

日本南海海槽天然气水合物取样调查与成功试采

左汝强¹, 李 艺^{2,3}

(1. 国土资源部, 北京 100812; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部, 北京 100037)

摘要:日本在实施天然气水合物研发计划(MH21)的第一阶段(2001—2008)及之后,作为合作伙伴,参加了加拿大Mallik和美国阿拉斯加陆域永冻层的水合物试采工程项目,并在本国南海海槽分别于2000年和2004年实施了水合物探井施工和多井钻探取样调查。从MH21第二阶段(2009—2015)开始,日本加强了对南海海槽东部的钻探、取样调查,运用新研发的CDEX hybrid PCS系统采取保压岩心;运用PCCT压力岩心测试鉴定仪器,对含水合物沉积地层的岩样作精密测试分析;提出水合物开采环境效应评估(EIA)研究战略,运用综合方法认真实施EIA调查,以及对海域水合物生产环境监测系统,包括海底甲烷泄漏监测仪(MLMS)、海底变形测量仪(SDMS)等予以部署。2013年3月12—18日,日本在南海海槽东部深水水合物储层实施了第一次天然气水合物的试采。六日内累积生产气量约120000 m³,平均日产气量20000 m³。这是世界上第一次海域天然气水合物成功的试采工程,是国际天然气水合物开发史上的一座里程碑。但是,天然气水合物的商业化开采在国际上将是一个艰难、漫长的过程。

关键词:天然气水合物;保压取心钻具;压力岩心测试鉴定;天然气水合物试采;环境效应评估;累积产气量;日本南海海槽

中图分类号:TE37;P634 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2017)12-0001-20

Japan's Sampling Study and Successful Production Test for NGH in Nankai Trough/ZUO Ru-qiang¹, LI Yi^{2,3} (1. The Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, Beijing 100812, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 3. Editorial Board of Exploration Engineering, Beijing 100037, China)

Abstract: During phase 1 (2001—2008) of Japan Methane Hydrate R&D program (MH21) and later, Japan participated in NGH production tests in permafrost zone in Canada Mallik and US Alaska; In 2000 and 2004, a exploration well and a multiple-well coring project were respectively executed. Since the beginning of phase 2 (2009—2015) of the MH21, Japan had strenthened the drilling and coring studies for methane hydrate reservoir in Eastern Nankai Trough with CDEX hybrid PCS, as well as comducted fine analysis and characterization for coring samples of hydrate-bearing sediments under pressure with Pressure Core Characterization Tools (PCCT), etc.; The strategy of Environmental Impact Assessment (EIA) study was put forwarded, and EIA methodology seriously was applied, as well as monitoring systems for offshore production tests, including Methane Leakage Monitoring System (MLMS), Seafloor Deformation Monitoring System (SDMS) etc., were deployed. Japan completed offshore methane hydrate production test-methane producrd from deepwater hydrate layers in the Eastern Nankai Trough in 12—18 of March, 2013. Cumulative volume of gas production was 120000m³ in 6 day, average volume of gas production—20000m³/day. This is the first offshore methane hydrate successful production test in the world, and a milestone in NGH development history in the world. At the same time, the NGH commercial production will be internationally a very difficut and long period.

Key words: nature gas hydrate (NGH); pressure core tool; Pressure Core Characterization Tools (PCCT); NGH production test; Environmental Impact Assessment (EIA) study; cumulative produced gas; Japan Nankai Trough

0 引言

日本是世界上第三大经济体,但却是能源极度缺乏的国家,绝大多数油气资源依靠进口,所以对可能从本国周围海域开采天然气水合物解决能源供给的需求十分迫切。20世纪70年代,日本在其南海海槽发现了天然气水合物存在的主要标志“似海底反射

层”(BSR),1990年,大洋钻探ODP131航次钻孔取得水合物岩样的间接资料。从1995年起,日本国家石油公司(JNOC)等联合实施了6年的天然气水合物专项计划。紧接着2001年,日本政府启动了“21世纪天然气水合物研发计划”(MH21)^[1]。在MH21第一阶段(2001—2008)及之后,日本一方面积极参与加拿

收稿日期:2017-11-18

作者简介:左汝强,男,汉族,1941年生,国土资源部咨询研究中心原咨询委员,教授级高级工程师,探矿工程专业,北京市海淀区北三环中路77号24楼1003室(100088),zrq1941@sina.com。

大 Mallik 和美国阿拉斯加陆地永冻层的水合物试采工程,以“先陆后海”的水合物开发方针,为以后在南海海槽积累试采水合物的方法和技术经验。另一方面,对南海海槽加强水合物的调查评价,实施精细勘探,为 MH21 计划第二阶段水合物的试采工程选址,以及在技术装备等方面进行准备。

本篇重点介绍日本 MH21 计划第二阶段(2009—2015)在实施南海海槽天然气水合物试采前,在南海海槽东部进行的详细钻探取样,运用现代先进仪器对水合物压力岩心测试分析,对计划中首次试采的海域进行环境影响评估研究,以及 2013 年于南海海槽在世界上第一次成功的实施海域天然气水合物的试采。

1 日本 1998—2012 年参加加拿大、美国陆域永冻带天然气水合物试采概要^[2-3]

1998 年,在加拿大 Mallik 永冻带 Mallik 2L-38 井首次试采工程中,日本国家石油公司(JNOC)、日本石油资源开发公司加拿大勘探公司(JAPEX)负责钻采工程施工。尽管该次钻采项目因气候变暖和机械设备故障未能实施水合物试采,但在该项目中,日本 PTCS 保温保压取样器进行了首次下井试用,虽

然未达到预期效果,却为其下一步的试验改进提供了依据。2002 年,上述的两家日本公司作为施工单位继续参与 Mallik 5L-38 井水合物试采项目,该井运用加拿大 APA 咨询公司和日本 JAPEx 公司共同设计的热注入法,实现了世界上首次冻土层天然气水合物的成功试采^[4]。2007—2008 年,在日本国家石油公司、天然气和金属公司(JOGMEC)及加拿大自然资源部(NRCan)的资助下,重返 Mallik 2L-38 井进行天然气水合物试采,并成功实现的一次短时(12.5 h)和一次长时持续(6.8 d)试采^[5]。

2011—2012 年,参加过加拿大 Mallik 水合物试采工程的两家日本机构——日本国家石油公司与天然气和金属公司(JOGMEC)又参与美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物试采项目,在 Ignik Sikumi #1 井运用创新的 CO₂-CH₄ 置换法成功地实施了水合物的试采^[6]。

1998—2012 年期间,日本参加加拿大、美国陆域永冻带水合物 4 次成功的试采成果见表 1。通过参加这 4 次成功试采,日本掌握了热注入法、降压法和 CO₂-CH₄ 置换法天然气水合物试采技术,为在其南海海槽的水合物试采打下坚实的理论和实践基础。

表 1 日本参加加拿大、美国陆域永冻带水合物 4 次成功试采成果

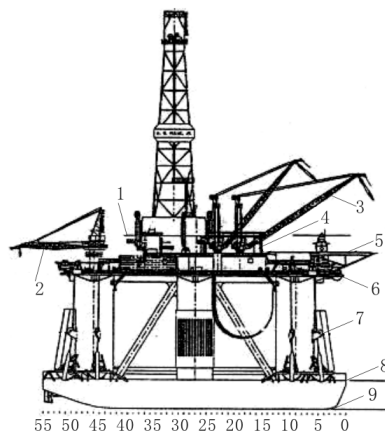
序号	日期	试验开采时间	总产气量/m ³	日均产气量/m ³	开采方法	生产试验井名称	备注
1	2002-03	5 d	470	94	热注入法	加拿大 Mallik 5L-38	
2	2007-04	12.5 h	830		降压法	加拿大 Mallik 2L-38(重返)	短时试采
3	2008-03	6.8 d	13000	1912	降压法	加拿大 Mallik 2L-38(重返)	长时持续试采
4	2012-03-04	30 d	28317	944	CO ₂ -CH ₄ 置换法	美国 Ignik Sikumi #1	

2 1999 年与 2004 年日本南海海槽水合物钻探调查简介

2.1 1999 年年末—2000 年南海海槽确认含天然气水合物探井调查概要^[7]

1999 年 11 月—2000 年 2 月,日本在南海海槽首次进行天然气水合物探井工程,计划总经费约为 50 亿日元。钻井位于御前崎近海(静冈县天龙川河口近海,离岸约 50 km 的海域),水深 945 m。钻井深度为海底以下约 2000 m。施工单位是石油资源开发公司,钻井装置采用美国 Reading & Bates Falcon Drilling 公司所拥有的半潜式钻井船 M. G. Hulme, Jr(图 1)。

钻井中,使用 PTCS(Pressure Temperature Core



1—钻台 45720(150'-0");2—标准 435 型起重机;3—SEAT-RAX 起重机(2 型);4—管架甲板 40254(132'-0");5—直升飞机降落甲板,基准线以上 41453(136'-0");6—主甲板,基准线以上 35357(116'-0");7—输水管线;8—船体;9—基准线

图 1 半潜式钻井装置(据 M. G. Hulme, Jr)

Sampler) 保压保温取心系统等从海面以下 1110 ~ 1272 m 的砂岩层取心。其中在深度 1175 ~ 1254 m 井段采用 PTCS 系统取心 27 次, 采取岩心 29.1 m, 岩心采取率 37%。

根据对岩心样品产生的大量气体的分析、异常低的样品温度、异常低的地层水含盐量等, 确认海面以下 1152 ~ 1210 m 井段有 3 层(合计约 16 m) 含甲烷水合物层存在。

通过南海海槽探井实施, 证实该区域甲烷水合物聚集度高的砂岩层, 其含量约为整个沉积物容量的 20%。其聚集程度相当于大洋钻探 ODP 著名 164 航次(1995 年)在美国东南海域布莱克海岭水合物调查确认值的 10 倍。

2.2 2004 年南海海槽多井水合物钻探计划实施简述^[8-9]

2004 年, 日本实施了南海海槽水合物多井钻探“Tokaioki Kumano-nada”计划, 该计划是根据 2002 年

以来在 3 个局部地区的高分辨率地震资料来确定多井钻探的井位。2004 年 1 月 18 日—5 月 18 日, 由日本石油资源开发公司 JAPEx 等作为施工承担机构, 由 IODP“决心号”钻井船执行, 共在海域 16 个站位钻了 32 口井。其中对 4 个天然气水合物高富集的井场(井场 1、2、4 和 13, 见图 2) 钻探采取水合物岩心。运用了由日本国家油气和金属公司(JOGMEC) 资助研发的 JOGMEC PTCS 保温保压取心钻具(相当于日本第二代水合物保压取心钻具), 在井场 4 和井场 13 采集到 82 m 岩心, 采取率达到 80%。同时也运用了 ODP 的 APC、XCB、HPC 等取心钻具。钻进中运用了随钻测井 LWD, 之后再用电缆测井校正, 并与岩心进行对比。在其砂层中识别出孔隙类型的水合物。根据岩心分析和测井资料, 取心砂层的水合物饱和度介于 55% ~ 68% 之间, 沉积物平均孔隙度介于 39% ~ 41% 之间。运用 JOGMEC PTCS 采取的水合物岩心样品见图 3。

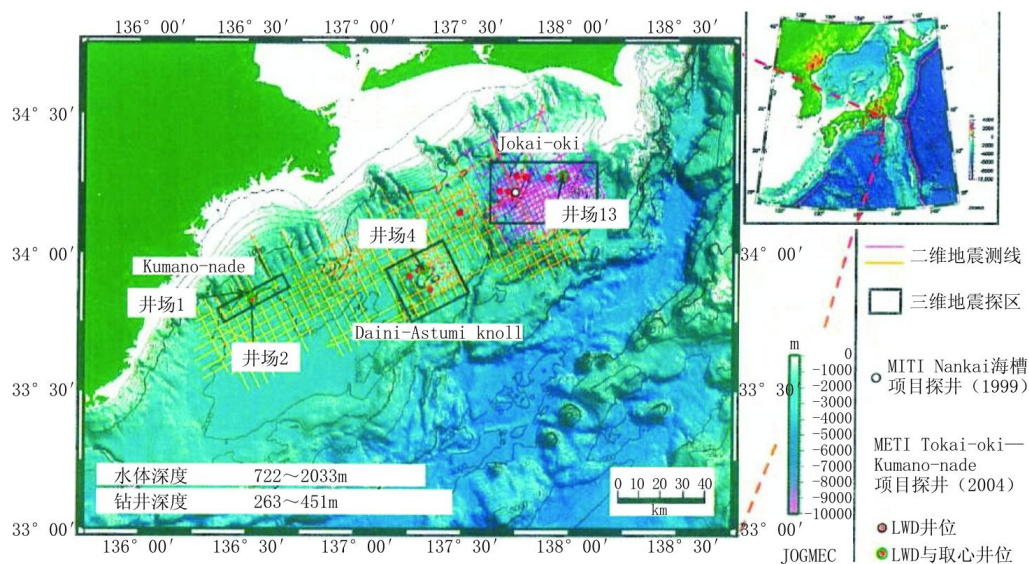


图2 日本南海海槽水合物多井钻探计划井位布置示意图(颜色代表水体深度)^[8]

这次多井钻探计划达到了预期目标, 确定了水合物的分布和形成发育, 并对后来钻采井位的确定等起到了重要作用。

3 2012 年新型 CDEX Hybrid PCS 保压取心系统应用于日本南海海槽水合物钻探取样调查^[10]

天然气水合物保压取心作业是水合物调查评价中最关键的技术, 对于水合物试采生产井的选址, 及生产井内开采储层井段位置的确定, 起着决定性的作用。

日本从 1995 年起至 2010 年先后研发应用了两代水合物保温保压取心器, 即 PTCS 和 JOGMEC PTCS。PTCS 曾于 1998 年首次运用于加拿大麦克肯齐三角洲 Mallik 永冻带水合物探井勘查取样, 两次下井取样均因取样器球阀未能关闭, 没有取得水合物保压岩心^[2]。同年又在日本柏崎试验场作验证试验, 保压取样效果也不甚理想。之后, 约于 2000 年, 日本 JOGMEC 技术中心研发了第二代的 JOGMEC PTCS (Takahashi 等, 2001; Takahashi 和 Tsuji 2005), 于 2004 年在日本南海海槽实施水合物多井钻探取样

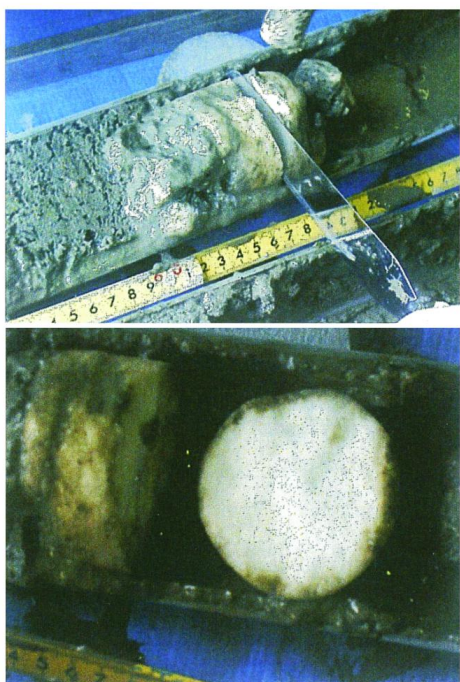


图3 运用 JOGMEC PTCS 保压取心系统采取的水合物岩心样品^[9]

调查(Fujii et al., 2010),保压取心效果有所提高。

但是,直至日本计划于2013年对南海海槽实施水合物试采前的详细取样调查,世界上所能提供的几种保压取心钻具不能与日本于1990'年代末花5.4亿美元建造的,专门用于综合大洋钻探计划(IODP),与日本海域水合物调查取样的“地球号”(D/V Chikyu)钻探船的井底钻具组合(BHA)配合使用,所以,又研发了一种适用于“地球号”钻探船的新型保压取心系统,可认为是日本第三代的CDEX Hybrid PCS 组合式保压取心系统。

几种国际上可提供的水合物保压取心系统见表2。

表2 国际上可提供的水合物保压取心系统(2013年)

保压取心器名称	钻杆直径/ in	岩心外 径/in	岩心长 度/m	最大压 力/MPa	研发国家 或地域
PCS	5 或 5½	1.575	1	69	美国
FHRC		2	1	21	欧洲
FPC		2.125	1	25	
JOGMEC PTCS	6¾	2.625	3.5	24	日本
CDEX hybrid PCS	5 或 5½	2	3.5	35	

注:CDEX——日本深部地球勘查中心。

3.1 CDEX Hybrid PCS 保压取心系统的设计和运用

新研发的 Hybrid PCS 将美国的 PCS 和日本第二代 JOGMEC PTCS 的设计结合起来,具有改进的

球阀密封功能。类似其所借鉴以前的保压取心钻具,Hybrid PCS 是一个绳索提取、液压启动的用于5和5½ in 钻杆柱的保压取心系统(图4),可以在“地球号”钻探船上与液压活塞取心系统((HPCS),以及延伸切削管鞋取心系统(ESCS)兼容互换使用。在保压取心期间该系统可以锁定在井底钻具组合(BHA)上。因此,Hybrid PCS 不能够采取定向岩心。其最大保压能力约为35 MPa(5000 psi),岩心样品直径51 mm,最大岩心长度3.5 m。

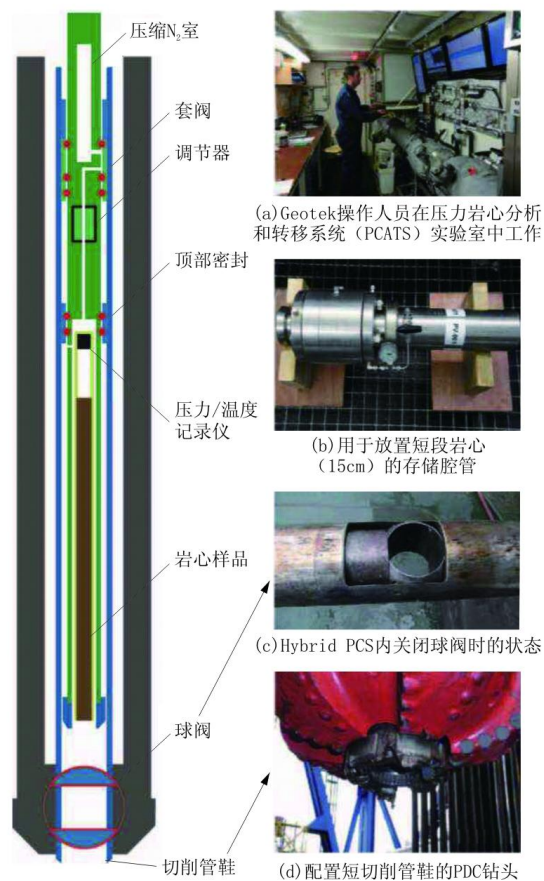


图4 日本 CDEX hybrid PCS 第三代水合物保压取心系统^[10]

3.2 CDEX hybrid PCS 保压取心系统的结构

该系统由3个主要部件组成:(1)上部为下放和回收工具;(2)中部是压力控制部件包括压缩氮气室;(3)下部为保压取样管。根据所钻目标地层岩性的不同,具有两种切削管鞋配用于 Hybrid PCS:一种是伸出钻头10 mm并随同钻杆回转;而另一种则是伸出钻头50 mm而不回转。当 Hybrid PCS 提到船上甲板后,将密封的内管转移到位于井口旁充填有冰块的“鼠洞”中。为防止水合物分解,将整套 Hybrid PCS 冷却30 min。将样品腔连接到压力岩心

分析和转移系统(PCATS, Pressure Core Analysis and Transfer System, Geotek Ltd.),供压力岩心转移和分析。利用保压岩心管内的温度-压力记录仪记录岩心样品的温度和压力。

3.3 “地球号”钻探船上对所采取保压岩心样品的操作和分析

在“鼠洞”中冷却后的压力岩心立即转移到压力岩心分析和转移系统(PCATS)。PCATS安置于用集装箱建造的实验室内,可测试分析3.5 m长的压力岩心样品。运用直线状操作器和转动器系统,将压力岩心从Hybrid PCS中转移到PCATS的保压腔室(Schultheiss et al. 2009)内。在转移压力岩心期间,通过一个铝制腔管,同时对岩心进行无损物理性质测量,包括X射线CT图像、伽玛射线和P波速度测量。运用所测全部数据,特别是X射线CT图像,将岩心切割分为几段。将这些小段岩心存储进短的保压样品腔管内,供以后航程完毕上岸分析,或是在钻探船上的实验室内分析与取小样。可控制的实验室提供精确的分析和体积测量,并从短段岩心中提取气体,以提供对取心地层中天然气水合物体积和浓度的计算和评价。

3.4 CDEX Hybrid PCS 在日本南海海槽 906 勘查航次的应用与效果

2012年12月,Hybrid PCS第一次在“地球号”钻探船在南海海槽906勘查航次上应用。在9004B孔,钻进海底以下深度约200 m过程中共采取11次岩心。除运用HPCS和ESCS采取7次常规岩心外,有4次运用Hybrid PCS采取保压岩心。其中,第一次于孔深24 m取心,因球阀泄漏,保压采心失败(取心压力仅0.1 MPa);第二次在孔深59.5 m取心,成功地采取了几乎保持原位压力的岩心,保持压力为18 MPa;第3次于109.5 m孔深取心,所采得岩心提至船上,未能密封住,岩心压力仅为0.4 MPa;第4次于190 m孔深取心,密封完好(16 MPa),但未采集到固态岩心。总之,9004B孔4次运用Hybrid PCS保压取心,仅2次获得成功保压效果。之后,在搬移至C9004C-1孔开始钻进时,从孔口钻进至6.5 m,采集到一个短的完整圆柱状保压岩心,保持压力达到23 MPa。

图5显示C9004C-1孔运用Hybrid PCS采取的岩心在提取、处置和分析过程中的压力和温度记录曲线。由图可见,容纳于保压腔管中的岩心在实

验室压力岩心分析和转移系统(PCATS)测试分析时的压力高于其在地层中的原位压力。

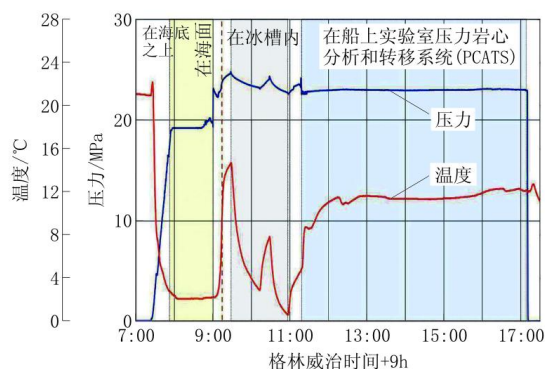


图5 日本南海海槽C9004C-1孔Hybrid PCS水合物保压取心直至“地球号”船上用PCATS测试样品时的压力-温度曲线(2012年6月28日)

3.5 CDEX Hybrid PCS 在“地球号”钻探船 802 水合物调查航次钻探取心调查中的应用及效果

紧接着906勘查航次之后,“地球号”钻探船于2012年7月,由日本国家油气和金属公司(JOG-MEC)与日本石油勘探公司(JAPEX, Japan Petroleum Exploration Company)合作,实施了天然气水合物详细调查的802勘查航次。此次继续运用CDEX Hybrid PCS执行水合物保压取心作业,以作为计划于下一年(2013年)初在南海海槽Daini Atumi knoll北坡实施第一次水合物试采前,对试采水合物的储层作进一步的测试鉴定(Yamamoto et al., 2012)。

保压取心孔段选择在约45 m厚含水合物的砂-粘土互层和15 m厚的覆盖深海粘土带地层。从海底262~322 m共60 m长度的孔段总共取心21个回次,包括18个保压取心回次和3个运用ESCS的取心回次。全部岩心采取率61%,其中运用Hybrid PCS保压岩心采取率达到69%。由此可见,此次802勘查航次运用Hybrid PCS保压取心效果,比上述的906勘查航次提高了许多。

802水合物勘查航次钻探取心总结见表3。取心作业完成之后,所采集的岩心样品在“地球号”钻探船上的实验室中,处置和测试分析的地点和操作流程见表4和图6。采取的全部岩心运用压力岩心分析和转移系统(PCATS)进行无损测试分析。

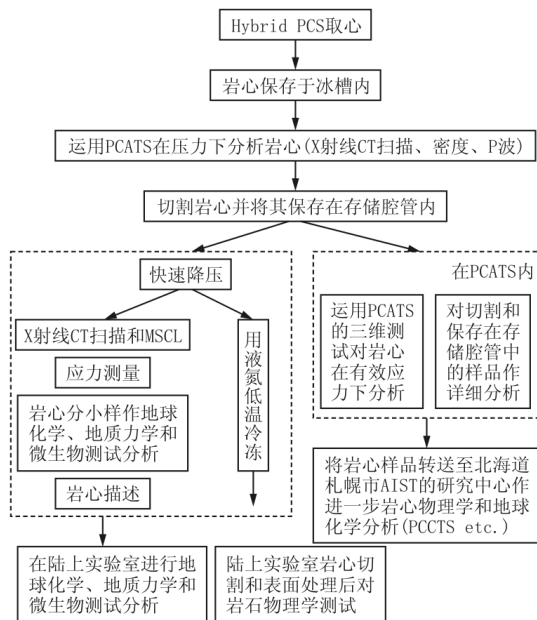
“地球号”钻探船802航次的水合物钻探取样调查,运用Hybrid PCS保压岩心系统及压力岩心分析和转移系统(PCATS)所取得的大量重要数据,对南海海槽水合物储层所作的更加精准的调查评价,

表3 日本南海海槽2012年7月802水合物勘查航次钻探取心总结

纯取心时间	17.5 h	
取心数量	ESCS 岩心	3 m×3
	Hybrid PCS 岩心	3 m×16+1.5 m×2
岩心采取率	全部取心孔段(36.82 m/60 m)	61%
	Hybrid PCS(34.99 m/51 m)	69%
岩心压力状况	保压岩心(大于12 MPa)	8段,17.08 m
	部分保压岩心(大于5.5 MPa)	4段,11.6 m
	泄压岩心(小于5.5 MPa)	6段,6.31 m

表4 保压岩心和降压岩心分析地点

岩心	长度/m	分析地点
ESCS 岩心	1.83	“地球号”钻探船上实验室
降压岩心	12.99	PCATS 和“地球号”钻探船上实验室
保压岩心	22.00	PCCT 和 AIST
腔室		陆上实验室



注:AIST:日本国家先进工业科学技术研究院(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology); MSCL:多传感器岩心记录仪(Multi-sensor Core Logger)

图6 “地球号”钻探船802水合物勘查航次船上实验室测试分析操作程序

对于日本约于半年后在世界上首次实施海域水合物成功试采起着十分重要的作用。

4 天然气水合物压力岩心测试鉴定仪器设备(PCCT)在日本南海海槽水合物调查中的应用^[11]

4.1 天然气水合物压力岩心操作、转移与测试分析的特殊性与困难

固体矿产和常规油气资源,以及某些非常规油气如页岩油(气)、致密油(气)等,当通过钻探采集

的样品提至地(海)面后,转移途径中,直到送交测试分析的全部过程中,样品的化学成分和性质,与物理、机械性质,以及形态基本上是不变的,仍保持其为固态或是流体(液体、气体)。但是,对于天然气水合物,由于其在地下储层原位处于低温(0~10℃)和高压(大于10 MPa)的环境,在钻探所采取的样品提至地(海)面、转移与测试期间,转变到常温、常压环境之后,必然要从固态的水合物分解为流体的甲烷和水,其化学成分和性质、物理和机械性质也将发生很大的改变。因此,为能够对取自地层的水合物进行原位、保真的岩心样品作测试分析,对水合物储层做出准确的调查评价,以及为水合物开采设计提供科学准确的数据,在从地下采取水合物样品直到测试分析的整个过程中,必须保持岩心样品的低温和高压状态。保持低温环境相对容易,而对于保持岩心大于10 MPa以上的压力却非易事。这就要求运用保压取心系统,及能够转移到其它“保压的”腔管(室)中去,并在“保压的”状态下接受测试分析。这对钻探工程师和测试分析专家,以及他们双方在工作上的衔接配合提出了挑战。

经过十几年的努力,不断的研究、试验、运用和改进,目前美国和日本,以及欧盟分别研发出PCS+PCCT,以及HYACINTH两套水合物保压取心+压力岩心测试鉴定系统。

参考文献[5]和本文上述第3部分已分别对美国的PCS和日本的CDEX hybrid PCS两种水合物保压取心系统作了介绍。以美国为主,日本参与,在压力岩心测试技术方面做了许多工作,美国乔治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)等开发出水合物压力岩心测试鉴定仪器(PCCT, Pressure Core Characterization Tools),在日本南海海槽水合物调查评价与试采中发挥了重要作用。

4.2 水合物压力岩心测试鉴定仪器(PCCT)的组成和操作运用

压力岩心的操作和转移技术需要一个纵向的操作器和球阀,在等同的高压数值(大于MPa)下将其与各类测试器具(高压腔管或腔体)联结起来(Pressure Core Analysis and Transfer System, PCATS; Schultheiss et al., 2006)。前几年,用于测量压力岩心样品P波和S波速度、强度、电阻率剖面和岩心内温度(IPTC; Yun, et al., 2006)的接触式测试工具,和测量伽玛密度、X射线,和与水结合的P波(Pres-

sure Multi - Sensor Core Logger; Schultheiss et al. , 2006; Abegg et al. , 2008) 的非接触式工具已经开展应用。对于在原位压力 - 温度 ($P-T$) 条件下,从岩心中局部取样提供生物研究的技术已经开发出来 (DeepIsoBUG; Parkes et al. , 2009)。

4.2.1 压力岩心测试鉴定仪器 (PCCT)

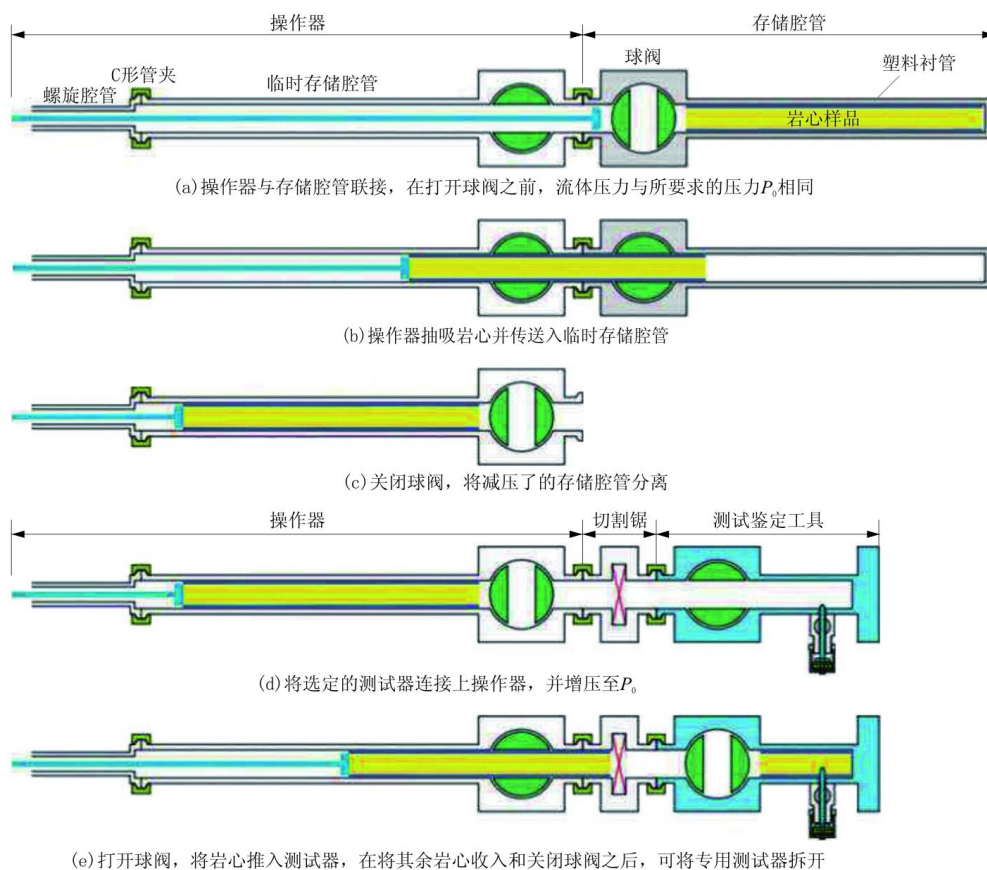
PCCT 包括操作器具和各类测试腔室。其重点是用于测量水合物的流体 - 热 - 力学分析方面的参数,这些参数对于水合物储层特性的研究,与试采的工程设计等有着重要的关联。所有测试器具按照以下原则和目标设计:简单和牢固的系统,快速运用的轻便构件,最大灵活性的组合式设计,标准尺寸,和便于制造和维修的零件,海水环境防锈,在压力下操作与保存的能力,承受有效应力的能力,以及在受控降压、加热与流体交换期间,监测水合物的分解和气

体生产的安全性。组合式设计可使任何两种测试器具通过相同的法兰盘连接起来。

4.2.1.1 操作器

操作器是一个定位系统,用于在要求的 $P-T$ 条件下,沿着相互连接的腔管/腔室和阀门抓取和移动压力岩心。图 7 中, a、b、c 展示了将存储腔管内的压力岩心样品传送入操作器。接着再将压力岩心倒换装进测试腔室 (图 7d、e)。操作器的长度 L_{man} (包括其“临时存储腔管”)与所要求测试的岩心长度 L_{core} 成比例, $L_{man} = 3.5 L_{core}$ 。该系统设计用于操作 1.2 m 长的压力岩心 (L_{core}); 运用一个外置的步进电机驱动内部螺旋伸缩系统 (行程 2.6 m), 可以对测试样品定位精度达到毫米以下。利用可拆卸的法兰盘连接到 1.3 m 长的临时存储腔管上。

4.2.1.2 压力岩心样品切割分段



注: 切割器 (CUT) 示于图中 (d) 和 (e); 切割器可按测试的要求, 在所需的长度间隔上排列安置 (对于专用的 ESC, DSC, CDC 和 BIO 测试装置)。

图 7 保压岩心操作

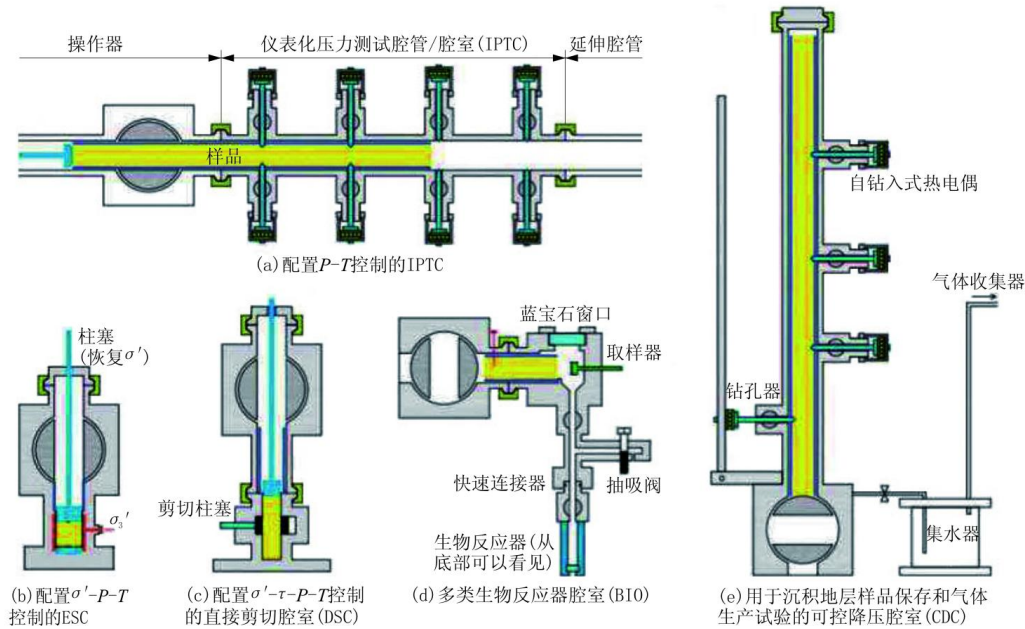
1.2 m 长的岩心可切割分为短段的样品。切割器可为直线或圆形锯片。切割器成排地安置于操作器和任何其它测试或存储腔管之间 (图 7d、e)。

4.2.1.3 仪表化压力测试腔室 (IPTC, Instrumented Pressure Testing Chamber)

所研发的此类腔管/腔室应用于对流体取样, 测

量 P 波和 S 波速度、未排液强度、电导率、压力岩心内的温度(图 8a, 详见 Yun et al., 2006)。美国地质调查局(USGS)已在墨西哥湾工业联合项目(JIP, GOM)中完成了辅助性器具的开发。这个腔管在外径上有 2 套 4 对通孔。通孔为在塑料衬管上钻孔(内径 8 mm), 使得接触式探针可依次沿着通孔被

压入样品。当按测试鉴定模式运作时, IPTC 一端连接操作器, 而另一端连接延伸腔管。可沿着岩心长度任意位置上进行测量。而在对水合物储层校正模式下实施监测生产研究时, 8 个通孔使得 IPTC 成为一个通用的腔管。



注: (a) ~ (d) 装置上的大球阀外径均为 220 mm。

图 8 测试鉴定腔室示意图

4.2.1.4 有效应力腔室 (ESC, Effective Stress Chamber)

含水合物地层的压力岩心的采集和保存必须在所要求的流体 $P-T$ 条件下进行。然而, 水合物的物理性质, 如刚度和剪切强度是水合物饱和度和有效应力的函数, 当水合物饱和度降低时, 相对有效应力增加。ESC 保持 $P-T$ 稳定性条件, 并恢复沉积物保持在原位的有效应力 σ' 。该 ESC 由乔治亚理工学院在联合海洋机构 (JOI) 资助下, 于 2006 年设计并完成实验室试验。ESC 由韩国地质科学和矿物资源研究院 (Korean Institute of Geoscience & Mineral Resource) 与英国地质技术公司 (Geotek, Ltd.) 联合, 进行了第一次野外应用 (Lee et al., 2009)。原先的设计是基于 0 侧向应变边界条件。现已经将此腔室加了外壳升级, 以调节应力可控边界条件。所形成的起三维作用的结构, 包括由外壳施加的 σ_3' 和通过球阀推进直接作用于压力岩心的活塞产生的 σ_1' 。柱塞和底座适用于测量多种物理性质, 包括刚度 (波速)、热导性和电阻率。这种腔室特别适用于

在原位有效应力条件下, 监测水合物生产的研究, 包括评估因水合物分解引起沉积层体积的变化。

4.2.1.5 直接剪切腔室 (DSC, Direct Shear Chamber)

从两种约束条件来设计 DSC 装置。第一种, 在垂直载荷下, 当切割受压非均质岩心时由于应力集中会产生不完善界面, 因而选择“双向直接剪切”形式, 避免样品的末端效应。第二种, 当取心时岩心留有裂隙, 与岩心剪切时岩心可能产生弯曲情况下的切割, 采取双剪切平面模式, 以避免样品弯曲。因此, DSC 由一个厚壁不锈钢环制成, 柱塞向放置其内部岩心样品中间的 1/3 处推进 (图 8c)。DSC 包括一个用于恢复岩心有效应力 (类似 ESC) 的活塞, 一个罩在样品放入剪切腔室之前的塑料衬管上的套管, 并有一个小的横向内置框架以推动侧向柱塞 (图 8c)。最大的剪切位移 (G_{\max}) 为 15 mm。可以测定剪切强度峰值和剩余数值。所测得在原位条件下, 水合物地层样品的强度和体积变化的数据, 对于研究模型的校正、水合物的生产设计、以及稳定性分

析,都是非常必要的。

4.2.1.6 生物研究取样器 (BIO, Sub - sampling Tool for Bio - Studies)

从钻探取样直到测试分析始终保持高压,对于深水沉积物中某些嗜高压微生物维持生存是十分重要的。利用操作器将岩心段装入 BIO 腔室,之后将 BIO 从操作器上卸下,进行以下操作程序:(1)更换液氮;(2)清洁岩心表面,对腔室消毒;(3)运用一个回转取样头从岩心上取小样;(4)样品沉积物进入预先放有营养液的生物反应器(体积 10 mL)中。通过蓝宝石窗口可观察到全部操作。藉助关闭两个球阀系统并卸下快速连接器,很容易更换生物反应器。这套装置可以从单个岩心段上采集到大量原位静压的生物样品。

4.2.1.7 可控降压腔室 (CDC, Controlled Depressurization Chamber)

所设计的 CDC 有助于保存岩心的岩性,并得到降压过程中有价值的信息。这个专用的装置有一个内设的钻孔器,可在所选择的位置上钻孔。运用压力传感器和热电偶监测腔体内气体的 $P-T$ 状况。另外,沿着 CDC 纵向还使用 3 个自钻入式热电偶;这些传感器钻入岩心中监测岩样降压期间沉积物内部的温度。最后,有一个 2 L 的集水器和一个 55 L 的气体收集器连接到针阀上,以控制减压的速率;这些水和气体的收集器可测量出水合物生产出水 and 气体(图 8e)的数量。

正如上述,运用了多种测量系统来测试鉴定,以测定腔室内在可控压力、温度和有效应力条件下,沉积物水文的、热的、化学的、生物的和机械的参数。它

们的运用,对含天然气水合物沉积地层在原位压力、温度和/或应力条件下进行综合性的测试鉴定提供了技术支撑,并详细地监测水合物的气体生产试验。

4.2.1.8 测试工具定位控制

所有接触性的仪器、传感器和钻入式工具安装在抛光的直杆上(直径 7.9 mm),运用外部可控螺旋定位系统,克服水合物岩心样品最大 35 MPa 流体压力下 1.7 kN 的作用力,向样品推进(图 9)。螺旋导轨和样品腔体之间的球阀可使在压力下更换测试工具。转动螺旋套沿着螺旋导轨将工具杆(绿色)尖部的传感器推入岩心样品,测试数值由工具杆中心的导线传出。

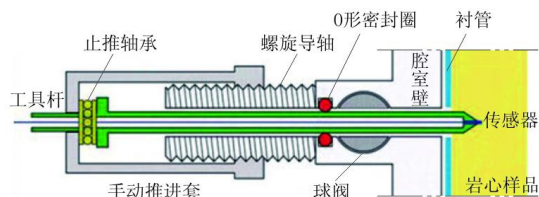


图 9 定位系统

4.2.1.9 测量传感器

各类测量传感器安置于工具杆的尖部,有信号导线穿过工具杆中心孔。所提供的测量工具和传感器见图 10。小的应变波速测量使用弯曲元件产生和探测 S 波,而用压电晶体测量 P 波(图 10a、b);已经研发了钻入式强度探头(图 10c);大的应变强度数据运用 DSC(图 8c)测取。这个装置使用一个其内部装有全桥应变片的锥形钉,来测定沉积物的强度。在探头钻入样品时所测得的阻力就反映出未排液沉积物的剪切强度(Yun et al., 2006)。

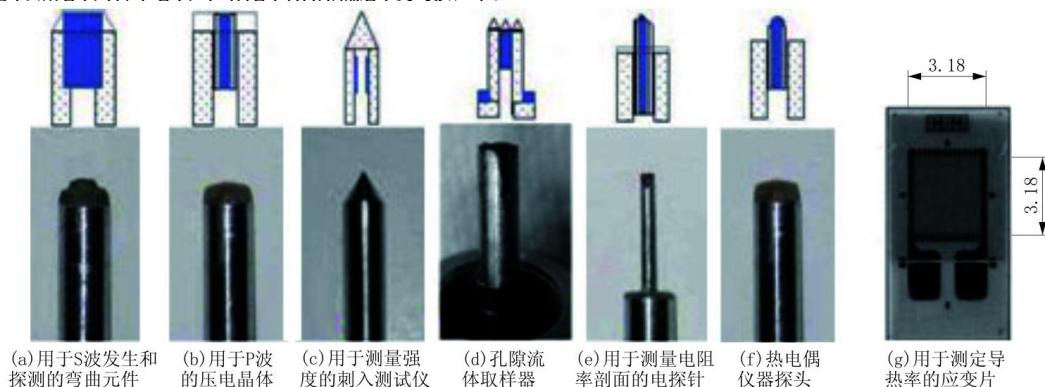


图 10 测试工具和传感器

流体导热率可使用装置在 ESC 之内的柔韧腔壁系统(图 8b),且可以利用流体取样器(图 10d)来

测定。这是一个利用压力或体积控制的自钻泄漏孔,驱使含水合物的沉积物内充填的流体排泄出来。

压差可按在稳定性条件下保存水合物作出选择。

电阻率测量运用一个电探针,逐步地插入样品,测量径向毫米级空间分辨率的电阻率剖面(图 8e, 细节与测量程序见 Cho et al., 2004)。还研发了一种在有效应力腔室底座上的多电极系统,从表面测量样品内电阻率层析 X 射线摄影图像。

热探头由安置在工具杆尖上的热电偶组成。当将其推进到样品之内时,可测得岩心内的温度(图 10f)。岩样内部温度的测量,可运用于控制性气体生产研究期间监测相态转变和导热率。此外,用于测量导热率的瞬变平面源传感器(TPS,美国能源部国家能源技术实验室 NETL 研发,图 8G, Rosenbaum et al., 2007)可以安置在工具或 ESC 和 DSC 的基座上。

4.2.1.10 监测水合物分解——气体生产

上述所有压力岩心测试鉴定仪器(PCCT)的腔室可运用于降压、加热,或化学材料注入(如抑制剂或 CO₂)实施水合物岩心样品尺寸规格的气体生产。监测的数据包括压力、温度、生产的气体和水量、刚度(地震波速)、流体导热性与电阻率等。

4.2.2 小结

总之,欲对天然气水合物储层进行正确可靠的评价,运用上述这一套压力岩心测试鉴定技术是必须的。上述介绍的压力岩心测试鉴定仪器(PCCT)既可以通过对压力岩心进行操作、切分取样和测试分析,以及全面评价含水合物沉积地层,也可以进行水合物实验室规模的生产试验。

PCCT 主要由美国乔治亚理工学院等机构研发,但日本与美国两国政府在研究和开发气体水合物方面签订有全面合作协议,而且日本本国也自我开发了相关测试装置(如 AIST - IPTC)。所以,PCCT 不但装备在美国深海科学探测和气体水合物研究的实验室内,和实施海洋水合物调查取样的“决心号”钻探船上,而且也装备于日本大洋综合钻探计划(IODP)执行机构和甲烷水合物研究中心,位于北海道札幌市 AIST 的国家级实验室内,及日本海洋水合物调查与试采主要平台——“地球号”钻探船上。此外,PCCT 也安置于其它钻探船上,先后为某些国家(如印度、中国和韩国等)天然气水合物调查应用服务。

4.3 美国和日本合作运用 PCCT 仪器对南海海槽试采前作压力岩心测试分析^[12]

4.3.1 美国和日本首次合作运用 PCCT 仪器

由美国乔治亚理工学院研发的压力岩心测试仪器设备(PCCT, Pressure Core Characterization Tools),包括一整套仪表化的高压腔管/腔室和多种传感器/取样器,成功地于 2013 年 1 月在日本札幌的研究中心,用于测量日本南海海槽东部(Eastern Nankai Trough)所采取气体水合物的压力岩心的机械、液压与电的性质和生物特性。由此表明,由美国和日本第一次开展国际合作,在水合物压力岩心测试分析方面共同使用 PCCT 仪器设备。双方合作的机构包括美国乔治亚理工学院、美国地质调查局(USGS)、日本国家油气和金属公司(JOGMEC)及日本国家先进工业科学技术研究院(AIST, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)等。

4.3.2 美日合作在日本札幌运用 PCCT 对南海海槽东部压力岩心测试分析

日本南海海槽蕴藏着大量的甲烷水合物(Fujii et al., 2009)。2012 年 6 月 29 日—7 月 4 日,由 JOGMEC 和日本石油勘探公司(JAPEX)共同努力对该海域的水合物储层的岩心进行测试鉴定,准备于次年(2013 年)对甲烷水合物作生产性试验,即水合物试采。

该海域水深约 1000 m,含水合物沉积层位于海底以下 300 m,内含浊积岩、粗粒沉积地层。在“地球号”钻探船上运用 CDEX Hybrid PCS 采取原位压力岩心,并转运到札幌的 AIST 去。运用 PCCT 将压力岩心从 Hybrid PCS 中取出,由英国地质技术公司(Geotek, Inc.)进行 X 射线测量,并将岩心分段为 1.2 m 长度,转移到保压 20 MPa 的存储腔管中。

2013 年 1 月,即日本南海海槽首次水合物试采前约 2 个月,PCCT 仪器应用于位于札幌 AIST 的冷却实验室(4℃)。将压力岩心从存储腔管中转移到测试腔管(室)进行分析。在这些岩心测试期间,PCCT 在 10 MPa 的压力下操作。为安全起见,电子设备和周边系统安置于相近的监测区域。

设于日本北海道札幌市日本国家先进工业科学技术研究院(AIST)的压力岩心测试仪器设备(PCCT)见图 11。

4.4 欧盟 HYACINTH 高压釜取心与压力岩心测试鉴定系统的研发应用^[13]

4.4.1 HYACINTH 系统 18 年研发应用概述

HYACINTH (HYACe in New Tests on Hydrate)

图 11 日本北海道札幌市 AIST 的 PCCT^[12]

由两大部分组成,即水合物高压釜取心设备 HYACE (Hyperbaric Autoclave Coring Equipment) 和水合物(压力岩心)新测试设备(New Tests on Hydrate)。HYACE 是由欧洲海洋科学和技术计划(MAST, European Marine Science and Technology)资助,于1990'年代末由欧盟德、荷、英、法等6个欧洲国家组织资助,2家企业与3所大学联合研发而成,配备有FRC回转式和FHPC冲击式两种保压取心器钻具(技术参数见表2),是用于天然气水合物和深部生物圈的重要取样工具^[14]。

HYACINTH 高压釜取心与压力岩心测试鉴定系统最初在 ODP194、201 调查航次,后又在水合物钻探调查的 ODP 204 与 IODP 311 航次(2005 年)中得到应用。此后,约 12 年来,HYACINTH 在保压取心和水合物测试分析两个方面不断的改进提高。截至 2008 年,HYACINTH 先后受承包应用于印度首次国家水合物项目 NGHP-1“决心号”钻探航次(2006 年)项目^[15],中国南海神狐海域水合物钻探调查 GMGS1 航次项目^[16],以及韩国郁盆地水合物调查 UBGH 1 航次项目^[17]等。此后,中国 GMGS 2-4 (2013—2016 年)三次水合物调查航次的保压取心与测试分析作业,均是承包于英国地质技术公司(Geotek Ltd.),运用 HYACINTH 系统来完成的^[18-20]。

4.4.2 近几年 HYACINTH 的技术创新与性能改进提高

(1)研发了以球阀作为密封机构的 PTCB(Pressure Coring Tool with Ball Valve)保压取心钻具,比原先 FRC 和 FHPC 采用瓣阀(翻板阀)的密封性能大为提高。同时,FRC 和 FHPC 本身保压性能也有所改进。目前,HYACINTH 系统水合物取心的保压成功率已提高至 70%~80%。

(2)将 FHPC 采取岩心的直径从原有的 51 mm 增加到 57 mm,以满足对 HYACINTH 系统测试分析仪器的适用性、兼容性。

(3)增加岩心采取的长度(原先为 1 m)。

(4)对压力岩心分析和转移系统(PCATS)提高了测试操作性能,包括完全自动化传动和转动控制(分别为 0.5 mm 和 0.5°);精细转动与高分辨率 X 射线成像相结合,可提供三维 X 射线成像可视化应用等。

图 12 展示了 HYACINTH 系统的某些创新改进成果。其中图 12c、d 展示了所研制的采取无菌岩心薄片样品用于高压下微生物研究的、十分复杂的岩心样品精细分割的 DeepIsoBug 装置。所有的操作均在等同地层中原位压力的高压设备中进行。

5 日本甲烷水合物研发计划(MH21)环境效应评估(EIA)^[21]

日本于 2001 年由经济、贸易和产业部(METI)启动了“21 世纪甲烷水合物研发项目”(MH21),其主要目标是研究和开发从甲烷水合物(MH, Methane Hydrate)。注:日本通常将天然气水合物 NGH 称为甲烷水合物 MH)中生产出能源的科学和技术。其中之一是“建成一个完全与环境保护兼顾的甲烷水合物开发系统”。在第一阶段(FY2001—2008),MH21 研究联合体(也简称 MH21)进行基础研究,并参与加拿大 Mallik 和美国阿拉斯加陆地永冻层水合物的试采工程,积累经验,以便于对之后南海海槽确定最有前景的甲烷水合物开发方案,并研发环境效应评估效应(EIA, Environmental Impact Assessment)的方法和仪器设备。

5.1 日本 MH21 的第二阶段(FY2009—2015)水合物研发的目标任务

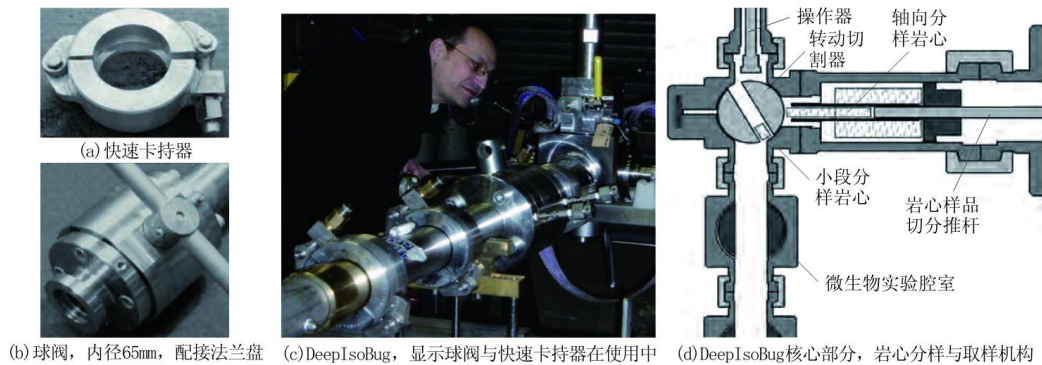


图 12 对接第三类设备至 HYCINTH PCATS

包括两个方面:一是在南海海槽东部实施两次甲烷水合物生产试验,即试采;第二是由 JOGMEC 和 AIST 的代表组成的 MH21 EIA 团队,对水合物开采试验的环境效应评估(EIA)作研究。

所确定的第二阶段的目标任务如下:(1) 进行环境风险分析并制定对策;(2) 开发环境影响测量技术并进行野外试验;(3) 针对计划确定的海洋水合物生产试验的具体条件,实施环境效应评估(EIA);(4) 利用上述工作取得的数据和认识,开展综合性的评估,对未来 MH 的开发提出最佳方法。

根据第一阶段的研究成果,MH21 EIA 团队致力于以下开采方案:

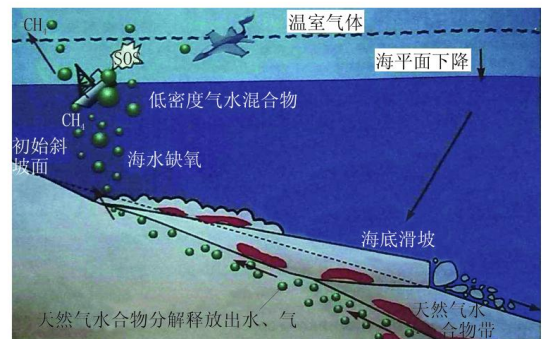
- (1) 在埋藏于海底以下 350 m 砂岩沉积层中多孔隙的水合物储层(甲烷聚集带)进行试采;
- (2) 借助于运用类似于常规天然气开发的钻井和完井技术,安装相应的设备通过钻井来进行开采;
- (3) 通过对水合物储层运用降压法实施试采工程。

5.2 日本南海海槽甲烷水合物开采主要的潜在风险因素与 EIA 海洋环境监测综合方法

5.2.1 日本南海海槽甲烷水合物开采主要的潜在风险因素

关于天然气水合物开采由于全球气候变暖,与海平面上升引起水合物分解“自然产生的”环境影响(如海底滑坡^[22]等,图 13),以及由于“油气钻采工业诱发的”与水合物相关的环境影响,即地质灾害和生态破坏等,美国和加拿大水合物研究顶级专家曾高度关注并予以研究^[23]。

日本对甲烷水合物开采可能存在的主要环境影响也予以高度重视,经分析研究提出以下各项作为开采甲烷水合物主要的潜在风险因素:(1) 生产井周围海底甲烷泄漏;(2) 生产中处理废水排放到



海洋;(3) 海底沉降;(4) 海底滑坡。但是,由于对甲烷生产缺少经验,很难评估这些危险。由于不知道是否会发生这些危险;或者发生了,其发生危险的程度、规模到底有多大。因此,为了更好地了解每一种环境风险因素的潜在本质,将进行海洋调查,及在南海海槽两次生产试验(计划 2012 与 2014 年,后推迟至 2013 和 2017 年)之前、试验中与试验后实施环境监测。同时,已于 2010 年起开发数字模型并预测环境风险的严重性。

5.2.2 日本甲烷水合物研发计划(MH21)第二阶段环境影响评估(EIA)研究战略

日本 MH21 第二阶段环境影响评估(EIA)研究战略概括于表 5。

表 5 日本甲烷水合物研发计划(MH21)第二阶段环境影响评估(EIA)研究战略

阶段 财政年度	阶段 2							阶段 3
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
查明环境风险	查明				审查		评价	
评价重要性	模拟环境风险量化			证实	评价	证实	评价	
环境监测系统	研发	证实		监测	改进	监测	评价	
环境海洋调查				连续周期性调查				
(风险)减缓计划 (风险)避免计划				基础研究				实际研究

5.2.3 日本南海海槽水合物研究开发第二阶段 EIA 环境监测综合方法

日本 MH21 第二阶段为在南海海槽实施水合物

试采,所进行 EIA 的海洋环境监测,运用了全方位空间、多类型仪器综合的监测方法技术,见图 14。

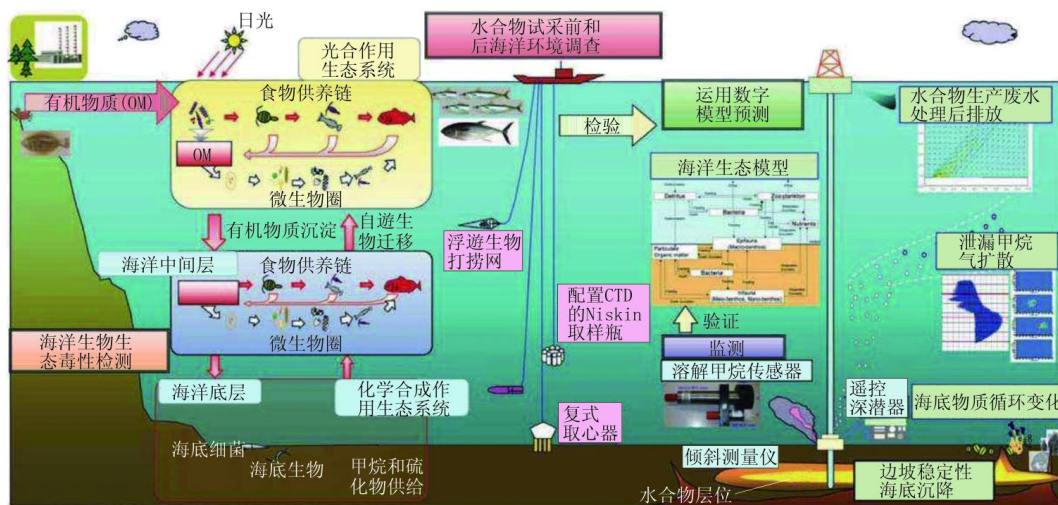


图 14 日本甲烷水合物研发计划 (MH21) 第二阶段环境影响评估 (EIA) 综合方法技术示意图

(1)图 14 右部分展示了海底运用倾斜测量仪或海底变形测量仪,监测水合物层位的边坡稳定性和海床沉降;运用水下遥控深潜器 (ROV, Remote Operation Vehicle) 监测海底物质循环的变化;运用溶解甲烷传感器监测海底泄漏甲烷气在海水中的扩散,并将水合物试采生产废水经处理后排放。以上监测采集的全部数据经海洋生态模型验证,由数字模型作出风险预测。

(2)图 14 左部分显示,海洋在其浅层、中间层和底层三个不同层位具有不同类型的海洋生物,及其生态系统。在海洋浅层与中间层,由于大陆河流等排泄的大量有机物质,浅部浮游生物 (动植物) 经日光照射发生光合作用,得以发育生长,并形成食物链。而中间层的自游生物由浅层海洋提供的有机物质沉淀供养,并有部分自游生物向上迁移。海洋浅层与中间层所有生物的生存属于“光合作用生态系统 (Photosynthesis ecosystem)”。海底渗出的甲烷等气体对以上这些生物是有害物质,必须运用仪器对此类海洋生物生态环境下的毒性进行检测、预防和控制。

至于海洋底层,则是完全不同的生态系统,即“化学合成作用生态系统” (Chemosynthesis ecosystem)。在海底表面的泥沙中生存着一种海底细菌,它可利用海底的甲烷气氧化时产生的能量,将海水中的硫酸还原为硫化氢。而一些海底生物 (如双贝

壳、海螺类动物) 的体内共生着大量这样的微生物,它们能够利用体内可以解毒的血红蛋白和蛋白质,将吸收的剧毒的硫化氢氧化时产生的化学能,制造出无毒的有机质,一方面供自身生存,另外部分则提供给母体海底生物^[24]。海底生物这种在高压、黑暗,有毒物质分布环境下生存的化学合成作用生态系统,与陆地深部类似极端环境下共同形成的地球深部生物圈,是国际生物科学研究的前沿 (探索生命起源),正是国际大洋发现计划 (IODP),与国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 共同研究的重要主题之一。美国、日本与欧盟在天然气水合物的调查中对海底微生物的研究十分重视,已经研发出若干海底微生物保压取样与测试分析的技术和仪器设备 (见本文第 4 部分中的 HYACE、BIO 和 DeepIsoBug)。

(3)图 14 中间部分表示,在天然气水合物试采工程实施前和完成后,应由科学调查船海洋中下放复式海床取心器、浮游生物打捞网,以及尼斯金 (Niskin) 取水器等采集海洋各类样品,对海底地质变化和海洋生态系统进行监测。

5.2.4 海域甲烷水合物生产试验 (试采) 的监测系统

为了对于每一种风险因素潜在的作用进行初步测量,MH21 计划在 2012—2014 财政年度的海洋水合物的生产试验之前、试验期间和试验之后进行环境监测。特别是应该对由于海底变形 (沉降和/或滑坡) 而产生的甲烷泄漏,在海底附近进行监测。

考虑到生产试验的规模,预期这些风险不是很大。但是,现在对其进行监测,是作为对未来甲烷水合物商业性开发所作环境效应评估调查的基础性研究。MH21 于 2010 年研发出两种新型监测仪器,分别用于安置在海底监测甲烷泄漏与海底变形。对于第一次生产试验(预计试验周期一周至一个月),所设计的两种监测系统采集 6 个月的数据,包括生产试验前的一个月,生产试验后至少 3 个月的监测。将根据第一次生产试验获取的数据,对这两种监测系统予以改进,以运用于第二次的生产试验。

5.2.4.1 海底甲烷泄漏监测系统 (MLMS)

由于计划试采的含水合物矿层存在海底以下比较浅(计划 2012 年生产试验的位置约 100 ~ 350 m 深),从海床产生的甲烷(气体或溶解的)泄漏受到深切的关注。MLMS (Methane Leakage Monitoring System, 图 15) 的任务是探测生产试验(会伴随有释放的甲烷气泡)期间,或之后的溶解甲烷的浓度。MLMS 内安装有多种测量传感器,包括溶解甲烷传感器、温度传感器、盐度传感器与海流仪。MLMS 的样机已于 2011 年在深海完成试验。

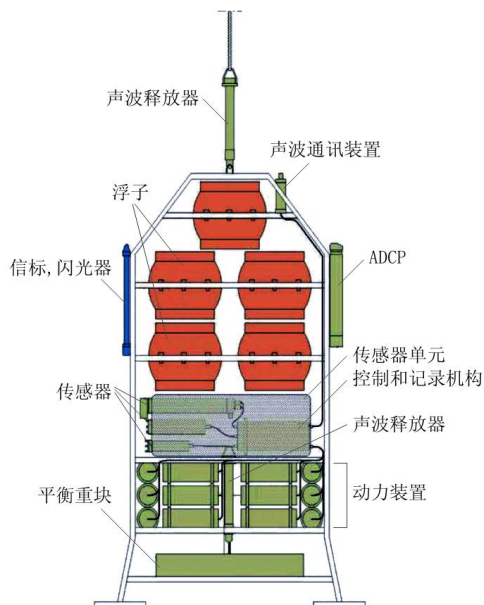


图 15 海底甲烷泄漏监测系统 (MLMS, IHI 海洋联合公司设计)

5.2.4.2 海底变形监测系统 (SDMS)

SDMS (Seafloor Deformation Monitoring System, 图 16) 有两个传感器(倾斜测量仪和压力传感器)。MH21 于 2010 年在海洋中试验了该监测系统。科学家和公众都认为海底不稳定性是海洋中与水合物紧密相关联的地质灾害。在日本南海海槽东部水合

物资源矿区周围,从海底地图上可见几处海底滑坡“疤痕”(图 17)。但是这些滑坡的规模相对较小(相对于大西洋大陆边缘发生的巨大滑坡),也没有证据说明这个滑坡与甲烷分解有关,而且滑坡表层之上还存在水合物集中区域上面的钻井井位。然而,虽然所观察到的这个滑坡不是大规模的现象,而且也不像与水合物有关联,但是这些滑坡对海底水合物的生产设施将可能是个灾害,必须进行评估。

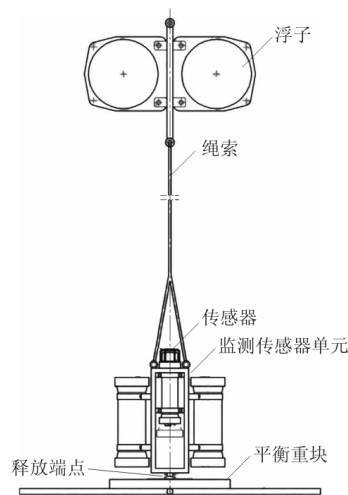


图 16 海底变形监测系统 (SDMS, OYO 物探仪器公司设计)

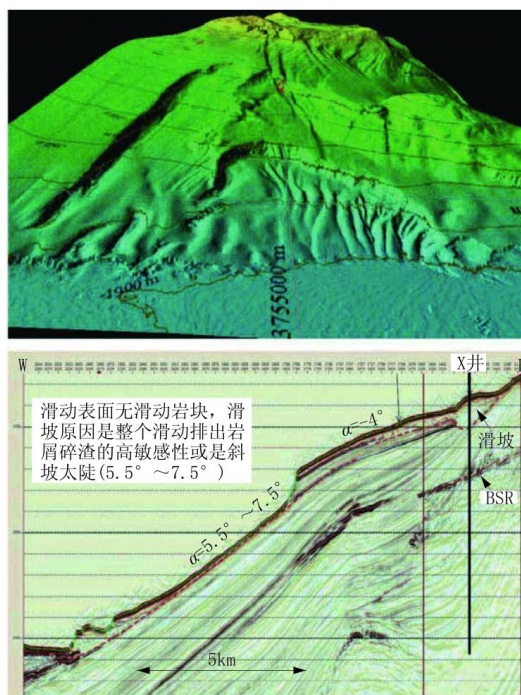


图 17 日本南海海槽东部海底曾经发生的滑坡

5.2.4.3 光纤技术精确原位温度测量系统

该精确原位温度测量系统(图 18)由 Schlumberger 公司、日本 JOGMEC 和俄罗斯国家地质勘查

大学联合研发,用于 2003—2004 年在日本南海海槽多井水合物钻探调查,在钻探活动期间测量原位地层温度,确定其测量数据是否可以准确的描述地热梯度,并且识别含水合物地层内的任何热扰动,同时找出其发生可能的起因。

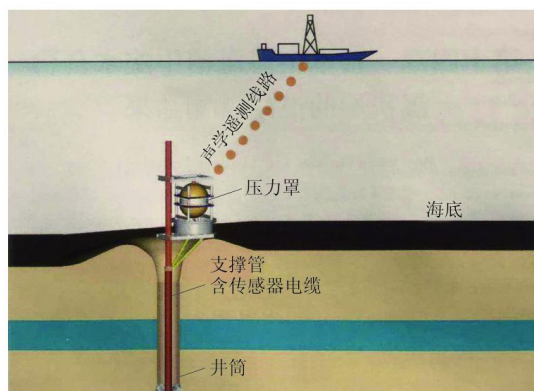


图 18 光纤技术精确原位温度测量系统^[8]

5.3 对南海海槽天然气水合物开发危险性的分析和判断

通常人们认为,海底水合物分解是很容易的,一旦分解反应开始发生后就不能够控制住。但是,情况不一定总是这样。实际上,水合物的分解是一种吸热反应^[5]。这就表明,沉积物中水合物的分解就降低了周围沉积物的温度。因此水合物的分解现象是自然地自我限制的过程,而不是继续的或加速的进程。实际上,需要继续输入能量,才能使水合物分

解过程进行下去。

有些文献还有一种提法,“水合物开发会影响全球气候变化”。也许有此种情况发生。但是,需要讨论的是水合物的开发与全球环境变化的时间跨度和空间规模。比如,日本一直研究的南海海槽东部的面积大约是 12000 km²,天然气水合物的富集地带分散于这一海域各处。其中任何具体的水合物成矿富集区都可能是未来生产的目标,其面积大约为几千米×几千米。并且,时间的跨度为 10~30 年。另一方面,大自然发生事件的空间规模是整个地球尺度。而且,其发生变化的时间尺度是几百年直至几千年。

需要强调的是,天然气水合物储层分布的空间规模(几千米×几千米),与发生于 6000—8000 年前著名的挪威的斯托瑞加 (Storegga) 巨型滑坡(几万平方米)在空间上是不可相提并论的。更重要的是,水合物的开采作业将避免在滑坡可能发生的地点实施。就如同现在实施常规油气开发所做的地质灾害评估一样。对于多孔隙砂岩的水合物储层,运用降压法是完全可以减少这种风险的。

图 19 展示了在水合物生产阶段运用降压法(用潜水泵降低生产井和储层水位)促使水合物分解。如果钻机和隔水管发生某些故障(如 2010 年 4 月在墨西哥湾发生的不幸的事故),海水将流入生产井。由此,水合物储层的压力就会恢复,其中水合物的

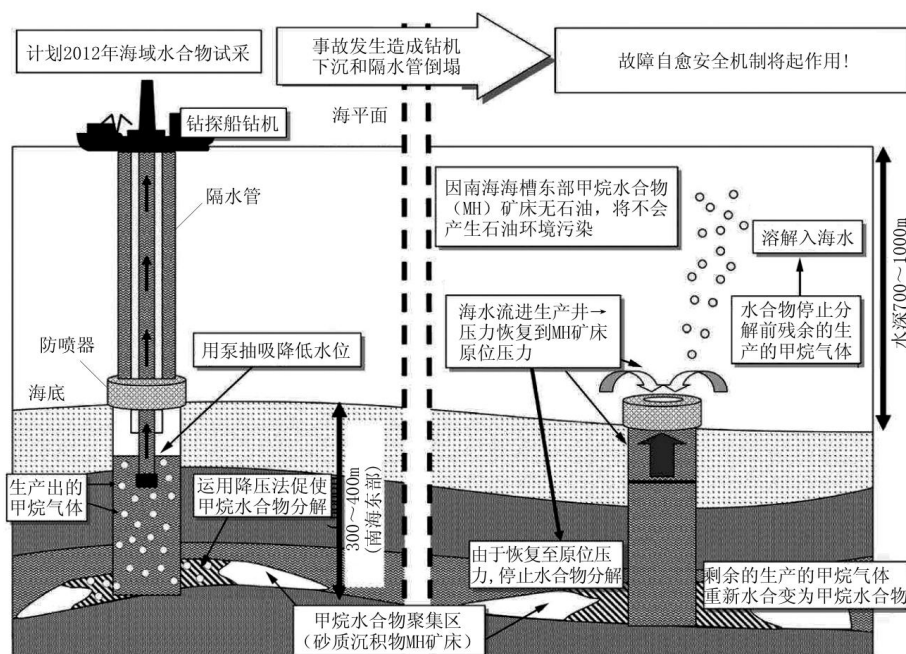


图 19 日本南海海槽水合物开采故障自愈安全机制示意图^[21]

分解过程就会很快停止。同时,沉积物中剩余的生产出的甲烷气体由于压力恢复而重新转变为水化物。从海底泄漏的水合物气泡将溶解入海水之中。所以,将这种故障自我抑制的机制称为“故障自愈安全机制”(“Natural Fail Safe Mechanism”)。

幸运的是,南海海槽东部的甲烷水合物矿层不含石油和重碳氢化合物,因此,由石油引起的海洋污染也不会发生。

根据上述对南海海槽天然气水合物开发危险性的分析结果判断,南海海槽天然气水合物开发的环境风险,看来并不比常规油气生产的环境风险更为严重。

6 2013 年日本南海海槽世界上首次海域天然气水合物试采成功^[25]

6.1 领导机构与施工负责部门

项目由重建的 MH 21 联合体领导。新建 MH 21 联合体由日本国家石油、天然气和金属公司(JOGMEC)和日本国家先进工业科技研究院(AIST, National Institute of Advanced Industry S & T)组成。下分 4 部门:现场开发技术部(领导施工,Yamamoto 为负责人,曾负责加拿大试采项目施工)、资源评价

部、生产方法和模拟部,以及环境效应评估部。

6.2 工程位置

日本南海海槽天然气水合物试采工程位置位于爱知县渥美半岛与志摩半岛海域。根据 2001—2008 年地震勘查和钻探取心资料确定了水合物生产试验井井位。选用“地球号”钻井船(图 20)和常规油气钻采设备实施作业。



图 20 “地球号”钻井船远眺

6.3 试采生产井、监测井与取心孔总体方案

图 21 示出了日本南海海槽天然气水合物试采工程生产井、监测井和取心孔的总体方案。生产试验井(AT1 - P)与 2 个温度监测井(MT1、MT2)于 2012 年 2—3 月钻成。附加钻进 AT1 - MC 取心孔,所钻进取心的 60 m 孔段包括粘土性泥沙覆盖层,与砂岩水合物聚集带(MHCZ)。

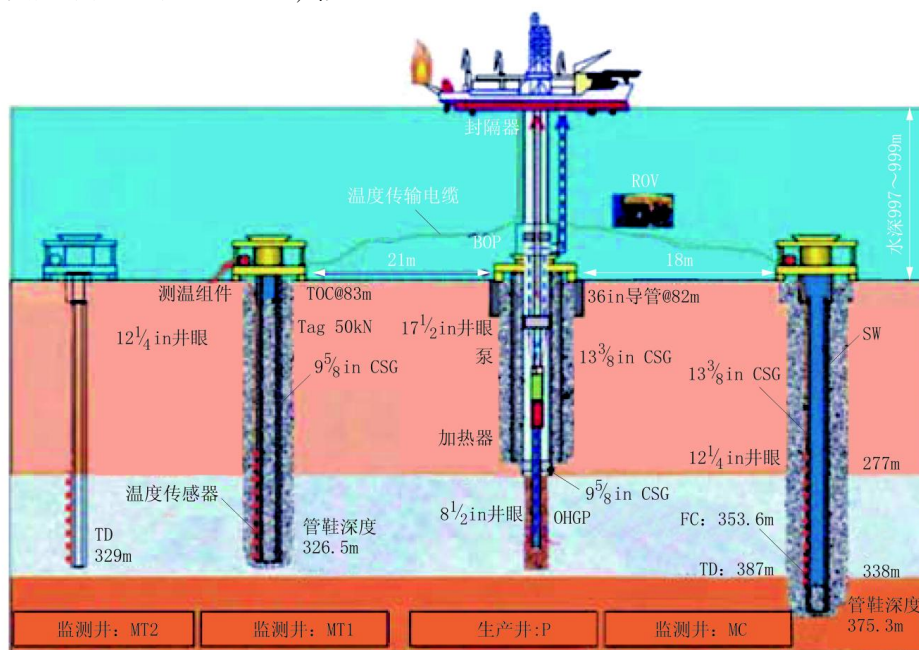


图 21 2013 年日本南海海槽水合物试采生产井、监测井与取心孔总体方案

此次试采生产井穿越的各地层的岩性依次如下:从海底深度 997.7—1091 m 为单元 I,是滑移沉积层;1091—1172 m 为砂质互层;1172—1249 m 为

单元Ⅲ,是粘土互层;1249—1272 m 为粘土层;甲烷水合物聚集带属单元Ⅳ,分为两层:1272—1301 m 为上层,1301—1333 m 为下层。此次试采井段即在

此甲烷水合物聚集带层段内。

此次生产试验中应避免发生的问题:(1)沙粒的产生;(2)地层破坏;(3)水合物重新组成,阻塞甲烷气流返排。

6.4 生产试验井水合物试采施工作业

日本南海海槽天然气水合物试采施工作业主要

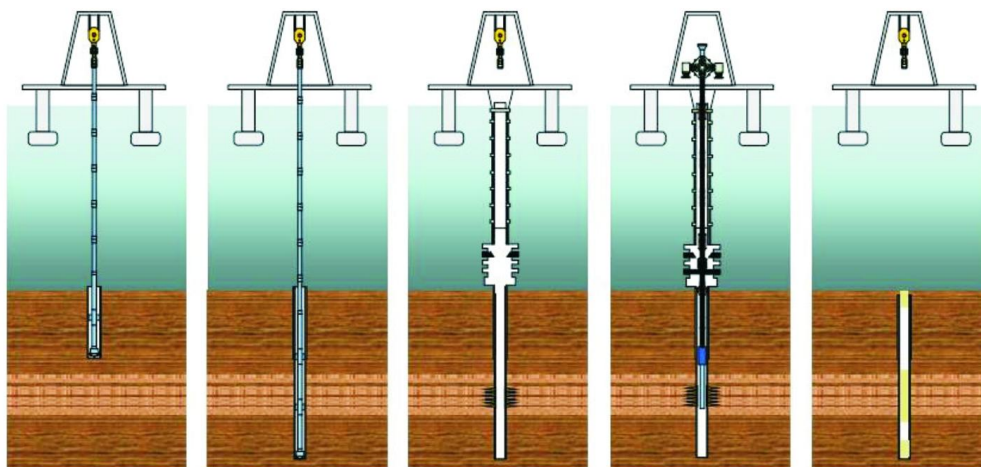


图 22 日本南海海槽天然气水合物试采施工作业程序

2012 年 2 月 15 日,开始钻进作业准备;3 月 26 日,试采作业用“地球号”钻探船回到清水港;6 月 29 日—7 月 7 日,采集保压水合物岩心样品(运用改进后的 CDEX Hybrid PCS 钻具);2013 年 1 月 28 日,在现场开始试采施工;3 月 12 日,开始水合物试采气体返排作业;3 月底前结束生产试验,回收设备;2013 年 8 月,回收剩余设备器材^[26]。

鉴于生产向天空排出的是甲烷可燃性气体,安全生产试验十分重要。特提出了以下 3 项要求:(1)所有舰船与人等远离施工“地球号”钻井船 2 km;(2)随时注意收听(看)129.6 MHz 广播,或海洋 VHK 波段 16 频道(发自“地球号”钻井船),按其指示行事;(3)一旦发现即将靠近施工现场的飞机和舰船,立即停止水合物试采作业^[27]。

6.5 试采成功

日本南海海槽东部海域运用降压法试采生产水合物(图 23),2013 年 3 月 12 日开始成功排气,图 24 展示了生产的甲烷气体在燃烧。本次试采采用了砾石充填的防砂措施,但由于砾石的移动引起了筛网的损坏,进而产生了出砂现象,导致试采末期发生了生产井通道砂堵问题,在 3 月 18 日不得不终止。AT1-P 生产井 6 d 试采共产生甲烷气 120000 m³,平均日产气量 20000 m³^[28]。

分 5 个程序(见图 22):(1)下导管;(2)钻进,随钻测井,下套管,注水泥;(3)连接隔水管和防喷器,电缆测井,射孔,控砂;(4)准备,运用减压法试采水合物,压井,电缆测井,拆卸隔水管和防喷器;(5)封堵、废弃生产试验井。

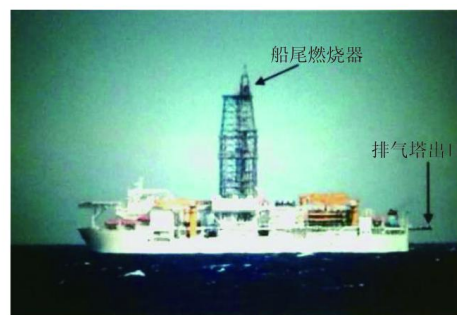


图 23 2013 年 3 月 12—18 日,日本海域水合物试采“地球号”钻井船



图 24 日本南海海槽天然气水合物试采生产出的甲烷气体在燃烧

7 2017 年 6 月日本南海海槽东部天然气水合物再次试采成功^[29]

7.1 2013 年日本南海海槽东部水合物试采故障发

生的原因

2013 年 3 月日本南海海槽东部水合物试采作业,其生产井段采用裸眼砾石充填的防砂技术,试采 6 日后,随着储层水合物不断的分解,地层亏空量逐渐增大,从而导致砾石充填井段发生松动、引起砾石层壁上形成空穴,使携带地层细砂的混合流体对砾石筛管造成强烈的冲蚀,迅速导致防砂功能失效,试采作业中止。

7.2 2017 年 6 月日本南海海槽东部第二次天然气水合物成功试采^[30]

7.2.1 2017 年 5 月日本又在南海海槽东部实施水合物试采作业

2017 年 5 月,日本再次在南海海槽东部实施水合物试采施工作业。这次改用先期膨胀 GeoForm 筛管实施防砂,但是效果还是不佳,仍然因生产井简埋砂,防砂失败。在 12 日(5 月 4—16 日)的连续水合物试采期间,累积生产甲烷气量仅为 35000 m³。

7.2.2 2017 年 6 月日本南海海槽东部水合物试采再次获得成功

2017 年 6 月日本南海海槽东部水合物试采,进一步改进了防砂技术。此次试采工程,采用井下膨胀 GeoForm 筛管,取代上次所用的先期膨胀 Geo-Form 筛管,取得良好的防砂效果。此次水合物试采工程是继 2013 年成功试采后,又取得的第二次海域水合物的成功试采。在 24 日的持续生产期间,累积生产甲烷气量 240000 m³,平均日产气量 10000 m³。

图 25 为日本南海海槽东部第二次天然气水合物试采的实施体系。

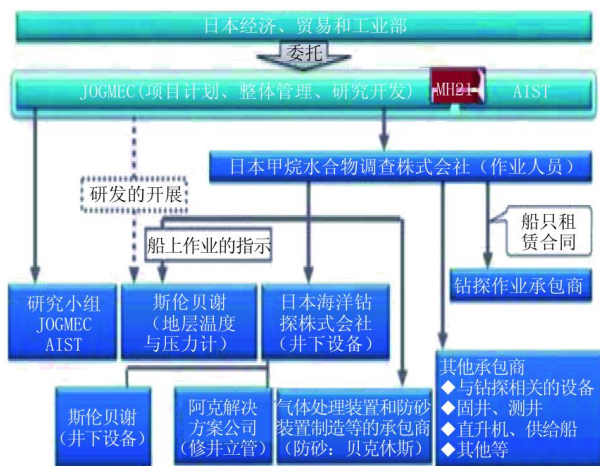


图 25 日本第二次海域天然气水合物试采的实施体系^[31]

至此,日本成功地完成了其“21 世纪天然气水

合物研发计划(MH21)”第二阶段的两次天然气水合物试采任务目标。

8 总结与建议

(1)日本于 2013 年 3 月在其南海海槽完成的天然气水合物试采,6 日生产甲烷气体 120000 m³,平均日产气量 20000 m³。尽管试采末期发生了生产井通道砂堵问题,试采作业未能继续进行,但这六日持续的甲烷天然气开采仍然被国际上认为是世界上第一次对海域天然气水合物的试采工程。这是国际天然气开发史上的一座里程碑。接着,日本又于 2017 年 6 月在南海海槽解决了砂堵生产管道的问题,成功地实施了第二次水合物试采工程。在 24 日持续生产期间累积产气 240000 m³,平均日产气量 10000 m³。目前,日本在海域天然气水合物的调查评价技术与试采工程总体实力居于世界领先地位。

(2)水合物保压取心技术是水合物勘查体系中最重要关键技术。目前世界上除美国的 PCS^[5],日本的 CDEX Hybrid PCS,欧洲的 FPC、FHRC 与 PTCB 之外,我国已研发成功 TKP-1 型保温保压取心钻具(北京探矿工程研究所)^[32]。后者于 2015 年在我国南海两次海试中,据多次保压取心回次统计,保压成功率达到 70%~80%,其效果可与美国、日本和欧洲同类保压取心钻具媲美。

但是,从 1973 年美国首次研发应用 PCB 至今约 45 年的期间内,虽然目前国际上可提供四大类水合物保压取心系统,但是其保压取心技术性能仍然不能满足实际需要,可靠性和保压成功率仍然不高。据部分资料分析,现有各型保压取心器的保压成功率通常维持在 60%~70%^[2,5],或更低。所以,进一步提高水合物保压取心技术的可靠性,将其保压取心成功率平均提高到 80% 以上,仍然是相关各国努力争取达到的共同目标。

(3)天然气水合物岩心样品在高压(大于 10 MPa)下的转移和测试鉴定技术同样是水合物调查评价的重要关键技术。经过约 20 年的努力,目前美国与日本,以及欧洲分别研发出 PCCT 和 HYA-CINTH 系统。这两套水合物压力岩心测试鉴定系统经逐步改进,趋于成熟,且相互交叉融合,已广泛应用于美、日、欧,以及其它国家,包括中国 2007—2016 年期间的 4 次南海水合物调查评价,以及印度和韩国海域水合物的多次调查评价。我国近年来在

压力岩心转移和测试分析技术方面发展迅速,但还缺乏独立的从海域水合物取样现场直至到陆地专业实验室,对水合物压力岩心样品转移和测试鉴定的整套技术系统。建议我国今后加强这方面的研究开发。

(4)借助海域天然气水合物调查和开发的硬件平台,加强地球科学向多圈层交互作用方向实施转变的平台,特别是促进地学与生物学进一步交叉融合的平台。地质学与生物学的融合渗透源远流长,传统地质学中岩石学、地层学等和古生物学是紧密联系的。20世纪后半叶,海洋科学钻探(DSDP、ODP)除以采取岩心实物证实板块学说等重大地质学发现,还发现深海海底极端条件下,即高温(黑烟囱出口)、高压、无氧、黑暗(无阳光)下的化学合成作用生态系统,颠覆了传统生物学唯一的光合作用生态系统。而1996年建立的大陆科学钻探计划(ICDP),和2003年启动的综合大洋钻探计划(IODP),均将地球深部生物圈微生物纳入其科学研究的主题。海域天然气水合物的调查与试采工程耗费巨资(许多亿)所建造的钻探船/钻探平台(如美国“决心号”,日本“地球号”)及其配置的钻探设备,和保压取心系统(如Hyace的FHRC和FPC等),以及压力岩心测试鉴定系统(如PCCT、HYACINTH),不但可应用于水合物的调查评价,也可运用于海底深部高压下微生物岩心样品的采取,高压转移与高压下的测试研究(如BIO, DeepIsoBug)。所以,建议我国利用海域天然气水合物调查和开发的硬件平台,积极开展岩石圈与(深部)生物圈交叉融合研究,实现多学科、多专业、多领域的交互综合研究,以解决整个人类生存和发展中与地球系统科学相关重大问题。

(5)天然气水合物开采有可能引起地质灾害、破坏生态系统及导致地球温室效应。日本在南海海槽,美国和加拿大分别在阿拉斯加和Mallik实施水合物试采工程,都非常重视水合物开采的环境效应影响研究。特别是日本,制定了环境效应影响研究战略,运用综合性方法技术,研发多种监测仪器装备,开展海洋三维空间、多类型仪器的监测,监测采集的全部数据经海洋生态模型验证,由数字模型作出风险预测。这种重视天然气水合物试采环境效应影响的方针,与采取的战略和方法技术是值得其他实施天然气水合物试采的国家和地区参考和借鉴

的。

(6)分析自2002年以来,15年内天然气水合物7次成功试采的实践,运用热注法1次(2002年加拿大Mallik永冻带),降压法5次(2008年加拿大Mallik永冻带、2013年日本南海海槽、2015年中国祁连山冻土带、2017年中国南海、2017年日本南海海槽), $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法1次(2012年美国阿拉斯加北坡)。其中降压法因其具有简单、经济的优点,应用次数较多。热注法因要求地层具有高渗透性,且在储层与围岩热损失较大,不宜单独运用于水合物试采。而 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法具有水合物开采期中及之后,水仍然保留于储层之中,有利于保持地层稳定性,适用于具有潜在地质灾害危险的地(海)域的水合物开采。

但是,多次试采实践表明,水合物最佳的开采方式将是组合方式,即一种方法为主,其它方法为辅。如2008年加拿大Mallik永冻带水合物开采,以降压法为主,在生产井下安置加热器以热注法辅助;2012年美国阿拉斯加北坡永冻带水合物试采,以 $\text{CO}_2 - \text{CH}_4$ 置换法为主,而在生产井内安置喷射泵以降低储层压力为辅。当然,将来也许会出现一些新的天然气水合物开采方法。

(7)2017年5—7月,我国在南海神狐海域天然气试采取得圆满成功。连续试采60 d,累计产气30.9万 m^3 。此次试采获得了持续产气时间最长、产气总量最大、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果,创造了产气时间和总量的世界纪录,使我国海域天然气水合物的试采技术水平目前处于世界领先水平。

(8)天然气水合物的商业化开采是个漫长的过程。开采技术完善成熟需要时间,解决防止灾害环境保护,加强研究和布署需要时间,更重要的是,要将水合物开采的甲烷气体产品以有竞争力的价格打入市场,更是极大的挑战和困难,特别是在常规油气,甚至其它非常规油气(页岩油气、致密油气等)在市场上尚能够长期足量提供的情况下。太阳能、风能等更为“清洁”的可再生能源迅速的开发和广泛应用,也将是未来能源市场上的强劲对手。所以,水合物的商业化开采任重道远,宜从基础研究抓起,稳扎稳打,逐步地建立起完整的、成熟的水合物调查和开发体系,不断地提高水合物试采的综合技术经济指标,水合物商业化开采的时日或许能够早日到来。

参考文献:

- [1] Yoshihiro Masuda, Koji Yamamoto, Shimada Tadaaki, et al. Japan's Methane Hydrate R&D Program Progresses to Phase 2[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 9, Iss. 4. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas/DB/OL>.
- [2] 左汝强,李艺.加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):1-12.
- [3] 左汝强,李艺.美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物研究和成功试采[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(10):1-17.
- [4] www.Mallik.icdp-online.org/[DB/OL].
- [5] Dallimore. 2006-08 Mallik team. Community update on the 2006-2008 Jgomec/NRCan/Aurora Hydrate production research program[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 7, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [6] Exchange Trial Project Team. Igmik Sikumi Gas Hydrate Field Trial Completed[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 12, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [7] [日]石油公团.南海海槽确认含甲烷水合物层[C]//中国地质调查局,中国地质科学院勘探技术研究所.天然气水合物勘探与开发校译文集(1),2001.
- [8] [美] T. 科利特, A. 约翰逊, C. 纳普, 等. 天然气水合物——能源资源潜力及相关地质风险[M]. 北京:石油工业出版社, 2012.
- [9] 曾繁彩,杨胜雄,张光学,等.天然气水合物资源勘探开发战略研究[M].北京:地质出版社,2013.
- [10] Y. Kubo, Y. Mizuguchi, F. Inagaki, et al. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyu[J/OL]. Scientific Drilling, Vol. 17, 2014. <http://www.ioldp.org>.
- [11] J. Carlos Santamarina, Sheng Dai, Junbong Jang, et al. Pressure Core Characterization Tools for Hydrate-Bearing Sediments[J/OL]. Scientific Drilling, Vol. 14, 2012. <http://www.ioldp.org>. (PCCT).
- [12] S. Dai, J. Jang, M. Terzariol, et al. Pressure core analysis tools used to characterize hydrate-bearing sediments from the Nankai Trough[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 13, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [13] Peter Schultheiss, Melanie Holland, Cary Humphrey. Wireline coring and Analysis under Pressure: Recent Use Future Development of the HYCINTH system[J/OL]. Scientific Drilling, Vol. 7, 2009. <http://www.ioldp.org>.
- [14] 左汝强,李常茂,赵文信,等.国际海洋科学钻探进展(DSDP、ODP、IODP)[Z].北京:国土资源部咨询研究中心,2005.
- [15] T. S. Collett, M. Riedel, R. Boswell, et al. International team Completes landmark Gas Hydrate expedition In the offshore of India[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 6, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [16] Haiqi Zhang, Shengxiong Yang, Nengyou Wu, et al. Successful and Surprising results for China's first Gas hydrate drilling expedition[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 7, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [17] Early results from Korean Gas hydrate research effort are encouraging[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 7, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [18] ZHANG Guangxue, YANG Shengxiong, ZHANG Ming, et al. GMGS2 Expedition investigates rich and complex gas hydrates Environment in the South China Sea[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 14, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [19] YANG Shengxiong, ZHANG Ming, LIANG Jinqiang, et al. Preliminary results of China's third Gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 15, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [20] Yang Shengxiong, Liang Jinqiang, Lei Yong, et al. GMGS-4 Gas hydrate drilling expedition in the South China Sea[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 17, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [21] Sadio Nagakubo, Nao Arata, Itsuka Yabe, et al. Environmental Impact Assessment Study on Japan's Methane Hydrate R&D Program[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 10, Iss. 3. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [22] 编委会.海洋石油工程深水油气田开发技术[M].北京:石油工业出版社,2011.
- [23] Ray Boswell, Tim Collett, Scott Dallimore, et al. Geohazards Associated with Naturally-Occurring Gas Hydrate[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 12, Iss. 1. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [24] [日]东京大学海洋研究所.海洋 de 奥秘[M].高华玮译.北京:科学出版社,2003.
- [25] Japan completes first offshore methane hydrate production test - methane successfully produced from deepwater hydrate layers[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 13, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [26] Gas Production from Methane Hydrate Layers Confirmed[DB/OL]. <http://www.jgomec.go.jp/english/news/release/release0110.html>.
- [27] Flow Test from Methane Hydrate Layers Ends[DB/OL]. http://www.jgomec.go.jp/english/news/release/news_01_000005.html.
- [28] Gas Produced from Methane Hydrate (provisional)[DB/OL]. http://www.jgomec.go.jp/english/news/release/news_01_000006.html.
- [29] 刘昌岭,李彦龙,孙建业,等.天然气水合物试采:从实验模拟到场地实施[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(5):12-26.
- [30] Haiqi Zhang, Shengxiong Yang, Nengyou Wu, et al. China's first gas hydrate expedition successful[J/OL]. Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, Vol. 7, Iss. 2. <http://www.netl.doe.gov/research/oil-and-gas>.
- [31] 日本第二次可燃冰试采,为何 12 天仅产气 3.5 万方[DB/OL].天然气水合物微信公众平台,2017-05-26.
- [32] 蔡家品,赵义,阮海龙,等.海洋保温保压取样钻具的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2).
- [33] [日]高桥秀明.“南海海槽”探井前期准备工作[C]//中国地质调查局,中国地质科学院勘探技术研究所.天然气水合物勘探与开发技术译文集(1).2001.

致谢:本文主要参考文献取自美国能源部(DOE,US)下属国家能源技术实验室(NETL)所办“冰中之火-气体水合物通讯”(Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter)期刊、国际大洋发现计划(ODP)与国际大陆科学钻探计划(ICDP)联办的“科学钻探期刊”(Scientific Drilling Journal),与日本国家油气和金属公司网站(www.jgomec.go.jp/),以及其他相关文献。在本文撰写结束之际,笔者对美国 NETL 的 Fire in The Ice - Gas Hydrate Newsletter, IODP 与 ICDP 联办的 Scientific Drilling Journal 期刊, www.jgomec.go.jp 网站,及其中各相关文章的作者,以及其它国内外参考文献的网站、书籍的作者和译者表示深切的谢意!

油气地质调查井钻井技术与对策

张德龙, 翁 炜, 黄玉文, 朱文鉴, 郭 强
(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 油气资源调查是中国地质调查局“十三五”规划的重要工作内容之一, 2016年中国地质调查局实施油气地质调查井54口, 2017年部署36口, 大多采用机械岩心钻探工艺。本文基于油气地质调查井和机械岩心钻探工艺特点, 从地层特点、井控、固井、录井、测井、井下复杂情况等方面对油气地质调查井钻井所面临的技术难点进行了总结和分析, 并有针对性地提出了解决方案。本文可为相关管理和作业人员提供技术参考, 为油气地质调查井钻井技术攻关和发展提供借鉴。

关键词: 油气地质调查井; 绳索取心钻探; 井控; 钻井技术; 钻井装备

中图分类号: P634; TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0021-05

Drilling Technical Problems and Countermeasures of Oil and Gas Geological Survey Well/ZHANG De-long, WENG Wei, HUANG Yu-wen, ZHU Wen-jian, GUO Qiang (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Oil and gas resources survey is one of the important contents of the 13th Five-Year Plan in China. 54 oil and gas geological survey wells were implemented by China Geological Survey in 2016, and 36 wells deployed in 2017, mechanical core drilling technology is mostly used. Based on the characteristics of oil and gas geological survey wells and mechanical core drilling technology, this paper summarizes and analyzes the technical difficulties of oil and gas geological survey wells drilling in the aspects of formation characteristics, well control, cementing, logging and downhole complex conditions, and puts forward targeted solutions. The research results of this paper can provide technical reference for the related managers and operators, and provide experience for the research and development of drilling technology oil and gas geological survey wells.

Key words: oil and gas geological survey well; wire-line core drilling; well control; drilling technology; drilling equipment

0 引言

油气资源调查是我国十三五规划的重要内容之一, 能源矿产地质调查计划是中国地质调查局的重要工作之一^[1]。中国地质调查局能源矿产地质调查计划部署了多个油气资源地质调查工程, 涵盖常规油气、页岩气、煤层气等多种能源。与石油系统钻井不同, 油气地质调查井旨在查明地层层序、验证地球物理信息, 设计井深一般不超过2000 m, 进行全井段或目的层取心, 完井直径通常不小于76 mm。中国地质调查局2016年实施油气地质调查井54口, 2017年部署油气相关地质调查井36口, 实现了油气资源调查工作重大突破。然而, 现有的油气地质调查井多采用机械岩心钻探工艺, 该工艺通常应用于固体矿场资源勘查, 在油气地质调查井钻井过

程中还存在诸多问题, 面临巨大的工程风险, 亟须得到重视和解决。本文针对油气地质调查井和机械岩心钻探工艺特点, 重点研究油气地质调查井钻井工程所面临的技术难点及相应解决方案。

1 油气地质调查井特点

1.1 地层特点

油气地质调查井属于公益性油气资源调查, 旨在查明地层层序、验证地球物理信息、获取油气地质资料, 具有重要的价值和意义。油气地质调查井设计井深通常在2000 m左右, 进行全井段或目的层取心, 完井直径一般不小于76 mm。其所勘探的区块通常是未开展过钻探工作的新区块, 在这些区块往往未开展过钻井工程, 在施工之前对地层的实际情

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“准噶尔盆地及周缘油气基础地质调查”(编号: DD20179122)、“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查”(编号: DD20179082)、“东南沿海厦门-琼北地区地热资源调查(北京探矿工程研究所)”(编号: DD20179022); 国际科技合作项目“地质深孔小口径孔底动力安全钻探技术研究”(编号: 2011DFR71170)、“复杂深孔小口径可膨胀波纹管及应用技术联合研究”(编号: 2015DFR71010)

作者简介: 张德龙, 男, 汉族, 1984年生, 硕士, 油气井工程专业, 从事石油钻井、地质钻探工程技术研究工作, 北京市海淀区学院路29号, tg-szdl@126.com。

况认知严重不足,即便是通过地震等资料对地层分布有一定的预测^[2-3],其预测结果往往与钻井施工实际遇到的地层情况差别较大。在地层的层序、岩性、压力梯度、油气水层未知的条件下开展钻井施工,技术上难度大,工程风险极高^[4]。

1.2 施工工艺

从目前已经施工的油气地质调查井来看,其一般采用机械岩心钻探工艺。机械岩心钻进工艺与常规石油钻井工艺差别较大,以往多用于工程地质勘察、固体矿产勘探,其主要的施工设备通常是立轴钻机或液压动力头钻机,钻杆采用薄壁内外平绳索取心钻杆,钻头采用金刚石取心钻头^[5-6]。

由于与常规的石油钻井不同,机械岩心钻探工艺在诸多方面都有一定的优势:

(1)施工成本低,施工一口2000 m的油气地质调查井成本通常为300万元左右(包含测井、录井费用)。

(2)采用机械岩心钻进工艺进行全井取心,岩心采取率高,施工效率高,可以全面、完整地揭示地层地质情况。

(3)现场作业人员少,按3个班组计算,每个班组一般配6个人,实际作业人员20人基本满足现场施工需要。

(4)设备、工具尺寸小,占地面积小,对环境的破坏小。

(5)施工产生的废弃物少,后期处理工作量少,对环境污染程度小。

同时,与石油钻井工艺相比,机械岩心钻进工艺也存在一定的不足:

(1)设备相对落后,自动化程度偏低,复杂事故处理能力略显不足。石油钻井通常采用转盘或顶驱钻机,设备能力大;机械岩心钻探通常采用传统的立轴钻机或全液压动力头钻机,设备的自动化程度、处理复杂事故的能力相对较差。

(2)装备体系不完善。受成本和以往技术需要的限制,机械岩心钻进工艺在设备配套方面相对较差。例如,目前成体系的配套固控系统尚不完善^[7],针对机械岩心钻探工艺的配套井控系统严重不足。

(3)钻井液处理系统不完善,环保设施及要求相对较低。机械岩心钻探施工现场一般不配备钻井液循环罐、储备罐,钻井液配制与循环多为现场临时

开挖的泥浆坑/池,不利于废弃钻井液、岩屑的收集和无害化处理。

(4)井控技术相对较弱。井控是机械岩心钻探工艺的短板,在井控技术、设备、人才、认识和管理方面都存在严重的不足,难以满足高压油气层钻井施工安全需要。

2 油气地质调查井钻井技术难点

2.1 地层压力预测与监测

不论是探井还是开发井,地层压力预测是油气钻井工程的重要工作之一,在地层压力未知的情况下,钻井井身结构设计、参数优化就无从谈起。油气地质调查井通常部署在没有邻井资料的新区块,而采用地面探测的方法根本上无法准确预测地层压力。

在石油钻井过程中,在没有准确地层压力的条件下可以应用Dc指数法、Sigma录井资料等对地层压力进行预测和分析^[8-9]。Dc指数法针对全面钻进工艺提出,通过钻压、转速、钻速、钻头直径、钻井液性能等参数可以计算出地层的Dc指数,通过Dc指数可以推导出地层压力变化^[10-11]。Dc指数法尚无在机械岩心钻进施工地层压力预测方面的应用案例。并且,由于机械岩心钻进采用立轴或动力头加压,难以获取钻头上的准确的钻压数值,加之其它参数的准确性和可测量性难以保证,即便是应用Dc指数法也难以用于地层压力的预测。

2.2 井控技术

在油气钻井过程中,井控工作是各项工作的重中之重,井控工作做不好,极易引发重大安全事故^[12-13]。由于以往多用于工程地质勘察和固体矿产勘探,机械岩心钻探工艺的井控工作没有得到足够的重视,在技术、装备、人才等各方面都存在严重不足。井控是一项系统的、复杂的重要工作,现有的防喷器、井控管汇、液气分离器、气测装置、液面检测装置及使用工艺都是针对石油钻井需要研发,完全不满足机械岩心钻探工艺井控需要,无法配套使用。目前,尚无与机械岩心钻探相匹配的井控系统,应用机械岩心钻探工艺开展油气地质调查井钻进施工安全隐患极大。

在石油钻井工程中对溢流、井涌、气侵、H₂S溢出、压井、放喷等复杂事故处理和作业有严格的完善的规定和操作规程^[14-15]。油气地质调查井由于采

用机械岩心钻进工艺,没有配套井控系统,缺乏轻重浆储备罐、起钻灌浆、液面监测、除气、液气分离器、气体监测报警、压井放喷管汇等设备,基本不具备井控实施能力。

此外,机械岩心钻探从业人员大多没有受过油气钻井技术、井控、 H_2S 、HSE等相关培训,钻井过程中的油气发现、施工安全难以得到保证。受从业人员对油气钻井技术掌握程度的限制,即便油气地质调查井现场配有防喷器等装备也很难在第一时间实现发现、上报并快速关井控制井口,安全隐患极大。

2.3 窄环空问题

机械岩心钻探施工通常采用绳索取心钻进工艺,绳索取心钻杆与标准石油钻杆不同,通常为内外平的薄壁钻杆,钻头外径比钻杆外径大2~6 mm,井眼与钻杆间的环空间隙为1~3 mm。环空间隙过小通常导致钻井液循环压降较高,环空压降过高将导致井底压力不稳,在不同工况下压力波动较大;同时在起下钻、提取岩心内管过程中由于环空过小,抽汲压力较大,同样会造成井下压力波动。井内的压力波动容易引发井壁失稳、井涌、井喷等复杂问题。在油气地质调查井施工过程中,尤其是在含油气地层,在条件允许的情况下应尽量采用大尺寸钻头,保证环空间隙,同时在起下钻、提取岩心内管过程中应尽量控制起下速度。

由于井眼尺寸较小,套管与井眼之间的环形间隙较小。在窄环空条件下,固井质量很难保证^[16-17]。固井质量关系到含油气井筒稳定、井控安全、井身质量,在以往的机械岩心钻探中未得到足够的重视,固井质量不过关将为后期钻井施工和试油埋下巨大隐患。

2.4 钻井液漏失随钻堵漏难度大

钻井施工必然会钻开多套地层,钻井液漏失是在钻进施工过程中常见的井下复杂情况^[18-19]。在工程地质勘查、固体矿产勘探钻进施工过程中,发生漏失通常会造成一定的成本增加和经济损失,最严重的情况下仅仅是弃孔换孔位重新开孔,很少引发安全事故。相反,在油气钻井过程中井漏有时会引发井喷、有毒有害气体溢出等重大安全事故,给作业人员和居民的生命财产造成巨大损失。

机械岩心钻探环空间隙小,岩心内管与外管的间隙更小,在随钻堵漏过程中采用大颗粒堵漏材料易造成憋压,堵漏困难。在漏速较快的情况下,如堵

漏作业不及时或不能满足要求,很有可能导致环空液面突然下降,环空压力瞬间降低,如钻遇油气层很可能引发漏转喷的严重事故。因此,在油气地质调查井施工过程中必须对钻井液漏失及堵漏问题引起足够的重视。

2.5 地层适应性较差

石油钻井通常为全面钻进方式,可根据地层条件选用PDC、牙轮、孕镶金刚石钻头等多种形式的钻头,同时还可以根据钻进需要选择螺杆钻具、涡轮钻具、扭冲钻具等多种提速工具,对地层的适应性相对较强。机械岩心钻探工艺采用绳索取心技术,在油气地质调查井钻井施工过程中只能采用取心钻头,钻头的选择范围相对较窄,可选用的钻井提速工具不多,地层的适应性相对较差。

2.6 固控技术

受成本和现有技术条件限制,机械岩心钻探现场很少配有成套的固控设备。现场通常采用岩屑自动沉淀的方法来去除泥浆中固相颗粒,从而降低钻井液的含砂量。这种采用自然沉淀的方法无法保证钻井液性能的稳定性,难以满足油气探井对钻井液的要求。钻井液性能对提高钻井施工效率、发现油气和保护储层有非常重要的作用。目前国内已有针对机械岩心钻探的小型固控设备^[7],虽然不成体系,但也基本满足要求。油气地质调查井施工现场应按需要配备满足要求的固控设备,以保证实现油气地质调查井的工程目标。

2.7 测井录井技术配套问题

录井是在钻井施工过程中实时获取地层油气、地质资料、掌握钻井施工参数的最便捷的手段。然而,机械岩心钻探通常采用金刚石取心钻头,钻井施工产生的岩屑颗粒极小,导致录井对岩屑的分析难度极大。钻时录井系统与机械岩心钻探钻机的配伍性不好,导致现场的录井工作开展比较困难。尽管气测录井进行烷烃类的录井可以实现,但是受泥浆排量、循环槽限制,效果并不理想。录井工作现存的困难对油气地质调查井地层岩性的判断和油气发现有十分不利的影响。同时,受机械岩心钻探现场条件限制,泥浆液面变化传感器、有毒有害气体监测传感器等无处安装,难以实时有效的监控井漏、溢流、有毒有害气体溢出等情况,不利于施工安全。

通过测井可以准确获取地层油气、地质参数,然而受机械岩心钻探井眼尺寸的限制,很多先进的仪

器无法下入井底,小直径的测井工具类型较少,测量效果相对较差。同时,由于井眼尺寸偏小,易发生测井仪器上提下放遇阻受卡等问题,一旦发生测井仪器卡钻很难打捞,施工风险较大。

2.8 管理、技术、安全体系不足

经过数十年的发展,石油钻井已经形成成套的管理体系、技术体系、作业规程和行业标准,相关规定、标准可以很好地指导现场施工、降低工程风险和保证施工安全。目前尚无针对油气地质调查井的相关规定、标准和管理体系,原有机心岩心钻探相关标准不满足油气地质调查井的需要,照搬或套用石油钻井相关标准同样无法满足现场施工和安全需要。

3 油气地质调查井施工技术对策

采用机械岩心钻探工艺开展油气地质调查井钻井施工可以大幅降低油气资源勘探成本,提高勘探效率。虽然其在技术、安全方面存在一些不足,但仍然可以通过改进工艺、技术、设备等方法来克服上述复杂问题。

3.1 地层压力预测技术改进

通过对现有录井仪器设备进行改进优化可以实现现有录井设备与机械岩心钻探钻机的配套,解决录井工作存在的问题。结合物探资料和录井资料可以对地层压力进行预测,根据测井资料可以对地层压力情况进行测量。综合运用上述技术手段,针对机械岩心钻探工艺参数特点开展地层压力预测技术研究,提高其准确性和可靠性,可以为油气地质调查井施工提供良好的技术指导和安全保障。

3.2 设备及工具优化

现有的机械岩心钻探设备不满足钻进参数精细化控制,井控设备安装困难。改善现有设备工作参数的采集、可视性能,同时兼顾录井仪器传感器安装配套需要,可以为钻时录井系统安装和精细化钻进提供有效保证。此外应在现有条件的基础上进一步加大设备改进、研发投入,对设备及工具进行优化和改进,进一步提高设备的自动化程度,改善各种工具的匹配性和适应性,实现设备、工具的成套化、系统性。

3.3 优化钻具组合

在钻井工程设计初期,应尽量增大完井井眼直径,保证完井井眼直径 ≤ 95 mm,一方面可以为井下复杂预留一层套管,另一方面可以满足测井工作需

要保证测井安全;在施工过程中应在条件允许的情况下尽量增加钻头尺寸,这样可以有效的增大环空间隙,减小循环压降,降低固井难度,提高固井质量;选择与钻头尺寸匹配的扩孔器、扶正器,保证井眼质量和钻柱的稳定。

此外,应根据区域地质概况设计或优选适应性强的钻头,以满足现场施工需要。

3.4 优化井控安全设备

现有的石油钻井井控设备与机械岩心钻探配伍性差,难以满足现场施工需要。应根据机械岩心钻探工艺特点,在保证井控系统压力等级的前提下,优化设计小型、轻型的防喷器、压力管汇、液气分离器、放喷管汇等关键井控设备,形成机械岩心钻探井控技术及设备体系。防喷器通径应不小于146 mm,压力级别 ≤ 21 MPa,同时配备与各级岩心钻杆配套的闸板芯子,根据实际排量和压力需要对相关配套管汇、设备、工具进行优化设计。同时,结合机械岩心钻探工艺制定相关井控措施和标准,对从业人员进行推广和培训。

3.5 完善钻井液处理和固控体系

现有的机械岩心钻探固控设备还存在不全面、不系统的问题。应结合机械岩心钻探实际需要逐步完善钻井液固控体系和装备,从而提高钻井液处理和性能控制的能力和手段。

同时,应进一步完善钻井液处理设备,形成配套的技术装备体系。改变以往采用泥浆坑的做法,配备循环罐、配浆罐、储备罐、加料设备、搅拌设备、液面监测仪器等必要的设备,确保钻井液性能的控制、优化、与监控。

3.6 建立相关标准

现有的机械岩心钻探标准和操作规程已经无法满足油气地质调查井的施工需要,应结合油气地质调查井特点重新梳理、制定相关标准,加强针对含油气地层钻井施工的管理与要求。

3.7 开展从业人员教育和培训

原有机心岩心钻探从业人员对油气钻井技术、井控、 H_2S 、HSE等方面的知识掌握程度较差。可以通过从业人员再教育、再培训的方式进一步提高其技术水平和工作能力,尤其是加强对油气钻井工程风险的认识。

3.8 强化现场管理和监理

工程管理是油气地质调查井工程的重要工作之

一,从地质设计到工程设计,从工程设计到施工方案,再到现场施工,每一环节都十分重要,应根据实际需要制定完善的管理体系,做到严格把关、规范管理。此外,在现场施工过程中应借鉴石油钻井施工中的监督监理机制,配备现场监督人员,规范现场施工和作业,保障施工质量和安全。

4 油气地质调查井技术展望

近年来,石油钻井行业提出了小井眼技术,可以大幅降低施工成本,提高施工效率^[20-22]。机械岩心钻探工艺与小井眼钻探存在很多相似之处,机械岩心钻探的关键问题在于油气钻井经验、技术、设备存在一定不足。然而这些问题并不是无法克服和改进的,随着中国地质调查局油气地质调查井工作的推进,机械岩心钻探技术和装备也将不断的发展。一旦上述问题得到解决,机械岩心钻探将为中国油气地质资源勘查和小井眼油气钻井技术发展做出巨大贡献。

5 结论与认识

采用机械岩心钻探工艺开展油气地质调查井施工具有成本低、效率高、资料全等优势。

采用机械岩心钻探工艺开展油气地质调查井施工在技术和安全方面还存在诸多问题,亟须得到重视和解决。

建议加大针对油气地质调查井施工过程中涉及的技术、装备等问题的科研投入,进一步提升钻井技术,优化相关配套设备。

建议逐步建立油气地质调查井相关标准,进一步完善和加强工程施工的管理、监理体系。

参考文献:

[1] 高慧丽.我国能源矿产地质调查形成新格局[N].中国国土资源报,2016-11-11(001).

- [2] 田军,李建忠.利用地震层速度预测地层破裂压力的方法研究[J].吐哈油气,1999,(2):50-54,99.
- [3] 张冰,符力耘,魏伟,等.异常地层压力声波衰减分析及地层压力地震数据外推反演[J].地球物理学报,2014,57(10):3373-3388.
- [4] 潘登.施工井事故的地质因素分析与风险预测[D].浙江杭州:浙江大学,2011.
- [5] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014.
- [6] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
- [7] 冯美贵,朱迪斯,翁炜,等.地质岩心钻探冲洗液固控系统及配套工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(5):67-70,75.
- [8] 刘岩生,苏义脑.探井地层孔隙压力计算[J].石油钻采工艺,2000,(5):6-9,83.
- [9] 陈子剑,邓金根,蔚宝华.探井孔隙压力复合预测方法研究[J].特种油气藏,2016,23(1):25-27,145,152.
- [10] 付素英,贾维慎.地层压力随钻监测计算方法改进[J].录井工程,2005,(4):48-53,83.
- [11] 于海海.地层压力预测技术现状及发展趋势[J].化工管理,2016,(14):134.
- [12] 刘鹏举.井喷事故分析与气体扩散研究[D].湖南湘潭:湖南科技大学,2009.
- [13] 杜钢,于洋飞,熊朝东,等.钻井井喷失控因素分析及预防对策[J].中国安全生产科学技术,2014,10(2):120-125.
- [14] SY/T 5053.2—2007,钻井井口控制设备及分流设备控制系统规范[S].
- [15] SY/T 6426—2005,钻井井控技术规程[S].
- [16] 焦贵菊.复杂地层固井技术存在的问题与研究方向[J].中国石油和化工标准与质量,2012,32(6):83.
- [17] 黄柏宗,谢承斌,蔡久能.深井固井的若干问题[J].钻井液与完井液,2003,(5):51-54,77-78.
- [18] 李大奇,康毅力,刘修善,等.基于漏失机理的碳酸盐岩地层漏失压力模型[J].石油学报,2011,32(5):900-904.
- [19] 王中华.复杂漏失地层堵漏技术现状及发展方向[J].中外能源,2014,19(1):39-48.
- [20] 王小玉.关于小井眼钻井技术的发展趋势研究[J].石化技术,2015,22(8):252.
- [21] 刘美玲,朱健军,李杉,等.小井眼钻井提速技术在徐深气田的试验与分析[J].石油钻采工艺,2016,38(4):438-441.
- [22] 林瀚,张浩.井控技术理论在小井眼钻井中喷漏问题探究[J].化学工程师,2017,31(3):59-62.

西藏尼玛盆地超 2000 m 油气调查井施工技术实践

郭如伦¹, 王志祥²

(1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 西藏 拉萨 851400; 2. 四川省地质矿产勘查开发局四〇三地质队, 四川 峨眉山 614200)

摘要: 尼 1 井为油气调查井, 完钻深度 2001.10 m, 该井为西藏地区最深小口径地质岩心钻井。通过对施工设备选型、钻井结构设计、取心工艺、冲洗液护壁及钻遇复杂地层处理方案等进行论述, 总结在高海拔地区钻探施工经验, 分析存在的不足, 为今后西藏该地区钻探施工提供一定的参考。

关键词: 钻探技术; 绳索取心钻进; 复杂地层; 西藏尼玛盆地

中图分类号: P634; TE242 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0026-04

Practice of Construction Technology for More than 2000m Oil and Gas Investigation Well in Tibet Nima Basin/ GUO Ru-lun¹, WANG Zhi-xiang² (1. No. 6 Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Tibet Autonomous Region, Lasa Tibet 851400, China; 2. No. 403 Geological Brigade of Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Sichuan Province, Emeishan Sichuan 614200, China)

Abstract: Being the deepest small diameter geological core well in Tibet area, Ni-1 is an oil and gas investigation well with the final depth of 2001.1m. The discussion is made on the construction equipments selection, borehole structure design, coring technology, flushing fluid wall protection and treatment scheme for drilling in complex formations, the drilling construction experiences in high altitude area are summed up with the analysis on the existing shortcomings, which can provide some experience for future drilling construction in this area of Tibet.

Key words: drilling technology; wire-line coring; complex formation; Tibet Nima basin

1 概况

尼 1 井施工区地处西藏那曲地区尼玛县境内, 海拔近 5000 m, 气候条件恶劣, 钻探施工周期短。该施工工程属于伦坡拉、尼玛措勤盆地油气基础地质调查项目, 由中国地质调查局油气资源调查中心组织设计, 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队组织施工。

尼 1 井设计井深 2000 m, 要求全井取心, 全井段录井、测井。目的为揭示尼玛盆地古近系地层发育情况, 并与周边露头及伦坡拉盆地进行对比; 了解烃源岩发育情况, 并揭示目的层烃源岩有效性; 获取钻井地质资料, 并为该区地震地质层位标定提供依据, 了解区内的地层及储盖组合发育情况, 为进一步油气勘探评价提供基础资料。

2 设备配套及使用情况

考虑到尼 1 井位于青藏高原腹地, 其海拔高, 冻

土层发育, 且地质构造复杂, 钻遇地层变化频繁, 结合以往羌塘盆地油气钻探施工工程的经验和教训, 在综合分析和调研考察的基础上, 确定选用 HXY-8 型钻机进行尼 1 井的钻探施工。主要钻探设备配置见表 1。

HXY-8 型钻机动力由标准 134 kW 改装到 192 kW, 增大内燃机功率的同时, 采取了进气道增压的涡轮增压技术, 提高机械效率, 尽量降低动力失效, 同时配套加强型 SG24 钻塔, 完全能够满足施工要求, 并且为终孔后成功起拔 1568.70 m HQA 钻杆 (做套管) 发挥了决定性作用。采用油缸 + 卷扬机的方式强力顶拉钻杆, 其力量大至足以拉断 HQA 蘑菇头, 但系统整体运行仍然非常平稳。由此可见, 虽然随着海拔增高, 氧气含量降低, 进入内燃机的充气量将减少, 造成柴油燃烧不充分, 设备功率下降, 但我们选用的带有涡轮增压的大功率内燃机配套, 在极端情况下仍然能够很好弥补动力衰减, 满足施工

收稿日期: 2017-07-18; 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 中国地质调查局油气基础性公益性地质调查项目“伦坡拉、尼玛措勤盆地油气基础地质调查”(编号: DD20160160)

作者简介: 郭如伦, 男, 汉族, 1968 年生, 副队长, 探矿工程专业, 从事钻探技术研究与管理, 西藏自治区拉萨市堆龙德庆区青藏路 11 号, 779645015@qq.com; 王志祥, 男, 汉族, 1983 年生, 勘查技术与工程专业, 从事钻探工程现场管理及技术研究, 四川省峨眉山市兴隆街 1 号, 182352585@qq.com。

表 1 尼 1 井钻探设备配置

设备名称	型号	主要技术参数	备 注
钻机	HXY-8	钻进深度 3000 m;转速(正)79、146、208、302、220、406、579、842 r/min,(反)77、215 r/min;最大起重 300 kN;立轴行程 1000 mm;动力 192 kW	动力由标准 134 kW 改装到 192 kW,减少高原缺氧动力损失,大大增强了钻进能力和处理事故的能力
钻塔	SG24	塔高 24 m;最大天车负荷 680 kN;立根 18 m;底盘尺寸 6.5 m×6.5 m	此为加强型钻塔,相比常用的 SGZ-23 钻塔更重、更稳定、承受荷载更大
泥浆泵	BW-320	配 60 缸径;流量 66、92、130、180 L/min;对应额定压力 10、9、8、6 MPa;动力 30 kW	选择 60 mm 缸径,相对 80 mm 缸径在流量上更符合小口径地质岩心钻探需要,同时相应的额定压力更大,施工更安全可靠
绳索取心绞车	SJ-2	7.5 kW;2000 m 绕绳容量	配套 6.2 mm 钢芯钢绳,相比麻芯钢绳缠绕性差,但强度更高
柴油发电机组	50 kW	50 kW;风冷;马达启动	为泥浆泵、绳索取心绞车、测录井、办公、照明等供电,满足正常需求
防喷器	SFZ18-21	工作压力 21 MPa;最小通径 180 mm	当出现大量油气显示时,可实现关井工作,为后续处理提供条件。现场油气显示弱,并未使用,但应急演练时,因操作空间狭小,使用专用工具手动关井相对液压防喷器方便性欠佳
液压钳	LH115	适合 PQ、HQA、NQZL 钻杆;工作压力 11 MPa	PQ 钻杆使用效果较好,能最大限度降低劳动强度

需求。另外,50 kW 发电机组同样采用了涡轮增压技术,在机台正常用电情况下能满足施工需求。

该井主要使用了 PQ、HQA 和 NQZL 钻杆,HQA 钻杆是在普通 HQ 钻杆基础上对两端进行镦粗加强处理,NQZL 钻杆相对 NQ 钻杆是对整根钻杆进行了加粗,同时设置负角螺纹,大大增加了强度,实际表现良好。在尼 1 井施工中,整个钻杆配套通过了高扭矩和强力起拔的严峻考验,仅出现过 1 次 NQZL 钻杆脱扣事故。现阶段已有国产 SQ 绳索取心钻杆问世,若引进多规格的绳索取心钻具,则能在很大程度上降低钻探风险。同时,我们将大口径的绳索取心钻杆当作套管使用,强度远远大于同级配的套管,在某些扩径严重井段避免了出现断套管的风险。

海拔 5000 m 施工区,高强度的体力劳动受限很大。项目 2016 年 5 月进场,采用挖机修路,冻土还

没有完全解冻,雨季也未来临,设备能够比较顺利地进入施工现场。SG24 型钻塔因太重,全靠人力基本无法完成安装,为此租赁了吊车协助。中期施工进入雨季时,大范围翻浆路面出现,陷车频繁,因此尽量较少使用重车的频率,提前备足材料物资。本项目主要靠 2 台皮卡车解决后勤保障问题,并相互救援。11 月施工结束,地表已经结冻,大型设备撤场也变得相对容易很多。所以,在高海拔地区施工需要充分利用好气候的变化,扬长避短才能更好地确保项目的顺利完成。

3 井身结构及地层情况

尼 1 井井身结构根据钻遇地层实际情况做了局部调整,整体上与设计较为吻合,为顺利施工奠定了基础。设计井身结构及实际井身结构见表 2 所示。

表 2 尼 1 井井身结构

开次	井径/mm	设计井深/m	实际井深/m	套管规格/mm	套管下深/m	备 注
一开	170	0~10	0~9.41	168	9.41	
二开	150	10~100	9.41~88.90	146	88.90	HQA 钻杆配 Ø150 mm 钻具
三开	122	100~800	88.90~561.39	114	561.39	PQ 钻杆
四开	96	800~1600	561.39~1568.70	89	1568.70	HQA 钻杆
五开	76	1600~2000	1568.70~2001.10			NQZL 钻杆(负角螺纹)

尼 1 井除 0~74 m 为表土层外,整井主要钻遇地层砾岩、砂岩、泥岩,交替出现。其中在钻至 396.22 m 处出现全井漏失,常规堵漏无效,顶漏钻进;井深 1150~1560 m 地层极不稳定,持续出现构造破碎带,夹断层泥,井内缩径严重,反复出现憋泵、卡钻等情况。

尼 1 井钻井情况分段描述见图 1。

4 取心工艺及冲洗液护壁

尼 1 井的一开、二开采用单管硬质合金/复合片钻进取心,三开、四开、五开采用 Q 系列金刚石绳索取心钻进工艺,配套 PQ、HQA、NQZL 绳索钻杆。钻进施工时选择合理的钻进参数和操作技术,严格控制钻压,为最大限度保证岩心采取率和井身防斜提供了保障,结果也完全满足地质设计要求。

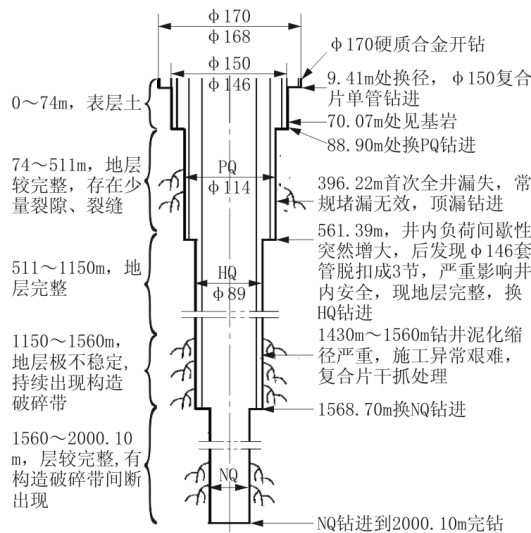


图1 尼1井钻井情况分段描述

冲洗液及护壁选择优先次序为:无固相冲洗液—低固相冲洗液—胶凝泥浆或水泥固井—下套管护孔,简单地层优先采用简单配方,特别注意泥浆固相含量的控制,力求方便现场泥浆维护,同时也能节约成本开支。

表土层、冻土层采用:清水+5%~10%SH植物胶+100~150ppm PHP+1‰~3‰NaOH。主要参数为:密度1.02~1.04 g/cm³;粘度26~28 s。

基岩完整地层采用:清水+100~150ppm PHP+2%~4%SH植物胶+2%~5%高效润滑剂。主要参数为:密度1.03~1.05 g/cm³,漏斗粘度24~26 s。

膨胀缩径、破碎垮塌地层采用:清水+4%~6%钠土+1%CMC+5%~10%SH植物胶+2%~5%K3防塌剂+5‰火碱+2%~5%广谱护壁剂+1%腐植酸钾+液态T型润滑防卡剂。主要参数为:密度1.04~1.07 g/cm³,漏斗粘度26~32 s。

在实际钻井过程中,以上3种泥浆都起到了较好的作用,达到了预期效果。当施工中岩心出现较大井段破碎或者夹有大量遇水软化泥岩时,往往伴随井内负荷加大和钻杆不易下放到位等现象,此时应立即停钻,以防止井内地层情况继续恶化。同时清理泥浆池,捞除沉淀岩粉,调整泥浆配方,重新配浆或在原浆基础上新加入材料重新搅拌,改良泥浆性能,由技术人员测量并作具体指导。然后利用足够的时间冲孔循环,使井内井外泥浆性能达到一致后,再恢复钻进,以适应掉块、垮塌、缩径等复杂地层。

5 复杂地层钻探施工实践

5.1 漏失地层的施工实践

PQ钻进至396.22 m处首次出现漏失,在泥浆中加入适量的801/803堵漏剂随钻堵漏,以及采用803堵漏剂+粘土粉+重晶石粉+广谱护壁剂泥球捅孔等方法反复堵漏,效果不理想。后放弃堵漏,直接采用顶漏钻进到561.39 m,发现φ146 mm套管脱扣成3节,出现间歇性井内负荷突然增大,已严重影响钻进施工安全,同时考虑到现阶段地层已足够完整,于是下套管隔离漏失带及脱扣套管并换径。

5.2 膨胀缩径、破碎垮塌地层的施工实践

根据1430.00~1560.00 m井段岩心分析,该地层有破碎及遇水膨胀缩径特征,导致该井段施工异常艰难,反复扫孔。在尽力调节泥浆性能并多次反复冲孔、扫孔并无明显效果后,采用无泵+复合片钻头干抓的方法,通过多次努力,最终穿过该复杂井段,后继续钻进至1568.70 m处下套管隔离复杂井段。

仔细观察该井段岩心会发现存在很多微裂隙,当取该段柱状岩心用泥浆或清水做浸泡实验时,短时间内就会坍塌成松散状,此现象在清水中的速度比在泥浆更快。因此,该类地层在钻进成井后泥浆浸泡,以及近1500 m上覆岩层巨大压力的双重作用下,更易造成岩层脱落,钻井缩径垮塌。在该段地层施工时,不断降低泥浆失水率、加大泥浆密度以及调制钙处理粗分散泥浆应对都没有完全克服该现象,可见地层应力释放的迫切性。部分缩径垮塌井段岩心照片见图2。

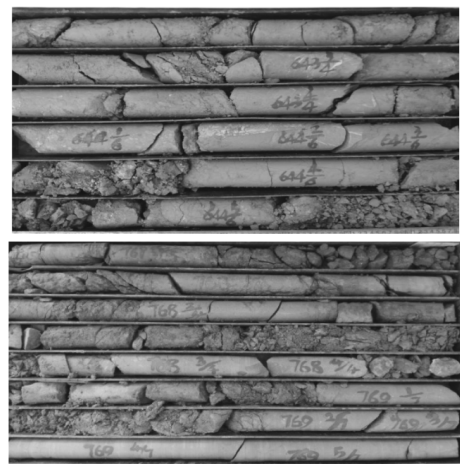


图2 部分缩径垮塌井段岩心照片

同时,测井数据可以看出,钻井的主要施工口径

HQ,其钻头外径96 mm,而测井显示最大井径为337.10 mm,最小井径为93.30 mm,平均井径为102.62 mm,井眼扩大率为6.90%,由此可见,此类沉积岩地层在钻井施工时孔壁的极不稳定性。

6 钻井技术指标及质量评述

尼1井于2016年6月20日开钻,10月23日施工结束,历时126 d,台效476 m。其中处理1430.00~1560.00 m复杂井段花费了25 d,效率因此降低。

尼1井设计井深2000 m,实际施工2001.10 m,采取岩心总长1929.18 m,岩心平均取心率96.41%,符合设计85%要求。井身孔斜在终孔位置达到最大,其顶角 3.2° ,方位角为 290° ,顶角平均变化率为 $0.16^{\circ}/100\text{ m}$,远优于设计要求的 $2^{\circ}/100\text{ m}$ 。同时简易水文观测、原始班报表记录详细准确;井深校正和封孔符合要求。最终该井综合评价为优秀。

7 结语

(1)尼1井工程施工完成了设计的各项目任务,且各项质量指标优良。此井已成为迄今为止西藏自治区小口径地质岩心钻探的最深记录,为该地区实施类似油气勘探施工积累了经验。

(2)通常情况下一开、二开套管的主要作用是隔离井口及表层软土层,应尽量置于坚硬完整地层上,但尼玛盆地沉积岩强度低,在后期钻杆不断扰动,上部覆土软层包裹造成套管脚不断悬空的共同作用下,可能会导致套管脱扣,给施工带来很大困难。故建议采用石油钻井中常用的水泥固井,以解决表层套管不稳的情况。

(3)尽量配齐NQ、HQ、PQ、SQ等口径的绳索取

心钻具,充分利用绳索取心工艺的高效性,同时可最大限度地降低单径平均进尺,能预留足够的风险控制口径,在井内异常时可果断下套管,节约宝贵的处理时间,对单年内冰冻期来临前施工超2000 m取心钻井的成功率将进一步提高。

(4)对于钻井深部地段的膨胀缩径、破碎垮塌地层的施工,应仔细分析观察岩心节理裂隙发育及结构特征,必要时进行浸泡实验,反复调节泥浆性能,从而提高施工效率。

(5)西藏地理条件特殊,气候恶劣,同时环保、林业等手续复杂,尽可能地将准备工作提前完成,做到早日进场,为施工预留足够的时间也是切实而重要的。

参考文献:

- [1] 张金昌,刘秀美.13000 m科学超深井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):1-6.
- [2] 李之军,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)断层泥孔段泥浆体系的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(12):13-15,19.
- [3] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):1-3,9.
- [4] 翟育峰,王鲁朝,丁昌盛,等.西藏罗布莎科学钻孔冲洗液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(4):1-4.
- [5] 张统得,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探项目钻井液技术与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):139-142.
- [6] 孙建华,王林钢,梁健,等.深孔小直径绳索取心钻进施工调研分析和技建议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):12-17.
- [7] 张丽君,彭莉,吕红军.深孔绳索取心钻杆质量控制措施[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):33-36.
- [8] DZ/T 0227—2010,地质岩心钻探规程[S].

涪陵页岩气田深层气井酸处理技术研究

张 驰

(中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408014)

摘要:涪陵页岩气田进入二期产建阶段,页岩气井埋深增加,压裂改造难度增大,尤其是在设备限压仅为93 MPa的前提下,深井施工压力高,酸降效果不明显,严重限制了后期各项改造措施的执行。通过分析深层页岩气井酸降效果降低的主要原因,并在此基础上通过室内及现场试验研究了影响酸处理效果的主要因素,试验表明:提高酸处理排量、增加酸液浓度、合理优化酸液用量将有助于提高酸处理效果,为涪陵页岩气田深层页岩气井后续的压裂施工提出了优化建议。

关键词:深层页岩气井;压裂改造;酸处理;酸处理排量;酸液浓度;酸液用量;涪陵页岩气田

中图分类号:TE37 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)12-0030-04

Discussion on Acid Treatment Technology of Deep Well Fracturing in Fuling Shale Gas Field/ZHANG Chi (Sinopec Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chongqing 408014, China)

Abstract: In the second production phase of Fuling shale gas field, the difficulties in fracturing treatment came along with the increasing buried depth, especially under the condition of only 93MPa limited pressure for equipments, acid reducing effect was not obvious in high pressure in deep well construction, which severely restricted the implementation of the later fracturing measures. By the analysis on the main causes of unsatisfactory acid reducing effect, the main factors affecting the acid treatment effect are studied through indoor and field tests on this basis. The tests show that the increase of acid treatment displacement, the increase of acid concentration and reasonable optimizing the amount of acid are helpful to improve the acid treatment effect. The optimization suggestions are put forward, which has important significance to the later fracturing construction of deep shale gas well in Fuling shale gas field.

Key words: deep shale gas well; fracturing; acid treatment; acid treatment displacement; acid concentration; acid dosage; Fuling shale gas field

0 引言

随着涪陵页岩气田二期区块埋深不断增加,页岩气井压裂改造难度也随之增大。目前涪陵页岩气田深层页岩气井借鉴浅井经验,采用前置 20 m^3 浓度为15%的盐酸以 $2\text{ m}^3/\text{min}$ 的排量处理地层来降低施工压力,但效果有限^[1]。针对深层页岩气井酸处理效果不佳的难题,调研分析了深层酸处理效果变差的原因,通过现场试验研究了影响现场酸处理效果的各项因素,探讨了针对深层页岩采用优化酸液配方、提高酸液浓度、提高酸处理排量、优化用量各项措施提高酸处理效果的可行性,为不断提升涪陵页岩气田深层气井前期酸处理效果,改善93 MPa限压下深层压裂改造效果明确了后期研究攻关方向。

1 深层酸处理不利条件分析

涪陵页岩气田深层页岩气井采用浅层页岩气井酸处理工艺出现酸降效果差、难以形成足够的压力窗口开展各项工艺措施的问题。通过调研分析认为以下几点不利因素则可能严重影响了深层酸处理的效果。

1.1 深层温度升高

由于涪陵页岩气田碳酸盐岩含量较高,一般采用盐酸进行前置预处理,降低岩石强度,为后期提供足够的压力窗口。但是随着页岩气井埋深的增加,地层温度逐渐升高,盐酸与碳酸盐的反应速率大幅加快^[2-4],酸液难以穿透到更深的地层,处理范围有限,不利于深层后续压裂施工。

1.2 深层压力升高

收稿日期:2017-06-18;修回日期:2017-10-11

基金项目:国家科技重大专项“涪陵页岩气开发示范工程”(编号:2016ZX05060)

作者简介:张驰,男,汉族,1989年生,硕士,油气田开发工程专业,主要从事页岩气勘探开发工程工艺方面的研究工作,重庆市涪陵区焦市镇, zcunstopable1@163.com。

埋深的增加还会造成压力的升高,有室内试验表明,虽然随着压力的升高,盐酸与碳酸盐岩的反应速率会逐渐减缓,但是在深层高温高压共同作用的条件下,酸岩反应速率还是主要受到温度的影响,远大于埋深较浅的低温低压条件下的反应速率^[5-6],酸处理范围受限。

1.3 矿物组分发生变化

涪陵页岩气田随着埋深的增加,部分气井的岩石矿物组分发生变化:通过常规测井结果可以看出,矿物组分中泥质含量明显增多(见表1);由于盐酸酸液体系仅能处理碳酸盐岩,无法处理泥质组分(粘土矿物),因此,涪陵页岩气田部分深层气井会由于泥质含量的增多而导致原有的盐酸酸液体系效果降低。

表1 涪陵页岩气田深浅井泥质含量对比 %

类型	井号	③小层 SH		①小层 SH	
		最大值	平均值	最大值	平均值
浅层	JYD-1HF	27.94	16.49	37.68	15.16
	JYE-3HF	39.11	26.71	72.19	29.80
	JYE-4HF	31.94	19.72	37.14	17.53
综合平均		20.97		20.83	
深层	JYA-2HF	53.45	29.16	45.02	26.48

1.4 深层缝宽减小

深层页岩气井地层压力增大,地层压实作用增强,裂缝扩展困难,缝宽相比于浅层明显变窄,室内试验表明:裂缝缝宽与反应速率成一定的反比关系^[7-8](见图1);因此,在深层压裂过程中若酸处理排量较低,由于酸液流经的裂缝缝宽不足,酸液反应速率较快,只能处理较小范围的地层,不利于酸液处理远端裂缝。

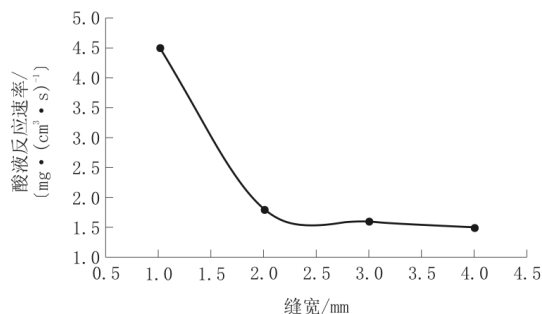


图1 缝宽对酸岩反应速率影响

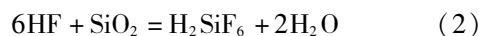
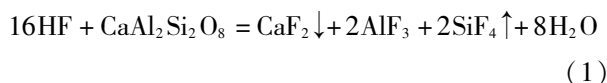
2 深层酸处理技术对策

针对浅层页岩气井,酸处理的目的是清理炮眼及近井污染,在形成快速酸降后可以快速提高

施工排量进行压裂施工,较低的裂缝延伸压力也保证了裂缝在高排量泵压下的延伸;但对于深层页岩气井,酸处理的目的不仅仅是清理炮眼及近井污染,更重要的是处理更大范围的地层,降低深层岩石的破压,确保在限压条件下裂缝更好地起裂、延伸。因此,对于深层页岩的酸处理,应当在保证酸蚀作用的基础上,延缓酸岩反应时间,尽量扩大酸处理范围。主要考虑从以下几个方面进行调整。

2.1 优化酸液体系配方

部分深层页岩气井粘土矿物成分增多,使用盐酸处理效果不佳,而有研究表明采用盐酸+土酸的酸液体系作用于粘土矿物含量较高的地层时,盐酸反应速率较快优先与碳酸盐岩反应,随后土酸中的HF处理粘土矿物,可有效降低岩石强度^[9],提高酸蚀效果(见式1、式2):



将涪陵页岩气田深层气井岩心进行室内试验,试验结果表明:岩心粘土矿物含量增多,采用盐酸+土酸酸液体系对岩心的溶蚀效果相比于单纯使用盐酸明显增强(见表2)。

表2 不同酸液体系溶蚀率试验结果 %

层位	15% HCl	15% HCl + 1.5% HF
①	8.2	17.8
④	16.5	34.2
④	16.4	38.6
⑤	8.4	20.1
⑥	11.6	24.4
⑦	10.6	22.3
⑧	9.0	22.2
⑨	15.5	18.5

2.2 提高酸处理排量

提高酸处理排量使地层中酸液流速更快,虽然会加快酸盐反应速率,但由于在高流速下酸液可以更快达到较远区域,因此,酸液穿透距离也随之增加^[10-12],室内试验也表现出相同的现象(见图2)。涪陵页岩气田深层气井现阶段主要采用2 m³/min的排量进行酸处理,排量明显较低,存在继续优化的空间。

但在现场压裂施工中,施工排量直接影响到压裂的施工压力,在深井压力窗口有限的前提下,也必须对施工排量严格限制,避免超过限压。因此,

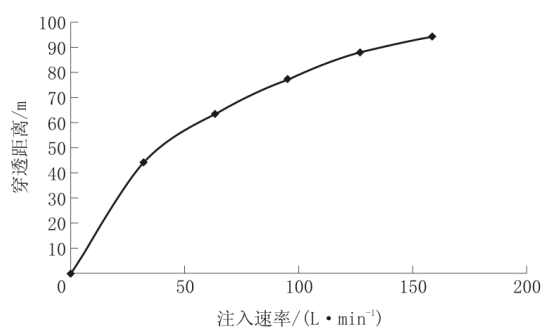


图2 酸液注入速率对穿透距离的影响

在现场实际施工中,应根据实时泵压调整酸处理排量。

2.3 提高酸液浓度

现阶段涪陵页岩气田主要采用15%的盐酸前置处理,室内试验结果显示在温度、压力一定的条件下,15% HCl 酸盐反应速率最快(见图3),对于浅层页岩气井使用该浓度盐酸可以较快反应形成压降便于提高施工排量,但对于深层页岩气井来说,应改变酸液浓度,减缓反应速率,考虑到低浓度的盐酸酸蚀作用减弱^[13],因此,考虑提高酸液浓度至20%。室内岩心试验结果也表明,使用20%浓度的盐酸相比于15%的盐酸反应速率更慢,穿透深度也随之增加(见表3)。

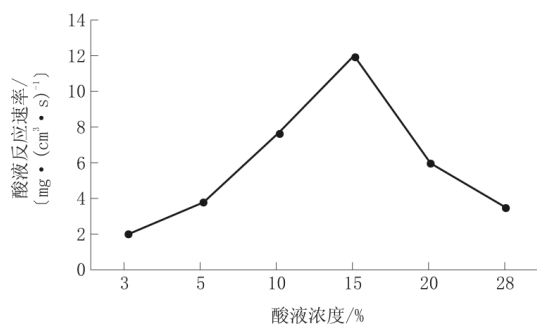


图3 不同酸液浓度酸盐反应速率

表3 不同浓度酸液穿透能力对比

酸液浓度/ %	37℃穿透 深度/m	71℃穿透 深度/m	104℃穿透 深度/m
15	36.3	26.7	24.2
20	44.2	41.3	39.8

2.4 优化酸液用量

有室内试验显示,酸液用量的增多可以提高酸液处理后残酸的浓度,可以增大酸液处理的距离^[14]。目前,涪陵页岩气田深层气井仍然主要采用前置20 m³的盐酸预处理的工艺,效果有限,因此,在室内试验的基础上考虑通过增大酸液用量,提高

酸处理效果;但酸液液量也并非越多越好,有研究表明酸液过多会导致滤失增加,不利于后期开展加砂压裂^[15-17]。因此,结合前期浅层气井施工经验,在深层增加酸液用量至40 m³,改善酸处理效果。

3 现场试验效果

针对深井开展了多井次的酸液现场试验,进一步分析对比各项调整措施在提高深层酸处理效果中的适用性。

3.1 “盐酸+土酸”体系试验

焦石坝区块JYA-1HF井第15、17段同穿行于⑥小层,两段垂深相近(3700~3800 m),射孔处石英含量45.25%,碳酸盐岩含量8.42%,粘土总量达到42.35%。酸处理排量均为2 m³/min,但第15段采用20 m³的15%盐酸体系,第17段采用20 m³的15%盐酸+1.5%土酸体系。从压裂施工来看,使用盐酸+土酸的酸液体系的第17段酸降压力达到16.8 MPa,明显高于使用盐酸体系第15段的9.8 MPa,为后期提高施工排量创造了更好的条件。

焦石坝区块JYB-3HF井前8段同穿行于③小层,各段垂深相近(3900~4000 m),射孔处石英含量53.43%,碳酸盐岩含量14.48%,粘土总量31.43%。酸处理排量为2 m³/min,第4段、第5段采用前置40 m³的15%盐酸+1.5%土酸体系,其余段前置30 m³的15%盐酸体系,从施工结果来看,在粘土含量相对较少的井段采用溶蚀效果更强的盐酸+土酸体系酸降效果相比于盐酸处理的压裂段并未有明显优势(见图4)。

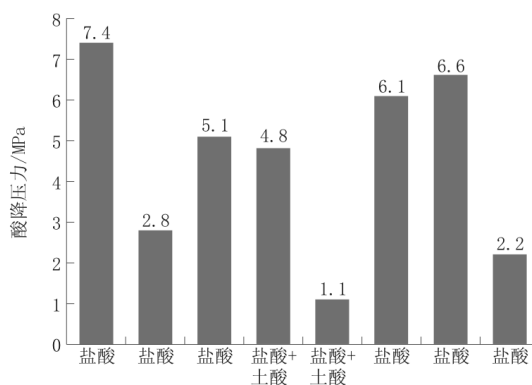


图4 JYB-3HF井不同酸液体系酸降压力对比

3.2 酸处理排量变化试验

对比分析了涪陵页岩气田平桥区块矿物组分含量相近的各井,在穿行相同小层、采用20 m³15%盐

酸体系的压裂段对比不同排量下的酸降效果,对比发现各井最终的酸降压力与气井的垂深并无明显相关性,而与酸处理排量呈现出一定的正相关关系(见图 5)。从现场试验结果来看,提高酸处理排量将有助于提高酸降压力。

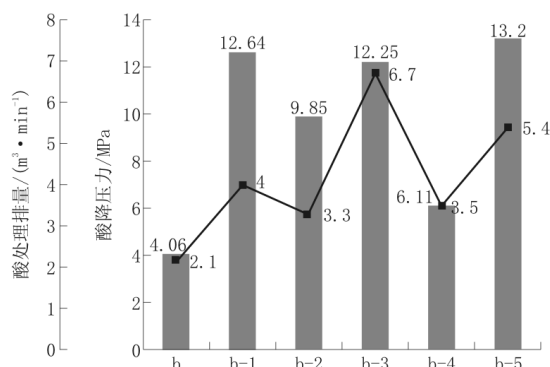


图 5 平桥区块各井相同小层不同酸处理排量酸降压力对比

3.3 盐酸浓度变化试验

在焦石坝区块西南区进行 15% 与 20% 盐酸效果对比试验,在地质条件相近、垂深相近的临井对比相同穿行小层、相同排量、用量条件下,不同盐酸浓度取得的酸降效果。对比结果显示采用 20% 浓度盐酸的压裂井段短期内酸降压力明显低于采用 15% 盐酸浓度的压裂井段,但在泵酸压力相当的情况下,使用 20% 浓度盐酸后,其破裂压力相比较与 15% 浓度的盐酸明显更低,分析认为提高酸液浓度至 20%,短期反应速率低于 15% 的盐酸,酸降压力相对较低,但由于残酸浓度较高,处理了更大的范围,提高排量时地层破裂明显降低。

表 4 不同酸液浓度现场试验对比结果

盐酸浓度/%	井号	穿行小层	酸量/m³	酸降压/MPa	酸处理排量/(m³·min⁻¹)	破裂压力/MPa
20	JYB-1HF	③	20	18.25	2.1	66.38
			20	8.84	2.6	63.23
			20	10.48	2.6	72.40
			20	9.27	2.1	72.95
	JYB-2HF	③	20	15.40	2.6	66.06
			20	9.13	2.7	71.07
15	JYC-1HF	③	20	13.89	2.0	83.97
			20	30.42	2.1	79.71
			20	41.26	2.0	85.05
			20	23.47	2.2	74.47
	JYC-3HF	③	20	39.84	2.0	85.79
			20	22.97	2.0	83.35
			20	26.70	2.0	80.04
			20	32.55	2.0	85.23
				29.96	2.0~2.5	84.75

3.4 盐酸用量变化试验

焦石坝区块 JYC-2HF 井埋深达到 3900~4000 m,在施工井段矿物组分差异不大、穿行小层相同的前提下,对比分析了采用 15% 盐酸、2 m³/min 排量下,不同酸液用量的酸降效果(见表 5),通过对比结果可以看出,酸液用量的增多并不能带来酸降压力的提高。分析认为,深层酸液用量更多受到地层中天然裂缝滤失作用的影响,酸液用量的增多,若滤失严重,并不能增大处理地层的酸液量。而具体单段酸处理前天然裂缝发育情况目前通过常用的曲率评价方法难以精确评定,这也是现场合理优化酸液用量的一大难点。

表 5 不同酸液用量现场试验对比结果

酸液用量/m³	酸前压力/MPa	酸后压力/MPa	酸降压力/MPa	酸处理排量/(m³·min⁻¹)
20	93.82	86.16	7.66	2
20	71.70	67.30	4.40	2
36	90.30	71.50	18.8	2
40	88.65	75.75	12.9	2

4 结论与认识

(1) 针对涪陵页岩气田深层页岩气井,通过试验调研以及现场试验对比可以发现,针对粘土含量较高的(>40%)井段,采用“盐酸+土酸”的前置酸液处理酸降效果明显好于采用盐酸前置处理的井段;但在粘土含量不高的井段使用“盐酸+土酸”体系,在成本增加的基础上,酸降效果并无明显优势。

(2) 提高前置阶段酸处理排量将有助于提高前期酸降效果,为后期大排量施工打好基础。但涪陵页岩气田深层页岩气井施工压力高,在限压控制在 93 MPa 的前提下,无法大幅提高酸处理排量,现场施工应根据实际压力窗口,在安全合理的条件下尽可能保证酸处理的排量,增大酸液处理范围。

(3) 在涪陵深层页岩气井使用 20% 浓度的盐酸短期内酸降效果并不如 15% 浓度的盐酸,但从随后施工来看,在泵酸压力相当的情况下,使用 20% 浓度盐酸的破裂压力明显低于 15% 浓度的盐酸。

(4) 从试验对比结果来看,对于涪陵深层页岩气井提高酸液用量效果并不明显,酸液的滤失作用可能是主要的影响因素;如何精确判断各压裂段

(下转第 58 页)

平桥南区页岩气水平井钻井优化设计

龙志平¹, 王彦祺¹, 周玉仓¹, 贺庆¹, 刘广庆²

(1. 中国石化华东油气分公司石油工程技术研究院, 江苏 南京 210031; 2. 华东石油技师学院, 江苏 扬州 225129)

摘要:在分析平桥产建井位部署特点及区块地质条件的基础上,系统总结了该区块页岩气水平井钻井存在的防漏堵漏工艺、钻井提速技术、水平段施工工艺等方面存在的问题,通过对平台部署、井身结构、井眼轨道、“井工厂”钻井模式、钻头选型、钻井液体系及固井工艺等方面的深入研究和优化,形成了平桥南区块页岩气水平井钻井优化设计方案,以实现平桥南区页岩气产建的高效开发。

关键词:页岩气;水平井;平台;轨道设计;井工厂;防漏堵漏

中图分类号:TE243⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)12-0034-04

Drilling Optimization Design of Shale Gas Horizontal Well in South Block of Pingqiao/LONG Zhi-ping¹, WANG Yan-qi¹, ZHOU Yu-cang¹, HE Qing¹, LIU Guang-qing² (1. Petroleum Engineering Technology Research Institution of East China Company of Sinopec Corp., Nanjing Jiangsu 210031, China; 2. Huadong Petroleum Technician College, Yangzhou Jiangsu 225129, China)

Abstract: Nanchuan Pingqiao shale gas block is another productivity construction block after Fuling shale gas field of Sinopec in southeastern Sichuan basin. On the basis of analyzing the characteristics of the well deployment and geological conditions of this block, the leakage prevention and plugging technology, ROP increasing method, horizontal section drilling construction technology and some other problems in this shale gas block are summarized. Through the further study and optimization of platform deployment, wellbore structure, borehole trajectory, "wells factory" drilling model, drill bit selection, drilling fluid system, cementing technology and so on, an optimization design scheme of shale gas horizontal well drilling for the south block of Pingqiao is formed to realize the efficient development of shale gas productivity construction in south block of Pingqiao.

Key words: shale gas; horizontal well; platform; borehole trajectory design; wells factory; leakage protection and plugging

1 地层特点及技术难点

平桥南区位于涪陵页岩气田一期产建区的西南部,区块地层自上而下依次为:雷口坡组、嘉陵江组、飞仙关组、长兴组、龙潭组、茅口组、栖霞组、梁山组、黄龙组、韩家店组、小河坝组、龙马溪组、五峰组等^[1-4]。地表出露主要为下三叠统的嘉陵江组,主要钻井完井难点包括以下几个方面。

(1) 钻井井场选址困难,平台建设成本高。平桥地区地表出露为嘉陵江组灰岩地层,属喀斯特地貌,山体沟壑较多。在该区域没有大面积的平整场地可供钻井使用,只有在规定的范围内选择相对平缓的场地开山后作为井场及生活营地使用,钻前费用较高。

(2) 目的层加深,地质条件复杂,钻井安全与提速对技术要求更加苛刻。相比涪陵一期,平桥南区页岩气水平井目的层埋深更深,平均埋深达到了3300 m,最大埋深超过4000 m。同时发育北东向逆

断层,多集中在背斜东西两翼,东翼断裂结构较西翼更复杂,地层裂缝较发育,钻井过程中发生井壁失稳及漏失的风险可能性较大。

(3) 丛式水平井组三维井眼轨道设计与轨迹控制难度大。受井场选址和大小的限制,平桥南区通常采用丛式井组部署,相比常规单水平井,具有大偏移距和大靶前位移的特点。同时,焦页8HF井实钻表明页岩气层上部标志层“浊积砂”不明显,进一步加大了水平井轨迹预测、控制和调整的难度。

(4) 二叠系龙潭组、茅口组,志留系韩家店、小河坝组地层可钻性差异大,PDC钻头适应性差,机械钻速低,钻头选型难,影响了单只钻头进尺和钻井进度。

(5) 水平井固井难度大。平桥南页岩气区块处于典型的喀斯特地貌区,地层裂隙、缝洞发育,承压能力低且漏失与气窜并存,同时需要满足后期大型压裂的需求,固井质量难以保证。

收稿日期:2017-06-10; 修回日期:2017-07-02

作者简介:龙志平,男,汉族,1986年生,助理研究员,工程硕士,石油工程专业,主要从事非常规油气钻井工程工艺技术研究工作,江苏省南京市浦口区新马路182号, longzhpaha@126.com。

2 钻井设计优化方案

2.1 丛式井位部署优化

前期勘探阶段钻井主要以单平台布井方式为主,存在钻前工程难度大、成本高等问题。在开发阶段,采用丛式井组部署,可平摊公共成本,实现单井降本。为进一步实现整体开发降本,首先需要在丛式井井位部署方面进行优化。

通常页岩气水平井钻井井眼方位是沿着最小水平主应力方向钻进的,这样更有利于增加压裂改造体积,提高产量。在水平段长度方面,根据涪陵一期的经验,要平衡钻井施工难度与最大产气量的关系,水平段长在1500~1800 m时最为合理^[2]。以井距500 m为例,提出了3种布井方案(以6井式为例):(1)常规型布井方式,每个平台钻6口井,中间井靶前距为350 m;(2)交叉型布井方式,每个平台钻6口井,中间井靶前距为750 m;(3)鱼钩型布井方式,每个平台钻6口井,中间井靶前距 ≥ 200 m。布井示意图见图1所示。

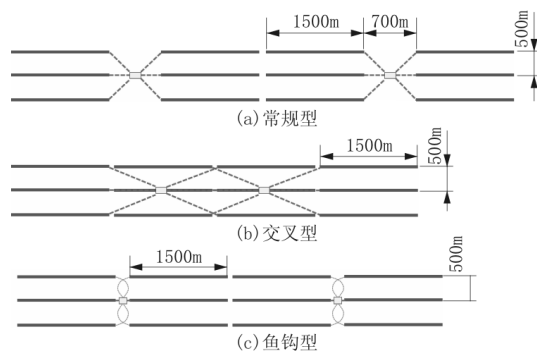


图1 布井方式示意图

对不同布井方式靶前距、平均钻井进尺、造斜段长等方面参数进行对比分析,结果见表1。

表1 不同布井方式对比分析

井型	平均钻进 进尺/m	靶前距/ m	造斜段 长/m	扭方位/ (°)	最大滑动 摩阻/kN
常规型	5084	350~610	892	78	186.0
交叉型	5131	750~1000	1230	42	168.0
鱼钩型	5102	150~350	1308	119	246.5

由表2可知,3种布井方式平均井深略有差距,可以通过调整造斜点井深来优化进尺。但是从扭方位角度和定向段长对比来看,鱼钩型井型工作量最大,且最大摩阻相比其他两类轨道增加39%左右。但常规型布井方式存在靶前距范围地层不能充分利用的弊端,综合钻井成本以及钻井施工难度等方面

考虑,平桥地区宜采用交叉型布井方式,对于平台选择难度大的井,可适当采用鱼钩型布井方式。

2.2 平台井型优化设计

在布井较少区域,构造落实程度较低,为了尽可能降低由于地层不确定性给钻井带来的难度,在钻水平井前通常选择合适的井作为基准井,对其测、录井项目进行补充和优化,提高对地层的认识,实现对平桥构造主体页岩气分布的整体控制。

2.2.1 实施导眼井

导眼井通常设计采用二级井身结构,完井方式为双井径裸眼方式,即二开采用 $\varnothing 311.2$ mm与 $\varnothing 215.9$ mm复合井眼,以增强井漏预防能力和降低钻井成本。一开与水平井一开设计原则相同,水平井二开则在 $\varnothing 311.2$ mm井眼内侧钻,完成二开及三开作业施工。导眼井的实施,能够为后期水平井的卡层和水平段轨迹控制提供更加精确的数据。

2.2.2 部署基准井

对于不实施导眼井的平台,优选平台其中一口井作为基准井,但不改变其井身结构。通常平台其他井只需三开井段进行完井组合测井,一开、二开、完井固井井段需进行声放磁测井。而基准井需要额外在一开、二开井段进行标准测井,如有较好气显示,还加测补偿中子测井。这样可以最大限度降低成本的同时,提高地层纵向识别率,为水平段钻进提供更可靠的数据。

2.3 “井工厂”钻井模式优化

平桥南区地处山区,由于地形限制,单平台钻井井数控制在3口及以上,井口间距10 m左右。采用三开井身结构,相同井段钻井方式和钻井液体系一致。可采用“井工厂”钻井模式进行施工,主要流程如下:(1)导管与表层段作业;(2)二开井段作业;(3)三开井段作业;(4)完井作业^[5]。但由于每个平台受井数、井场大小、井型等因素各异的影响,并不能完全按照上述4个流程来执行。为最大限度地减少中完作业、完井作业时间,提高钻井时效,对“井工厂”钻井模式优化如下。

2.3.1 单钻机“井工厂”模式

当平台井位部署呈“一”字型时,推荐采用一部横向移动钻机进行施工。该类移动式钻机能充分利用“井工厂”钻井模式进行交叉、无钻机作业。表套与技套测固井质量、装套管头、油管头只有一口井占用钻机时间,剩余井可进行无钻机作业,不占用钻机

时间。如果在钻机运移条件允许的前提下,可以准备二套防喷器系统,减少每个开次的防喷器安装与试压占用钻机的时间。

2.3.2 双钻机“井工厂”模式

当平台井位部署双排井时,为实现尽快投产的目的,推荐采用两部纵向移动钻机进行施工,以最大限度减少井场占地面积。采用此类钻井模式更能够充分借鉴“学习曲线法”提高速度和效率,主要体现在井队与井队之间、井与井之间的学习和总结。

2.3.3 “钻井-试气”同台作业模式

若为了加快产建进度和对地层的认识,实现当年完成钻井、试气、投产的要求,推荐“钻井-试气”同台作业模式。通常为单排布井方式,推荐采用横向移动钻机,能够为同台压裂试气提供最大的空间,同时能够实现交叉作业。

2.4 井身结构优化

井身结构的优化需要综合考虑多方面的因素,在保证井下安全的情况下一方面要利于提高钻速,另一方面要降低成本。平桥南初期主要为预探水平井,井身结构主要侧重于安全成井,在后期开发阶段,结合前期实钻经验,从井眼尺寸和套管下深方面均进行了优化,具体见表 2。

表 2 平桥南区页岩气井井身结构

井型	开次	前期钻井情况			优化后设计			备 注
		井眼/mm	套管/mm	下深/m	井眼/mm	套管/mm	下深/m	
导眼井	导管	660.4	508.0	120	609.6	473.1	60	优化井眼、套管尺寸
	一开	444.5	339.7	1200	406.4	339.7	800	优化井眼尺寸及下深
	二开	311.1	裸眼		311.1	裸眼		
	三开	215.9	裸眼		215.9	裸眼		
水平井	导管	660.4	508.0	120	609.6	473.1	60	
	一开	444.5	339.7	1200	406.4	339.7	800	
	二开	311.1	244.5	2900	311.1	244.5	2600	优化技术套管下深
	三开	215.9	139.7	5000	215.9	139.7	5000	

井身结构具体优化思路如下。

(1) 导管段:采用 $\varnothing 609.6$ mm 钻头钻至井深 60.00 m,下入 $\varnothing 473.1$ mm 导管。导管段若钻遇溶洞,则钻穿溶洞后进入下部基岩至少 10 m 下导管,平台其他井应根据第 1 口井的情况调整下深。

(2) 表层套管:采用 $\varnothing 406.4$ mm 钻头,以封飞仙关组飞三段及以上地层为原则确定中完深度,下 $\varnothing 339.7$ mm 表层套管。

(3) 技术套管:二开用 $\varnothing 311.2$ mm 钻头,中完井深以进入龙马溪组至少 50 m 为原则,若发生漏失则

以钻穿漏失层为原则,下入 $\varnothing 244.5$ mm 套管固井。

(4) 生产套管:三开使用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头、油基钻井液,完成大斜度井段和水平段钻井作业,下入 $\varnothing 139.7$ mm 套管完井。

2.5 三维井眼轨道优化

平桥南区页岩气水平井采用交叉型和鱼钩型丛式井组部署方式,相比常规丛式平井,具有偏移距大、靶前位移大和井眼防碰难度大的特点^[10-12]。

(1) 偏移距大。对于六井式平台,外侧四口井偏移距达到 300 ~ 700 m,对于四井式平台,各井偏移距在 100 ~ 400 m。偏移距的增大会导致水平井扭方位工作量的大大增加。

(2) 靶前位移大。对于采用交叉型布井方式的井,靶前位移通常在 750 ~ 900 m。较大的靶前位移一方面增加了稳斜段长,另一方面长造斜段导致整个井眼摩阻加大。

(3) 井眼防碰难度大。采用交叉型和鱼钩型布井,不仅要考虑同平台邻井之间直井段的防碰,还需考虑相邻平台各井造斜段和水平井着陆段的防碰。

为解决以上难题,从以下 3 方面优化轨道设计。

(1) 井眼剖面设计。对于二维或者接扭方位 $< 30^\circ$ 的页岩气水平井,采用空间五段制设计剖面即可满足要求,即“直-增-稳-增-平”剖面。对于三维页岩气水平井,扭方位通常 $> 30^\circ$,采用空间六段制设计剖面,即“直-增-稳-扭-变增-平”剖面,设置的第四段为扭方位井段。

(2) 轨道参数设计。造斜点的选择在满足靶点垂深和靶前位移要求的前提下,通常选择二叠系下统以下地层进行定向较为容易,造斜段设计造斜率控制在 $4^\circ \sim 5.5^\circ/30$ m,第一稳斜段井斜角控制在 $26^\circ \sim 40^\circ$,水平段造斜率控制在 $3^\circ/30$ m 以内。

(3) 井眼防碰设计。对于同平台相邻井之间的防碰,在设计阶段首先尽可能避免各井在平面上相交叉,然后再通过错开造斜点深度进行防碰。对于相邻平台井之间的防碰,为避免前后相邻的两井在水平段着陆时发生相碰,如果仅仅通过改变轨道设计参数则不能有效防碰,需要在井网部署时便考虑井眼的防碰。其做法是将前后相邻的两井 A 靶点左右各拉开 30 m 以上,这样在着陆时两井便有 60 m 以上的防碰距离。

2.6 钻头选型优化

平桥区块龙潭组、茅口组地层为含粉砂岩、硅质

条带及燧石团块灰岩地层,PDC 钻头适应性较差。韩家店和小河坝组地层为灰色泥岩和灰色粉砂质泥岩互层,粉砂质含量高,研磨性强,使用 PDC 钻头机械钻速低,单只进尺少。从前期应用情况来看,平桥区块龙潭组、茅口组平均垂厚 249 m,平均消耗 PDC 钻头 3 只,韩家店、小河坝组平均垂厚 1100 m,平均消耗 PDC 钻头 6 只。

综合考虑地层岩性、岩石力学参数,通过平稳切削控制技术、力平衡优化切削结构等研究,对钻头选型进行以下优化。

(1)二叠系龙潭组、茅口组钻头选型。PDC 结构特征:六刀翼、中密度布齿、大后倾角(渐变)、减震托(齿)、复合保径。切削齿要求:外锥段主切削齿采用抗研磨齿,整体可混布。钻具组合:纵向“减震”、钻压稳定加载。本阶段地层以 PDC 钻头为主,采用牙轮钻头过渡,可获取较高的机械钻速。推荐钻头:S1665FGA、MDSi616LBPX、HJT617GL 型等。

(2)志留系韩家店组、小河坝组钻头选型。本段地层需要兼顾定向需求,PDC 选型以提高钻头的稳定性和抗冲击性为主。PDC 结构特征:六刀翼 16 mm(副切)+六刀翼 13 mm(单排+减震)的 PDC 序列。钻具组合:减少扭矩波动或防粘滑。推荐钻头:MDSi616LMEBPX、KPM1633DST、U516M 型等。

2.7 钻井液及固井工艺优化

2.7.1 钻井液工艺优化设计

为快速钻穿浅层大漏失层,降低泥浆成本消耗,优化一开、二开直井段采用清水钻进,二开造斜段采用 KCl 聚合物润滑钻井液体系钻进,三开井段采用油基钻井液钻进^[13-14]。同时采用“井工厂”钻井模式,当批量施工同一井段时,钻井液可以重复利用。尤其是三开井段钻进过程中,油基钻井液的重复利用能够大大降低油基钻井液的使用成本,同时降低对环境的污染。

2.7.2 固井工艺优化设计

对于表层和技术套管固井,采用泡沫水泥固井技术,可有效避免固井井漏和预防环空带压。为了满足后期大型分段压裂需要,生产套管固井采用双凝双密度水泥浆柱结构,领浆采用低密度水泥浆,尾浆采用弹性防气窜水泥浆^[15-16]。为有效清除井内环空壁上残留的油基钻井液,优化采用三级油基冲洗工艺,并使用清水和水基钻井液进行水泥浆的顶替,降低后期通探洗作业成本。

3 结论及建议

(1)合理的井位部署和井型优化对于地处山地区域的页岩气区块实现降本开发至关重要,交叉型和鱼钩型布井方式可作为平桥南区页岩气开发阶段的布井方式。

(2)单钻机、双钻机、“钻井-试气”同台作业三类钻井模式丰富了“井工厂”钻井模式,可最大限度地减少中完作业及各工种辅助时间,提高钻井时效。

(3)针对页岩气丛式水平井井眼轨道偏移距大、靶前位移大和井眼防碰难度大等特点,优化了轨道设计参数,形成了三维六段制剖面设计和相邻平台井之间的防碰等技术方案。

(4)建议开展韩家店、小河坝、龙马溪组等地层钻井及固井过程中防漏堵漏技术的研究,以实现平桥页岩气的高效开发。

参考文献:

- [1] 周贤海. 涪陵焦石坝区块页岩气水平井钻井完井技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 26-30.
- [2] 艾军, 张金成, 臧艳彬, 等. 涪陵页岩气田钻井技术难点[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 9-15.
- [3] 黎红胜, 汪海阁, 纪国栋, 等. 美国页岩气勘探开发关键技术[J]. 石油机械, 2011, 39(9): 78-83.
- [4] 臧艳彬, 白彬珍, 李新芝, 等. 四川盆地及周缘页岩气水平井钻井面临的挑战与技术对策[J]. 探矿工程, 2014, 45(5): 21-24.
- [5] 张金成, 孙连忠, 王甲昌, 等. “井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 20-25.
- [6] 龙志平, 王彦祺, 周玉仓. 涪陵 1HF 页岩气井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 16-21.
- [7] 姜政华, 童胜宝, 丁锦鹤. 彭页 HF-1 页岩气水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 28-31.
- [8] 马庆涛, 葛鹏飞, 王晓宇, 等. 涪陵 HF-1 页岩气水平井钻井关键技术[J]. 石油机械, 2013, 41(8): 107-110.
- [9] 袁明进, 王彦祺. 彭水区块页岩气水平井钻井技术方案优化探讨[J]. 钻采工艺, 2015, 38(5): 28-31.
- [10] 祁宏军, 闫振来, 唐志军, 等. 金平 1 井长水平段水平井的设计与施工[J]. 中外能源, 2010, 15(2): 56-57.
- [11] 何树山, 岳发辉, 周明信. 大港油田大位移钻井技术研究与实践[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(2): 105-106.
- [12] 陈作, 曹红军. 水平井造斜段待钻井眼轨迹设计及应用[J]. 天然气工业, 1998, 12(4): 52-54.
- [13] 杨力. 彭水区块页岩气水平井防漏堵漏技术探讨[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 16-20.
- [14] 李雄, 王显光, 林永学, 等. 彭页 2HF 井油基钻井液技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 40-43.
- [15] 刘伟, 陶谦, 丁士东. 页岩气水平井固井技术难点分析与对策[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(34): 40-43.
- [16] 冯大鹏, 崔璟, 童胜宝. 彭水页岩气水平井固井工艺技术[J]. 钻采工艺, 2014, 37(6): 21-23.

新疆吉木萨尔县准页 4 井钻探施工技术

熊虎林, 张 飞

(新疆地质矿产勘查开发局第九地质大队, 新疆 乌鲁木齐 830009)

摘要:以新疆吉木萨尔县准页 4 井钻探工程为背景,从钻井井身结构、钻具组合、泥浆工艺、取心技术措施、井斜控制等方面,简要介绍了页岩气参数井采用石油钻机施工工艺流程。针对施工过程中遇到的大砾径覆盖层钻进、超长裸眼段钻进及钻井漏失等问题,通过采取优化钻具结构、调整泥浆粘切润滑性能、使用桥浆堵漏等技术措施,工程得以顺利完工,各项技术指标满足设计要求。总结了实践经验,可为该区大口径钻井施工提供经验借鉴。

关键词:页岩气;调查井;钻井工艺;钻井液

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2017)12-0038-05

Drilling Technology for Zhunye Well -4 in Jimusaer County of Xinjiang/XIONG Hu-lin, ZHANG Fei (No. 9 Geological Brigade, Xinjiang Geology and Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Urumqi Xinjiang 830009, China)

Abstract: Based on the drilling engineering of Zhunye well -4 in Jimusaer County of Xinjiang, this paper introduces drilling rig construction technological processes of shale gas parameter well in aspects of wellbore structure, drilling tool assembly, mud technology, coring technology and well deviation control. In view of the problems encountered in the construction process, such as the overburden layer of large-sized boulders, super-long open hole section drilling and lost circulation, through optimizing drilling tool structure, adjusting mud viscous shearing and lubrication performances, using bridge slurry plugging and other technical measures, the project was smoothly completed and the technical indicators meet the design requirements. The practice experience is summarized, which can provide reference for the large diameter drilling construction in this area.

Key words: shale gas; survey wells; drilling processes; drilling fluid

1 工程概况

准页 4 井是新疆准噶尔盆地南缘重点远景区页岩气调查评价项目中的一口钻井,为 2016 年度新疆国土资源厅下达的中央返还两权价款项目。井位布设于新疆吉木萨尔县泉子街镇北约 2 km,交通便利。

2 地质概况

区内地层主要包括第四系全新统、上新统昌吉河群(N_2ch)、中—上三叠统小泉沟群(T_{2-3xq})、烧房沟组(T_1s)、韭菜园组(T_{1j})、梧桐沟组(P_3w)、泉子街组(P_3q)、芦草沟组(P_2l);其中以芦草沟组黑色炭质泥页岩夹油页岩为主要目的层。准页 4 井实际揭露地层情况见表 1。

表 1 准页 4 井实际揭露地层情况

地 层	底界深度/m	岩 性
第四系(Q)	332.29	主要为河流冲积、山前洪积等,成分主要为砾石层夹砂层,砾径 0.5~10 cm 不等
昌吉河群(N_2ch)	880.39	以砂泥岩为主,上部砾岩增多,变为砂砾岩与泥岩互层为特征
小泉沟群(T_{2-3xq})	1474.15	砾岩、砂岩与泥岩、炭质泥岩互层夹薄煤;中部为泥岩夹少量薄层细砂岩
烧房沟组(T_1s)	1607.98	棕红色泥岩、砂质泥岩夹灰绿色薄层细砂岩、粉紫色粉砂岩
韭菜园组(T_{1j})	2133.99	灰绿色厚层—块状砂岩、砂砾岩与灰绿色、暗红色泥岩、砂质泥岩互层
梧桐沟组(P_3w)	2552.40	灰绿色、黄绿色、灰黑色夹紫红色粉砂质泥岩、泥岩夹粉砂岩及少量细砂岩
泉子街组(P_3q)	2753.24	主要为紫红色、棕红色砾岩、砾质泥岩、褐色泥岩夹灰绿色泥岩、砂岩
芦草沟组(P_2l)	3439.50	灰黑色炭质泥页岩夹油页岩及多层白云质灰岩、泥灰岩

口径 215.9 mm。

3 主要工作量及技术要求

(1)实施钻井 1 口,设计井深 3300.00 m,完钻

(2)取心。对芦草沟组目的层采用常规取心方法,岩心收获率 > 90% (如果岩心采取率未达到要

收稿日期:2017-06-09;修回日期:2017-10-28

作者简介:熊虎林,男,汉族,1986 年生,勘查技术与工程专业,从事钻探施工工作,新疆乌鲁木齐市西环中路 497 号,447573557@qq.com。

求,必须补做井壁取心),密闭率要求达到 80% 以上,岩心直径 >100 mm。

(3)井身质量要求参照执行《石油钻井井身质量技术监督及验收规范》(Q/SY 66—2003),全井井斜 $\geq 6^\circ$,井底水平位移 ≥ 120 m,井径扩大率 $< 25\%$ 。

(4)综合录井。包括岩屑录井、岩心录井、钻时录井、地化录井、钻井液录井、气测录井、荧光录井等,以及岩心、岩屑伽马及元素扫描,现场页岩气含气量解吸等。

(5)地球物理测井。包括常规测井、特殊测井(元素 ECS 俘获、FMI 成像、核磁共振、多极子阵列声波)以及固井质量测井等。

(6)固井及完井。表层套管水泥返至地面,技术套管水泥返至地面,生产套管水泥返至烧房沟组上部。固井质量测井评价在合格及以上。完井按油气压裂测试要求完井。

(7)井场平整、道路修理和钻后井场恢复等。

4 施工难点

(1)第四系砾石层掉块。第四系堆积物松散,成分主要为砾石层夹砂层,砾径大,地层成岩性差,容易发生井漏,井斜控制难度大,且泥浆护壁困难,易超径,易发生掉块卡钻事故。

(2)超长裸眼井段泥浆护壁。第三次开钻后, $\varnothing 215.9$ mm 口径裸眼井段长达 1883.84 m,需要合理选择泥浆体系实时优化泥浆性能,在保持井壁稳定同时兼顾保护目的层。

(3)井漏。据临井资料,泉子街组(P_3q)砂砾岩裂隙发育,钻井漏失风险较大。

5 钻探施工

5.1 钻探设备

选用了 ZJ-50 型石油钻机,其技术指标满足页岩气参数井设计井深和完钻口径的要求。钻机及附属设备见表 2。

5.2 井身结构

依据钻井工作区的地质构造特征及已完工的邻近钻井施工情况,本井设计三开井身结构^[2],实际完钻井深结构如图 1 所示。

一开使用 $\varnothing 444.5$ mm 钻头开孔,钻穿第四系后,下入 $\varnothing 339.7$ mm 套管 361.76 m。固井采用了插入法固井工艺,钻井液返至地面,封隔上部松散易塌

表 2 钻机型号及主要设备

名称	型 号	载荷/ N	功率/ kW	备注
钻机	ZJ-50	3150		
井架	JJ45k-315	3150		
转盘	ZP375			
钻井泵	3NB-1300		960	2 台
钻井液罐	9000 mm×2000 mm×2000 mm			180 m ³
动力系统	GV12V190B-3		1000	3 台
固控系统	振动筛、除泥器、除砂器、离心机			1 套
井控系统	双闸板防喷器、圆形防喷器、除气器、控制系统及其节流、放喷管汇			1 套

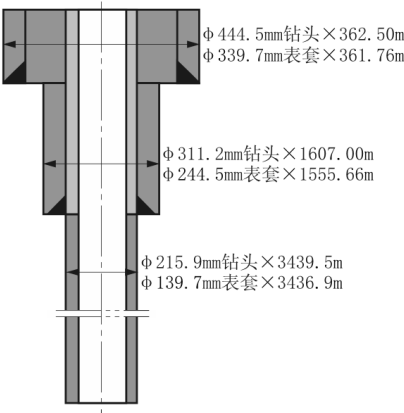


图 1 井身结构及套管程序

地层,为井口控制和后续安全钻井创造条件。

二开使用 $\varnothing 311.2$ mm 钻头,钻至烧房沟组下段后,下入 $\varnothing 244.5$ mm 套管 1555.66 m。采用技术套管固井方案,水泥浆返至 355.00 m,封隔破碎易漏失地层,从而确保下部目的泥页岩层段的取心、完井作业,亦有利于油气储层的保护。

三开使用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头,穿至目的层芦草沟组上段,完钻井深 3439.50 m。下入钢级为 P110, $\varnothing 139.7$ mm 生产套管固井,固井水泥浆上返至 1550.00 m。

优化施工工艺技术,提高顶替效率以确保封固质量,按照既定固井方案固井,采用声波变密度检测,固井质量合格,达到设计要求。

5.3 钻具组合及钻井工艺参数

5.3.1 钻具组合

根据井身结构及地层特征选取钻具组合方案,以塔式钻具组合为主,转盘处采用 $\varnothing 133$ mm 方钻杆传动。各开次钻具组合见表 3。

5.3.2 全面钻进工艺参数

依据多年施工经验和邻区已完钻井所钻遇的地

层情况,原则上在第四系较软地层钻进,采用高转速、

表3 各开次钻具组合

开钻次序	井段/m	钻具组合	备注
一开	0 ~ 362.50	Ø444.5 mm 牙轮钻头 + Ø228.6 mm 钻铤 + Ø177.8 mm 钻铤 + Ø127 mm 钻杆	
二开	362.50 ~ 1555.88	Ø311.1 mm 牙轮/PDC 钻头 + Ø177.8 mm 钻铤 + Ø159 mm 钻铤 + Ø127 mm 钻杆	
三开	1555.88 ~ 3439.50	Ø215.9 mm 牙轮/PDC 钻头 + Ø177.8 mm 钻铤 + Ø159 mm 钻铤 + Ø127 mm 钻杆	防斜
	2753.24 ~ 3439.50(取心段)	Ø215.9 mm PDC/金刚石取心钻头 + 川8-4 取心筒 + Ø177.8 mm 钻铤 + Ø127 mm 钻杆	取心

大泵量和适当的压力;在坚硬的研磨性强的岩层钻进,则采用大钻压和适当的转速和泵量;在裂隙发育的破碎岩层和研磨性强的岩层钻进,则采用小钻压、中低转速和适当的泵量^[3]。第三次开钻后随着钻井深度增加,为保证井内安全,则要限制转速和钻压。钻进工艺参数见表4。

表4 全面钻进工艺参数

开 钻 次 序	层位	井段/m	钻进参数			
			钻压/ kN	转速/ (r· min ⁻¹)	排量/ (L· s ⁻¹)	立管 压力/ MPa
一开	Q	0 ~ 332.29	50 ~ 150	65 ~ 110	55	1 ~ 5
二开	N ₂ ch	332.29 ~ 880.39	60 ~ 160	65 ~ 90	45	4 ~ 9
	T ₂₋₃ xq	880.39 ~ 1474.15	40 ~ 120	90 ~ 120	45	8 ~ 12
三开	T ₁ s—T _{1j}	1474.15 ~ 2133.00	100 ~ 180	65 ~ 90	40	10 ~ 14
	P ₃ w—P ₃ q	2133.00 ~ 2753.24	60 ~ 150	90 ~ 120	28	12 ~ 16
	P ₂ l	2753.24 ~ 3439.50	40 ~ 120	65 ~ 100	28	14 ~ 18

施工过程中严格控制好井内压力平衡,起钻时必须采取钻井液回灌措施,并根据本次所遇地层的实际情况,控制起下钻的速度,防止井内压力失衡造成井壁坍塌。

5.3.3 取心技术措施

(1)取心工具必须严格检查、丈量、计算、选配。组装钻具后,调整好间隙。其它辅助工具配套齐全。

(2)下钻时操作平稳,严禁猛刹、猛放。遇阻不得超过 30 kN,不得划眼强下。下钻距井底 3 ~ 5 m,开泵循环,冲洗取心内筒及井眼。

(3)循环正常后,缓慢下放钻具到井底试转,轻压慢转后,树心钻进 0.3 ~ 0.5 m,再逐渐调整到最佳取心钻进参数。

(4)钻进中,不停泵、不停转盘、不上提钻具、不溜钻、不顿钻,尽量减少憋跳钻。时刻注意钻压、泵压及转盘负荷的变化,认真观察、分析钻进中的相关情况,发现异常及时压井、割心起钻。

(5)钻井裸眼段长,严格控制起下钻速度,减小压力激动,确保井壁稳定,不具备安全起下钻条件时

不起钻^[5]。取心井段:2753.24 ~ 3439.50 m;取心工具为常规川8-4 取心筒,取心钻具组合为:Ø215.9 mm 取心钻头(表镶金刚石/复合片) + 川8-4 取心筒 + Ø172 mm 螺杆 + Ø177.8 mm 钻铤 + Ø159 mm 钻铤 + Ø127 mm 钻杆,取心钻进参数为:取心正常钻压 30 ~ 80 kN、树心钻压 10 ~ 20 kN,转速 190 ~ 260 r/min,排量 20 ~ 28 L/s。

5.4 钻井液

5.4.1 钻井液管理原则

(1)井壁稳定技术方面。为减少固相对润滑性的影响,尽量按设计下限施工,当出现其他复杂情况,不限定密度指标上限,现场工程师按现场施工情况调整。保证钻井液中处理剂含量满足设计施工要求,加强钻井液抑制地层水化膨胀和分散能力^[6]。

(2)固控技术方面。四级固控,振动筛、除砂器可利用率达到 100%,除泥器、离心机保证随时可用。

(3)油层保护技术方面采用屏蔽暂堵技术,减小固液相对储层的伤害。

(4)钻井液大型处理前必须进行小型试验钻井液处理剂必须选用合格的产品。

5.4.2 钻井液配制及维护管理

钻井液主要以不漏、压稳地层流体、维持井壁稳定为原则进行配制^[4]。各开次钻井液性能见表5。

(1)一开钻进时充分利用固控设备清除钻屑,以 0.3% ~ 0.5% NH₄HPAN 水溶液调整粘切。中完后充分洗井,调整好钻井液性能,确保下表套、固井施工顺利。

(2)二开钻固井水泥塞时,可加入适量纯碱以清除 Ca²⁺,防止造成污染。随着井深逐步加深,应对泥浆实施护胶,各种处理剂含量应逐渐向设计配方的上限靠拢,以期实现泥浆的抑制性,防塌性及失水造壁性,控制地层造浆和吸水膨胀,确保井眼稳定畅通。

(3)三开后随着井深的增加,按照 1.5% 的比例

加入高效润滑剂 RH-1, 减小钻井液的摩阻系数, 提高钻井的润滑防卡能力。

表 5 各开次钻井液配方及性能

钻井程序	钻井液体系	钻井液配方	钻井液性能				
			密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘度/ s	失水量/ mL	泥饼厚/ mm	pH 值
一	高膨润土 开	8% ~ 10% 膨润土 + 0.4% Na_2CO_3 + 0.3% NaOH + 0.3% CMC(中粘) + 2% ~3% MMH + 重晶石	1.10 ~ 1.20	60 ~ 90	8	0.5	8 ~ 9
二	强抑制聚 开	4% 膨润土 + 0.2% Na_2CO_3 + 0.5% KOH + 0.6% MAN101 (SP-8) + 8% 磺钻井液 KPAM + 0.6% ~ 0.8% MAN104 (FA367) + 2% ~ 3% SMP-1 + 0.3% ~ 0.5% NPAN + 2% ~ 3% SPNH + 3% ~ 5% 无荧光阳离子乳化沥青(磺化沥青) + 1% ~2% 低荧光润滑剂 + 重晶石	1.20 ~ 1.30	45 ~ 80	5	0.5	9 ~ 10
三	低伤害低 开	4% 膨润土 + 0.2% Na_2CO_3 + 0.5% KOH + 0.8% MAN101 (SP-8) + 8% ~ 摩阻聚磺 10% KPAM + 0.6% ~ 0.8% MAN104 (FA367、PMHA-2) + 2% ~ 3% SMP-1 钻井液 + 0.5% ~ 0.7% NPAN + 2% ~ 3% SPNH + 5% 无荧光阳离子乳化沥青(磺化 沥青) + 2% QCX-1 + 0.2% ~ 0.5% CaO + 1% ~ 2% 低荧光润滑剂 + 重晶石	1.22 ~ 1.35	45 ~ 60	5	0.5	9 ~ 11

(4) 井浆加重时, 除严格控制泥浆膨润土含量和总固相含量外, 护胶剂和润滑剂的加量应向设计配方的上限靠拢, 并同时使用好降粘剂, 调节和控制好流变性能, 以防止发生卡钻事故。

(5) 日常维护以 MAN101、MAN104、XY-27、JT-888、FA-367、CMC-HV、NPAN 配置成胶液, 以细水长流的方式维护钻井液性能, 以避免泥浆性能波动过大。

5.5 井斜控制

钻具结构必须符合设计要求, 及时测斜, 用测斜数据指导钻井施工, 确保井身质量达到设计要求。

(1) 表层开钻打方钻杆时, 每钻进 3 ~ 5 m 用水准尺校正方钻杆, 确保开直井口。

(2) 新钻头下井, 以设计钻压下限钻进, 当稳定器全部进入新井眼后再以正常钻压钻进。

(3) 钻进中注意防斜, 按要求每 100 ~ 150 m 测斜一次。钻进按规定要求进行测斜, 若井斜角在 2° ~ 2.5° 之间以及经预测完钻点井底水平位移超过设计值时, 要进行纠斜钻进, 并每钻进 20 ~ 30 m 测斜一次。

(4) 有增斜趋势并井斜可能超出设计要求的情况下, 采用钟摆钻具进行纠斜, 如钟摆钻具达不到控制井斜效果, 采用螺杆钻具进行纠斜。

5.6 井控

参照中国石油天然气集团公司《石油与天然气钻井井控规定》(中油工程字【2006】247 号) 组织实施井控工作。

准页 4 井施工历时 158 d, 完钻井深 3439.50 m, 最大井斜 3.43° (3425 m), 井底闭合位移 24 m, 平均井径扩大率不大于 20%。录井工作中, 钻时录

井工程量 3439 个、岩屑 1713 件、全井累计进行钻井液性能测试 545 次; 固井质量合格; 取心 20 回次, 平均取心收获率 95.3%。各项技术指标达到设计要求。

6 主要技术措施及应用效果

6.1 第四系砾石层钻进

一开井径大, 钻遇卵砾石层砾径大、胶结差, 井壁易失稳, 易垮塌, 泥浆护壁困难。

施工中使用高膨润土含量的聚合物钻井液钻进, 防止由于粘切过低, 造成表层窜漏和钻屑携带困难等问题。维护过程中, 使用聚合物胶液配合 CMC-HV 进行处理。通过调节聚合物浓度有效地防止了地层不稳及钻屑携带困难的问题。

工程上紧密配合, 使用高粘切钻井液大排量钻进, 中完后注入防卡钻井液, 保证了起下钻和下表层套管的顺利进行。

6.2 三开超长裸眼井段施工

三开井段 $\varnothing 215.9$ mm 口径裸眼井段长达 1883.84 m (1555.66 ~ 3439.50 m), 钻井液维护处理重点是防卡、防漏及保护气层。因此, 井段中将二开强抑制聚磺钻井液体系转化为低伤害低摩阻聚磺钻井液, 从而有效地保护气层。将 API 失水控制在设计范围内, 增加滤液粘度, 及时补充 CMC-HV 和 KPAM。将两者的浓度达到 0.6% 以上。防止托压和降低摩阻, 减小钻具回转阻力。保证在起下钻顺畅。在固控方面为了保护油气层, 将振动筛、除砂器和离心机的使用率达到纯钻时间的 100%。减少钻井液中的固相含量对油气层的伤害程度。工程上坚持多短起下钻, 提高钻井速度, 缩短钻井液对油气层

的浸泡时间。

三开钻进过程中,泥浆性能完全满足施工要求,钻井得以顺利完钻。

6.3 典型井漏及其处理措施

准页4井钻井过程中,出现 20 m^3 以上较严重漏失情况4次,轻微漏失18次。对典型漏失情况及处理措施介绍如下。

钻遇地层为泉子街组砂岩,分析为中细裂缝性漏失,经讨论决定采用桥浆堵漏。2909.60 m处井漏,平均漏速 $9\text{ m}^3/\text{h}$ 。漏失密度 1.26 g/cm^3 、粘度59 s 泥浆 12.6 m^3 。钻遇地层为芦草沟组砂岩,分析为中细裂缝性漏失,经讨论决定采用桥浆堵漏^[7-8]。注15%桥浆 10 m^3 ,桥浆配方:8%复合堵漏剂+5%随钻堵漏剂+2%膨胀堵漏剂。关井挤入 6 m^3 憋压1.7 MPa降至1.4 MPa,20 min后挤入泥浆 4 m^3 憋压1.2 MPa,循环候堵,泥浆池液面未下降,堵漏成功。

2910.55 m发生井漏,平均漏速 $7\text{ m}^3/\text{h}$ 。漏失密度 1.26 g/cm^3 、粘度67 s 泥浆 8.5 m^3 。注20%桥浆 11 m^3 ,桥浆配方:10%复合堵漏剂+8%随钻堵漏剂+2%膨胀堵漏剂。关井挤入 5 m^3 憋压1.2 MPa不降,20 min后挤入泥浆 3.5 m^3 憋压1.2 MPa不降。循环候堵,泥浆少量渗漏,30 min后漏失量增大。继续配制浓度28%的桥浆堵漏。注入桥浆 12 m^3 ,顶桥浆过程中井口少量返浆,漏失泥浆 22.7 m^3 。起钻140 m未出桥浆面,发现环空被桥浆堵塞,开泵循环排出环空桥浆,漏失泥浆 23 m^3 。起钻至套管内配制补充泥浆。下钻分段循环泥浆调整性能,下至井底循环不漏,恢复钻进。

7 经验和体会

(1)泥浆性能的保持,应以维护为主,处理为辅的方式进行。各种粉状处理剂均应配成不同浓度胶

液连续均匀加入;其它处理剂则应严格按泥浆循环周连续均匀加入,避免因泥浆性能大幅波动而造成井下情况复杂化。

(2)该地区山前河床砾石层机械钻速低,钻头使用寿命短,钻井施工建议选用钻具组合: $\varnothing 444.5\text{ mm}$ 515 镶齿牙轮钻头+2LZ244 直螺杆+ $\varnothing 177.8\text{ mm}$ 钻铤8根+ $\varnothing 127\text{ mm}$ 钻杆,采用吊打方式钻进,同时配合大排量高压辅助破岩和清洗井底,提速增效。完钻后采用 $\varnothing 444\text{ mm}$ 螺旋扶正器通井,修复不平整井壁,使表层套管顺利下入。

(3)进入二叠系施工,泉子街组以下地层为硬脆性泥岩,层理发育,井漏频繁,漏失量大,鉴于地层复杂,建议在使用暂堵钻井液的同时,简化钻具结构,采用常规钻具结构钻进,当井下情况允许可以尝试采用MD 高效牙轮(或PDC)+直螺杆钻具组合提速提效。钻进中,应充分利用固控设备,及时清除劣质固相。严格控制井浆坂土含量,预留泥浆加重空间。

参考文献:

- [1] 蒋国盛,王荣璟.页岩气勘探开发关键技术综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):3-8.
- [2] 陈宁,彭步涛.贵州页岩气调查评价井钻探施工技术综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(S1):260-265.
- [3] 鄢泰宁.岩土钻掘工程学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [4] 单文军,蒋睿,陶士先,等.页岩气钻探冲洗液体系的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):176-181.
- [5] 卢予北,陈莹,申云飞.河南中牟页岩气区块地层特征及钻探问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(7):62-67.
- [6] 邓亮,张承飞,邓少东,等.贵州省页岩气资源调查评价(黔北项目)钻探施工技术[J].西部探矿工程,2014,(12):38-40.
- [7] 马光长,吉永忠,熊焰.川渝地区井漏现状及治理对策[J].钻采工艺,2006,29(2):25-27.
- [8] 王参书,邹盛礼,李子成,等.桥浆混水泥堵漏技术在迪那11井的应用[J].钻井液与完井液,2002,19(1):47-48.

钻探技术在敖汉旗浅覆盖区 1: 5 万 地质填图中的应用研究

谭春亮, 宋殿兰, 岳永东, 林广利

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:利用钻探可连续取心的技术特点,可查明第四系地层序列,控制基岩顶面埋深与起伏、验证推测模型、研究地质构造、圈定地质体间的重要接触关系,服务于填图。通过浅钻技术在敖汉旗四图幅覆盖区填图中的应用,总结出一套适用于荒漠草原浅覆盖区填图的钻探技术方法组合,并归纳出利用浅层钻探技术开展覆盖区填图的技术操作要点,为相似景观区区域基础地质调查和矿产调查提供技术支撑。

关键词:浅覆盖区;地质填图;浅层钻探;松散层;植物胶

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0043-05

Application Research on Drilling Technology for 1: 50000 Geological Mapping in Shallow Overburden Area of Aohan/TAN Chun-liang, SONG Dian-lan, YUE Yong-dong, LIN Guang-li (Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: By using the drilling characteristics of continuous coring, the Quaternary stratigraphic sequence can be found out, and then top surface depth and fluctuation of bedrock determination, estimation models verification, geological structures research, delineating important contact relation between geological bodies can be realized and can be used for geological mapping. Based on the application of shallow drilling technology for geological mapping in Aohan County, a set of drilling technical methods combination is summed up, which is suitable to the geological mapping in shallow overburden area of desert steppe, the key points of technical operation for overburden area mapping by shallow drilling are presented, which provides technical support for geological survey and mineral resources exploration in similar landscape area.

Key words: shallow overburden area; geological mapping; shallow drilling technology; loose layer; vegetable glue

1 项目概况

内蒙古 1: 5 万波罗和硕村(K50E009023)、孤山子村(K50E009024)、四道湾子镇(K50E010023)、玛尼罕乡(K50E010024)4幅荒漠草原覆盖区填图是中国地质调查局组织实施的二级项目“内蒙古中东部荒漠草原浅覆盖区 1: 5 万填图试点”的重点工作区之一。工作区主要位于内蒙古赤峰市敖汉旗辖区,填图面积 1481 km²,其中,覆盖区面积占 70%。前人工作集中在基岩出露区,大面积第四系地质体分布区的地质图表达单一、内容简单,已无法满足当地社会经济发展的需求。随着浅层钻探机具研发系列化与配套工艺方法的成熟^[1],以及浅钻地球化学测量^[2]、以钻代槽技术方法的应用研究^[3]取得了一系列显著成果,使得采用浅钻手段进行覆盖区“揭盖”填图成为可能。所谓浅覆盖区填图指在

第四系堆积物连续覆盖厚度 < 200 m、且覆盖面积占图幅面积 50% 以上的地区进行的地质填图。项目重点探索应用钻探手段揭露覆盖层,查明覆盖层之下的基岩面基本地质结构和地质体空间展布,并通过示范总结钻探在荒漠草原覆盖区的应用效果,制定浅覆盖区 1: 5 万填图钻探技术方法和技术要求。按照 1: 5 万覆盖区区域地质调查工作指南(试行),浅覆盖区填图钻探技术要求如下。

(1) 采取率指标:第四系松散堆积物或构造破碎带 < 65%,机械岩心钻探岩心采取率 < 85%。

(2) 钻孔口径要求:满足地质观察和各种样品的采集要求,钻孔口径 < 75 mm。

(3) 钻孔深度:浅层取样(3 m 以浅)钻揭露到基岩时,揭露基岩厚度 ≥ 0.3 m;机械岩心钻探(3 ~ 200 m)揭露到基岩时,揭露到新鲜基岩,厚度 ≥ 2

收稿日期:2017-07-22

作者简介:谭春亮,男,汉族,1979年生,高级工程师,从事岩土工程勘察、钻探技术的研究与应用工作,北京市海淀区学院路29号探工楼206室,bjtan1979@163.com。

m, 钻遇含矿层、蚀变矿化带需穿透。

2 地质条件

敖汉旗4图幅工作区位于燕山向西辽河平原过渡地带, 地形呈不规则的缓坡形, 主要为低山丘陵及河谷平原, 地势呈南高北低、东高西低形态。主要河

流包括老哈河及其支流羊肠子河、饮马河、蹦河、孟克河等。工作区新生界成因包括河流沉积、冲洪积、风积、坡积等多种类型, 加上沉积环境的改变, 构造运动的影响以及水流变化对原来沉积物的破坏使第四系沉积物的结构变化非常复杂。图1为老哈河河谷横向地质剖面。

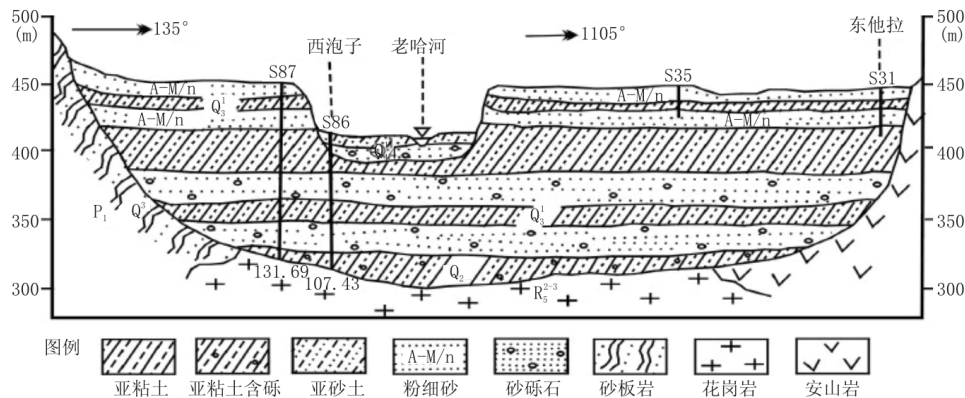


图1 老哈河河谷横向地质剖面

以老哈河河谷为例, 覆盖层以上更新统早期冲湖积亚砂土、亚粘土、粉细砂和砂砾卵石层为主体构成^[4], 其下为中更新统冰碛及冰水堆积的亚粘土含砾和砂砾卵石层, 厚4~20 m。全新统冲积亚砂土、亚粘土、粉细砂和砂砾石层上叠于冲湖积物之上, 厚18~20 m。沉积厚度沿河纵向变化较大, 一般50~120 m, 中心可达150 m。沉积物粒径由上游到下游由粗变细, 覆盖厚度由薄变厚。

3 工程难点

(1) 第四系玄武岩与松散堆积物复合覆盖, 地层结构复杂, 包括腐殖土、黄土、砂层、砾(卵)石层、风化基岩、第四系玄武岩等多种覆盖类型, 地层软硬交错、松散破碎、胶结性差, 表现为孔壁不稳定、缩径、塌孔等问题^[5-7]。

(2) 浅覆盖区填图工区面积大(单个图幅的面积为300~400 km²), 钻孔浅(<200 m)、孔位多(单个图幅拟布设20个), 表现为单孔作业时间短、搬迁频繁。

(3) 老哈河流域地处八里罕断裂带是项目的重点研究区, 河谷地下水丰富, 砂层、砂砾石层较厚(20~60 m), 极易出现泥浆被稀释钻孔坍塌、卡钻、埋钻等事故。

区别于固体矿产钻探, 浅覆盖区填图的钻探工作以基岩为目标层、以松散堆积层钻进为主, 根据填

图需求布孔, 深度不确定。因此, 更需要地质与钻探的紧密结合, 一方面: 需要充分利用已有地质资料, 科学布孔, 并随工作的深入不断优化布孔方案, 合理利用钻探工作量; 另一方面: 需要制定更加灵活的施工方案, 带着地质问题搞钻探, 重点加强松散层取样技术的研究, 包括钻进方法、钻进工艺、钻机具、冲洗液等, 同时, 注重钻探与地质、钻探与物探、钻探与化探等技术手段的综合研究, 提高单孔的利用价值, 实现一孔多用。

4 浅覆盖区填图钻探技术研究

4.1 设备选型

根据地质条件、钻孔结构、钻孔深度及钻进方法、工艺要求, 结合浅覆盖区填图钻探工作的特点(需要频繁搬迁)。确定在交通便利的区域, 选用车装式的全液压力头式钻机; 车辆难进入的区域, 选用TGQ系列轻便型钻机。选用的钻机数量及适用范围见表1, 两种机型分别见图2、图3。

4.2 钻孔结构

通过对已有地质、水文等资料的分析, 首先掌握工作区的地层沉积结构情况。依据地质目的、沉积类型、覆盖厚度、施工条件和取样要求等因素, 确定钻进方法与钻孔结构, 选择钻机、钻具。为了快速穿过砂层或卵砾石层, 减少提钻次数, 降低对孔壁的抽吸, 对于河道复杂地层, 采用Q系列Ø122、96、75 mm

表 1 钻机选型

设备类型	钻机型号	数量/台	泥浆泵	适用范围
车装式钻机	TGQ-500CZ 型	2	BWF160/10 型	机械化程度高,适用于交通便利、车辆能够到达的景观区
轻便型钻机	TGQ(C)-30 型、TGQ-50 型	2	WF-45 型	分体式结构,适用于施工条件受限、车辆难进入的景观区



图 2 车装式全液压钻机



图 3 轻便型取样钻机

三级金刚石绳索取心钻进技术,两级套管三级成孔,利用上一级绳索钻杆作为下一级绳索钻进的套管,主要以 $\varnothing 96\text{ mm}$ 绳索钻具钻进为主, $\varnothing 75\text{ mm}$ 作为备用口径。部分钻孔采用了 $\varnothing 110\text{ mm}$ 口径,下 $\varnothing 108\text{ mm}$ 套管代替 $\varnothing 122\text{ mm}$,再采用小一级的钻具钻进至目的层。

4.3 钻进参数与钻具级配

浅覆盖区填图钻探主要是解决松散沉积层的取心问题,钻探工艺有两方面的难题:第一是钻进时,保证岩心(样)能够顺利进入岩心管,防止样品被冲蚀、损耗;第二是提钻时,保证岩心不脱落,防止丢心,保持原始层位关系。围绕着这两个问题,确定钻进参数与钻具级配。

4.3.1 钻进参数

采用“低压力、中转速、小泵量”的原则,平稳钻进。特别松散、漏失地层,采用小泵量;胶结地层、粘性较大的地层,采用较大泵量,以确保排除岩粉的需要。采用的钻进参数见表 2。

表 2 钻进参数

钻孔口径/mm	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/kN	泵量/(L·min ⁻¹)
122(110)	70~250	7~14	60~80
96	80~350	5~12	50~70
75	200~500	6~9	40~60

4.3.2 钻头的选择

河谷覆盖层较厚且含砾石,以 PDC 钻头钻进为主,硬岩破碎层选用梯齿型或尖齿型金刚石钻头。采用底喷、侧喷式钻头代替常规取心钻头隔断冲洗液对岩心的冲蚀,提高取心率。

4.3.3 钻具的选择

为降低松散破碎地层钻进过程中对孔壁的扰动,以绳索取心钻进为主,部分粉质粘土地层采用单管或单动双管、砂层采用单动双管或绳索取心三层管钻具^[8]、卵石层采用金刚石单管取心钻具与半合管钻具。

4.4 冲洗液

冲洗液的使用效果和管理水平直接关系到钻进效果,特别是在复杂地层中,冲洗液的作用显得尤为突出。松散堆积地层的特征是怕冲蚀、易塌、遇水易蚀变等,因此,要求冲洗液既要有较高的护壁和携带岩屑的能力,又要有较大静切力和较小的动切力,尽可能小的失水量。经过野外试验与探索,工作区地处农牧区,因此,选用了环保的天然植物胶配置无固相、低固相冲洗液^[9-10],满足不同的地层钻进需求。不同地层采用的泥浆配方见表 3。通过应用前后的对比,明显提高了钻进效率和取心质量,减少了孔内事故的发生。

5 施工效果

通过合理的匹配钻具、冲洗液体系。确保了第四系地层的取心质量和钻孔安全,特别是老哈河道中的钻孔,对砂层、砾石层实现了很好的护壁,为后续取心,综合测井创造了条件。

先期 2 个月,完成钻孔 48 个,钻探进尺 3200 m,其中最深钻孔 344 m。各层采取率为:黄土层、粘土层采取率 93%,含砂层采取率 70%,砂(卵)砾石层采取率 65%,基岩采取率 90%,松散层平均采取率

表 3 各种地层采用的泥浆配方

地 层	岩 性 描 述	复 杂 情 况	采 用 的 泥 浆 配 方
粘土、第四系玄武岩覆盖层	腐殖土、黄土、粘土、亚粘土、亚砂土、第四系玄武岩等	水敏性地层,易发生膨胀缩径、泥浆增稠、泥包等	1 m ³ 清水 + 1.5% ~ 2% 植物胶 + 0.1% ~ 0.3% NaOH + 0.2% PAM
砂土类地层	粉(细)砂层、中(粗)砂层、含砾砂层等	胶结性差,易发生膨胀缩径、涌砂等	1 m ³ 清水 + 1.5% ~ 2% 植物胶 + 0.1% ~ 0.3% NaOH + 0.2% PAM + 0.1% ~ 0.2% Na - CMC
砂(卵)砾石层	砂砾石、卵砾石、块石、漂石等	密实度低,易发生坍塌、掉块、漏浆、涌水、超径等	1 m ³ 清水 + 4% ~ 5% 膨润土 + 1.5% ~ 3% 植物胶 + 0.1% ~ 0.3% NaOH + 0.2% ~ 0.3% Na - CMC + 1% ~ 2% KPAM + 0.3% ~ 0.5% 防塌剂
风化基岩层	风化基岩,包括泥岩、砂砾岩、花岗岩、安山岩等	易冲蚀、易蚀变、坍塌、泥浆漏失等	1 m ³ 清水 + 3% ~ 5% 膨润土 + 1.5% ~ 3% 植物胶 + 0.1% ~ 0.3% NaOH + 0.2% ~ 0.3% Na - CMC + 0.2% PAM + 1% ~ 2% KPAM

76%,满足了覆盖区填图钻探技术要求。图 4~6 为采取上的岩心样品。



图 4 砂土层



图 5 砂(卵)砾石层



图 6 风化基岩层

6 浅覆盖区填图钻探技术研究

6.1 利用钻探手段进行浅覆盖区填图的基本思路

首先依据已有地质信息,物探、化探异常信息,结合地质单元边界控制、面积控制需求等关键要素确定出钻孔位置,并推断出钻孔深度;其次,依据覆盖层的特点、厚度和施工条件选择钻进方法,根据地

质目的、取样要求,施工场地景观和地质条件、钻进方法、钻孔结构等因素选择钻机和钻具;利用钻探可验证、揭露、连续取样的优势,探明覆盖层之下基岩面,包括基岩面起伏状况、基岩面地质结构及盆山关系;揭示出被覆盖层掩盖的重要矿产信息、重要地质体分布及重要地质边界的延伸等。

6.2 利用浅层钻探技术填图技术要点

通过分析国内不同地质景观区已开展的覆盖区填图钻探技术方法试验,参照“1: 5 万覆盖区填图工作指南(试行)”的要求,归纳总结并提出利用浅层钻探技术覆盖区填图的操作要点,旨在规范野外施工。

(1)布孔依据。地质推测边界控制需求、物探异常、地质面积控制需求、现场地形地貌特征、施工条件。

(2)取样要求。3 m 以浅揭露到基岩取心 ≥ 0.3 m,3 m 以深揭露到基岩取心 ≥ 2 m;基岩取心率 $\geq 85\%$,第四系取心率 $\geq 65\%$ 。

(3)布孔密度。依据地质-地球物理场复杂程度和目的任务;依据覆盖层厚度调整施工网度;每幅钻探工作量 1000~2000 m。

(4)取样层位。分层连续采样;重点采集风化残积层(找矿)、基岩顶面样品(基岩地质图)。

(5)工作流程。连续取心(样)直至基岩、地质编录、综合测井、岩心拍照、封孔、资料入库、数字化处理等。

(6)目的层判别。充分利用钻进过程中上返冲洗液颜色变化、钻进参数变化和连续样品物质含量变化等要素辨别。

(7)野外记录。钻进深度、分层厚度、采取率、数字化钻孔编录(性质、颜色)、柱状图及工程描述(机具、工艺、参数变化)。

(8)后续工作。岩矿鉴定、残积层与基岩光谱

分析、磁化率测量、密度测量等,构建钻孔联合剖面,三维结构建模等。

6.3 浅覆盖区填图钻孔分类

钻探只是浅覆盖区填图的技术手段之一,需要加强与地质、遥感、物探、化探等技术方法的综合利用,才能形成一套真正适用于浅覆盖区的经济、实用、有效的填图技术方法组合。例如:利用不同沉积地层在测井曲线上有其明显的反映特征,有一定的

规律特点,通过部分钻孔“取心 + 测井”建立起标准地层单元,部分钻孔“不取心 + 测井”,通过测井曲线与标准地层单元对比确定地层沉积序列,实现地层划分,提高填图钻探效率,降低施工成本。因此,将浅覆盖区填图钻孔划分为两类:全孔取心孔与非全孔取心孔。不同类型钻孔的钻进方法、工作手段、研究目的不同(表 4 所示)。

表 4 浅覆盖区填图钻孔分类

钻孔类型	地 质 目 的	钻 探 要 求	钻 进 方 法	配 套 手 段
全孔取心孔	调查覆盖层及基岩地质构造特征、建立地层序列	准确全面的提取地层沉积序列信息,要求高的岩心采取率	冲击钻进、回转钻进 + 优质的冲洗液体系	测井(电阻率、自然电位、自然伽玛等)
非全孔取心孔	验证物探推断解释成果、追踪和圈定地质体间的重要接触关系,厚度变化等	提取残积层(找矿)与基岩顶面(填图)的信息	空气循环钻进、全面钻进等钻进方法	测井(电阻率、自然电位、自然伽玛等)

6.4 浅覆盖区填图钻探技术方法下一步的研究方向

首先,加强松散层取心工艺研究,提高采取率,尽可能多的提取地层信息,提高钻进效率,降低成本;其次,在不缺少必要的质量功能前提下,创新成果表达方式,尽量简化程序、方便实施;最后,加强钻探与地质及其它技术方法的综合研究,如:与物探测量技术的结合、与化探快速分析技术的结合、与槽探技术的结合等,充分利用钻孔与岩心,既可提高覆盖区填图质量与精度,又可指导找矿。

来物影响,准确地定位矿化位置,实现快速异常查证,验证地质推断、物化探推断,剔除假信息,提高成图质量。

(3)初步总结了利用浅层钻探手段覆盖区填图的技术要点,总结出布孔依据、取样要求、取样层位、层位判定方法以及工作流程等基本要素,阐明了利用钻探开展浅覆盖区填图内容包涵:地质条件、覆盖类型、钻机的选型、钻进工艺和覆盖区填图钻探技术方法的研究等要素,推广中还需补充完善。

7 结论

对于敖汉旗 4 图幅,特别是老哈河流域遇到的复杂地层,通过合理的设计钻孔结构、选择钻机具与冲洗液体系,解决了 0 ~ 200 m 的松散层取心难题,满足浅覆盖区填图取心的技术要求,同时,通过实践与研究,归纳并总结出钻探技术在浅覆盖区填图应用过程中的操作要点。为后续覆盖区填图技术方法的综合研究奠定了基础。

(1)浅覆盖区填图钻探以钻进松散堆积层为主,优先选用硬质合金钻头或 PDC 钻头,钻进参数采用“低钻压、中转速、小泵量”的原则,合理控制单回次进尺,同时,利用优质冲洗液技术结合套管综合护壁措施,可提高岩层采取率,满足技术要求。

(2)钻探在浅覆盖区填图中的应用,拓宽了机动浅钻的应用范畴,提高了覆盖区地质填图精度,可有效剔除传统水系沉积物测量、土壤测量过程中外

参考文献:

[1] 冉恒谦,张金昌,谢文卫,等.地质钻探技术与应用研究[J].地质学报,2013,85(11):1806-1822.

[2] 喻劲松.浅钻地球化学勘查技术方法及应用研究[J].地质学报,2013,87(S1):236-237.

[3] 赵洪波,何远信,宋殿兰,等.以钻代槽勘查技术方法与应用研究[J].地质科技情报,2014,33(5):204-207.

[4] 韩洪伟.内蒙赤峰翁牛特旗地区水井施工中多工艺空气钻进技术的应用研究[D].吉林长春:吉林大学,2005.

[5] 孙满军,冯基东,杨振雷,等.浅谈第四系复杂地层钻探技术[J].吉林地质,2010,29(2):151-152.

[6] 黄永波,侯建华,宋志勇,等.第四系科学钻探及地层对比方法探讨[J].山东国土资源,2015,31(10):71-75.

[7] 吴文飞,欧汉森.浅析复杂覆盖层钻探工艺技术及应用[J].资源环境与工程,2013,27(4):513-514,521.

[8] 王达,何远信,等.地质钻探手册[M].湖南长沙:中南大学出版社,2014:371-372.

[9] 隆威,王祖平,纪鹏.新型无粘土冲洗液的研究与应用[J].勘察科学技术,2011,(9):6-11.

[10] 陈礼仪,牛文林,朱宗培.植物胶冲洗液在岩土工程勘察中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,(S1):314-316.

乌兰哈夏煤田灭火工程复杂地层钻进施工技术

陈磊, 王军

(新疆地矿局第七地质大队, 新疆 乌苏 833000)

摘要:煤田火区烧变岩地层复杂, 松散破碎、裂隙发育、胶结性差, 且温度高。钻进过程中会遇到钻孔漏失、掉块、坍塌, 施工效率低、成本高, 施工质量难以保证。更严重的是高温伤人、伤物等施工技术和安全问题。针对该工程钻进施工技术难题, 采用空气潜孔锤跟管钻进工艺, 并结合钻孔高温护壁的施工方案, 有效地解决了煤田灭火工程钻进施工难题, 降低了钻进施工成本, 提高了工程施工质量, 为煤田灭火工程探索出了安全有效的钻进工艺。

关键词:煤田灭火工程; 复杂地层护壁; 空气潜孔锤跟管钻进

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2017)12-0048-06

Drilling Construction Technology in Complex Formation for Wulanhaxia Coal Field Fire Extinguishing Engineering/CHEN Lei, WANG Jun (The Seventh Geological Brigade of Xinjiang Geology and Minerals Bureau, Wusu Xinjiang 833000, China)

Abstract: The complicated burnt rock formation in coal field firing zone is loose and fractured with fracture development, poor cementation and high formation temperature. Lost circulation, block falling and collapse are often encountered in drilling process, which lead to low construction efficiency and high cost; it is difficult to ensure the construction quality. And what are more serious are the challenges to construction technology and the people's safety under the condition of high temperature. Aiming at this, by the combination of the technology of air DTH drilling with casing and the scheme of wall protection for high temperature drilling, the construction difficulties in coal field fire extinguishing engineering are effectively solved. The construction quality is improved and the drilling cost is reduced, this valuable drilling process is developed for coalfield fire extinguishing construction.

Key words: coal field fire extinguishing engineering; wall protection in complex formation; air DTH drilling with casing

新疆的煤炭资源十分丰富, 其预测储量达 1.8 万亿吨, 占全国预测储量的 40.6%。由于新疆区域地质构造的复杂性, 大陆性干旱气候的特殊性, 早期采煤工艺的落后等原因, 导致新疆煤田火灾相当严重。火区面积之大, 分布之广, 燃烧历史之长堪称世界之最。乌兰哈夏煤田位于新疆和布克赛尔蒙古自治县和什托洛盖镇, 因早期小煤窑的非法开采, 引发煤田火灾, 火区地表多处可见明火, 在火区北部有多个塌陷坑; 着火时间较早的火区南部可见煤层燃烧过的红色烧变岩露头。

通常煤田灭火工程有五大工序: 剥离, 钻探, 注浆, 覆盖, 其中钻探工作是灭火工程的核心, 而煤田火区地层的特殊性给钻探工作带来了严峻的考验。

1 火区地层概况及施工难点

1.1 地层概况

火区钻探揭露地层自上而下依次为: 砂土堆填层-泥岩-烧变岩-煤层-烧变岩-砂岩-煤层-

砂岩。烧变岩是由于煤层燃烧后, 岩层受高温烘烤形成浅红色、砖红色岩石, 主要构造特点是既有高温烧结作用使岩石物理性质发生变化, 产生了类似构造运动的张力、剪力作用, 岩层发生变形, 产生裂隙、裂缝; 又有长年累月的空气、地下水侵蚀作用, 岩石胶结性差, 松散破碎(见图1)。

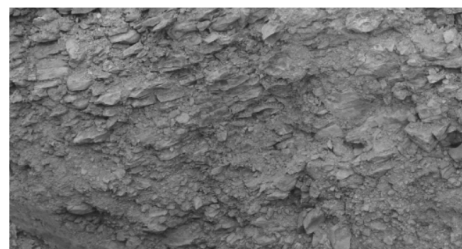


图1 火区地表探槽(烧变岩)

1.2 施工难点

(1) 烧变岩硬脆、破碎, 裂隙发育, 钻孔坍塌、掉块、漏失严重, 钻进时易卡、埋钻。

(2) 钻进重复破碎, 钻屑难以清除, 钻进效率

收稿日期: 2017-08-21; 修回日期: 2017-09-06

作者简介: 陈磊, 男, 汉族, 1986年生, 勘查技术与工程专业, 从事钻探技术与管理工, 新疆乌苏市乌鲁木齐北路128号。

低,施工成本高。

(3)孔壁极易失稳,掉块、坍塌严重,生产花管下入困难,施工质量很难保证。

(4)火区地表温度最高可达 328 ℃,地下着火点温度最高可达 800 ℃。施工时易发生爆喷、烫伤等安全事故,同时也会产生钻杆熔断变形等钻探事故,使得钻探施工风险进一步增大。

2 历年钻探施工概况

在历年的该工区勘察钻探施工中,主要采用了以下 2 种钻进施工技术,但施工效果并不理想。其表现为施工效率低,施工成本高,钻孔质量不好保证。

(1)全面钻进。一般采用泥浆护壁,牙轮钻头快速全面钻进完孔的方法。该施工工艺的特点是钻进效率低、成本高、钻孔施工质量差。

(2)跟管钻进。主要采用进口大功率双动力头钻机,边钻进边跟管施工的方法。该工艺的优点是钻孔施工成功率高,缺点是钻进效率较低、成本高。

虽然针对煤田灭火钻探施工有很多技术方法,但目前仍未有一个行之有效的解决办法。关键是应将高效率碎岩技术与有效的护壁技术结合起来,提高钻孔施工质量,降低生产成本。

3 钻进施工工艺

由于空气潜孔锤钻进施工工艺效率高、成本低,空气对地层原始物性参数影响小,可省去钻孔测温等待时间(钻孔成孔后需进行测温工作,使用液相介质钻进,必须等待 24 h 钻孔温度稳定后方可测

温,根据温度变化情况才能确定钻孔是否达到目的),而且空气比液体的膨胀系数小,在高温情况下施工更加安全。因此空气潜孔锤钻进工艺在火区钻探施工优势明显。所以根据火区的地质和工程特点,将常规的空气潜孔锤施工工艺进行优化,就可有效形成煤田灭火工程比较理想的施工工艺。

3.1 钻孔布置

根据地质技术设计要求,在火区边界范围内划分 6 条勘探线,东西走向,每条勘探线间距 4 m,勘探线上孔间距 8 m,钻孔呈三花状。每条勘探线钻孔设计深度依次为 15、20、25、30、35、40 m。计划施工钻孔 190 个,总进尺 5000 m。

3.2 钻进设备及机具

根据地层情况和工区特点选择钻机、空压机、套管起拔设备以及钻进机具,钻进设备及机具的选型直接关系到施工效率高低和钻孔施工质量的优劣。

3.2.1 钻机

选用钻机主要从钻机能力,经济能耗、施工效率等因素综合考虑,主要特点是机动性强,搬迁方便;采用顶部驱动,升降钻具速度快,正向、倒向划眼可靠,防止卡钻,节省大量辅助时间;长行程给进方式,满足了易塌地层的划眼护壁要求;液压传动钻机部件间使用管路连接,便于改装,可以按使用要求方便地增设不同机构。

因火区地层复杂,钻孔数量多,施工中会遇到各种工况,因此根据实际施工情况,应用多类型钻机组合有助于提高钻孔施工生产效率,降低生产成本。钻机型号及参数见表 1。

表 1 钻机型号及参数

项 目	型 号	钻孔直径/mm	最大钻深/m	回转扭矩/(N·m)	回转转速/(r·min ⁻¹)	最大推进力/kN	提升力/kN	推进行程/mm	发动机功率/kW	工作压力/MPa	推进方式	备 注
潜孔钻机	KG950B	80~150	70	1400	0~70	10	15	3000	50	0.7~1.8	油缸-链条	可跟管
车载钻机	150B	80~150	150	3000	0~70	40	80	5000	85	0.7~1.5	油缸-链条	不可跟管
水井钻机	HJG-W300C	105~311	300	4400	0~100	60	120	3700	93	1.05~2.46	油缸-钢绳	可跟管

3.2.2 空压机

空压机是空气钻进系统的核心设备,是潜孔锤工作的动力来源,其选型直接影响到施工成本,钻进效率和钻进深度。在空气潜孔锤钻进中使用的空压机一般都为容积结构,以活塞式和螺杆式较为普遍。其中螺杆式空压机因维护维修成本低,工作稳定最为常用。空压机的选用原则,首先要满足潜孔锤所需的最小风压和风量的需要,其次要满足钻屑的上

返要求。工区选用空压机型号及参数见表 2。

表 2 空压机型号及参数

项 目	型 号	压缩机形式	公称容积流量/(m ³ ·min ⁻¹)	额定排气压力/MPa	发动机功率/kW	备 注
烟台群效	2W-12.5/8	活塞式	10/12.5	0.8/1.2	85	国产车载
LG 开山	CY-15/13	双螺杆	15	1.3	177	国产机
英格索兰	XHP1070	双螺杆	30.3	2.4	347	进口

3.2.3 潜孔锤

空气钻进冲击碎岩的能量是由潜孔锤提供的,潜孔锤的选择与钻孔效率、施工质量密切相关。从使用的角度出发,工程中选择潜孔锤主要考虑钻进效率及使用寿命。我们在施工中选用了国内外技术

比较成熟的冲击器,空气潜孔锤钻进选用宣化中潜、阿特拉斯和天瑞重工等厂家的冲击器,使用效果较好。潜孔锤型号及参数见表 3。

3.2.4 钻头

表 3 潜孔锤型号及相关参数

项 目	型 号	生产厂家	工作压力/MPa	耗气量/(m ³ ·min ⁻¹)	长度/mm	配套钻头直径/mm	外径/mm	冲击频率/Hz
中风压潜孔锤	110W	宣化中潜	0.8~1.2	7~12	932	110~130	98	14~18
高压潜孔锤	DHD340A	阿特拉斯	0.7~2.1	3.5~18	1138	130~155	92	14~25
	TRC55G	天瑞重工	1.0~2.5	7~19	1110	130~155	110	16~30

空气潜孔锤冲击钻头是一种用冷压方法在钻头体中镶嵌一定数量柱齿的钻头,柱齿由硬质合金及金刚石复合材料制成。

常规施工中选用的钻头为平面弹头齿型钻头,其工作特点是钻头齿与岩石的接触面积较小,有利于入岩,因此钻速较快,并且有利于节省材料和动力,在破碎和裂隙性以及岩性多变的岩层钻进中有良好的效果。

空气潜孔锤跟管钻进采用同心跟管潜孔锤钻头(见图 2),钻头可回收,回收口径 130 mm,展开口径为 152 mm。钻头为平面弹头齿型,与常规钻头不同的是,钻头中心为弹头齿,边刃为半球齿。目的是为了加强钻头的抗径向磨损能力。

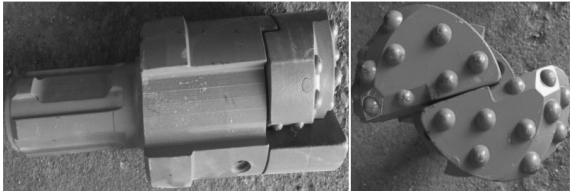


图 2 同心跟管潜孔锤钻头

该灭火工程下入的生产花管口径为 91 mm,为增加下管的成功率,施工尽可能选用较大口径冲击钻头,实际生产中主要使用的钻头口径为 115、130、152 mm。

3.3 施工工艺组合

由于火区钻孔数量众多,各钻孔煤层燃烧情况并不均匀,钻孔烧变岩层的高温破碎程度也不相同;在钻探施工过程中,同步进行连续注水降温工作,因钻孔间火烧层大裂隙是相互连接的,这样在已施工钻孔注水时就会对相邻钻孔施工产生很大影响。因此对各条带、各方位钻孔施工所采用的工艺组合,施工顺序一定要进行周密的设计。

将钻孔按孔深、施工机械等要素分为 3 组(见

表 4),在施工中根据设计钻孔参数和相邻钻孔情况,合理安排施工工艺组合及施工顺序,以利于降低施工成本,提高施工效率和质量。

表 4 钻孔施工工艺组合

序 号	孔深/ m	施工工艺组合		孔径/ mm	施工 方法	钻孔情况
		钻机型号	潜孔锤			
1	10~25	KG950B/150B	中风压	115/130	常规	轻微漏失/大量漏失
		KG950B	中风压	152	跟管	完全漏失/孔内有水
		150B	中风压	130	常规	轻微漏失
2	25~40	HJG-W300C	高压风	130	常规	轻微漏失/大量漏失
				152	跟管	完全漏失/孔内有水
3	>40	HJG-W300C	高压风	152	跟管	漏失/孔内有水

(1) 相对完整、深度浅、漏失轻微的钻孔,采用风量较小的空压机和功耗低的钻机施工,以节省成本。

(2) 工区地层漏失情况反映了地层的破碎程度,破碎漏失严重时,孔内风压损失急剧增大,采用高风量空压机和大能力的钻机,可降低卡埋钻事故风险。

(3) 连续降温注水会使钻孔之间沿裂隙窜水,而孔内有水会使钻屑粘附成团和上返背压增加,造成钻屑难以排出。遇到此类情况,一是对钻孔施工与降温注水工作进度差,如何防止注水影响周围钻孔施工;二是平行于火区煤层走向施工;三是遇到完全漏失及地下有水钻孔群,开孔直接采用空气潜孔锤跟管钻进施工工艺。

3.4 钻进方法及参数的选择

煤田灭火工程钻探目的是钻进成孔后,将生产花管下至设计层位,进行注浆灭火。因此施工的重点是护壁成孔,提高花管下入率。

新疆乌兰哈夏火区灭火钻探施工主要采用以常规空气潜孔锤钻进为主,空气潜孔锤跟管钻进配合的施工工艺。通常一个钻孔的施工流程如下:测放孔位、钻机就位、作业前检查、安装孔口管、钻进、提钻下管、验收封孔。

3.4.1 常规空气潜孔锤钻进

因钻孔地层变化大,孔内温度高,空气潜孔锤钻进要严格遵守灭火钻探企业标准和执行钻探设计,密切注意设备及钻孔情况,发现异常及时采取相应措施。空气潜孔锤钻进技术参数的选择是空气潜孔锤钻进的一项关键问题,主要包括空压机供风量与排气压力,钻进钻压与转速的选择。

3.4.1.1 供风量

考虑地层破碎,岩屑颗粒大,钻孔超径与漏失等因素,在选择空压机供风量时,根据经验公式,上返风速选取的是上限值,并考虑孔深修正系数和孔内涌水量修正系数,深度 $<80\text{ m}$ 的钻孔,空压机的供风量配置应在 $8.8\sim 29.6\text{ m}^3/\text{min}$,实际生产中基本可满足施工要求。

3.4.1.2 排气压力

空压机排气压力大小取决于潜孔锤性质、钻孔深度、孔内水柱高度等,潜孔锤的冲击频率和冲击功能都与风压有密切关系,一般提高风压,能提高钻速和最大钻进深度。空压机排气压力应满足潜孔锤工作压力,还应克服高压输气管路的压力损失、随钻孔深度增加的排屑压降、潜孔锤压降,在灭火注水降温孔内有水情况下还要克服孔内水柱压力才能正常工作。

根据施工经验,考虑高压输气管路压力损失、孔内压力降、潜孔锤压降等因素,推荐空压机的额定排气压力比潜孔锤启动工作压力应大 0.3 MPa 左右,且小于或等于潜孔锤最高工作压力。风压不宜过大,过大会造成潜孔锤超负荷工作而缩短寿命。另外在有水情况下钻进,背压对潜孔锤风压每 10 m 增加 0.1 MPa ,必须要采用高排气压力的空压机。

3.4.1.3 钻压

从空气潜孔锤破碎岩石的工作原理来看,岩石主要是在冲击动荷载作用下破碎的。因此潜孔锤钻进效率的高低,主要取决于冲击功,而钻压的作用就在于辅助冲击功充分发挥。在空气潜孔锤钻进工艺中,保持合理范围的钻压,有利于有效地传递冲击功,提高钻进效率。但是钻压过大和过小都会影响正常钻进,过大会影响冲击钻头的使用寿命;过小会影响岩石的破碎效果,从而降低钻进效率。

工区钻探施工实践证明,用于钻进的钻压,以每厘米钻头直径钻压 $0.3\sim 0.6\text{ kN}$ 最为合适,破碎地层取下限,完整地层取上限。

3.4.1.4 转速

空气潜孔锤钻进是属于慢回转的一种钻进方

法,回转的目的是使钻头上的球齿在每经一次冲击后落入新的岩层位置。合理的选择转速,对钻头寿命乃至钻探成本至关重要。

工区施工中根据地层不同,选择的转速如下:砂岩层 $80\sim 100\text{ r/min}$;泥岩层 $60\sim 80\text{ r/min}$;煤层 $40\sim 60\text{ r/min}$;烧变岩层 $10\sim 30\text{ r/min}$ 。通过地层的变化及时改变转速,取得了良好的经济效果,整个工区钻探施工过程中,没有发生过任何钻头的异常磨损,球齿掉落等现象。

3.4.2 空气潜孔锤跟管钻进

空气潜孔锤跟管钻进工艺流程与常规空气钻进工艺类似,不同之处在于跟管套管需和钻杆同时加接;下入花管后,需用液压拔管机将跟管套管从孔内拔出。

乌兰哈夏火区钻探施工中空气潜孔锤跟管钻进选用同心旋翼式跟管钻具,该钻具扩孔钻头为两个形状相同,方向相反的扇形,两扩孔钻头的相对面滑动配合,当顺时针转动时,扩孔钻头沿滑动面移动和分别以传动轴为中心转动而张开,并在开启到设计位置后被限位,同心钻头钻出的孔径大于套管的最大外径,从而实现扩孔钻进;当逆时针转动时,两扩孔钻头收拢实现从套管内回收。压缩空气经潜孔锤做功后到达孔底,冲刷破碎岩屑并冷却钻头,岩屑经钻头排粉槽和套管与钻杆的环空被高速吹出孔外。其优点是扩孔钻头工作时的中心与整套钻具中心重合,使用寿命长,受力平衡;两个扩孔钻头在工作状态时互相自锁,传递扭矩可靠,扩孔效率高;使用方便快捷。

因乌兰哈夏火区烧变岩地层破碎,裂隙发育,在钻进过程中漏失严重,主要表现为钻孔间发生跑风,钻进中漏风现象。施工中为了解决成孔问题而不得不采取反复灌土固壁,多次扫孔成孔的方法。同时当烧变岩层厚度大时,采用常规护壁手段费时费力,不仅易发生钻探事故,而且提钻后钻孔坍塌掉块,难以下入花管。这样既加大了施工成本,又严重的拖后了施工进度。

如高温区3线钻孔ZK77号钻孔施工钻至 20 m 时,出现孔内不返风现象,而且空气从邻孔3线ZK21号钻孔返出,提钻进行了6次灌土护壁和反复扫孔才下管成功。4线钻孔ZK86号也出现了同样的情况,空气从邻孔ZK76号排出,进行了5次灌土护壁扫孔下管未果,挪孔换空气跟管钻进工艺施工成功。

从乌兰哈夏灭火钻探施工效果来看,应用空气潜孔锤跟管钻进工艺有效地解决了成孔的难题,但

也存在一定的局限性。

(1)有效地解决了因钻孔漏失和坍塌,造成大颗粒岩屑难以返出的问题,保证钻进施工钻孔的安全,为后续下管质量的保证奠定了基础。空气跟管钻进工艺排出岩屑见图3。



图3 空气潜孔锤跟管钻进排出钻屑

(2)完成40 m以浅的跟管钻进钻孔施工,平均单孔用时4 h;完成40 m以深的跟管钻进钻孔施工,平均用时8 h,单孔效率较常规钻探方法提高2倍以上,证明了空气潜孔锤跟管钻进工艺的高效性。

(3)直接效益明显,常规钻进施工费时费力费钱,而且成功率得不到保证,而空气潜孔锤跟管钻进工艺施工的钻孔优秀率几乎达100%,而且都是一次成功。无形中节约了大量的材料和时间成本,说明了该工艺的可靠性。

(4)局限性:在火区破碎地层钻孔进行跟管钻进时,如果跟进深度>40 m,钻进摩擦阻力和扭矩不断增大,跟管钻进效率将急剧下降,造成套管跟进困难,套管的强度不够和套管难以起拔等问题。因工区大多钻孔深度<40 m,目前设备尚可应用。将来采用空气潜孔锤跟管钻进施工深孔,应采用多级套管跟进和双动力钻机施工,可有效地增加施工孔深。

4 钻探难点攻关

4.1 烧变岩钻进

乌兰哈夏火区烧变岩地层其钻探特性表现为硬、脆、碎,在钻进中,上返的小颗粒岩粉极少,多为大颗粒的块状结构,一旦发生漏失,钻屑很难排出。如顶漏继续钻进,反复划眼不进尺,孔壁形成“大肚子”,甚至发生卡钻、埋钻事故。钻孔护壁堵漏措施更是关系到花管能否下至设计孔深,钻孔质量能否合格的关键。因此在煤田灭火工程钻探施工中要解决的难点之一就是地层的护壁堵漏,提高花管下入

率的问题。在施工中经试验采取了3种有效的措施:增加气量法、灌土护壁法、雾化钻进法。

4.1.1 增加气量法

在漏失地层,采用的空压机气量过小会导致钻屑无法排出,在选配空压机时,应配置风量有余量的空压机,但在严重破碎地层,不应盲目加大气量,会造成孔壁失稳的加剧,应采取其他护壁措施。

4.1.2 灌土护壁法

当遇到严重漏失不返渣地层时,可采用灌土护壁法,做法是将优质粘土灌入孔内漏失部位向上10 m左右,并配合雾化钻进反复划眼至孔底,并通过多次灌土护壁来堵塞漏失通道。

4.1.3 雾化钻进法

当钻遇破碎漏失时,采用雾化钻进方法是非常有效的。雾化钻进在空气流中压入少量清水,使介质形成以气为主,以水为辅,即空气中含有水滴的雾化状态。其作用改变介质状态,提高携带岩粉的能力;湿润孔壁,凝聚岩粉产生泥饼起到护壁的作用。

通常雾化钻进施工需使用专用的雾化设备,在要求便携,机动的工区施工,不仅需要增加额外的动力设备,而且搬迁麻烦,为此火区钻探施工在钻机上创新加装雾化装置,该装置由高压罐、阀门、喷嘴等部分组成,通过空压机分支管路对高压罐供压,通过球阀改变雾化水流的大小来适应不同破碎程度地层的钻进。该雾化装置在施工中应用效果很好。其装置设计加工图及安装效果图见图4和图5。

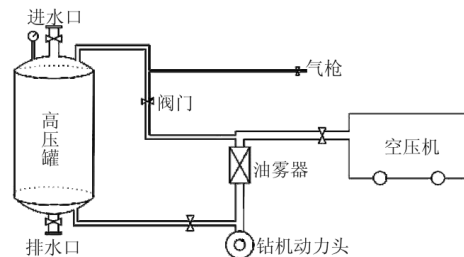


图4 设计加工图



图5 安装效果图

4.2 高温钻孔施工

乌兰哈夏火区煤层处于燃烧状态,在充分注水降温后高温层的平均温度约250℃,部分燃烧层的温度最高可达400℃以上。钻孔地层高温对施工工艺和施工安全带来了很大的影响,施工初期常发生钻杆高温强度下降扭断、钻具高温损坏、人员蒸汽灼伤的事故,针对以上情况,采取了如下的技术措施。

4.2.1 合理安排施工顺序

因火区面积广,地层温度传导慢,只有通过钻开火烧层,向地层裂隙内注入大量的水进行热量交换降温。钻孔施工顺序由低温区向高温区进行,高温区地层经过充分的降温后再进行钻探施工。

4.2.2 钻具改进

施工中发现潜孔锤的工作寿命很短,经拆卸检修发现潜孔锤逆止阀容易损坏。潜孔锤逆止阀的作用是防止岩屑及水倒流入潜孔锤中。潜孔锤逆止阀头的材质为树脂材质,高温熔化变形后造成岩屑进入腔体内,使得潜孔锤停止工作,寿命缩短。经与厂家沟通后,将潜孔锤逆止阀头改为合金材质,成功地解决了此问题。

4.2.3 钻进防范措施

通过观察钻进情况来判断钻孔温度,如孔口冒烟颜色,青烟较白烟温度高;返出钻屑的温度;机上钻杆的颜色及温度,颜色越深(甚至呈黑红色),钻孔温度越高。在钻进高温钻孔时,坚持短进尺,勤扫孔,发现孔内阻力过大时应及时提钻检查。

4.3 封孔方案

压力注浆为灭火工程的重要工序,而灭火孔钻探施工的封孔质量好坏直接关系到压力注浆工序的成败,也关系到施工质量验收的合格与否。以往的施工往往采取地表挖树坑,灌注水泥的方法封孔,极易产生3种质量风险:(1)高温水蒸汽将花管连带水泥从孔内顶起;(2)高压注浆时,灭火浆液从水泥与地表结合处泄压漏出;(3)高压注浆时,封孔无法承压,水泥从地表覆盖松散层中泄压漏出。

因此在乌兰哈夏火区灭火钻探施工中采取了两大措施来保证封孔质量:(1)必须将实管(下部与花管连接)下至完整原始地层上;(2)采取了包裹法和焊接法封孔(包裹法是使用袋子或棉布在连接处包裹成纺锤形架桥注水泥浆,此方法简易,但架桥质量难以控制;焊接法是切割外径与孔径,内径与花管外径相匹配的环状隔盖焊接在连接处架桥注水泥浆,

此方法可形成标准化,提高封孔速度和封孔质量)。

5 结语

乌兰哈夏火区钻探施工历时72d,共完成钻孔179个,进尺4899.6m,下入花管量4744.5m。通过生产实践,取得了如下体会。

(1)随着钻孔深度的增加,完成钻孔工序的时间并不是线性增加的。钻孔越深,相应的烧变岩地层深度和厚度增加,钻进难度大大提高。前期施工出现了钻探设备性能不够,钻孔护壁方法单一,辅助工作时间过长,花管下入难度增大等问题。因此钻探技术设计应考虑全面并留有余地。

(2)空气潜孔锤钻进工艺的改进,提高了灭火工程钻探施工效率。是解决破碎、漏失和坍塌等地层施工困难问题的有效手段。

(3)空气潜孔锤组合钻进工艺,平均生产成本低,经济效益良好。提高了火区治理效率,降低了治理成本。有利于提高灭火工程的经济效益和社会效益。该施工工艺在相关地质灾害治理领域是值得大力推广的。

(4)继续研究改进空气潜孔锤钻具,提高其在煤田灭火钻探工程中的适用性。进行复杂地层钻进施工技术研究,如双动力套管钻进,双动力空气反循环钻进等技术。进行雾化设备的改进,研发可靠、更高效的雾化设备,弥补空气介质钻进的不足。

参考文献:

- [1] 李政昭,吴金生,钱锋,等.覆盖层绿色钻探新方法—空气潜孔锤取心跟管钻进[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):122-125.
- [2] 张国忠.气动冲击设备及其设计[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [3] 耿瑞伦.多工艺空气钻探[M].北京:地质出版社,1995.
- [4] 卢予北,王建华,陈莹,等.空气潜孔锤在松散地层中的钻进试验[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(7):9-11,27.
- [5] 石永泉.潜孔锤钻进技术[M].四川成都:西南交大出版社,2013.
- [6] 胡郁乐,张惠,等.深部地热钻井与成井技术[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2013.
- [7] 楼日新.复杂地层潜孔锤跟管钻进技术研究[D].四川成都:成都理工大学,2007:64-89.
- [8] 李广兵,叶礼明,李泉,等.采用空气潜孔锤钻进技术在井筒内施工泄水孔实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):48-51.
- [9] 张所邦,谭建国,王爱军,等.宜昌磷矿北部整装勘查项目深孔复杂地层钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):23-27.

河南内乡板厂铜多金属矿 ZK1724 孔钻探施工技术

韩明耀, 柳硕林

(河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院, 河南 郑州 450001)

摘要:河南省内乡县板厂一带铜多金属矿区, 地层构造复杂, 蚀变强烈, 裂隙发育, 冲洗液漏失严重, 深部钻探难度大。施工过程中, 通过优选设备机具, 优化孔身结构, 摸索合理的钻具和套管级配, 优选钻进技术规程参数, 采用植物胶体系细分散低固相冲洗液, 多种措施联合堵漏, 顺利完成了钻探任务。为矿区下一步钻探施工提供了技术保障, 为深孔复杂地层钻探提供了可行的经验。

关键词:构造蚀变带; 孔身结构; 钻进参数; 冲洗液; 护壁堵漏

中图分类号: P634 文献标识码: B 文章编号: 1672-7428(2017)12-0054-05

Drilling Technology of Well ZK1724 in Banchang Copper Polymetallic Mining Area in Neixiang County of Henan Province/HAN Ming-yao, LIU Shuo-lin (The First Geological Exploration Institute of Henan Provincial Bureau of Geo-exploration and Mineral Development, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: Deep drilling is difficult in Banchang copper polymetallic mining area because of complex stratigraphic structure, strong alteration, fissure development and serious loss of circulation. Series of measures were taken to ensure smooth drilling in the construction process, including optimizing equipments, well structure design and drilling technical parameters, exploring reasonable drilling tools and casing gradation and using plant gum system fine-dispersed low solid flushing fluid, which provide the technical support for the subsequent drilling operation and can be feasible experience for deep complex formations drilling.

Key words: structural alteration zone; borehole structure; drilling parameters; flushing fluid; wall protection and leakage control

1 概述

河南省内乡县板厂一带铜多金属矿勘查, 是省重点找矿项目。矿区地层构造复杂破碎, 蚀变严重; 地层裂隙发育, 冲洗液漏失, 孔壁维护难度很大。该项目 2011 年河南省国土资源厅已立项, 前期钻孔较浅, 2016 年续作后, 为控制矿体在深部延伸情况, 设计钻孔更深。

其中 ZK1724 钻孔, 设计孔深 1700 m, 倾角 85°, 方位角 20°, 终孔孔径 ≥ 76 mm。实际完成钻探孔深 1712.56 m, 为矿区目前最深钻孔。ZK1724 钻孔自 2016 年 5 月 16 日开钻, 11 月 25 日终孔, 施工 193 d, 钻探总台时 4632 h, 台月效率为 266.20 m。ZK1724 钻孔矿体厚度 381.63 m, 矿心采取率 99.73%, 岩石厚度 1662.52 m, 岩心采取率 98.36%, 终孔倾角为 75°, 方位角为 19°, 经地质专家现场验收, 综合评定为优质孔。在长达 6 个多月的现场实际施工过程中, 对于深孔复杂地层的施工

技术和经验进行了艰苦的探索与细致的总结, 并进行了有效的技术改进, 从而实现了工程质量和钻进效率的提高。

2 矿区简介及地层

2.1 矿区简介

矿区位于伏牛山南麓, 秦岭山脉东段, 豫西南伏牛山脉南侧, 属中低山区。区内山峦起伏, 地形复杂, 坡度一般在 30°左右, 一般相对高差 300 ~ 500 m。行政区划属河南省内乡县管辖。区内有 S249 省道和县乡公路网相通, 交通方便。

矿区属长江流域汉水水系, 气候属亚热带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均气温 15.2 °C, 年平均降雨量 877 mm。冰冻期一般在每年的 11 月至次年 2 月份, 全年无霜期 220 d 左右。

区内居民点较多, 人口比较集中, 劳动力资源丰富。该区工业不发达, 主要以矿山开发为主, 目前开

收稿日期: 2017-06-28; 修回日期: 2017-10-25

作者简介: 韩明耀, 男, 汉族, 1974 年生, 从事岩心钻探、水文水井钻探技术及管理工作, 河南省郑州市高新区莲花街 56 号地矿大厦 3007 室, 1069090551@qq.com。

发矿产有金、银、铜、铁、铅、锌等金属矿产及砂线石、石墨、海泡石及花岗岩等非金属矿产。

2.2 矿区地层

矿区位于小水-老虎山背斜南翼,朱阳关-夏馆断裂上,由于多次的变质与变形作用,施工区域内的褶皱与断裂等构造极为发育。矿区出露地层为秦岭岩群雁岭沟岩组(Pt_{1Y}),以及少量第四系(Q)。

雁岭沟岩组(Pt_{1Y}):出露主要岩性为黑云二长片麻岩、斜长角闪片麻岩、白云石大理岩,含石墨大理岩、透闪石化大理岩、铁白云石化碎裂大理岩等各类大理岩夹石英片岩、斜长角闪片岩、黑云二长片麻岩、砂线二长片麻岩等。可结合岩石组合特性,大致上将其分为4个主要的岩性段。

(1)第四系(Q):分布于河谷及山前沟谷内。主要岩性为砂砾石层,残坡积物,亚砂土,亚粘土及粘土,井壁容易发生失稳。

(2)上部岩性段:主要岩性为白云石大理岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩。岩石裂隙发育,冲洗液漏失风险高。

(3)中部岩性段:岩性组合为白云石大理岩,碎裂透辉(闪)石大理岩夹含石墨大理岩。矿(化)体赋存于该段内的构造蚀变带与花岗(斑)岩的内外接触带中。构造蚀变带岩性有绿泥石、绿帘石等,岩石稳定性差,破碎,易坍塌,部分层段具水敏性。岩石中石墨含量过高时,孔壁稳定性也相应降低,且软硬不均,对岩心采取和防止孔斜要求较高。

(4)下部岩性段:岩性组合为白云石大理岩,白云质大理岩,含石墨大理岩夹黑云斜长片麻岩等。岩心破碎,取心比较困难,回次进尺少,须少打进尺勤起钻,钻进效率低。

工作区主要岩石白云岩、大理岩可钻性4~6级,研磨性低;片麻岩、花岗岩可钻性6~8级,中等研磨性。

3 钻进方法和工艺措施

3.1 主要设备机具

XY-6B型岩心钻机:额定钻进深度1500~2000 m,最大扭矩6.7 kN·m,立轴转速80~1000 r/min,立轴最大起重力200 kN,卷扬机最大提升力60 kN。

3NBB260型泥浆泵:缸套直径85 mm,5个挡位,泵量35~260 L/min,泵压7~10 MPa。

SG-23型钻塔:名义高度23 m,最大负荷30 t。

SJ-2000型绞车:钢丝绳长度2000 m。

XJL-42型测斜仪:总长度1700 mm,外径42 mm。

金刚石绳索取心主要使用HQ、NQ钻具,使用木马式夹持器。

3.2 孔身结构及级配

孔身结构如图1所示。ZK1724钻孔设计深度较大,地层复杂,上部复杂层位较多,深部地层地质情况未知,为确保钻探施工顺利进行,必须留有变径余地,开孔直径尽可能大一些,两级套管之间的孔深间隔尽可能大一些,做好下多层套管的准备,形成多台阶的钻孔结构。

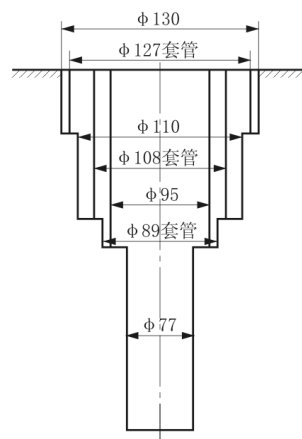


图1 孔身结构示意图

开孔口径 $\Phi 130$ mm,使用单管钻具,金刚石钻头,钻进至32.11 m,见完整基岩,因孔内漏水严重且上部坍塌,下入 $\Phi 127$ mm套管。

换用 $\Phi 110$ mm金刚石单管钻具,钻进至65.28 m,下入 $\Phi 108$ mm套管。这一孔段地层比较完整,但冲洗液全漏失,顶漏钻进,未采取堵漏措施。

再换用HQ系列S95B绳索取心钻具,钻头外径95 mm,扩孔器外径95.3 mm,钻进至584.78 m。其间钻遇数层破碎带和水敏性地层,使用了惰性材料、桥接材料、水泥、凝胶等堵漏材料,大部分冲洗液返出孔口。经技术人员对岩心和地层分析,为维护上部地层稳定、隔阻漏失地层、提高效率,决定换径,下入 $\Phi 89$ mm套管。

最后采用NQ系列S76绳索取心钻具,钻头外径加大至77 mm,扩孔器外径77.3 mm,钻进至终孔1712.56 m。

各级套管使用地质套管,壁厚4.5 mm,确保套

管强度。采用外接箍连接,接箍内壁与套管体内壁无台阶,从而保证套管内径最大化、套管与钻具环状间隙最大化,可有效减小回转阻力、降低深孔泵压、利于较大颗粒岩粉上返;同时,套管体内壁平滑,避免了接箍和钻具的直接回转摩擦,从而大大减少了因接箍断裂或脱扣造成的套管事故。套管丝扣间使用反扣连接,可有效减少套管脱扣事故,也便于终孔后起拔套管。

3.3 钻进方法与技术参数

按照施工要求,结合项目实际情况,全孔采用金刚石回转钻进方法施工。 $\varnothing 130$ 、110 mm 孔段使用单管钻具,回次终了采取岩心时,从水龙头上部向钻具内投入卡料或卡丝,确保岩心采取率。 $\varnothing 95$ 、77 mm 孔段使用绳索取心钻进方法,岩心采取率高,钻探效率高。

综合考虑设备机具能力、口径、钻头、钻进方法和地层情况,优选钻进技术规程参数。钻进过程中,根据地层岩性情况,对钻压、转速、冲洗液量等参数进行有机配合,及时调整。孔内情况正常时,转速取上限值以提高效率。具体钻进技术参数见表1。

表1 钻进技术参数

钻进方法	钻头直径/ mm	钻压/ kN	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	泵量/ ($L \cdot \min^{-1}$)
单管钻进	130	6 ~ 15	80 ~ 400	60 ~ 120
单管钻进	110	12 ~ 15	150 ~ 500	60 ~ 120
绳索取心	95	12 ~ 15	350 ~ 700	60 ~ 120
绳索取心	77	8 ~ 12	400 ~ 800	60 ~ 100

3.4 冲洗液

3.4.1 正常钻进时冲洗液

钻孔正常钻进时,使用细分散低固相植物胶体系冲洗液,其优点是密度低,失水量小,胶体率高,对岩屑的悬浮和携带能力强。配方为:1.5% 膨润土 + 0.2% ~ 0.25% 纯碱 + 0.6% 植物胶 + 0.6% ~ 0.8% 腐植酸钾 + 0.03% 聚丙烯酸钾。孔深时或孔内阻力大时,加入润滑剂 0.3%。配置时严格按照上述材料顺序添加,膨润土应充分预水化,充分搅拌。配置出的冲洗液性能为:粘度 22 ~ 26 s,密度 1.03 g/cm³,pH 值 8,失水量 < 12 mL/30 min,胶体率 > 98%。

3.4.2 水敏化地层冲洗液

钻孔钻遇绿泥石化、高岭土化地层时,表现出坍塌、缩径等水敏化特征,钻具回转阻力大,起下钻阻

力大,甚至发生卡钻事故。在冲洗液中加入钙盐作为抑制剂,转化为钙处理冲洗液,为方便购置,选用石灰作为钙盐。

具体配置方法为:第一步,原浆中加入纤维素 0.2% ~ 0.3%,降低失水量。第二步,加入钙盐(选用石灰)转化为钙处理泥浆,Ca²⁺ 浓度维持在 0.8 ~ 1.5 kg/m³ 以上,可以适当多加一些石灰,使 Ca²⁺ 处于过饱和状态。钙处理后泥浆表观粘度、漏斗粘度会显著增加,失水量增大。第三步,加入腐植酸钾调节泥浆粘度和失水量。

3.4.3 复杂地层冲洗液

矿区钻探的复杂地层主要是构造蚀变带岩层,如绿帘石等,岩石松散、破碎、胶结性差,钻探过程中,轻则掉块;严重时钻孔垮塌,憋车憋泵;甚至造成孔内事故。图2为绿帘石层岩心图片。泥浆配置思路是适当提高粘度,尽量降低失水量,保护孔壁,预防坍塌,维持正常钻进。



图2 绿帘石层岩心图片

泥浆配方为:2% 膨润土 + 0.2% ~ 0.3% 纯碱 + 0.2% ~ 0.3% 纤维素 + 0.6% 植物胶 + 0.6% ~ 0.8% 腐植酸钾 + 0.1% ~ 0.2% 磺化沥青 + 0.03% 聚丙烯酸钾 + 0.3% 润滑剂。

配置出的泥浆性能为:粘度 26 ~ 32 s,密度 1.03 g/cm³,pH 值 8,失水量 6 ~ 8 mL/30 min,胶体率接近 100%。

3.4.4 冲洗液维护与管理

(1) 冲洗液体系与配方需要结合地层条件与钻进方法来确定,现场应用过程中在严格执行冲洗液方案的基础上,也应对可能出现的异常情况做好工程预案,灵活处理。

(2) 钻井现场应配备专用的泥浆测试仪器,并认真做好泥浆性能测试工作,整理好泥浆班报表。严密观测六速旋转粘度值、中压失水量、含砂量、pH 值等常规性能,一旦发现异常应引起充分重视,分析

性能波动的原因,并进行针对性解决。

(3)做好现场泥浆净化工作。定期清理沉淀池、循环槽以及上水池,勤捞砂,保证除砂器开启率。避免雨水、污水等汇入泥浆池而引起泥浆性能大幅波动。

(4)泥浆配制应确保处理剂性能充分发挥。坂土预水化时间应在 24 h 以上,纤维素等大分子处理剂应预先配制成高浓度胶液,维护过程中应适量、均匀地补充至上水池中。

(5)冲洗液体系转换时应做好小样实验,分析转换过程中是否会出现大的性能波动,全井转换时应兼顾效率与效果。

3.5 护壁堵漏

冲洗液漏失是 ZK1724 孔钻探施工的一大难题。漏失发生后将导致井内静液柱压力下降,难以平衡地层空隙压力,从而引发垮塌等复杂问题。冲洗液难以建立循环,钻进工作难以顺利进行,钻进施工安全得不到保证,严重者将导致钻孔报废。矿区白云岩、大理岩地层,可能出现轻微漏失、严重漏失、全漏失等不同程度漏失情况。做好护壁堵漏工作,主要采取了以下几种方法。

3.5.1 顶漏钻进

孔深较浅、供水水源充足,钻探施工中对轻微漏失不做处理,顶漏钻进。钻探上部地层采用 $\varnothing 130$ 、110 mm 口径施工,产生的岩粉量较大,通过井内自然沉降以及在压差作用下部分岩粉在近井壁处渗滤而侵入裂隙深处,从而起到一定的封堵效果。如此,可以实现泥浆的自我堵漏效果,避免了因为堵漏作业而引起的工期延长以及材料成本增加。

3.5.2 随钻堵漏

适用于微裂缝轻微漏失,常规方法是在冲洗液中加入惰性材料或随钻堵漏剂,或者在 CMC 溶液中加入石灰石粉、锯末等随钻材料,通过地面搅拌罐进行强力混合搅拌,确保其均匀,并保持较高的粘度,经钻杆灌注至井底。开动钻机后低转速回转,并上下活动钻具扫孔,保持小排量。一次堵漏难以奏效时可多次连续采取该措施。相比于其它堵漏措施,该方法操作简单,随钻随堵,限于随钻材料尺寸较小,适合进行微孔隙及微裂隙等轻微漏失。

3.5.3 桥接材料堵漏

当漏失程度较为严重,随钻堵漏难以奏效时,需要配制桥接堵漏浆液,大致配方为:清水 + PHP +

CMC + 桥接材料 + 锯末,其中桥接材料为 803 堵漏王或地层压力增强剂。配制与灌注方法与随钻堵漏大致相同。与随钻堵漏相比,桥接材料组分更为复杂多样,相当于化学材料与惰性材料联合堵漏,且惰性材料粒径更大、纤维更长,堵漏效果更好。

3.5.4 水泥砂浆堵漏

孔内漏失严重,孔口返出的冲洗液量很小或不返时,使用水泥砂浆堵漏方法:清水 + 水泥 + 河砂 + 1% NaCl(早强剂),水灰比控制在 0.4 ~ 0.5 的范围内。其中水泥标号应大于 42.5 级,而河砂尺寸应为中细粒径。水泥最好现买现用,保存时应注意防潮结块。水泥砂浆配制完成后,应一次性连续灌注至井内,待全部钻具起出井口后候凝 36 ~ 48 h,候凝时间不足有可能导致水泥固结不充分,候凝时间过长水泥强度较高时导致扫孔时间延长。计算好替浆液,确保水泥砂浆顶替到位。扫除水泥塞过程中避免使用清水,以防携带能力不足而导致沉砂过多;控制扫孔速度不要过快,保证冲洗液循环充分以最大程度保证井眼清洁。

3.5.5 溶胀型堵漏材料

孔内漏失严重,孔口返出的冲洗液量小或不返时,使用具有延迟膨胀特点的材料堵漏,如凝胶等。经过 ZK1724 孔的凝胶堵漏实践,与水泥砂浆堵漏相比,操作程序相对简单,节省了水泥候凝时间,也避免了水泥初凝早,抱死钻具的事故风险。

膨胀性堵漏剂自身含有多种亲水基团,并且具有一定的交联度(或外加交联剂),可吸收相当于自身质量上千倍的液态水而形成体状凝胶结构。初始阶段吸水较慢,后期吸水膨胀速率大幅加快,从而方便现场配制并泵送至漏失层段,在漏失通道内不断膨胀占位,从而起到良好的封堵作用。该方法使用过程中应严格注意各时间节点,以防未泵送到位时即出现过度膨胀,而引起堵漏失败。

3.5.6 套管堵漏

套管堵漏即先强行钻穿漏层后,下入套管将漏层进行封隔。ZK1724 孔下入的 $\varnothing 127$ 、108、89 mm 三层套管,都起到了很好的堵漏效果。但是套管封隔受井身结构和套管程序的限制,不到万不得已的情况不能采用。

4 结语

(1) ZK1724 孔多策并举,顺利完成了钻探任

务,提高了钻探施工效率和工程质量,为矿区下一步钻探施工提供了技术保障,为深孔复杂地层钻探提供了可行的经验。

(2)《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010)规定的钻探公称口径系列为150(S)、122(P)、96(H)、76(N) mm等,实际的钻头、扩孔器外径尺寸可根据不同的钻进方法和地层情况,在合理范围内适当调整。ZK1724孔据此大胆改进,使用的四级钻头外径为130、110、95、77 mm,同时,对钻具级配、套管结构也做出相应的调整。实践证明是可行的,适应矿区地层情况,满足地质要求,有利于提高钻效,节约成本。

(3)在地层漏失的情况下,坚持使用细分散低固相冲洗液,是保障正常钻进的关键。细分散低固相冲洗液的固相含量低,流动性好,润滑性能好,适应金刚石绳索取心钻探,且不易发生缩径、坍塌卡钻等事故。构造蚀变带复杂地层,岩石松散、破碎、胶结性差、有的层位具水敏性,细分散低固相冲洗液自由水含量少,能有效地阻止冲洗液中自由水向岩层中渗透,减少对岩层的干扰,保证钻孔的安全。

(4)尝试了顶漏钻进、随钻堵漏、专门堵漏、套管堵漏等方法,试用了惰性材料、桥接材料、水泥砂浆、溶胀型材料(凝胶)等堵漏材料,对漏失地层特性判断与堵漏方法、堵漏材料的关联性有了初步认

识。

参考文献:

- [1] 雷淮. 河南省内乡县板厂铜多金属矿床成因及成矿模式探讨[J]. 中国矿业, 2011, 20(9): 62-68.
 - [2] 朱恒银, 蔡正水, 王强, 等. 赣州科学钻探 NLS-D-1 孔施工技术研究与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(6): 1-7.
 - [3] 曾石友, 杨宽才, 蔡记华, 等. 小秦岭金矿田 2000m 深孔钻探技术[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 175-180.
 - [4] 王达, 何远信, 等. 地质钻探手册[M]. 湖南长沙: 中南大学出版社, 2014.
 - [5] 于辉, 史强, 叶兰肃, 等. 新疆阿舍勒铜矿 ZK2102 孔钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S2): 330-333.
 - [6] 段志强, 李生海. 低固相冲洗液在赣南再里地区的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 26-29.
 - [7] 陶士先, 纪卫军, 等. 地质钻探复杂地层冲洗液对策及应用案例[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
 - [8] 张统得, 陈礼仪, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目钻井液技术与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 139-142.
 - [9] 翟育峰, 陈师逊, 张英传. 水泥封孔技术在罗布莎科钻孔施工中的应用[J]. 西部探矿工程, 2013, 25(3): 70-72.
 - [10] 石立明, 曹灶开. 凝胶堵漏技术在阳山矿区漏失地层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(9): 22-24.
 - [11] 张所邦, 谭建国, 王爱军, 等. 宜昌磷矿北部整装勘查项目深孔复杂地层钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4): 23-27.
-
- (上接第 33 页)
- 天然裂缝发育程度,并针对性优化该段酸液用量将成为后续工作的难点。
- 参考文献:**
- [1] 周德华, 焦方正, 贾长贵, 等. JY1HF 页岩气水平井大型分段压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 75-80.
 - [2] 郝志伟, 王宇宾, 宋有胜, 等. 高温深井碳酸盐岩储层降滤失酸体系研究与应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(4): 69-71.
 - [3] 陈冀崧, 雷鸣, 赵立强, 等. 川东北碳酸盐岩气藏酸-岩反应特征研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(4): 83-86.
 - [4] 陈赓良, 黄瑛. 碳酸盐岩酸化反应机理分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 104-108.
 - [5] 赵立强. 碳酸盐岩和盐酸反应动力学的试验研究[J]. 西南石油学院学报, 1988, 10(1): 34-41.
 - [6] 李颖川. 采油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 214-216.
 - [7] 李力. 用人工模拟裂缝装置研究盐酸/白云岩反应速率的影响因素[J]. 钻采工艺, 2000, 23(1): 28-31.
 - [8] 李莹, 卢渊, 伊向艺, 等. 碳酸盐岩储层不同酸液体系酸岩反应动力学实验研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(33): 9010-9013.
 - [9] 曲占庆, 于姣姣, 温庆志, 等. 水平井分段酸化效果影响因素分析及优化[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 63-68.
 - [10] 吕小明, 丁里, 石华强, 等. 长庆油田高桥区块碳酸盐岩储层酸岩反应基础研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(6): 106-108.
 - [11] 刘如红. 酸岩反应速率影响因素的多元线性回归分析研究[J]. 石油化工应用, 2013, 32(3): 13-15.
 - [12] 满江红, 张玉梅. 深井碳酸盐岩储层深度酸压工艺技术探讨[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(1): 77-80.
 - [13] 张建利, 孙忠杰, 张泽兰. 碳酸盐岩油藏酸岩反应动力学实验研究[J]. 油田化学, 2003, 20(3): 216-219.
 - [14] 刘飞, 赵立强, 孟向丽, 等. 前置缓速酸加砂压裂中酸岩反应模拟研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(1): 104-108.
 - [15] 韩慧芬. 酸液滤失的影响因素分析[J]. 钻采工艺, 2002, 25(3): 29-31.
 - [16] 李年银, 赵立强, 刘平礼. 碳酸盐岩酸压过程中的酸液滤失研究[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(3): 109-111.
 - [17] 潘琼, 段国彬. 酸液滤失实验模型的建立[J]. 钻采工艺, 2004, 27(3): 88-89.

海底天然气水合物取样器冷却技术研究现状

朱黄超¹, 陈家旺¹, 刘芳兰², 肖波², 秦华伟³

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 3. 杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘要: 天然气水合物是一种潜力巨大的替代性能源, 其可以稳定地存在于一定的低温高压条件之下。在天然气水合物钻探作业中, 冷却保温技术是天然气水合物钻探的关键技术之一。低温可以抑制天然气水合物分解, 这对获取水合物样品有着十分重要的作用。本文首先概述了海底天然气水合物取样器保温冷却技术研究现状, 并对取样器冷却保温技术进行深入的调查研究和分析。然后对日本的 PTCS 取样器中的冷却保温技术和国内具有冷却保温功能的取样器进行了详细介绍, 并对相关技术进行分析和总结, 最后对海底天然气水合物取样器冷却保温技术的发展做了总结与展望。

关键词: 海底天然气水合物取样; 天然气水合物取样器; 冷却; 保温; 抑制水合物分解

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0059-07

Research Status of Cooling Technology for Submarine Natural Gas Hydrate Sampler/ZHU Huang-chao¹, CHEN Jia-wang¹, LIU Fang-lan², XIAO Bo², QIN Hua-wei³ (1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan Zhejiang 316021, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510075, China; 3. Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Natural gas hydrate is a potential alternative energy source that is stable under the conditions of certain low temperatures and high pressures. In the gas hydrate drilling, cooling and temperature insulating technology is one of the key technologies. Low temperature can inhibit the decomposition natural gas hydrate, which is very important for hydrate samples obtaining. This paper summarizes the research status of submarine natural gas hydrate sampler in cooling and temperature insulating technology at the first, the thorough investigation and analysis are made. Then the cooling and temperature insulating technology of Japan PTCS sampler and the sampler technology in China are described in detail, the related technologies are analyzed and summarized. Finally, the development of the cooling and temperature insulating technology for the natural gas hydrate sampler is summarized and predicted.

Key words: submarine natural gas hydrate sampling; natural gas hydrate sampler; cooling; insulation; inhibition of hydrate decomposition

0 引言

天然气水合物俗称“可燃冰”、“固体瓦斯”等, 其特点是分布范围广、储量丰富、能量密度大和清洁高效^[1]。据研究表明, 单就世界大洋中天然气水合物的总量换算成甲烷气体就高达 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其含碳量要比迄今为止世界上所有已知石油、天然气、煤炭矿产总和还要大出 2 倍^[2-3]。天然气水合物一般赋存于深海沉积物和陆上冻土带中。对于海底天然气水合物, 目前大多数是通过勘探机构采集海底沉积物岩样(心)的方式来分析判断是否有天然气水合

物的存在, 但是天然气水合物只能稳定存在于低温(一般 $\leq 10^\circ\text{C}$)、高压(一般 $\geq 3.8 \text{ MPa}$) 环境中。当岩心提升到常温常压的环境时, 其中含有的天然气水合物的组分会全部或大部分分解, 则达不到原位勘探的目的。为了能获取保持在原始条件下的沉积物岩心样品, 各国科学家们都在致力于研制性能可靠的天然气水合物保真(既能保压又能保温)取样器。目前国内外的天然气水合物取样器还是以保压型为主, 这种取样器大多采用机械式保压来获取岩心, 一旦机械保压机构的密封性稍有下降, 那么岩心

收稿日期: 2017-02-20; 修回日期: 2017-10-26

作者简介: 朱黄超, 男, 汉族, 1992 年生, 硕士研究生在读, 从事海底天然气水合物取样器研究, 浙江省舟山市定海区惠民桥浙江大学舟山校区, 21634119@zju.edu.cn; 陈家旺, 男, 汉族, 1978 年生, 浙江大学海洋试验站站长, 副教授, 博士生导师, 2012—2013 年美国夏威夷大学工程学院 FRL(机器人)实验室访问学者, 博士, 从事深海沉积物、孔隙水、微生物保真取样技术研究、深水油气田水下生产系统、水下机器人及海洋能开发利用研究, arwang@zju.edu.cn。

就无法保持初始压力,导致所取岩心不是处于保真状态。而且当取样器的设计压力达到一定程度后,如果想再增加压力,就会对取样器的材料和密封性能提出更高的要求。所以现在的做法是趋于同时对岩心进行保压和保温,这样既可以降低对材料的压力要求,又可以维持天然气水合物的状态。目前国内对天然气水合物的勘探刚刚起步,开展天然气水合物勘探取样装置的研究工作非常必要,意义重大。

图1为天然气水合物温度压力临界平衡示意图。如图所示,在温度保持一定时,当天然气水合物压力低于在该温度下临界稳定曲线上所对应的临界点的压力值时,水合物则会分解,释放出甲烷气体;而在压力保持一定时,当温度高于在该压力条件下临界稳定曲线上所对应的临界点温度时,水合物也会分解^[4]。由此可以得出,如果要想抑制天然气水合物的分解,获得高保真的天然气水合物样品,就可以通过降低水合物岩心的温度,提高水合物压力,来抑制水合物的分解。相关实验证明,将天然气水合物岩心冷却到 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或者更低时,即使在常压下岩心样品也不会分解。所以,采用冷却的方式来获取水合物保真样品是完全可行的。

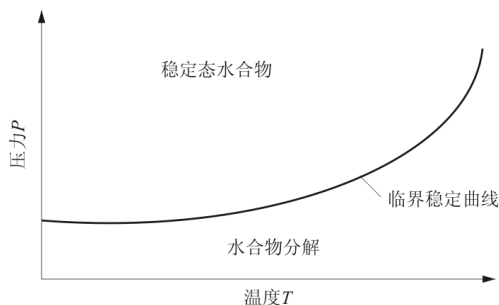


图1 天然气水合物温压临界平衡示意图

1 海底天然气水合物取样器冷却技术研究现状

天然气水合物勘探和开采涉及物质的多相传递和转换,并可能带来一系列环境和地质等问题,至今

还没有成熟的天然气水合物开发技术。在进行天然气水合物勘探研究方面,国外做的工作比较多。20世纪70年代,为了获得海底天然气水合物原位实物样品,国际深海钻探计划(DSDP)、国际大洋钻探计划(ODP)就开始研制海底天然气水合物保真取样器设备。目前,国外使用的主要有国际深海钻探计划(DSDP)采用的PCB取样器^[5],国际大洋钻探计划(ODP)采用的PCS取样器^[6],FUGRO压力取样器(FPC)^[7],日本研制的PTCS^[8]以及HYACE的HRC^[9],Multiple Autoclave Corer(MAC)和Dynamic Autoclave Piston Corer(DAPC)^[10]。表1中列出了国外主要取样器的相关情况。

我国开展天然气水合物的研究起步比较晚,开始于20世纪80年代,相关的研究也落后于美、日等发达国家^[11]。近些年来,随着全球能源问题的日趋紧张和对海洋资源开发的高度重视,我国也不断加大对海底天然气水合物勘探开发的力度,在海底天然气水合物保真取样器的研究方面也取得了很大的进展。2007年我国正式启动863计划海洋技术领域重大项目的研究,其中就包括天然气水合物重力活塞式保真取样器研制及样品后处理技术、天然气水合物钻探取心关键技术两个关键项目。国内已研制出的天然气水合物保真取样器中,比较具有代表性的有浙江大学研制的重力式活塞取样器,北京探矿工程研究所TKP-1保温保压取样钻具,中国地质科学院勘探技术研究所研制的绳索打捞不提钻取心钻具,以及吉林大学研制的孔底冷冻取样钻具。其中浙江大学研制的重力式活塞取样器和北京探矿工程研究所的TKP-1保温保压取样钻具采用的是被动保温方式,中国地质科学院勘探技术研究所和吉林大学研制的取样器采用主动冷却保温技术。表2中列出了国内主要取样器的相关情况。

表1 国外主要天然气水合物取样器

种类	应用	保压方式	保温方式	最大取样深度/m
PCB	国际深海钻探计划	球阀密封,高压氮气保压	无	6.0
PCS	国际大洋钻探计划	球阀密封	无	0.99
FPC	欧盟资助的风信子计划	上端活塞密封,下端翻盖密封,蓄能器保压	无	1.0
HRC	欧盟资助的风信子计划	球阀密封,蓄能器保压	无	1.0
PTCS	日本	球阀密封,蓄能器保压	绝热管,热电制冷技术	3.0
MAC	R. V. SONNE cruises	瓣阀密封,GRP压力桶保压	海水、冷却介质或外部冷却装置	0.55
DAPC	R. V. SONNE cruises	球阀密封,蓄能器保压	海水、冷却介质或外部冷却装置	2.50

表 2 国内主要天然气水合物取样器

种 类	研 发 单 位	保 压 方 式	保 温 方 式	最大取样深度/m
深海浅地层岩心取样钻机	湖南科技大学	海底表面螺纹盖机械旋进	无	60
重力式活塞保真取样器	浙江大学	球阀密封,蓄能器保压	被动保温	30(单根)
TKP-1 保温保压取样钻具	北京探矿工程研究所	球阀与翻板阀密封,蓄能器保压	被动保温	1
绳索打捞不提钻保真取样钻具	中国地质科学院勘探技术研究所	球阀密封,蓄能器保压	绝热管,热电制冷技术	3
孔底冷冻取样器	吉林大学	球阀密封	干冰,乙二醇主动保温	

2 海底天然气水合物取样器冷却技术

海底天然气水合物取样器冷却的方式可以分为 2 种,一种是被动保温,即通过隔热、阻热材料镀层等对取样管进行被动保温,达到抑制天然气水合物分解的目的。这个方法比较容易实现,技术也相对比较成熟,但是保温的效果不是很理想,取样结果具有很大的偶然性;另一种是主动冷却,就是通过外部冷却系统对天然气水合物样品进行降温或者保温。这种方法对技术的要求比较高,但是可以实现很好的冷却效果,是目前海底天然气水合物取样器冷却技术发展的方向。

2.1 海底天然气水合物被动冷却保温技术

所谓被动冷却保温就是利用保温材料隔热,从而达到抑制天然气水合物分解的目的。通常是在保真取样筒外壁采用热喷涂工艺涂覆 ZrO_2/CaO 等绝热陶瓷材料^[12],这种材料硬度适中,具有优良的绝热、耐热性能和抗冲击强度,可以用来作各种金属材料的热障涂层。另外采用保温性能良好的有机玻璃管作为样品衬筒,可以较好地保持住岩心样品温度,在样品衬筒与保真取样筒之间还留有一定的填充空间,可以用于填充隔热材料。目前比较典型的被动保温的取样器有浙江大学研制的重力式活塞取样器^[13-14]和北京探矿工程研究所设计的 TKP-1 保温保压取样钻具^[15]。

图 2 为浙江大学研制的重力式活塞取样器,由重力活塞式取样单元、保真取样筒和蓄能装置等部分组成。其特点有:回收时可将样品转移到保真取样筒内;翻板阀密封后,可以实现保压功能;采用蓄能器装置进行保真管内压力补偿;保真筒体、密封舱

本体内外表面涂保温材料层实现天然气水合物的被动保温。此取样器适用于 3000 m 深海的表层保真取样,可以采集 30 m 左右的沉积物。目前,重力式活塞取样器在此基础上也发展了很多新的型号,主要有浙江大学 30 m 天然气水合物保真采样器^[16],国家海洋局一所的 20 m 重力式活塞取样器^[17]和湖南科技大学研制的 30 m 重力活塞取样器^[18]。

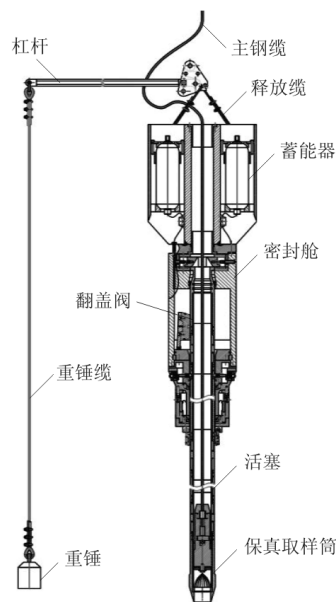


图 2 重力式活塞取样器

北京探矿工程研究所的 TKP-1 保温保压取样钻具主要有蓄能器、阀组段、保压岩心筒和保压阀段等单元。采用真空保温,即取样管采用双层结构,将取样管两端焊接好后,再将两管间的空气抽尽,从而减缓取样管内外的热量交换^[19]。如图 3 所示是 TKP-1 保温保压取样钻具结构示意图。

2.2 海底天然气水合物主动冷却保温技术



图 3 TKP-1 保温保压取样钻具结构示意图

主动冷却保温技术,就是通过外部冷却系统对

海底天然气水合物样品进行降温或者保温。这种方

法对技术的要求比较高,但是可以实现很好的冷却效果,是天然气水合物取样器冷却技术发展的方向。目前主动冷却主要有两种方式,一种是利用半导体致冷原理保持岩心取样管的内部温度,半导体致冷的动力由安装在取样装置内部的高能锂电池提供。另一种则是采用液氮或者干冰等进行冷却保温。这两种方式的原理相同,都是通过快速转取样管内的热量,达到冷却的目的。其中国内外比较具有代表性有日本保温保压取样器 PTCS 和吉林大学研制的天然气水合物孔底冷冻取样器。

2.2.1 保温保压取样器 PTCS

日本石油公司委托美国的 Aumann & Associates

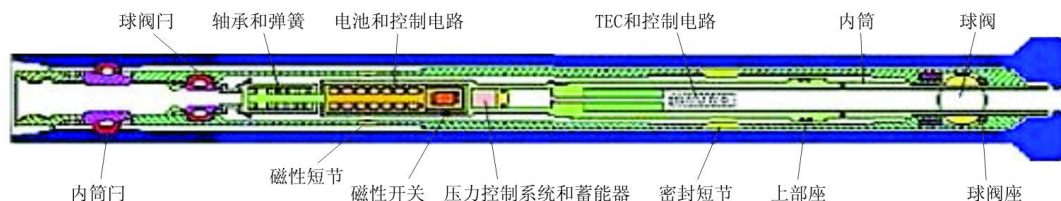


图4 保温保压取心器 PTCS 结构示意图

热电制冷技术是采用半导体制冷理论(如图5所示),其半导体致冷的动力由安装在取样装置内部高能锂电池提供。锂电池相当于冰箱,周围的铝层用于散热。这种冷却方式不需要另外添加任何制冷剂,可以连续工作较长时间,安装也较为容易。热电制冷冷却方式的特点是:制冷片热惯性非常小,

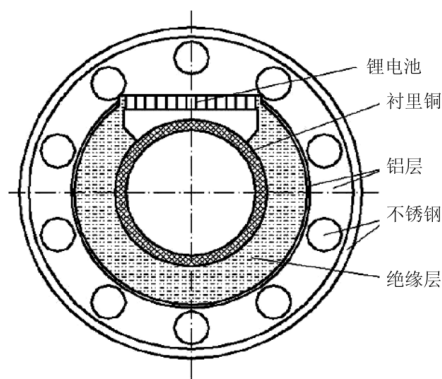


图5 热电制冷保温技术

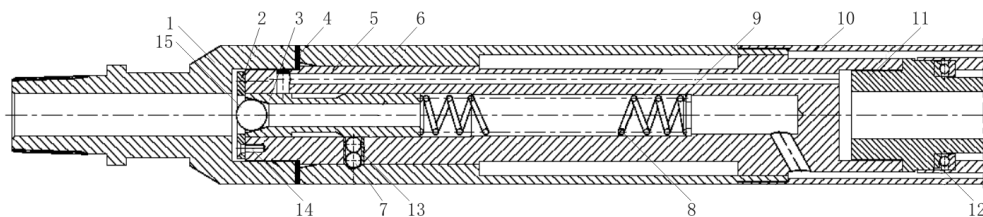
对其海底保温保压取样器 PTCS 进行设计、加工和室内试验,其总体结构和工作原理与国际大洋钻探计划的 PCS 取样器相似,也是采用单动双管式取心方式^[20]。图4是日本保温保压取心器 PTCS 结构示意图。保温保压取心器(PTCS)采用绳索打捞式岩心管,通过装有氮气的蓄压器补充管内压力,并通过绝热型内管和热电式内管冷却方式实现保温功能,并在钻进过程中配合泥浆冷却装置和低温泥浆实现主动冷却。保温保压取心器(PTCS)是目前较为先进和成熟的保温保压的海底天然气水合物取样设备,所取岩心样品的温度可以被冷却至5℃或者更低^[21]。

制冷时间很快,通电后很快就能达到最大温差。

2.2.2 孔底冷冻取样器冷却装置

吉林大学的孙友宏、刘大军和郭威等人^[22]设计了一款天然气水合物孔底冷冻取样器 FCS-1(如图6所示)。该款取样器选取干冰作为冷却源,酒精作为助冷催化剂和冷却介质^[23]。其工作原理是:当停止作业后,开始向钻杆内投入钢球,使泥浆再次循环起来。钢球的作用是将泥浆正常循环通道封堵,泥浆压力就会升高,从而推动钢球及阀座下移一段距离,打开外管接手上的导流口,泥浆经导流下行,这样会推动控制活塞和酒精上腔体活塞下行,腔体中酒精经干冰腔,被冷却成低温酒精,被压进冷冻腔,冷冻所钻取的岩心,从而实现孔底冷冻岩心过程。孔底冷冻取样器还有一个 FCS-2 型号,该型号和 FCS-1 的原理基本相同,它采用液氮作为冷却源。

2.2.3 绳索打捞不提钻保真取样钻具



1—外管接手;2—弹球机构;3—滑套;4—垫;5—外六方接手;6—内六方接手;7—小钢球孔;8—滑套弹簧;9—垫圈;10—外管;11—轴;12—推力球轴承;13—钢球;14—沉头螺钉;15—钢球1

图6 孔底冷冻取样器结构原理示意图

张永勤,孙建华等^[24]在国家“十五”863项目中研制了绳索打捞不提钻保真取样钻具(如图7所示)。这套设备主要由内外管总成、钻杆、打捞装置等单元构成,该钻具可实现连续取心作业。利用齿轮齿条机构使球阀旋转90°的方式达到岩心取样管保压的目的。为了实现对天然气水合物保真取样,

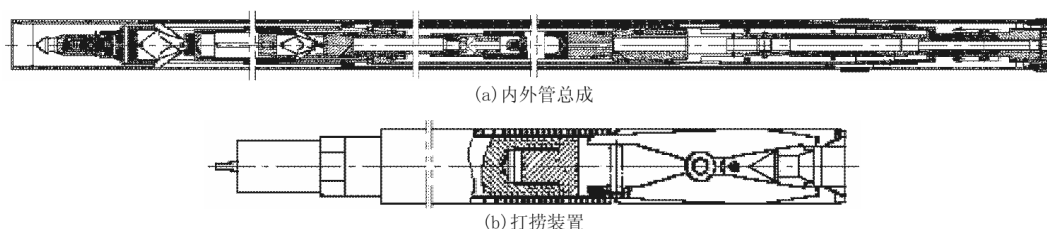


图7 绳索打捞不提钻保真取样钻具

绳索取心器内采样管组件包括取样管、活塞机构、主动保温机构(如图8所示),球阀密封机构等^[25]。其保温也是利用热电制冷技术,由锂电池驱动半导体对岩心进行制冷。

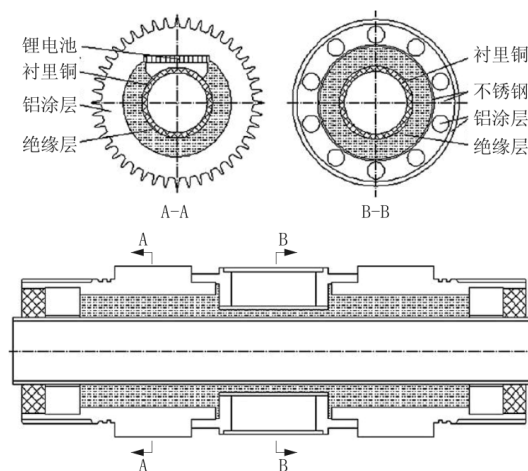


图8 绳索取心取样器冷却保温装置

2.3 两种冷却保温技术的传热学分析

主动冷却和被动冷却保温技术是两种不同的保持取样岩心低温状态的方式。被动保温就是要尽量减少外部热量的进入,从而保持岩心处于较低的温度,要减少外部热量的进入就要从热传递的3个方面去做,即:从对流、传导和辐射这3个方面去做。具体到海底天然气水合物取样器来讲,就是通过使用绝热材料尽最大可能地减小对流与传导,通过在取样管外表面镀上金属材料热障涂层,最大程度地减小辐射。主动保温则是通过消耗外部能源来对取样管岩心进行制冷,这种冷却方式外界温度对取样管内的岩心的影响比被动冷却方式小得多,岩心可

在钻具上还装有蓄能压力补偿装置。其中保温冷却功能是通过电子制冷装置实现,电子制冷设备包括保温层和电源制冷器,采用的是由他们自己开发的半导体致冷方式,致冷过程中的动力由装在钻具内部的锂电池提供,制冷温度可以达到0~1℃。

以冷却至很低的温度。下面对取样管的被动冷却保温和主动冷却保温模型进行简化,分析其传热过程。

现以一个内径为100 mm,外径为130 mm的不锈钢海底天然气水合物取样管(导热系数为 $k_1 = 19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)为例进行分析。取样管外面包裹着30 mm厚的隔热层(导热系数 $k_2 = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$),钢管内壁保持3℃^[26],隔热层外表面温度为25℃,如图9所示,则每米取样管长的热损失^[27]为:

$$\begin{aligned} \frac{q}{L} &= \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_1} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_2}} \\ &= \frac{2\pi(3 - 25)}{\frac{\ln(6.5/5)}{19} + \frac{\ln(9.5/6.5)}{0.2}} \\ &= -72.324 \text{ W/m} \end{aligned}$$

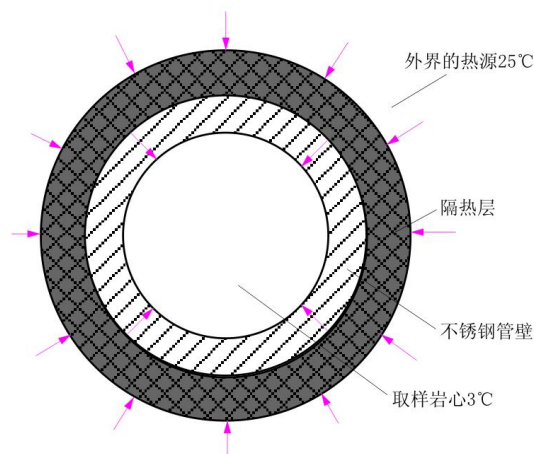


图9 取样管被动冷却保温示意图

如果取样管外面包裹着干冰冷却层,钢管内壁为3℃^[26],冷却层温度为-78℃^[28],其它条件和被

动冷却保温模型相同,如图10所示,则每米取样管长的热损失^[27]为:

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{2\pi(3 - 25)}{\ln(6.5/5)} = 36856 \text{ W/m}$$

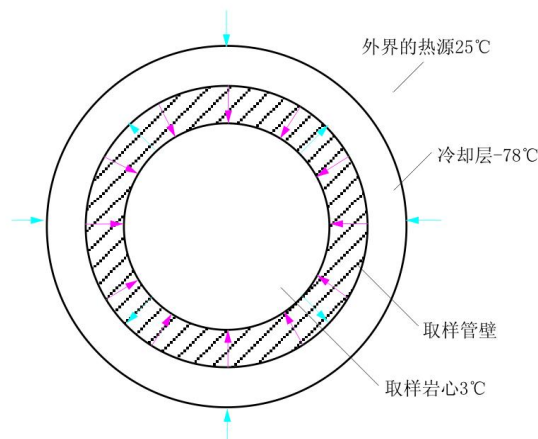


图10 取样管主动冷却保温示意图

由此可见,被动冷却保温岩心是吸热过程,外部的热量会进入取样管岩心内部,使岩心温度升高。而主动冷却保温技术会使岩心大幅度地散热,岩心温度会降低。通过分析可知,主动冷却保温技术较于被动冷却保温技术冷却效果好得多。

3 总结与展望

2017年5月18日,我国进行的首次海底天然气水合物试采成功,这也是全球首次试开采可燃冰取得成功,标志着我国天然气水合物的开采技术开始领跑世界^[29]。而对海底天然气水合物进行研究和开采的前提条件就是要具备对其开展保真取样的技术,所以随着对能源的需求的加大,天然气水合物的保真取样设备应用也会越来越多。

(1)目前国内外的海底天然气水合物取样器以保压型为主,就是通过提高压力来抑制水合物分解,但是这种保压取样器对材料的要求很高,密封效果也不是很理想。

(2)在取样器冷却保温技术方面,目前比较成熟的是利用保温材料进行被动保温。在钻探取样的复杂热工况条件下,被动保温方法无法维持岩心的原始温度。

(3)如何有效地进行主动保温,是研究海底天然气水合物保真取样器的一个重要方向。目前主动冷却保温技术主要是采用热电制冷技术或液氮(或

干冰)技术来降低天然气水合物岩心的温度,这种冷却技术可以较好地解决天然气水合物取样过程中的保真问题,但还有些关键问题需要进一步研究,比如如何延长冷却时间,如何快速高效地对天然气水合物进行降温等。

笔者认为,在海底天然气水合物取样器主动保温技术方面还有许多可以改进的地方。

(1)在方法上,可以将主动冷却保温和被动冷却保温结合使用,既采用主动冷却,又利用保温隔热材料或者真空材料来减缓保真取样管的热量交换,这样保温的效果会更加理想。可以使用半导体制冷片制冷,半导体制冷片是电流换能型片件,通过输入电流的控制,可实现高精度的温度控制,再加上温度检测和控制手段,很容易实现遥控、程控、计算机控制,便于组成自动控制系统。

(2)在结构上,可以通过增大接触面积的方式来增强冷却保温效果,可以考虑采用螺旋式循环冷却的结构,这样可以达到很好的冷却保温效果。

(3)在精确控制方面,可以考虑在保真管内安装温度和压力传感器来确定其内部实时的温度和压力,根据测到的温度和压力情况做出相应的控制和调整,最大程度地使取样保持原位温压状态。

(4)在回收取样器方式方面,可以采用快速回收方式,尽量缩短回收过程的时间,这样会减少对天然气水合物状态的改变。

总之,随着能源需求的日益增大,对海底天然气水合物的开发力度也会不断加大,对天然气水合物保真取样的要求也会越来越高,加强对海底天然气水合物取样器冷却保温技术的研究是一个必然趋势。

参考文献:

- [1] Kvenvolden K A. A primer on the geological occurrence of gas Hydrate[C]// Henriet J P, Mienert J. Gas hydrates-relevance to world Margin stability and climate change. London: The Geological Society, 1998:9-30.
- [2] 史斗,孙成权,朱岳听. 国外天然气水合物研究进展[M]. 甘肃兰州:兰州大学出版社,1992:22-58.
- [3] 吴时国,王秀娟,陈端新,等. 天然气水合物地质概论[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [4] 赵建国. 天然气水合物孔底冷冻绳索取芯钻具的设计与室内冷试验的研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2010:9-10.
- [5] Peterson MNA. Design and operation of a wireline pressure core barrel[C]// Deep Sea Drilling Project Technical Report PB-85e112282/XAB TR-16. La Jolla, CA (USA): Scripps Institu-

- tion of Oceanography, 1984.
- [6] Pettigrew T L. Design and preparation of a wireline pressure core sampler(PCS)[J]. ODP Technical Note, 1992, (17).
- [7] Kawasaki Masayuki, Umezu Satoru, Yasuda Masato. Pressure temperature core sampler (PTCS)[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology 2006;71(1):139-47.
- [8] Amann H, Hohnberg H-J, Reinelt R. HYACE - a novel auto-clave coring equipment for systematic offshore gashydrate sampling Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdgas und Kohle e. V. (DGMK)[R]. Report 9706, 1997;37-49.
- [9] Schultheiss PJ, Holland ME, Humphrey GD. Wireline coring and analysis under pressure; recent use and future developments of the HYACINTH system[J]. Scientific Drilling, 2009, (7):44-50.
- [10] Abegg F, Hohnberg H-J, Pape T, et al. Development and application of pressure-core-sampling systems for the investigation of gas-and gas-hydrate-bearing sediments[J]. Deep-Sea Research I, 2008, (55):1590-1599.
- [11] 朱海燕, 刘清友, 王国荣, 等. 天然气水合物取样装置的研究现状及进展[J]. 天然气工业, 2009, 29(6):63-67.
- [12] Dell'Agli G, Mascolo G. Low temperature hydrothermal synthesis of ZrO₂-CaO solid solutions[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(3).
- [13] 李世伦, 程毅, 秦华伟, 等. 重力活塞式天然气水合物保真取样器的研制[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(5):888-892.
- [14] Jia-wang Chen, Brian Bingham. A Developed Long Gravity-Piston Corer Utilizing In-situ Pressure-Retained Method for the Seafloor Gas Hydrate Coring[J]. Energies, 2013, (6).
- [15] 蔡家品, 赵义, 阮海龙, 等. 海洋保温保压取样钻具的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(2):60-63.
- [16] 王天宇. 30米天然气水合物保真采样器的设计[D]. 浙江杭州:浙江大学, 2008.
- [17] 李民刚. 40米重力活塞取样器设计及仿真[D]. 山东青岛:青岛理工大学, 2012:6-10.
- [18] http://www.hnust.edu.cn/kxyj/cxyhz/zxdt_cxyhz/44758.htm. 2013, 6[DB/OL].
- [19] Kawasaki Masayuki, Umezu Satoru, Yasuda Masato. Pressure temperature core sampler (PTCS)[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2006, 71(1):139-47.
- [20] Back F R, Task I. Preliminary evolution of existing pressure/temperature coring Systems[R]. Washing:DOENETL, 2001.
- [21] Youhong Sun, Wei Guo, Valery Konstantinovich Chistyakov. Sampling method and sampled for gas hydrates by hole bottom freezing[P]. Dec. 13, 2011.
- [22] 陈光华, 郭威, 贾瑞, 等. 天然气水合物孔底冷冻取样器储冷腔的设计与试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10):182-187.
- [23] 张永勤, 孙建华, 赵海涛. 天然气水合物保真取样钻具的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(9):62-65.
- [24] Haiyan Zhu. Pressure and temperature preservation techniques for gas-hydrate-bearing sediments sampling[J]. Energy, 2011, (3).
- [25] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社, 2002:65-96.
- [26] J. P. Holman. Heat Transfer[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011:20-53.
- [27] 赵建河. LNG冷能用于液体CO₂及干冰制备过程工艺开发及优化[D]. 广东广州:华南理工大学, 2015:3-17.
- [28] http://www.china.com.cn/haiyang/2017-05/18/content_40842768.htm[DB/OL].

深孔绳索取心液动锤钻具的研制与应用

杨泽英, 齐力强, 崔淑英, 王跃伟, 苏长寿, 王建华
(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 绳索取心液动锤钻探技术具有钻进效率高, 可大幅度增加回次进尺、延长钻头寿命、减少辅助工作时间等优势被广泛应用。本文主要针对深孔环境对钻具整体强度、安全性、稳定性、工作寿命、高背压适应性等的具体要求, 对原 SYZX 钻具所做的一系列改进和完善进行了论述。生产试验证明, 改进后的钻具完全满足深孔钻探施工对钻具的更高要求。

关键词: 绳索取心液动锤; 深孔钻探; 岩心钻探

中图分类号: P634.5⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0066-05

Development and Application of Wire-line Coring Hydro-hammer for Deep Hole/YANG Ze-ying, QI Li-qiang, CUI Shu-ying, WANG Yue-wei, SU Chang-shou, WANG Jian-hua (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The wire-line coring hydro-hammer drilling technology is widely applied for its advantages of effective drilling, largely increased round footage, prolonged bit service life, less auxiliary time and so on. Aiming at the specific requirements of the deep hole environment for the drilling tools in overall strength, safety, stability, service life, high backpressure adaptability and other aspects, this paper discusses a series of improvement and perfection of the original SYZX drilling tools. The production test proves that the improved drilling tools can fully meet the higher requirements for deep drilling construction.

Key words: wire-line coring hydro-hammer; deep hole drilling; core drilling

1 概述

传统的地质岩心钻探以小口径金刚石钻探为主, 需要高速回转磨削、地表驱动回转, 随着孔深的增加, 设备功耗损失、钻杆磨损均大大提高, 且易引发孔内事故。绳索取心液动锤钻探技术将绳索取心和液动锤冲击回转两项先进技术有机结合, 不仅能减少提下钻辅助时间, 提高台月效率, 减轻劳动强度, 更具有钻进速度快, 回次进尺长, 钻孔质量优等优点, 在深孔中应用还因为冲击碎岩作用, 使得碎岩所需转速和钻压均可降低 20% ~ 30%, 能进一步减少设备功耗损失, 降低孔内事故风险, 且更容易保证钻孔垂直度。

到 2012 年底, 绳索取心液动锤钻具成功应用深度已达 2211.4 m (直径 75 mm) 和 1461.3 m (直径 96 mm)。随着新一轮能源探采施工孔深的增加, 对钻具的整体强度、安全性、稳定性、工作寿命、高背压适应性、密封件的耐温性能等技术指标均提出了更高的要求。在地调项目“3000 m 深孔绳索取心液动锤及钻进工艺研究与应用”支持下, 课题组对此与多位专家

进行技术交流与沟通, 并针对原有钻具中存在的问题进行了深入剖析, 在原有 SYZX 系列钻具的基础上进行了一系列的改进与完善, 重点开展了绳索取心液动锤外总成螺纹分析与优选、单动机构优化、提高液动锤工作寿命、新型陶瓷耐磨材料尝试、受冲击易损件材质优化及热处理工艺改进等工作, 以满足深孔钻进工况对绳索取心液动锤钻具的性能要求。

2 主要研究内容

2.1 提高钻具的整体安全性

为提高钻具整体强度及安全性, 采用有限元分析法对 N 规格绳索取心液动锤外总成现有的螺纹标准进行计算、分析, 根据计算结果, 其安全性排序为: 加厚 > 老地标 > 新地标 40 > 新地标 30 > 冶标 > NQ (各标准螺纹参数参见表 1)。

由此对钻具结构等作如下调整。

(1) N 规格绳索取心液动锤外总成联接螺纹采用加厚螺纹标准进行加工, 并严格加工时的公差与配合及光洁度要求。

收稿日期: 2017-09-08; 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“3000 m 深孔绳索取心液动锤及钻进工艺研究与应用”(编号: 12120113016300)

作者简介: 杨泽英, 女, 汉族, 1963 年生, 教授级高级工程师, 探矿工程专业, 从事钻探器具研究与开发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 1207361274@qq.com。

表 1 螺纹参数

螺纹名称	螺纹大径/mm	螺纹小径/mm	螺距/mm	公螺纹长度/mm	螺纹高度/mm
加厚螺纹	67.0	65	6.00	50.0	1.00
老地标准螺纹	68.0	66	4.00	40.0	1.00
新地标准螺纹 40	68.5	67	4.00	40.0	0.75
新地标准螺纹 30	68.5	67	4.00	30.0	0.75
冶标螺纹	68.5	67	6.00	40.0	0.75
NQ 标准螺纹	67.5	66	6.35	41.5	0.75

(2)图 1 为绳索取心钻具原有的上部结构,为减少薄弱环节,将上扩孔器(无论是热压烧结还是

电镀加工,其基体材料均为 45 钢,而弹卡挡头、弹卡室及上外管均采用 XJY850 调质管材加工,和合金钢材料相比,45 钢的机械性能差了很多,是外总成上部的薄弱环节)和弹卡挡头做成一体,弹卡挡头外部镶焊硬质合金块,起扶正耐磨作用。去掉了原外总成上的上扩孔器,将上扶正环放置在上外管中。

(3)外总成的承冲环接头和下外管均采用 XJY850 调质管材加工,钻具的整体强度得到充分保证。改进后的外总成上部结构见图 2。

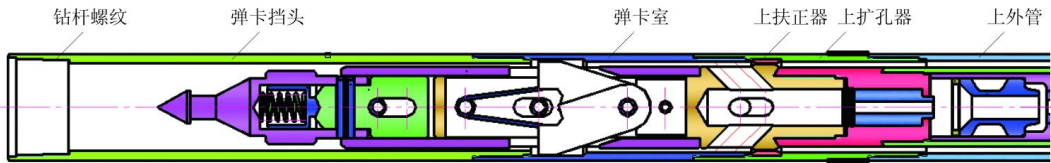


图 1 外总成上部的原有结构

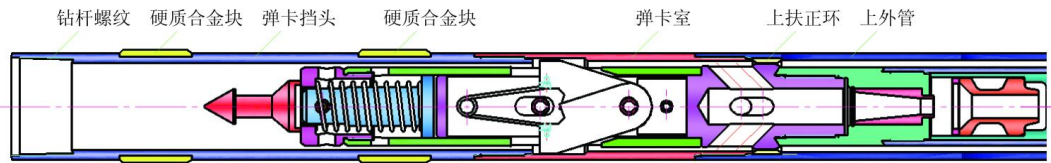


图 2 外总成上部改进后的结构

2.2 单动机构改进

原有的绳索取心液动锤钻具沿用绳索取心钻具的单动结构(参见图 3)。拔断岩心时,缓冲弹簧压缩,会挤压下盘推力轴承;轴承磨损后,调整其间隙

时,受到花螺母孔位和轴上开口销孔位的限制,容易过松或过紧,影响单动效果和轴承工作寿命。改进后的单动机构参见图 4。

(1)将缓冲弹簧和单动轴承分别置于弹簧腔和

上盘推力轴承 轴承盖 黄铜套 上轴承套 单动轴 下盘推力轴承 缓冲弹簧 垫圈 花螺母 开口销

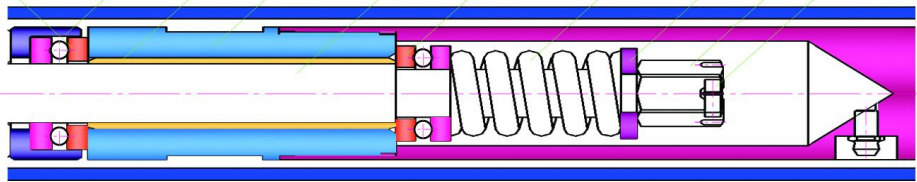


图 3 原有钻具的单动机构

缓冲弹簧 弹簧套 上轴承套 自润滑黄铜套 单动轴 自锁螺母 上分离接头 油嘴

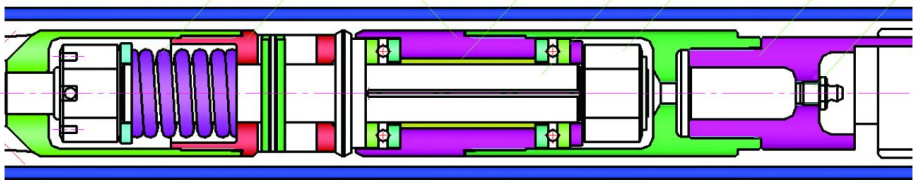


图 4 改进后的单动机构

轴承腔中,采用自锁螺母调整锁定轴承的轴向位置,改善轴承的受力状态。

(2)采用韧性更好的材料加工单动轴,并将螺纹部分由 M22X2.5 变为 M24X2。

(3)选用自润滑轴承代替原来的黄铜轴承。

(4)改变油嘴位置到上分离接头中,更方便生产现场加注润滑脂。

2.3 提高液动锤工作寿命

液动潜孔锤采用泥浆作为工作介质,泥浆在循环清理钻屑过程中使其本身含有了大量的固相颗粒,造成了极其恶劣的磨粒磨损状况;液动潜孔锤在工作过程中缺乏有效的润滑,导致零件中存在严重的黏着磨损;零件工作过程中高频的强力冲击和振动导致出现振动磨损(黏着磨损);高速流动的泥浆裹挟着坚硬颗粒对液动潜孔锤内部产生严重的冲蚀等等。上述情况同时存在,且其恶劣程度远远超过常规机械零件的工作环境。

液动锤运动密封副采用间隙配合,磨损对液动锤的影响表现为:(1)磨损使得间隙变大,因为补偿变大的间隙,需要更高的泵量和泵压才能保证液动锤正常工作;(2)磨损过度,间隙达到一定程度后,需要的泵压太高,会超过现场机具对泵压的承受能力,也会导致液动锤内腔体的压力难以建立或不同腔体之间的压差偏离设计值过大而破坏了其工作条件;(3)零件的磨损,导致零件间的配合尺寸出现较大变化,零件间的位置关系破坏也会停止工作;(4)裹挟着大量固体颗粒的高速泥浆对液动潜孔锤内部零件产生冲蚀,导致零件外形发生变化,流场形态随之改变,破坏了液动潜孔锤设计的工作条件等等。种种情况都导致了液动潜孔锤停止工作,而需要更换新的零件,这一过程表现为液动锤的工作寿命。

为增加运动密封副的耐磨性能进而增加液动锤的工作寿命,曾尝试采用底端留台阶,上端采用弹性挡圈限位的方法将陶瓷衬套加放到 YZX73 型液动锤的上缸套中(参见图 5),增加上缸套的耐磨性,减少易损件数量,结果由于组合零件过多,组装后同轴度受影响,使得上活塞偏磨明显,液动锤启动泵压变高,该方案被搁置。后采取在原有材料和加工工艺

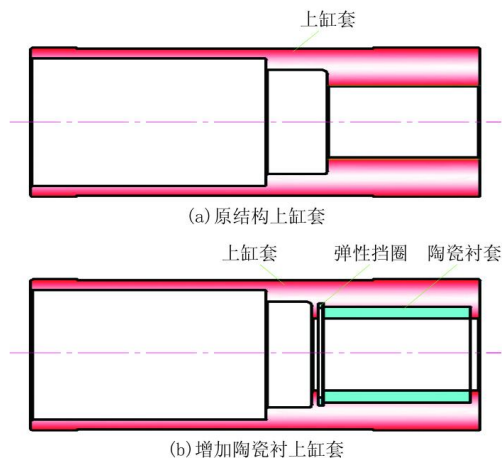


图5 液动锤上缸套结构变化示意

的基础上,增加锻造工艺,以减少基材缺陷,提高其耐冲击性能,增加其工作寿命。生产试验结果证实,增加锻造工艺后,运动密封副工作寿命由原来的 120 h 左右(清水作冲洗液),增加到 200 h 以上。

2.4 提高受冲击部件的质量稳定性

原有的液动锤锤轴,受冲击部位需要局部淬火,以增加其局部硬度而其余部分保持其韧性。针对这个零件,我们反复试验材料、淬火介质、修改零件结构和工艺,始终无法获得性能稳定的成品;不是淬硬了碎裂掉块,就是淬软了打堆,甚至从硬层和软层的分界处整体断裂(参见图 6)。碎块掉落后,还会造成下缸套的损坏。液动锤产生的冲击功大约是同直径低风压气动锤的 60%,为提高锤轴的质量稳定性,我们到气动潜孔锤生产厂家走访调研后,决定采用气动潜孔锤相关零件的材料和热处理工艺试制锤轴。通过室内测试和生产试验进行检验,证明其质量稳定性问题得到彻底解决,性能完全达到设计和使用要求,且生产成本在可承受范围,也适宜规模化生产。究其原因,加工用材料相同,加工工艺也相差不大,只是最后的局部淬火,由于热处理中温度、时间和淬火介质等相关因素控制得当,淬火部位硬度值稳定适中,零件的质量得到了充分保证,推向市场的产品整体质量得到提高。

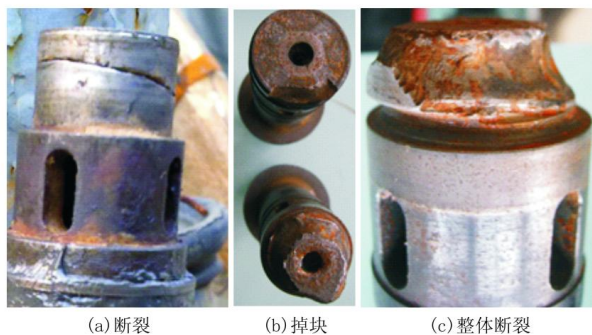


图6 损坏后的锤轴

2.5 优化传功结构

液动锤复合在内总成的打捞定位机构下部,其产生的冲击功通过位于内总成的传功环传递到位于外总成的承冲环上,进而传递到下外管、钻头上。钻进过程中,传功环靠台阶悬挂在承冲环上,由于冲洗液中固相成分的沉积作用,易使得传功环和承冲环之间的导向斜面空间被固相沉积物填充,使得回次结束打捞内总成时,因内总成和外总成不易分开造成打捞失败。优化传功结构采用减少固相物堆积空

间,减少粘滞阻卡几率,更有利于打捞时内外总成的分离。生产试验表明效果很好。优化后的传功结构如图7所示。

原结构(图7a)设计时,偏重考虑了传功环进入承冲环时的导向作用,传功环坐落到承冲环上后,承冲环导向角与传功环之间形成的空间较大,且成楔形,不仅造成冲洗液中的固相物易沉积,而且易产生粘滞阻卡;承冲环去掉导向斜面改短后(图7b),固

相物堆积空间只是由于装配公差产生的,比较小,而且由于内总成自身较长,居中性较强,去掉导向斜面后不影响内总成投放到位,是比较理想的结构;只是改短后的结构会造成零件尺寸的改变,会对生产和售后服务增加额外工作,因此我们设计了承冲环保持原长的结构(图7c),该结构虽然不及图7(b)结构理想,但比图7(a)结构效果优越。

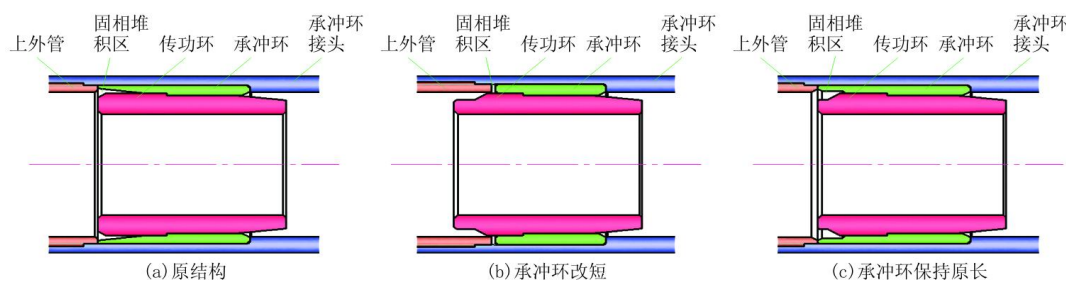


图7 传功结构

2.6 降低水垫阻力

在液动锤工作原理确定的前提下,通过对 YZX 系列液动锤的流场分析,发现造成冲锤向下运动冲击砧子的过程中液流通道阻力过大,是造成该系列液动锤泵压较高的原因之一。采取在砧子增设分流孔,以降低液流阻力,可使得液动锤更好的适应深孔环境,且结构简单,容易实现。

2.7 研制耐高温密封圈

针对深孔高温环境,我们委托专业单位研制了耐高温的 O 形密封圈,其测试数据如表 2 所示。

表2 耐高温 O 形密封圈测试数据

测试数据	硬度(邵尔 A)/HA	抗拉强度/MPa	扯断伸长率/%	50%定伸应力/MPa	100%定伸应力/MPa
标准值	75 ± 5	≥10	≥100	≤8	≤15
老化前实测值	81	18.05	139	5.41	12.21
老化后实测值	85	16.19	116	6.75	13.93

注:表中所列的老化后的实测值是在空气环境中,260℃持续 142 h 后的结果。根据检测的结果该密封圈尚在未失效的范围内。

泥浆环境下, YZX178 型液动锤的应用孔深达 5450.74 m,该回次进尺 19.03 m,用时 21 h,井底循环液温度为 175℃,液动锤在该次生产试验中 O 形密封圈没有失效。

2.8 加长岩心管的设计与思考

由于孔深使得打捞内总成时间变长,为了减少辅助时间,设计了 5 m 长岩心内管的绳索取心液动锤钻具。该设计方案是内管设计成 5 m 长单根,下外管分上下两段,中间接扩孔器(有利于钻具外总

成的扶正)并加放下扶正环(有利于内总成的导正和居中);要求加工内外管时,首先挑选符合直度要求的管材,严格对同轴度的要求;其次要求加工螺纹时,一定要测量、卡正,保证螺纹连接后的同轴度。

加长到 5 m 的岩心内管钻具使用效果很好:在内蒙古赤峰市双山子铜多金属矿区共完成了 4 个孔的施工,不管是破碎、节理发育、构造泥夹层,每个回次岩心都是 5 m 长,岩心采取率 100%,减少了辅助时间,提高了钻进效率。

应该注意的是,岩心内管加长,下外管也要相应加长,位于上下外管之间的传功台阶到钻头距离增加,经下外管传递的冲击功损失增加,传递到钻头上的部分减少。对于特别坚硬地层,需要高冲击功的情况下,为减少冲击功损失,不应采用加长的岩心管钻具。

3 钻具的生产试验

经过系列改进后的深孔绳索取心液动锤钻具,通过生产试验的检验,完全满足深孔钻探环境的要求。

3.1 SYZX75 型绳索取心液动锤钻具

2013 年 SYZX75(N 规格)型绳索取心液动锤钻具在“中国岩金勘查第一深钻”(三山岛西岭矿区 ZK96-5 孔,设计孔深 4000 m)进行了生产试验,取得了很好的效果。

从孔深 3381.77 m 开始使用该套钻具,直到 4006.17 m 终孔,连续钻进了 624.4 m。结果表明,

在深孔硬、脆、碎地层中应用绳索取心液动锤钻进,具有可大幅度提高回次进尺、增加钻头寿命、减少辅助工作时间等优势。回次进尺平均提高约40%,在特别破碎地层回次进尺提高150%;钻头寿命平均延长20 m;小时效率提高60%,台月效率提高56%。有效地解决了回次进尺短的问题,彰显了绳索取心液动锤的先进性和优越性。

钻具经受了4000 m深度的工况考验,创国内外小口径绳索取心液动锤钻进最深纪录,入选2013年度探矿工程十大新闻。

3.2 SYZX96 型绳索取心液动锤钻具

2015年,SYZX96(H规格)型绳索取心液动锤钻具在新疆昌吉庙尔沟煤层气勘查工地庙煤1井进行了生产试验,试验孔深达到2215.81 m,创同规格绳索取心液动锤钻具应用孔深纪录。本次试验有179 m的工作量是在2000 m以深完成的,钻具在使用过程中工作性能、结构强度、零件强度及温度适应性等方面均承受住了考验,钻具的螺纹联接强度没有出现问题,完全能够满足2000 m钻深的工作要求,并充分体现了钻具在提高钻速、增加回次进尺以及保证岩心采取率等方面的优势。

3.3 SYZX122 型绳索取心液动锤钻具

2015年配合地质调查项目“3500 m深部地质勘查全液压钻探装备配套示范”研制的高冲击功的YZX89型液动锤,与P(S122)规格绳索取心钻具有机组合,形成的SYZX122型绳索取心液动锤钻具,在山东招远的试验孔钻进中,2套钻具从开孔使用,一直到691.2 m孔深结束,除了因操作失误造成1套钻具的单动轴弯曲以外,整个过程没有更换任何其他零件;在可钻性8级以上的强研磨花岗岩为主的岩层中,最高机械钻速达3 m/h;因钻孔孔斜要求 $\geq 1^\circ/1000$ m,钻进速度受到严格控制,在既控制孔斜不超标,又能保持一定的钻进速度,该钻具起到了重要作用;在钻进过程中,即使遇到破碎地层,也能基本保证满管的回次进尺,还取出了3 m长的整根岩心(参见图8)。

4 结语

通过理论计算、分析探索、结构优化、工艺改进等综合研究,使得液动锤技术得到进一步提高;钻具强度提高,安全性得到保证,零部件寿命延长,结构更加合理,整体质量得到提高,可以更好地适应深孔



图8 SYZX122型绳索取心液动锤钻具取出的岩心

工况对钻具的严格要求。绳索取心液动锤钻具的最深应用记录N(SYZX75型)规格4006.17 m,H(SYZX96型)规格2215.81 m,P(SYZX122型)规格691.2 m。生产试验表明,经过系列改进的绳索取心液动锤钻具完全满足深孔工况的复杂环境,在深部钻探中具有大幅度提高回次进尺、增加钻头寿命、减少辅助工作时间等显著优势,成为我国深孔施工特有的、性能优越的钻探器具。

参考文献:

- [1] 苏长寿.“科钻一井”突破4000m,YZX127液动潜孔锤创造新纪录[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(8):28.
- [2] 苏长寿,谢文卫,杨泽英,等.系列高效液动锤研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):27-31.
- [3] 王建华,苏长寿,左新明.深孔液动潜孔锤的研究与应用[J].勘察科学技术,2011,(6):59-64.
- [4] 曹学斌,王发民,何玉云,等.SYZX96型绳索取心液动锤在甘肃李坝金矿复杂地层中的应用及效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):30-33.
- [5] 董海燕.绳索取心液动锤在中国岩金勘查第一深钻的应用和最新进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):9-12.
- [6] 姜桂春,韩颂.绳索取心液动锤在浩尔忽洞金矿复杂地层中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(10):13-15.
- [7] 罗永贵.SYZX绳索取心液动锤在小秦岭金矿田复杂地层深部钻探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(3):7-9.
- [8] 傅丛群,彭金灶.SYZX75型绳索取心液动锤在福建武平银多金属矿的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(6):33-34.
- [9] 杨泽英,苏长寿,齐立强,等.绳索取心液动锤技术的应用与拓展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(S2):138-140.
- [10] 傅丛群.绳索取心液动锤在多类型矿区的应用及其效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):24-26.
- [11] 赵华.SYZX系列绳索取心液动锤在新余梅山煤矿易斜深孔防斜钻进中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(9):27-29.
- [12] 石生明,朱永宁.SYZX75型绳索取心液动锤在坚硬致密“打滑”地层的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):15-16,20.
- [13] 罗冠平.SYZX75型绳索取心液动锤在肃北德勒诺尔铁矿区的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):47-49,56.

气举反循环清理地下连续墙槽底沉渣数值分析

曾纪文, 胡福洪, 閤超, 陈锋, 王润甜
(武汉地质勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉 430070)

摘要:为了深入研究用气举反循环清除地下连续墙槽底沉渣的效果,采用 Fluent 软件,运用模拟数值分析的方法,建立二维模型,并以气举混合器安置深度、空压机清槽压力、沉渣直径为研究对象,得出了如下结论:气举反循环技术能够有效地将沉渣从连续墙基坑底部返出,沉渣的出口速度范围在 0.014 ~ 1.098 m/s,粘粒的逃逸速度比其它粒径的逃逸速度大;沉渣厚度越大,沉渣清理出来越难。

关键词:地下连续墙;沉渣;气举反循环;清渣;数值分析

中图分类号:TU476⁺.3;P634.6⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)12-0071-04

Numerical Analysis on Slag Removal of Diaphragm Wall Groove Bottom by Air-lift Reverse Circulation/ZENG Ji-wen, HU Fu-hong, GE Chao, CHEN Feng, WANG Run-tian (Wuhan Geological Prospecting & Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to study the application effect of air-lift reverse circulation in slag removal of diaphragm wall groove bottom, Fluent software was used to establish a two-dimensional model by means of simulated numerical analysis method. The placement depth of air-lift mixer, slag cleaning pressure of air compressor and slag diameter are taken as the research objects. It is concluded that the air-lift reverse circulation technology can effectively remove slag from the foundation pit bottom of diaphragm wall. The velocity of slag flowing out is 0.014 ~ 1.098m/s, the escape velocity of clay particles is faster than that of slag with other sizes; and the thicker the slag is, the more difficult the slag removal is.

Key words: diaphragm wall; slag; gas-lift reverse circulation; slag removal; numerical analysis

0 引言

在地下连续墙施工成墙后,墙身混凝土浇灌前,利用气举反循环钻进工艺原理^[1],先将气液混合器放入灌浆导管内一定深度,再将压缩空气通过送风管送至其内,使压缩空气与导管内的泥浆混合,形成密度比导管外泥浆密度小的泥浆空气混合浆液。在管内外压差的作用下,沿导管内腔上升,经排渣管排至沉淀池,沉淀后的泥浆又以自流方式连续不断地流回槽段内,从而达到清除槽底沉渣的目的。具体过程如图1所示。

气举反循环清渣在工程上虽然有一定应用^[2-5],但尚无确定的理论依据和设计方法用于指导工程方案设计及实施。本项目拟通过设计制作气举反循环清渣模拟实验装置,模拟实际工程清渣过程,结合有限元方法建立模型分析,寻找各技术参数与工程情况相对应的规律,以期对气举反循环技术用于不同深度的地下连续墙清孔施工起到指导作用。

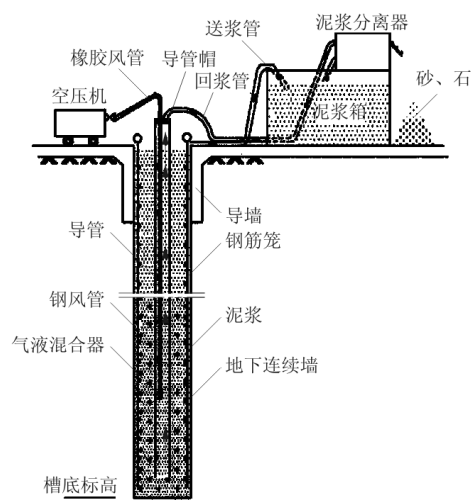


图1 气举反循环清渣原理

1 研究方法

1.1 主要研究内容

- (1) 工程实物模型概化,优化并建立合理的气举反循环超深地下连续墙清孔施工试验模型;
- (2) 确定流体属性及基本参数;

(3)通过有限元分析软件 Fluent 模拟得出不同沉渣厚度所需的清孔压力;

(4)利用 Fluent 计算分析清渣效果。

1.2 工程试验概化模型

1.2.1 工程要求

该工程为地下 50 m 深处气举反循环情况,根据气举反循环清孔过程的相关要求,出水管(导管)下放深度以沉渣面深度控制,距沉渣 300 ~ 400 mm 为宜。随着泥渣的排出,基坑底部的沉渣厚度减少,出水管(导管)应同步跟进,保持管口与沉渣面的距离。混合器安放深度是影响气举反循环清孔效率的关键参数,如果安放深度太浅,导管内无法形成稳定液流,导致气举反循环清渣失败;如果太深,排浆量过大,泥浆补给达不到要求,会使孔内泥浆面迅速下降,严重影响孔壁稳定,容易引起孔壁坍塌。根据工程经验,风管的插入深度可控制在 0.6 倍的孔深,允许小范围波动。

1.2.2 模型概化

由于工程实际情况为地下 50 m,地下连续墙的厚度按槽机的规格而定,一般槽机规格为 600、800、1000、1200 mm,基坑的宽度相对其深度较小,若按实际情况 1:1 建立足尺模型,则模型表现为“细长”形状。若以混合器的安放深度为参考点 a (0.6 倍孔深),取混合器以下部分建立试验模型,仍然表现为“细长”形状,整体看起来不直观,不易突出气举反循环的特征,也不易观察流动形态。所以本试验模型直接截取基坑底部以上 3 m,以该段建立试验模型,基坑宽度 W 和深度 H 比例合适,易于突出和观察气举反循环的效果以及泥浆的流动形态。

混合器安装在 0.6 倍孔深处,导管内混合器安装位置以上的泥浆,由于气体与泥浆的混合而密度变小,而混合器安装位置以下部分的泥浆密度仍然保持着与导管外循环相泥浆的密度一致。由于模型选取的为基坑底部以上 3 m,该段处于混合器以下部分,所以导管内外的泥浆密度不变。

从基坑截面方向观察,导管距离基坑两边的距离相等,即在竖直方向表现为对称形态,所以简化模型,取一半为研究对象(注:试验计算后可通过对称原理补全另一半结果,对试验精度无影响)。

试验模型参数为:基坑宽度 $W=0.8$ m;计算截取段深度 $H=3$ m;导管距离沉渣面的距离 $h=0.35$ m;导管内径 $d=0.22$ m,外径 $D=0.24$ m,壁厚 0.01 m。

1.3 试验模拟参数

由气举反循环原理可知,循环流动的原因在于导管内外存在压强差,而压强差可以通过导管内外泥浆的密度以及混合器的深度计算出来。气举反循环清孔工艺实施的关键在于基坑深度,且基坑越深,压力差越大,流速流量也就越大,清孔效果就越好。反之,基坑越浅,压力差越小,流速流量过小,就难以形成流动反循环。本试验模拟的深度为 50 m 深处的气举反循环情况。

循环相泥浆要有一定的密度和粘度,工程上所用泥浆的密度 >1500 kg/m³,泥浆的密度越大,则粘度越大;但过大的粘度不利于泥浆的流动,通过查阅相关文献可知,工程上用于气举反循环清渣的泥浆参数如表 1 所示^[6-7]。由于试验变量较多,为了更好的研究和反映出气举反循环清渣的效果,故在最大压强差的情况下(泥浆、沉渣和气体混合物相密度为 700 kg/m³),进行气举反循环模拟试验,通过控制变量的方法,将试验的固定参数列于表 2。变量参数为沉渣固体土颗粒粒径和沉渣厚度,列于表 3。通过计算得出导管内外压强差,如表 4 所示。

表 1 气举反循环清渣的泥浆参数

流动相种类	密度/(kg·m ⁻³)	粘度/s
泥浆循环相	1200	22 ~ 28
泥浆与沉渣的混合液相	1400	28 ~ 32
泥浆、沉渣和气体混合物相	700 ~ 900	

注:泥浆流动速度要达到 1.5 ~ 2 m/s,此时排浆液效果最好。

表 2 试验固定参数

流动相种类	密度/(kg·m ⁻³)	粘度/s	沉渣距离导管的距离/m	泥浆、沉渣、气体混合密度/(kg·m ⁻³)
泥浆循环相	1200	25	0.35	700
泥浆与沉渣的混合液相	1400	30		

表 3 变量参数

变量种类	变量水平			
	粘粒	粉粒	砂粒	圆砾或角砾
沉渣颗粒粒径/mm	0.004	0.01	2	20
沉渣厚度/m	0.3	0.6	0.9	

表 4 管内外压强差

基坑与导管之间的压强 P_1 /Pa	导管内部压强 P_2 /Pa	压强差 $\Delta P = P_1 - P_2$ /Pa	对应泥浆、沉渣和气体混合物相密度/(kg·m ⁻³)
5.5272×10^5	4.0572×10^5	1.47×10^5	700

1.4 沉渣参数确定

气举反循环的流体为泥浆,由勘察报告显示,此项目地质下卧层有着厚度在 27 ~ 35 m 的砂质粉土,粉质砂土、粉砂、中粗砂,这些成分极易产生沉渣。由土粒粒组划分可以确定沉渣中各组分颗粒的粒径种类^[8],如表 5 所示。

表 5 土粒粒组的划分

粒组名称		粒径范围/mm
漂石或块石颗粒		> 200
卵石或碎石颗粒		200 ~ 20
圆砾或角砾颗粒	粗	20 ~ 10
	中	10 ~ 5
	细	5 ~ 2
砂粒	粗	2 ~ 0.5
	中	0.5 ~ 0.25
	细	0.25 ~ 0.1
	极细	0.1 ~ 0.075
粉粒	粗	0.075 ~ 0.01
	细	0.01 ~ 0.005
粘粒		< 0.005

由于沉渣中的土颗粒种类繁多且直径大小不一,为了便于研究不同粒径的沉渣颗粒的循环清除效果,根据粒径划分等级,取粘粒、粉粒、粗砂和圆粒角粒 4 种颗粒为研究对象,对应颗粒的粒径分别为各个粒径组的最大值。沉渣的厚度选取 0.3、0.6、0.9 m 三个厚度为研究对象,分别对应薄、中、厚三个等级。

2 计算结果

2.1 计算云图

图 2 ~ 7 主要为沉渣厚度为 0.3 m 时,泥浆和沉渣最终相速度、初始体积分数、最终体积分数云图。

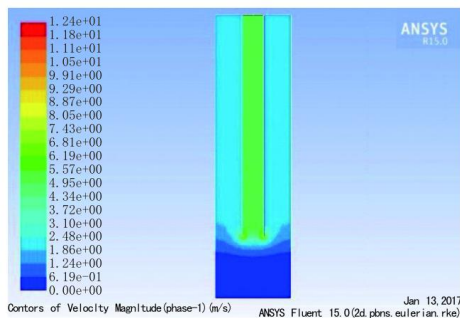


图 2 泥浆最终相速度云图

2.2 计算结果分析

由试验结果可以看出,粘粒、粉粒、砂粒以及圆粒或角粒均能通过气举反循环技术从基坑槽底部清理出来。由沉渣出口处的最大速度以及颗粒追踪

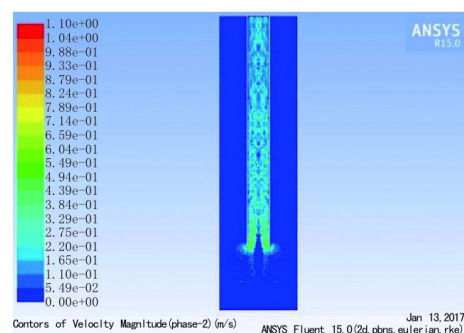


图 3 沉渣最终相速度云图

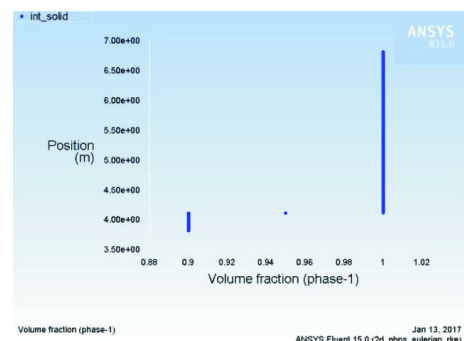


图 4 泥浆初始体积分散点图

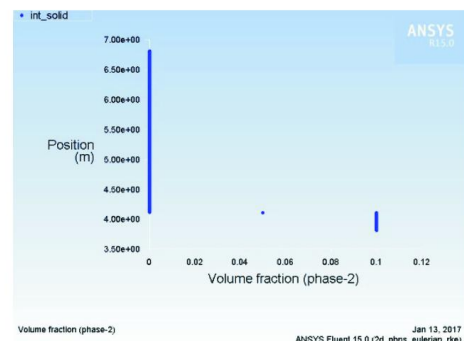


图 5 沉渣初始体积分散点图

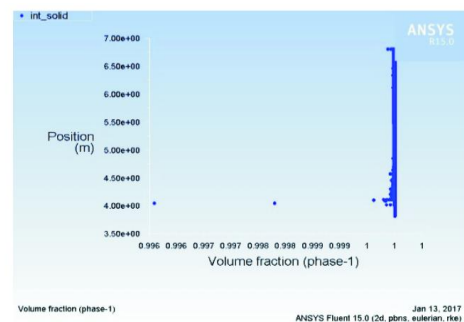


图 6 泥浆最终体积分散点图

结果可以看出,所有粒径的沉渣颗粒,在出口处均能够逃逸出去,都有一定的逃逸速度,粘粒的逃逸速度比其它粒径的逃逸速度大。沉渣厚度越大,沉渣

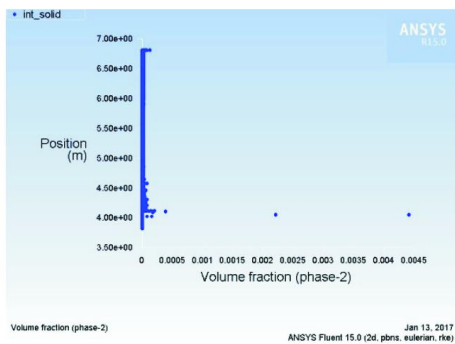


图7 沉渣最终体积分数散点图

出口的速度呈减小趋势。

从图8可以看出,当沉渣颗粒粒径一定时,沉渣残余体积分数随着沉渣厚度的增大而增大;当沉渣厚度一定时,局部残余沉渣体积分数随着粒径的增大而增大;沉渣厚度 ≤ 0.6 m时,气举反循环对粘粒、粉粒、砂粒以及圆砾或角砾均能达到较好的清除效果,而当沉渣厚度达到0.9 m时,气举反循环对于砂砾(2 mm)、圆砾或角砾(20 mm)的清除效果减弱,需要更长的循环时间才能清除干净,对于粒径较小的沉渣颗粒(粒径 < 2 mm),气举反循环的清除效果较好。

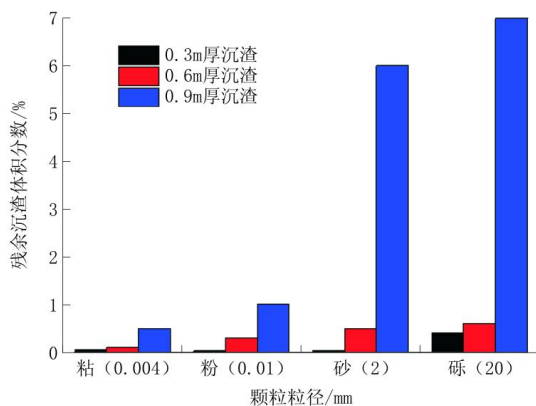


图8 局部残余沉渣体积分数随粒径、沉渣厚度变化关系图

从图9可以看出,当沉渣颗粒粒径一定时,最终沉渣相出口最大速度随着沉渣厚度的增大而减小;当沉渣厚度一定时,沉渣相出口最大速度随着沉渣粒径的增大而呈现减小趋势;对于粒径更小的粘粒,其出口最大速度相比其它粒径的沉渣更大。在导管的出口处沉渣的出口速度在0.014 ~ 1.098 m/s范

围,粘粒的逃逸速度比其它粒径的逃逸速度大。

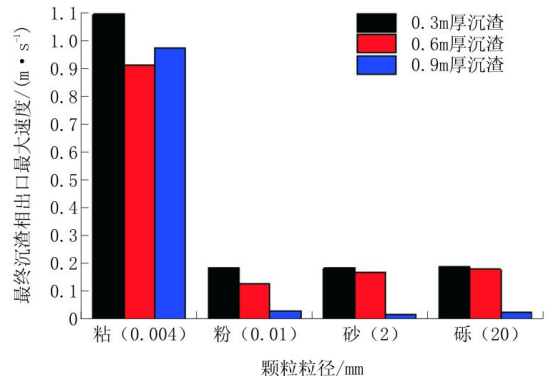


图9 最终残余沉渣出口最大速度随粒径、沉渣厚度变化关系图

3 结论

(1)采用气举反循环技术可有效的将粘土、粉土、砂土以及圆砾或者角砾形成的沉渣,从50 m深的槽段底部中循环带出。

(2)沉渣从连续墙基坑槽底部带出时,在导管的出口处沉渣的出口速度在0.014 ~ 1.098 m/s范围,粘粒的逃逸速度比其它粒径的逃逸速度大。

(3)随着沉渣厚度的增大,基坑槽底部的沉渣越难通过气举反循环带出。

参考文献:

- [1] 周俊然. 气举反循环冲砂技术研究[D]. 陕西西安: 西安石油大学, 2007.
- [2] 熊亮, 张小连, 熊菊秋, 等. 大口径工程井气举反循环钻进效率影响因素初探[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(5): 42-45, 49.
- [3] 倪俊, 原海霞. 气举反循环清渣方法的应用[J]. 探矿工程, 2000, (6): 28-28, 30.
- [4] 唱伟. 气举反循环技术在上海长春藤名品商厦地下连续墙施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(3): 17-19.
- [5] 陈怡, 段德培. 气举反循环钻进技术在地热深井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(4): 23-24, 28.
- [6] 舒明记. 气举反循环工艺在温州地质条件下钻孔灌注桩施工中的应用[J]. 科学与财富, 2013, (11): 175-176.
- [7] 余志文, 邱杰. 冲(钻)孔灌注桩气举反循环清孔工艺[J]. 福建建设科技, 2009, (1): 37-39.
- [8] 石振明, 孔宪立. 工程地质学(第2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

基于正交设计的堆积体稳定性影响因素的敏感性分析

王 冰¹, 王常明¹, 张索煜¹, 卢长伟²

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省水利水电勘测设计研究院, 吉林 长春 130021)

摘要:采用正交试验设计和极限平衡方法,以九子崩滑堆积体为实例进行稳定性分析。并对正交试验设计结果进行了极差和方差分析;极差和方差分析结果均显示,堆积体稳定性影响因素敏感性最大的因素为粘聚力 c ,其次为内摩擦角 φ ,重度 γ 对稳定性影响的敏感性较小。找出了影响边坡稳定性的主导因素,为滑坡防治工程提供了参考依据。

关键词:堆积体;滑坡;稳定性分析;正交设计;敏感性分析

中图分类号:P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)12-0075-04

Sensitivity Analysis on Influence Factors of Accumulation Stability Based on Orthogonal Design/WANG Bing¹, WANG Chang-ming¹, ZHANG Suo-yu¹, LU Chang-wei² (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Jilin Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: Taking Jiuzi toppling accumulation as the example, the stability analysis is carried out by using orthogonal experiment design and limit equilibrium method, and the range analysis and the variance analysis are made on the orthogonal experimental design results, all the analysis results show that the most sensitive influence factor of accumulation stability is cohesion c , followed by the friction angle φ , the accumulation weight γ has little effect on the stability. The dominant factors affecting slope stability are found out, which provides a reference for the landslide prevention and control project.

Key words: accumulation body; landslide; stability analysis; orthogonal design; sensitivity analysis

0 引言

伴随着水利水电事业的发展,由于水库修建、蓄水等行为引发的滑坡等地质灾害频发。2003 年 7 月 13 日三峡库区秭归县,由于水库蓄水引发千将坪滑坡,造成多人死亡,经济损失达几千万元^[1]。2004 年 9 月 5 日四川宣汉县由于受前期暴雨影响,天台乡义和村渠江支流前河岸坡上的南樊公路出现开裂,此后逐步发展扩大为天台特大滑坡。此外,由于滑体前部滑入前河,形成的堰塞湖导致上游 2 个乡镇被淹^[2]。岸坡滑坡具有规模大、危害性大的特点,因此其稳定性受到了大家的高度关注。影响岸坡稳定性的因素有很多,如岩土体的重度、内摩擦角、粘聚力及地下水活动等。但是由于测量技术、实验设备、场地条件等方面的限制,因素的具体数值存在一定误差。在边坡稳定性分析中传统的定值法不能反映参数不确定性的影响,而基于边坡稳定性影响因素敏感性的分析方法与传统定值方法相比则可

以得出参数不确定性对稳定性的影响,反映土性参数的真实情况,更加科学合理。

很多专家学者对敏感性分析进行了较深入的研究,目前单因素分析法依旧被广泛采用。杨继红等考虑了水库蓄水因素对边坡稳定性的影响^[3];张杰等考虑了黄土分层性对边坡稳定性的影响^[4]。Rahardjo、唐栋等考虑前期降雨对边坡稳定性的影响^[5-6]。也有学者采用双因素法进行敏感性分析,方景成等通过分析库水和降雨两个因素对岸坡稳定性进行分析^[7];唐栋、Alonso 等考虑前期降雨过程与不同岩土体对边坡稳定性的影响^[8-9]。以上边坡的稳定性分析考虑了单因素或者两个因素并进行定量分析,未考虑全部影响因素,存在一定局限性。

本文基于正交试验设计和极限平衡方法对自然状态下九子崩滑堆积体力学因素的敏感性进行分析,得出不同因素的敏感性大小,继而得到影响边坡稳定性的主导因素,在边坡的防治过程中采取针对

收稿日期:2017-09-13;修回日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目“结合水对软粘土力学行为的控制作用与机理”(编号:41572257)

作者简介:王冰,男,汉族,1991 年生,硕士研究生在读,岩土工程专业,研究方向为地质灾害防治,吉林省长春市西民主大街 938 号,1414951734@qq.com。

性措施,从而达到经济安全的目的。

1 工程概况

九子崩塌堆积体位于万家口子水电站上游 400 ~ 1200 m 左岸,分布高程为 1350 ~ 1770 m。该崩塌堆积体为主要岩性为石炭系中统黄龙群(C_2hn)中厚层状白云岩(岩层产状为 $SE170^\circ \angle 30^\circ$)和摆佐组(C_1b)灰岩(岩层产状 $SW196^\circ \angle 28^\circ \sim 30^\circ$)发生大规模崩塌和错落形成的堆积层。两者产状总体接近,略呈角度不整合。崩塌及下滑过程中相互碰撞挤压使部分岩体破碎,后经压密固结并被地表水及地下水携带的钙质重新胶结。据已有调查资料,堆积体地面坡度平均约为 30° ,地势比较平缓,对堆积体稳定性影响较小。整个崩塌堆积体体积约为 853 万 m^3 。堆积体后缘陡崖连续分布,前缘为堆积阶地,堆积有厚 20 ~ 35 m 钙质胶结卵石层,并且经常形成陡坎。堆积体平面图见图 1,堆积体主要地质剖面见图 2。



图 1 堆积体平面图

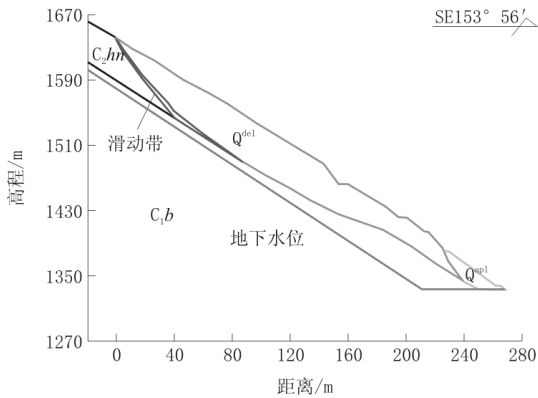


图 2 堆积体主要地质剖面图

崩塌堆积体与基岩界面之间的滑带土经现场勘察,综合室内土工试验确定为碎石土。组成堆积体的坡体地层划分为 4 层:堆积体、碎石土、微胶结卵

砾石和基岩。该坡体上附堆积体岩性比较复杂,以第四系堆积体为主,中间含有相互胶结的灰岩、白云岩及胶结卵砾石。地下水位全部位于崩塌堆积界面以下,且该堆积体透水率较大,有良好的地下水排泄条件,故前期稳定性计算未考虑地下水、降雨对堆积体稳定性的影响。力学参数由现场实际调查及室内试验得出,详见表 1。

表 1 岩土体力学参数

岩土位置	岩土名称	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	抗剪指标	
			内摩擦角 $\varphi/$ ($^\circ$)	粘聚力 $c/$ kPa
堆积体	崩塌堆积体	25.8	28.8	200
	卵砾石	20.0	26.5	30
	白云岩/灰岩	27.4	43.8	1250
滑带	碎石土	19.8	25.0	20
堆积阶地	坡脚前缘卵砾石	20.0	26.5	30
基岩	白云岩/灰岩	27.4	43.8	1250

2 正交试验方案设计

正交试验设计是用于多因素设计的一种方法,以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交表安排试验方案,对结果进行计算分析,最终迅速找到优化方案,具有很高的效率^[12]。正交试验设计和分析方法是目前最常用的工艺优化试验设计和分析方法,是部分因子设计的主要方法^[13]。

根据边坡堆积体本身性质,正交试验方案可划分为重度 γ 、粘聚力 c 、内摩擦角 φ 三因素三水平范畴。参照正交表选取原则,在三个因素相互独立,且不考虑因素间相互作用的基本前提下,选择 $L_9(3^4)$ 正交表,其中第四列空列可以作为误差项进行分析。因素水平对照表见表 2,详细的试验安排见表 3,并根据表 3 确定的方案采用极限平衡方法中的摩根斯坦-普利斯法计算实验方案中的安全系数 F_s 。各实验方案安全系数结果见表 3。

表 2 因素水平对照

水平	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa	空白列
1	25.8	28.8	200	
2	20.0	26.5	30	
3	27.4	43.8	1250	

3 正交试验结果计算分析

3.1 极差计算

正交设计方案计算结果一般用极差分析法和

表 3 正交试验方案设计及模拟结果

实验 编号	影响因素				安全系 数 F_s
	γ	φ	c	空白列	
1	1	1	1	1	1.153
2	1	2	2	2	0.968
3	1	3	3	3	1.071
4	2	1	2	3	1.153
5	2	2	3	1	1.063
6	2	3	1	2	1.430
7	3	1	3	2	1.210
8	3	2	1	3	1.320
9	3	3	2	1	1.061

方差分析法两种方法。其中,极差分析法(亦称直观分析法)简单明了,只需进行少量的计算,便可得到各因素对试验指标的影响。极差计算公式:

$$m_i = K_i/n; n=3 \quad (1)$$

$$R = m_{i\max} - m_{i\min} \quad (2)$$

式中: K_i ——同一水平所对应的试验指标之和,在这里, K_1 为水平 1 的 3 次指标值之和, K_2 为水平 2 的 3 次指标值之和, K_3 为水平 3 的 3 次指标值之和。

例如影响因素 γ 在水平 1 时的 K 值: $K_1 = 1.520 + 0.968 + 1.071 = 3.559$ 。

各因素列的极差 R 表示该因素在其取值范围内试验指标变化的幅度。根据极差 R 的大小,进行因素的主次排队。 R 越大,表示该因素的水平变化对试验的影响越大,在本试验中这个因素就越重要,敏感性越大。 K_i 和 m_i 以及 R 值的计算结果见表 4。

表 4 剖面 1-1 极差分析结果

实验号	γ	φ	c
K_1	3.559	3.883	4.270
K_2	3.646	3.351	3.182
K_3	3.519	3.562	3.195
m_1	1.186	1.294	1.432
m_2	1.215	1.117	1.061
m_3	1.197	1.187	1.065
R	0.029	0.177	0.362

由表 4 可以看出,极差结果大小为粘聚力 $c >$ 内摩擦角 $\varphi >$ 重度 γ ,所以边坡稳定性影响因素的敏感性大小为粘聚力 $c >$ 内摩擦角 $\varphi >$ 重度 γ 。

3.2 方差计算

方差分析是通过对试验数据进行分析,检验在 F 假设条件下各组的均值是否相等,由此判断因素对试验指标的结果是否产生显著性影响(显著性水平 α 取 0.01、0.05、0.1)。当 $F \geq F_{0.99}$ 时,为特别显著; $F_{0.95} \leq F < F_{0.99}$ 时,为有显著性影响; $F_{0.9} \leq F <$

$F_{0.95}$ 时,为有影响但不是特别显著; $F < F_{0.9}$ 时,为 $F_{0.9}$ 无显著性影响^[14]。

方差分析弥补了极差试验无法精确反映误差项的大小及其带来的影响。此外还弥补了极差分析不能够对各因素进行显著性分析的缺点^[15]。数据分析所需公式如下^[12,16]。

$$SS_T = \sum_{j=1}^c SS_j + SS_e \quad (3)$$

$$df_i = \sum_{j=1}^c df_j + df_e \quad (4)$$

$$MS_j = SS_j/df_j \quad (5)$$

$$MS_e = SS_e/df_e \quad (6)$$

$$F_j = \frac{MS_j}{MS_e} \sim F(df_j, df_e) \quad (7)$$

$$df_j = m - 1 \quad (8)$$

$$SS_T = \sum_{j=1}^c x_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \quad (9)$$

$$SS_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^m K_{ij}^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

式中: SS_T ——总偏差平方和; SS_j ——因素偏差平方和; SS_e ——误差偏差平方和; df_i ——总自由度; df_j ——因素自由度; df_e ——误差自由度; MS_j ——因素方差; MS_e ——误差方差; F_j ——因素 F 值,用以判断试验因素的显著性程度; m ——每个因素的水平数; x_i ——模拟试验对应的所有某一试验指标; K_{ij} ——某一因素的某一水平所对应的试验指标之和; n ——试验总次数; r ——水平重复次数。

依上述公式进行计算,得出因素的显著性,方差分析结果见表 5。

表 5 剖面 1-1 方差分析结果

因素	偏差平方和	自由度	平均方差	F 值	F_j 临界值	显著性
γ	0.001	2	0.001	0.755	$F_{0.01} = 99$	无影响
c	0.230	2	0.115	134.321	$F_{0.05} = 19$	高度显著
φ	0.048	2	0.024	27.975	$F_{0.1} = 9$	显著

选取显著性水平 $\alpha = 0.01, 0.05, 0.1$ 。查 F 分布表可知 $F_{0.99}(2, 2) = 99$; $F_{0.95}(2, 2) = 19$; $F_{0.90}(2, 2) = 9$ 。若 $F_j \geq 99$, 表示因素 j 对指标的影响高度显著;若 $19 \leq F_j < 99$ 表示因素 j 对指标的影响显著;若 $9 \leq F_j < 19$, 表示因素 j 对指标有一定影响;若 $F_j < 9$

表示因素 j 对指标无显著影响。

在方差结果分析中可以看出粘聚力 c 的 F_j 值大于99,对指标安全系数的影响高度显著;内摩擦角 φ 的 F_j 值位于19和99之间,对指标安全系数影响显著;重度 γ 的 F_j 值小于9,对指标安全系数无影响。

4 结论

采用正交试验设计和极限平衡法,以九子堆积体实例;其中极差分析结果为 $R_c = 0.362 > R_\varphi = 0.177 > R_\gamma$,表明影响该滑坡的3种因素,敏感性最大为粘聚力 c ,其次为内摩擦角 φ ,敏感性最小的因素是重度 γ 。方差分析结果为: $F_c > F_{0.99}$ 表明因素粘聚力 c 对稳定性系数指标的影响高度显著; $F_{0.1} \leq F_\varphi \leq F_{0.05}$ 表明因素内摩擦角 φ 对稳定性系数指标的影响度显著; $F_\gamma \leq F_{0.1}$ 表明因素重度 γ 对稳定性系数指标无影响。综合极差、方差分析结果,两者所确定的堆积体稳定性影响因素的敏感性顺序一致。

本文只对堆积体自然状态下的力学影响因素进行敏感性分析,水电站投入使用后,随着水位周期性变化,产生加卸载效应,堆积体孔隙结构、岩土体力学性质、地貌等随之改变。因此水位周期性变化对堆积体稳定性的影响将是接下来工作的重点。基于正交试验分析设计和极限平衡方法对边坡稳定性影响因素的敏感性进行分析,与传统定值方法相比体现了参数不确定性对稳定性的影响,反映了岩土体参数的真实情况,得出了影响稳定性计算结果的主要参数、次要参数。是对边坡进行多因素敏感分析的一种有效的试验设计方法。

参考文献:

- [1] 王思敬,黄鼎成.中国工程地质世纪成就[M].北京:地质出版社,2004.
- [2] 黄润秋.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.
- [3] 杨继红,王俊梅,董金玉,等.水库蓄水过程中堆积体边坡瞬态稳定性分析[J].岩土力学,2011,32(S1):464-470.
- [4] 张杰,韩同春,豆红强,等.基于降雨入渗分层假定的黄土边坡稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4355-4361.
- [5] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(5): 483-491.
- [6] 唐栋,李典庆,周创兵,等.考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(11):3239-3247.
- [7] 方景成,邓华锋,肖瑶,等.库水和降雨联合作用下岸坡稳定影响因素敏感性分析[J].水利水电技术,2017,48(3):146-152.
- [8] 唐栋,祁小辉,蒋水华,等.不同前期降雨与土-水特征曲线对边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2015,37(1):149-155.
- [9] ALONSO E, GENS A, LLORET A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]// Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. Paris, France:1995.
- [10] 覃伟,徐智彬,李东林.渗透性与降雨强度对堆积层滑坡稳定性的影响[J].地质与勘探,2016,52(4):743-750.
- [11] 雷迪.库岸边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].人民长江,2014,45(S2):95-97.
- [12] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.
- [13] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交实验设计和方法研究[J].实验技术与管理,2010,(9):52-55.
- [14] 刘涛,王俊杰.基于正交设计的土坡稳定影响因素敏感性分析[J].水电能源科学,2010,28(3):88-90.
- [15] 葛云峰,唐辉明,熊承仁,等.滑动面力学参数对滑坡稳定性影响研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3873-3884.
- [16] 侯国治,王玉民.正交试验法[M].吉林长春:吉林人民出版社,1985.

桂林七星公园危岩落石治理工程 被动防护网设计与施工

黄晨忱, 许曼钰

(桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:结合桂林市七星公园危岩治理工程实例,探讨在危岩落石地质灾害治理工程中采用被动防护网的设计和施工,为今后的危岩地质灾害治理工程提供参考。

关键词:危岩;落石;被动防护网;柔性防护网;防护能级;防护高度

中图分类号:TV223;P642.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2017)12-0079-04

Passive Protection Net Design and Construction of Holding Rockfall Treatment in Guilin/HUANG Chen-chen, XU Man-yu (Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Based on the case of dangerous rocks treatment project in Qixing Park of Guilin, this paper discusses the passive protection net design and construction for holding rockfall geological disaster treatment, which can provide reference for the dangerous rocks geological disaster control project in future.

Key words: dangerous rocks; rockfall; passive protection net; feasible protection net; protection level; protection height

0 引言

危岩是高陡斜坡产生了拉裂、松动变形并随时可能发生破坏,向坡下运动的岩体。落石是在自身重力、震动、降雨等作用下丧失稳定性,脱离母岩,向下坠落的石块。目前,危岩治理工程主要采用主动治理,如:清除、支顶、嵌补、锚固、喷射混凝土等,当山体表面构造风化严重,节理裂隙发育,岩体破碎,可能存在小块落石掉落现象,或悬崖上的危岩不宜清除或清除困难,及不经济和存在较大施工安全隐患时,宜选择被动防护,如:落石槽、拦石墙、拦石堤、刚性栅栏和被动防护网等。

柔性防护网产品自20世纪90年代中期从国外引进后,经过相关科研院所、生产企业的升级研究,在国内铁路、公路、水电、地灾等工程项目中已得到广泛应用,技术和产品均有一定程度的发展和进步。但规程、规范及相关技术标准较少,目前,仅铁路部门于2004年发布了《铁路沿线斜坡柔性安全防护网》(TB/3089—2004),其余部门、行业均无统一标准,各行其是。本文根据桂林市七星公园危岩落石治理工程实例说明被动柔性防护网在危岩落石治理

工程中的应用。

1 工程概况

七星公园位于桂林市区东部,东部、北部滨临小东江,西侧紧靠龙隐路,由普陀山天枢、天璇、天玑、天权4峰与月牙山玉衡、开阳、瑶光3峰组成,山体中下部为著名景点七星岩入洞口,经调查分析目前存在安全隐患确定的危岩体有9处,危岩体破坏形式属于滑塌式(如图1所示)。七星岩上方危岩对游客构成威胁,据现场调查,受危岩威胁的游客和工作人员约150人,潜在经济损失达300万元,危岩崩塌危害对象等级为Ⅲ级。崩塌危害对象为县级以上城市,危岩防治工程等级为Ⅰ级。

2 自然条件

2.1 地形、地貌

治理区处于漓江东岸的孤峰平原地貌区,为一多峰山体,由普陀山天枢、天璇、天玑、天权4峰与月牙山玉衡、开阳、瑶光3峰组成,普陀山天玑峰山顶标高241~248 m,地面标高150 m,相对高差约

收稿日期:2017-04-07;修回日期:2017-11-12

基金项目:广西大学生创新创业训练计划项目(编号:201610596142);广西自然科学基金项目(编号:2017JJA150020);广西岩土力学与工程重点实验室项目(编号:2015-A-01)

作者简介:黄晨忱,女,壮族,1996年生,土木(岩土)工程专业,广西桂林市七星区建干路12号,3071177496@qq.com。

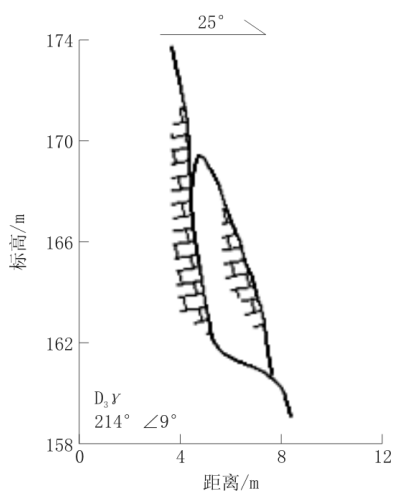


图1 危岩剖面图

91~98 m。本次治理的范围主要是七星岩上方的山体,为七星公园普陀山的天玑峰东侧,山体宽120 m,标高248~150 m,相对高差约98 m,总体坡向约为75°,上部山体较缓,坡度为45°~65°,下部山体近似垂直,坡度80°~85°,局部岩壁直立。山体上方大部生长有灌木丛,中下部岩石裸露。

2.2 地层岩性

治理区分布的地层主要有第四系和泥盆系上统桂林组白云质灰岩。

①第四系(Q)粘土层:黄色粘土,稍湿—湿,呈硬塑—可塑状,主要分布于山脚处,厚度多为3~6.5 m,山腰较缓处也有零星分布,厚度多为0.3~0.7 m。

②泥盆系上统容县组(D₃γ)白云质灰岩:浅灰色,隐晶质结构,中厚—厚层构造,岩石坚硬,性脆,结构破碎,岩溶较发育。地层产状为214°∠9°。据本次野外调查,在山体主要有二组裂隙,其裂隙产状分别为:J1 200°∠89°、J2 105°∠90°,裂隙长0.2~12 m,宽度0.1~20 cm,大多无充填,局部充填粘土,密度2~3条/m。

3 被动防护网方案设计

危岩治理方案的确定主要是根据危岩体所处的地质环境条件、危岩基本特征、破坏失稳方式,同时考虑治理效果的持久性和安全性、现场施工条件以及对围岩稳定性的影响程度、经费等综合因素。综合上述因素,本设计针对危岩采用静态爆破清除危岩和采用定型化被动防护网的治理设计方案。采取静态爆破施工,操作简单,一劳永逸。静态破碎剂胀

裂破碎是在危岩体上钻凿密集炮眼,在炮眼中灌装按一定水粉比加工好的爆破剂,通过爆破剂的膨胀作用产生压力将岩石破碎,将清除后的危岩块放置于安全地带,防止次生灾害的发生。由于山体表面构造风化严重,节理裂隙发育,岩体破碎,仍存在小块落石掉落现象,为保证安全,在山腰位置布设一排被动防护网;同时辅助监测措施。

3.1 危岩破坏后的运动计算

3.1.1 计算落石滚落距离

落石运动方式受下部斜坡的物质组成、边坡坡度角等的影响,运动距离各不相同。根据R·M·Spang(1978)的研究成果,崩落体只有坡度角小于一定临界值(约27°)时,才停积于崖角,随坡度角增大(大于55°),可分别表现为滑动、滚动、跳跃和自由崩落等方式(图2所示),大部分或全部堆积于坡脚。因此岩体在产生变形破坏后,大部分以滚动、跳跃或自由崩落的方式向坡脚运动,最后堆积于坡脚地带或滚入坡下,直接影响坡下建筑和在七星岩入口及山下过往游客的生命财产安全。

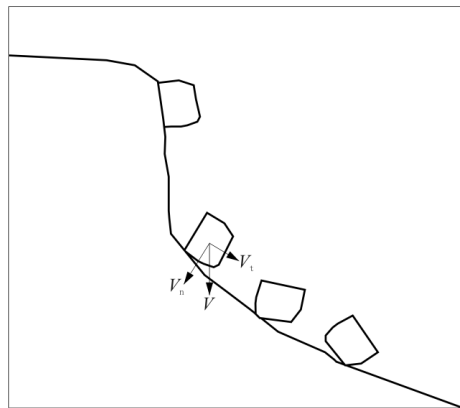


图2 危岩崩塌运动轨迹示意图

因区内危岩岩体内部节理裂隙发育、较破碎,岩石已被分割成较小的块体,滚石体积按3 m³计算。预测该危岩发生破坏滚动时的滚动距离和速度。

当落石第一次坠落在斜坡表面,因碰撞,能量发生变化,部分能量消耗在碰撞过程中,部分能量将使落石在坡面上继续运动。

据能量守恒定律:

$$mgh = (1/2)mV^2$$

据上式可以计算出落石碰撞前夕的速度V,根据地形剖面可以计算出碰撞时的切向速度V_t与法向速度V_n,以及V_t与V_n的夹角β。

即:

$$V_n = V \sin \beta$$

$$V_t = V \cos \beta$$

落石与斜坡松散层地面的法向碰撞可认为是对心塑性碰撞,所以 $V_n = 0$ 。切向碰撞,损失率采用 10%。所以落石第一次在斜坡上碰撞与维持其继续运动的动能为 $(1/2)m(0.9V_t)^2$ 。块石在斜坡上的继续运动是以滚动和滑动为主的综合形式。为了计算方便,可简化为沿斜坡的综合摩擦运动来分析。据功能原理,落石的势能变化等于动能变化和克服摩擦所做的功:

$$\sum mg \Delta h_i = (1/2)m(V_i^2 - V_t^2) + \sum mg \cos d_i \tan \varphi_i L_i$$

式中: V_i ——落石在斜坡面上任意位置处所具有的速度, m/s; d_i ——各直线段斜坡的平均坡度($^\circ$); Δh_i ——各直线段斜坡的垂直高度, m; φ_i ——落石与坡面之间的综合摩擦角, ($^\circ$); L_i ——各直线段斜

坡的长度, m。

由此式便可预测危岩崩塌的最大落距, 当末速度 $V_i = 0$ 时, 便可求得 $\sum L_i$, $\sum L_i \cos d_i$ 就是崩塌的最大水平运动距离。

3.1.2 撞击能量计算

据查尔斯(Chasles)理论, 动能 = 运动能 + 滚动能。在这里采用经验公式计算滚石的冲击能量 K_E :

$$K_E = 1.2 \times (1/2)mV^2$$

落石在此时的速度 V 的水平 and 垂直(x, y) 方向分量分别为 V_x, V_y :

$$V_x = V \cos d_i$$

$$V_y = V \sin d_i$$

根据能量守恒定律:

$$(1/2)mV_y^2 = mgH$$

式中: H ——危岩体的弹跳高度, m。

山坡落石撞击能计算结果如表 1。

表 1 落石弹跳高度及能量计算结果

计算剖面	石块从陡坡坠落高度 H_i /m	石块从陡坡上坠落至坡脚时的速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	石块自坡脚向前运动的反射切线分速度 $V_i(0)/(m \cdot s^{-1})$	石块运动至较缓坡段末端处的速度 $V_t/(m \cdot s^{-1})$	落石能量 K_E/kJ	落石从陡坡落下的落点到拦截网的垂直高度 $H_2(\Delta h_i)/m$	上部坡段坡度 $\alpha_1/^\circ$	下部坡段坡度 $\alpha_2/^\circ$	上部坡段坡度计算速度系数 V_i°	下部坡段坡度计算速度系数 V_t°	石块冲击到缓坡上的瞬间摩擦系数 μ	岩石的密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	岩石的体积 V_s/m^3	岩石的质量 m/kg	弹跳高度 H/m
C	5.0	4.70	4.17	11.15	101	15	37	46	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	1.20
	33.4	12.14	10.79	14.94	103	15	46	40	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	1.50
	29.5	11.41	10.14	14.48	105	15	46	40	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	3.10
A	4.2	4.30	3.83	11.03	98	15	37	46	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	1.10
	19.5	9.27	8.24	13.22	102	15	37	46	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	1.30
	29.6	11.43	10.16	14.49	112	15	37	46	2.1	2.67	0.1	2700	12	32400	3.19
B	4.2	4.30	3.83	11.03	106	15	38	57	2.2	2.87	0.1	2700	12	32400	1.20
	25.4	11.09	9.44	14.58	123	15	38	57	2.2	2.87	0.1	2700	12	32400	1.45
	23.5	10.66	9.08	14.35	131	15	38	57	2.2	2.87	0.1	2700	12	32400	3.32

3.2 设计工程量

根据以上计算危岩体撞击能结果, 按 $3 m^3$ 滚石计算撞击能为 105 ~ 1311 kJ, 故拦截撞击能在设计和校核情况下按 2000 kJ 进行设计。在三级防护位置, 滚石弹跳高度为 3.10 ~ 3.32 m, 系统高度 H 应比计算弹跳高度大于 1.0 m 作为安全储备, 故防护设置高度为 5.0 m。经危岩体撞击能计算共需一道 2000 kJ 级被动防护网, 被动防护网拐点坐标如下:

$$(1) X = 3742846.4214 \quad Y = 2798770.7090$$

$$(2) X = 3742862.8456 \quad Y = 2798782.1215$$

$$(3) X = 3742869.0367 \quad Y = 2798801.1392$$

$$(4) X = 3742854.8979 \quad Y = 2798815.2847$$

$$(5) X = 3742837.4318 \quad Y = 2798825.0281$$

同时, 为保护景观, 在 5.0 m 高被动网下种植紫藤, 种植间隔 0.5 m/株, 在其他被动防护网下种植爬山虎, 种植间隔 0.5 m/株。被动防护网具体工作量详见表 2。

表 2 被动防护网工程工程量汇总

序号	内 容	工程量
1	XI-200 型柔性被动防护网	长 60.0 m, 高 5.0 m
2	基座开挖	4.3 m ³
3	拉锚开挖	12.3 m ³
4	C25 砼浇筑	26.6 m ³
5	R/3/190 环形网	200 m ²

4 施工技术要求

工程设计选型中,当采用定型化被动防护网时,应给出满足产品加工制造或采购、质量检验、施工安装与工程验收需要的技术条件或要求,或指出定型化技术文件的出处,并给出附加技术条件或要求。

(1)对坡面防护区域的松土及落石进行清除。

(2)相邻基座间连线与水平面的夹角 $>10^{\circ}$ 或其间高差 $>1.5\text{ m}$ 时,应考虑所需柔性网片的尺寸增大或形状改变。

(3)相邻两跨在水平面内的走向朝上坡侧偏离直线且走向改变角 $>5^{\circ}$ 时,应考虑增加共用钢柱上的下坡侧拉锚绳;如这种走向改变是朝下坡侧偏离直线且走向改变角 $>30^{\circ}$,则应考虑增加共用钢柱上的上拉锚绳。

(4)连续布置的单道被动防护网长度较大时,应进行支撑绳分段,并结合被动防护网的局部走向改变综合考虑分段位置,设置分段钢柱上的拉锚绳。如所采用被动防护网定型化技术文件规定了支撑绳分段方法时从其规定,否则,各支撑绳分段长度不应大于 100 m 或 10 跨。

(5)应尽可能不砍伐树木,对需要砍除的灌木,应保持其重新生长的条件;防护工程实施可能破坏原有植被时,宜考虑人工绿化措施。

(6)因在半山腰上安装被动防护网,要做好材料运输、施工等安全措施。

5 结语

桂林市七星岩上方危岩经过采用被动防护网等

综合治理工程后,消除了七星岩入洞口处的安全隐患,确保公园的正常营运。实例应用实践表明,被动防护网以其独特的柔性和高强度特征以及对复杂地形的灵活适应性,具有其他防护方法常常难以解决的优势。特别是在解决高陡悬崖上危岩采用清除或加固治理存在安全风险极大及造价太高时,具有很好效果,其环保效果突出。

参考文献:

- [1] 七星公园七星岩洞上方危岩应急治理工程施工图设计[Z].广西桂林:广西地质灾害防治工程勘查设计院,2015.
- [2] 阳有奎,原振华.柔性防护系统及其工程设计及应用[M].北京:科学出版社,2015.
- [3] 阳有奎.坡面地质灾害柔性防护的理论与实践[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 罗伟.硤石山坡SNS主动柔性防护系统综合治理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):73-76.
- [5] 李念.SNS边坡柔性安全防护系统工程应用[M].四川成都:西南交通大学出版社,2002.
- [6] 阳友奎,姜瑞琪.SNS柔性防护技术及其与传统边坡防护方法之比较[C]//2002年中国西北部重大工程地质问题论坛论文集,2002.
- [7] 谢正富.采用SNS柔性防护系统整治危岩落石病害[C]//铁道工务论文集(第3册),2004.
- [8] 李文勇.浅谈SNS柔性防护网在山区高边坡中的应用[C]//河南地球科学通报2009年卷(下册),2009.
- [9] 李铁振.SNS柔性防护在公路边坡治理上应用[C]//2005年公路交通学术论文,2005.
- [10] 袁关松.公路路基的边坡防护中采用刚性防护与柔性防护的范围及特点[C]//中国新时期思想理论宝库——第三届中国杰出管理者年会成果汇编,2007.
- [11] 韩富强,张锦灵,庞磊.兰州徐家湾不稳定边坡的综合治理技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):78-84.

馏化法处理垃圾新工艺探讨

颜俊, 卢薇艳

(深圳市地质局, 广东深圳 518023)

摘要: 为了适应环保部门提出的更高的环保要求, 减少因焚烧垃圾产生的 CO_2 含量, 从而达到节能减排的目标, 在大量实验和计算研究的基础上, 提出了采用馏化法处理垃圾的新工艺。馏化法主要是垃圾中的炭质不参加燃烧, 不产生 CO_2 和 CO , 不破坏空气中的主要成分, 做到无害生产。馏化法处理垃圾的设备由喷淋系统及滚动筛、不锈钢输送带、隧道式烘干炉及馏化炉、烘干焦化炉、粉碎机、液压成型机等组成。主要的配套工艺有垃圾干馏炭化制砖工艺和垃圾三角条幅填海工程工艺。该馏化法处理垃圾解决了减少 CO_2 排放问题, 而炭渣填海方法做到零污染、全利用效果, 具有客观的经济效益。

关键词: 垃圾处理; 馏化法; 低碳减排; CO_2 排放

中图分类号: X705; TU993 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0083-05

Discussion of New Process for Wastes Treatment by Distillation Method/YAN Jun, LU Wei-yan (Geological Bureau of Shenzhen, Shenzhen Guangdong 518023, China)

Abstract: In order to adapt to the higher requirements of environmental protection, reduce CO_2 content generated by wastes incineration and achieve the goal of energy-saving and emission reduction, a new process for wastes treatment by distillation is put forward based on a large number of experimental and computational studies. With the distillation method, carbon in the wastes does not participate in combustion with no CO_2 and CO production, no destruction on the main components in the air and harmless production can be realized. The equipment for treating wastes by distillation consists of spraying system, rolling screen, stainless steel conveyor belt, tunnel type drying furnace and distillation furnace, drying coking furnace, crushing machine, hydraulic molding machine and some others. The main supporting processes include wastes dry distillation carbonization brick making and wastes triangle strip making technologies for reclamation. By this distillation method, CO_2 emissions can be reduced in wastes treatment, zero pollution and total utilization in carbon slag reclamation have objective economic benefits.

Key words: wastes treatment; distillation process; low carbon and emission reduction; CO_2 emission

0 引言

常用的垃圾焚烧炉为垃圾完全焚烧式, 经过多年运行后, 环保部门提出了更高的环保要求, 对 CO_2 排放有了更严格的限制。根据我单位试验计算得到, 完全燃烧 1 t 垃圾要消耗 2.4 万 m^3 空气, 产出 0.6 万 m^3 CO_2 排入大气。目前较大型的垃圾焚烧炉日烧 1000 多吨, 产生大量的 CO_2 扩散在城市上空的大气中, 并向周围扩展, 有的已达到万余平方千米, 遇到雾霾天气, 风速小, 烟气得不到快速疏散, CO_2 使空气氧含量降低, 造成人体轻微缺氧状态。

对此, 笔者开展了“馏化法处理垃圾新工艺”研究工作, 主要目的是达到低碳减排的要求, 减少 CO_2 排放, 避免温室气体产生, 保证该区域空气氧含量稳

定, 控制空气中的有害物质。经过大量的试验工作, 总结出了行之有效的“处理垃圾馏化新工艺”。现已申报国家专利。

1 国内外垃圾处理现状

据国内有关文献表明, 全球每年各类垃圾排放量约 1×10^{10} t, 其中美国 2.5×10^8 t, 德国 5000 万 t, 日本 5020 万 t。

关于生活垃圾处理全世界都在关注和研究, 发达国家在这方面投入较多, 方法也较多, 比较成熟的方法有 3 种: 一是填埋法, 二是焚烧及焚烧发电法, 三是堆肥法。20 世纪 90 年代以前, 主要发达国家采用填埋法处理生活垃圾。随着经济的迅速发展,

收稿日期: 2017-06-19; 修回日期: 2017-10-24

基金项目: 深圳市地质局地质工程院士工作站工作项目

作者简介: 颜俊, 男, 汉族, 1960 年生, 教授级高级工程师, 地质矿产勘查专业, 从事岩土工程、探矿工程、地质灾害防治等工作, 广东省深圳市罗湖区宝岗路 7 号, yanjunsz@qq.com。

越来越多国家采用焚烧法处理生活垃圾。堆肥法在国外已经很少使用。此外,发达国家对生活垃圾的可利用回收率较高,平均在20%~30%之间,余下的垃圾大部分做焚烧处理,少量做填埋处理。

近年来,生活垃圾焚烧处理越来越普及,主要采用机械化焚烧炉及馏化床焚烧炉,可消除二次污染,其各项技术均已成熟。根据资料记载,全世界共有生活垃圾焚烧厂近2200座,其中生活垃圾焚烧发电厂约900座,总处理能力为57.6万t/d,年处理量约为1.5亿t,且主要分布在欧美、日本等发达国家。该方法具有占地少、处理时间短、减量化显著、无害化以及可回收垃圾焚烧余热等优点。

而在我国城市生活垃圾处理方式中,填埋占85%~90.6%,堆肥约占5.5%~8.4%,焚烧仅占1%~8%,东部沿海和京津地区焚烧应用较广。各大城市建造大型垃圾焚烧炉进行焚烧处理,但是馏化法处理垃圾在全世界仍处于探索与研究阶段。

近几年,笔者及有关研究人员将盐水喷淋法、垃圾燃烧余热馏化法及将馏化渣填海造陆等相关工序相融合,使垃圾处理更加现代化、适用化、低污染化。目前该方法已基本完成实验。

2 馏化法垃圾处理新工艺的工作原理和存在问题

2.1 工作原理

目前馏化法处理垃圾没有被普及应用的原因是馏化设备及方法尚不成熟,但是它的环保效果在理论上得到业内人员所共识。馏化法处理垃圾的主要原理是通过控制馏化炉的温度,使垃圾在炉内不参加燃烧,不产生 CO_2 ,达到低碳减排的目标。

2.2 关键难题

馏化法处理垃圾需要攻克的主要难题有如下几个方面。

(1)馏化温度范围需控制在350~550℃。低于350℃垃圾达到干燥极限,只是产生微馏化现象,高于550℃超过垃圾燃烧点的温度,会使垃圾燃烧失去馏化效果。

(2)对馏化设备的研制要求较高。垃圾是一种导热性极差的物质,根据我单位的实验研究,生活垃圾在 0.25 m^3 的网状炉内,炉温保持在450℃,3.5h后,只有1/2的垃圾被馏化,容器心部垃圾没有得到馏化,这个现象说明研制馏化设备仍有一定难度。

(3)切碎机的研制。填入馏化炉内的垃圾需要

切碎,由不锈钢制成的输送带送入炉内,为了快速完全馏化垃圾,切碎后的垃圾料层要求薄而均匀,才能达到完全碳化的效果。垃圾成分复杂,有少量硬金属、混凝土块、石块等物料,还有废旧轮胎橡胶、麻棉物品,以上这些物料使目前切碎机无法正常工作,要解决这个问题就要研制新型的万能切碎机。

(4)馏化垃圾过程需要大量的能源,为了降低燃料成本,选用垃圾中的可利用能源,我们通过试验,利用不经过分选的垃圾在焚烧过程中产生的余热馏化垃圾取得了成功。对于制造新的垃圾馏化设备提供了实验基础。

(5)馏化垃圾要产生比焚烧法多几倍的垃圾残渣,对于残渣再利用方面参考国内外先例进行深入研究,取得了一定的成绩,但仍需进一步试验,使之成熟后方可推广应用。

2.3 解决方案

利用海水喷淋法解决了垃圾除臭、长期保存的问题,在喷淋过程中进行分选解决了部分物料回收问题,余下的垃圾要进行馏化处理,主要是达到消毒减排目的。尾料与填加剂可做为填海、防洪建材,填海可制作成混料三角锥砌块,每个2~5t,具有便于运输、砌筑牢固等特点。

3 热空气馏化法处理垃圾的主要流程

馏化法主要是垃圾中的炭质不参加燃烧,不产生 CO_2 ,不破坏空气的主要成分,做到无害生产。

采用馏化法处理垃圾,流程如下:(1)运输垃圾到处理场;(2)通过输送带传至滚动筛;(3)滚动筛上置喷淋器,向下喷洒加过厌氧酸的食盐水;(4)垃圾在滚动筛中搅拌冲洗;(5)滚动筛下方设置过滤网及储水池;(6)过滤网上的细碎有机物经输送带传至烘干炉烘干,出炉粉碎筛分;(7)经筛分装袋做农田肥料;(8)滚动筛中粗料经传送带传至烘干炉;(9)由烘干炉出口投入到馏化炉,馏化到350℃;(10)馏化后粉碎筛分加水泥制成建材。

4 馏化法处理垃圾设备及工艺

馏化法处理垃圾的设备由喷淋系统及滚动筛、不锈钢输送带、隧道式烘干炉及馏化炉、烘干焦化炉及其他设备组成。

4.1 喷淋系统及滚动筛(图1)

垃圾车由长廊进入滚动筛料斗侧,将垃圾翻入

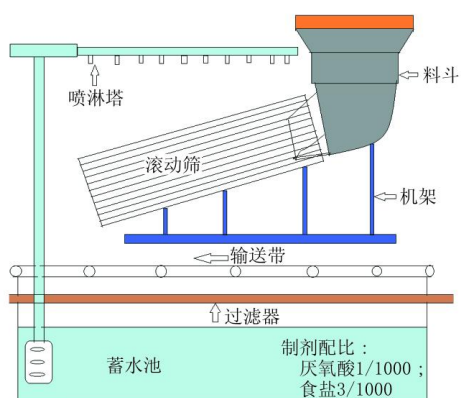


图1 新建垃圾场喷淋系统滚动筛分系统图

料斗,料斗上口位置设置在地平面上,垃圾进入滚动筛内在转动条件下翻转摩擦冲击,破坏垃圾原包装,使包装袋与之分离,上部喷头向筛内喷洒加厌氧酸的盐水、下部筛分出细颗粒食品残渣、流入筛下过滤托盘,托盘置于传送带上、由传送带传至操作间将沉渣装入车中推入烘干炉烘干微焦化后送入包装车间包装成袋、待运销售,这是一种优良的有机肥。

滚动筛排出的粗料主要是塑胶制品、木柴、纸板,破布,与其它硬质废料经清洗后达到无味无污染,由传送带送至干馏车进入干馏炉干馏。

4.2 不锈钢输送带(图2)

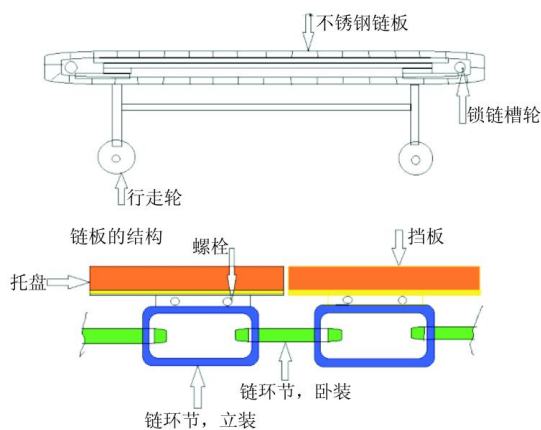


图2 链式不锈钢带输送机示意图

垃圾腐蚀严重,用不锈钢材料防腐功能好。传动系统系锁环传动,强度高,耐磨损。

4.3 隧道式烘干炉及馏化炉(图3)

湿垃圾装在料车上在烘干室烘干后进入干馏室干馏,烘干及干馏时间加起来要达到3 h以上方可炭化完成。干馏炉下方为热空气发生炉,热空气经由保温管道向烘干炉及干馏炉输送热空气,烘干温度120~150℃,馏化温度320~350℃。温度可以

无级调节,通过自动调节阀自动调节,由温控表控制。

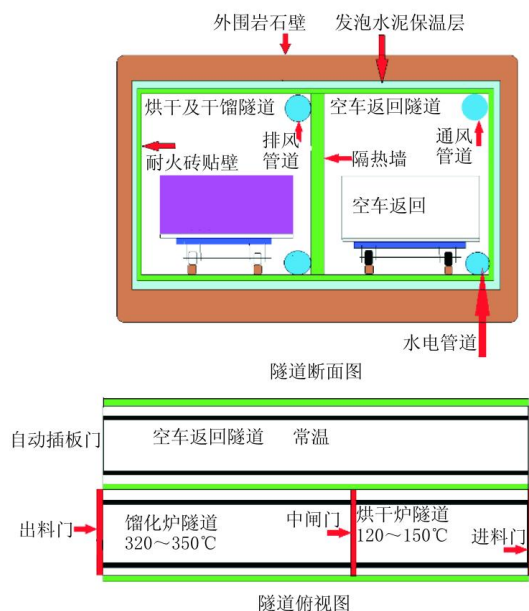


图3 隧道式烘干炉及馏化炉构造示意图

4.4 食品垃圾烘干焦化炉(图4)

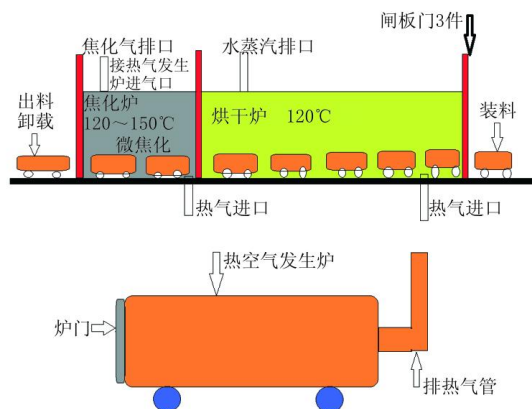


图4 食品垃圾烘干焦化炉结构示意图

经过滚动筛分下来的食品残渣经酸化处理,送烘干炉烘干焦化。

4.5 粉碎机(图5)

垃圾馏化后需粉碎成一定粒度的物料,烘干及馏化后的粗细料都要经过粉碎机粉碎过筛分类,做为各种材料待用。塑胶、木材、橡胶、棉布、纸质、馏化后质地酥脆,便于粉碎,石料、砖料也便于锤式粉碎机粉碎。

4.6 液压成型机(图6)

筛分好的物料加入粘接剂(如粘土粉等)由液压成型机挤压成棒料待用。压料之前在粉碎好的料中加入粘合剂,如黄土、红土、白岭土等物料搅拌后

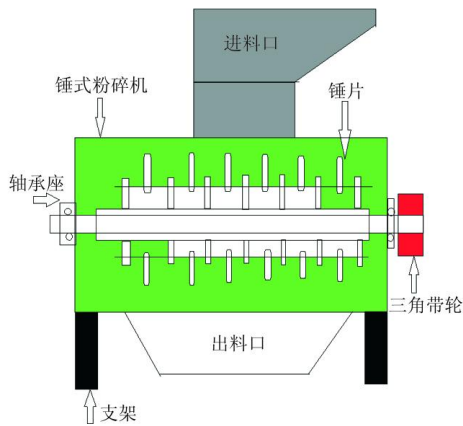


图5 粉碎机示意图

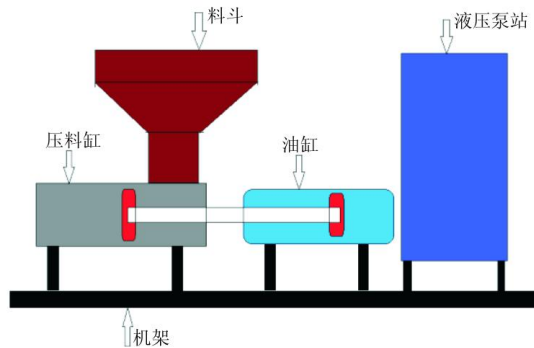


图6 液压成型机示意图

进入挤压工序。棒料的直径及长度要分成几种规格。根据棒料规格,设立多组挤压设备,也有同种多台情况。

4.7 棒材充填水泥成型模块(图7)

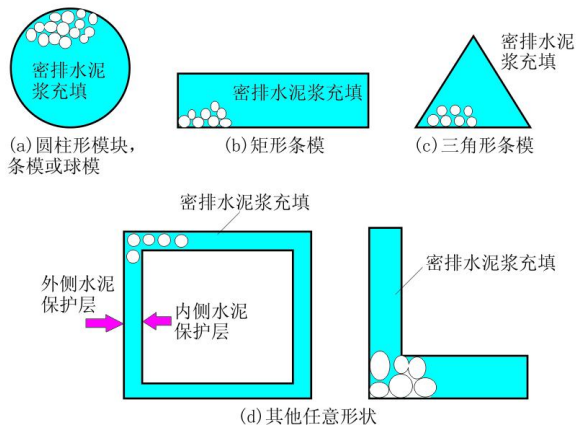


图7 棒材充填水泥成型模块

把各种不同规格棒料分别摆放在模块内封闭后注入水泥浆、养生脱模待用。图7中有圆柱模,三角条型模,矩型模,方框模,直角模,其中三角模用于填海造陆用。根据甲方提供抗压强度选择水泥标号及棒料抗挤压强度。

4.8 垃圾干馏炭化制砖工艺(图8)

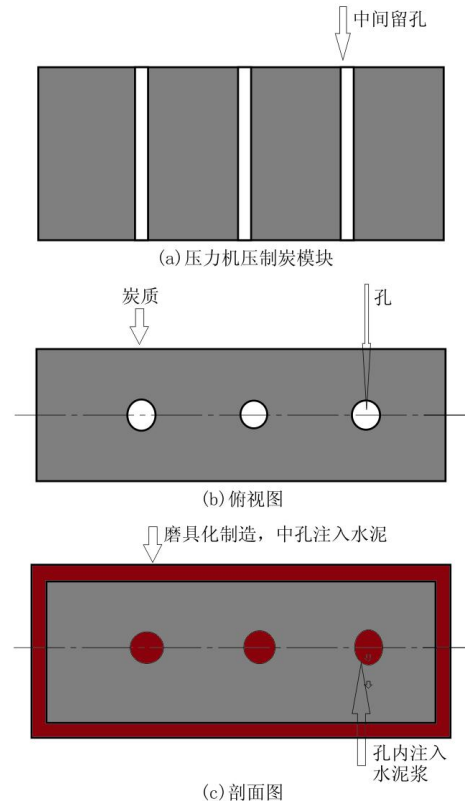


图8 垃圾干馏炭化制砖工艺图

炭化砖具有强度高,质量轻,保温,墙体可模块化,消音效果好等优点。

国内多家企业研究垃圾残渣再利用问题,已取得了显著成果,如制成高压空心砖,并经过质检部门压力测试与鉴定,也有制成空心管材,板材,整体式建筑型材,而且更有整栋楼房墙体与门窗都是垃圾馏化渣经过工厂加工制造的,外表光滑色泽鲜艳毫无异味,牢固耐用。由于垃圾再生产品有机质含量较多,导热性差,保温性能、防水性能均良好,该原料适合生产建筑材料。

我单位首次提出垃圾残渣再生造型用于开展填海工程的研究工作,在浅海地区围堰,预置基础桩基,垃圾馏化渣拌入填加剂再生造型充填填海,比较典型的是垃圾再生“三角锥”填海砌块,它的主要特点是落入海底稳定性高,抗水流冲击强度大,制造简单,每个三角锥质量可达3~5 t,便于运输,是防洪堤坝的理想材料,填海工程每平方千米土地面积售价150亿元人民币起。目前市场垃圾馏化渣供不应求,有待新式垃圾馏化炉的大量投入使用,加大投入力度,加快研究步伐。

4.9 垃圾三角条幅填海工程工艺(图 9)

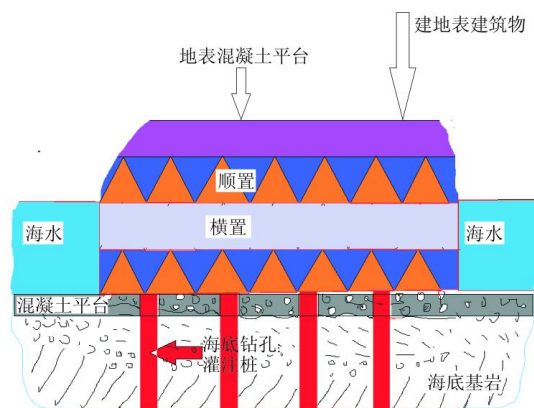


图 9 垃圾三角条幅填海工程工艺图

勘查海底地层情况,根据承载力要求设计钻孔灌注桩,在灌注桩桩头浇筑混凝土平台,在平台上砌筑垃圾三角锥建材,横竖交叉摆放,水泥勾缝,超出水面以后以混凝土筑平台。需要注意的是垃圾制品在海水中处于混凝土全封闭状态,三角锥要进行压力承载试验,垃圾原料拌入粘合剂,粘土,水泥等物料。具体步骤如下:

- (1) 勘查海底地层,钻凿钻孔灌注桩;
- (2) 做好桩头平台,系水下作业;
- (3) 把三角条幅水平按层次摆放;
- (4) 海平面以上浇筑平台,水泥浆注入三角幅孔隙固结成为一体;
- (5) 可根据不同用途采用不同设计;
- (6) 以上工艺适合飞机场,码头,港口建造。

4.10 热空气发生炉烟气处理(图 10)

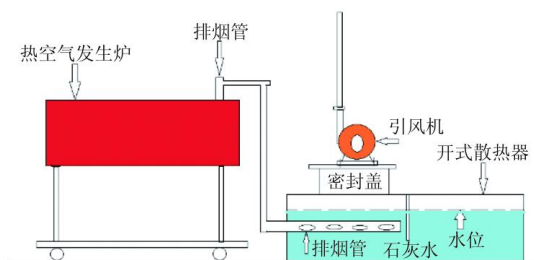


图 10 热空气发生炉烟气处理示意图

烟气经石灰水过滤,降温处理,有引风机排入烟囱。达到全封闭过滤。其技术要求为水箱面积 $\leq 4 \text{ m}^2$,水深 0.5 m,中间隔开,底部连通。引风机功率 $\leq 500 \text{ W}$,无级变频调速。水下花管埋在水中深度为 0.1 m(上表面至水面距离)。

以上设计参考数据:黄铜熔点 950°C ,导热系数 80,比热 0.094。每小时处理 1 t 铜,由常温升至 200

$^\circ\text{C}$,铜吸收的热量为 18800 千卡,即 18800 千卡。18800 千卡可使 1 t 水温度上升 20°C 。

水箱中加入生石灰,作用是吸收烟气中的炭黑,起到净化烟气的作用。当石灰变黑时要及时更换石灰水。利用该装置使木材烟气排放达到环保要求。

5 馏化法处理垃圾综合评价

5.1 经济性评述

馏化法处理垃圾使可燃性物质馏化为炭质保留下来,形成可利用的再生能源,经分选可成为多种农业原料,如长效颗粒农家肥和改良土壤的人造土,适合果园、花木、大棚蔬菜种植,室内盆栽栽培,无化肥水稻种植,无化肥瓜果种植,所获得的农产品具有较高的商业价值。垃圾馏化渣在市场上具有广阔的前景。

垃圾馏化渣经粉碎筛选与水泥搅拌制成各种砌块用于填海工程,以解决土地供应不足等问题。以广东某沿海城市为例,日产垃圾 1.4 万 t,馏化后可得到 4500 t 馏化渣,填加水泥制成砌块,折合体积 1800 m^3 ,海边平均水深 3 m,每日可完成 600 m^2 填海工作量,其经济价值 ≤ 600 万元。此外,馏化垃圾每吨价格 250 元,14000 t 垃圾馏化费日收入为 350 万元,而填海每日可获利 600 万元,350 万元为主业收入,600 万元为副业收入,而投入的设备,人力,材料费只占主业的 45% 左右。

5.2 垃圾馏化法新工艺环保性评述

垃圾在馏化炉内的馏化温度为 $350 \sim 450^\circ\text{C}$,物质内部结构水挥发已尽,有机物质氢化合物大量挥发,到了 450°C 时只剩下炭质,是高温消毒后的产品,它的可靠性相当于原生矿物。

烟气当中的 CO_2 气体排放,馏化法处理垃圾 CO_2 排放效果较好,产生的 CO_2 含量相当于焚烧法排放的 1/3,对碳排放有较好的促进作用。

馏化法消灭了垃圾中的有机物质,使馏化渣无机化,即使再浸入水中,又有良好的温度环境也不会发生细菌繁殖现象,与水泥制成砌块使其达到建筑行业要求的强度条件,成为建筑业的新型材料。

6 结语

本文总结了国内外垃圾处理的经验和方法,研究馏化法处理垃圾工艺,设计了馏化法处理垃圾的

(下转第 94 页)

偏压状态下非对称连拱隧道有限元分析

王佳欣¹, 陈振邦², 徐 燕¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 镇江新区管委会, 江苏 镇江 212000)

摘要:非对称连拱隧道是一种特殊隧道,具有几何不对称、结构不对称等复杂的力学特征。而非对称连拱隧道的修筑不可避免要穿越偏压地形,偏压地形又会对隧道的受力状态产生较大的影响。采用有限元单元法对偏压地形条件下非对称连拱隧道进行数值模拟分析,根据大洞径隧道和小洞径隧道的左右位置不同的情况下围岩及衬砌结构受力变形特点,得出在偏压状态下非对称连拱隧道中的小隧道应设计在埋深大一侧的结论,为隧道的设计提供了一定的理论依据。

关键词:非对称隧道;偏压状态;连拱隧道;数值模拟

中图分类号:U451 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)12-0088-03

Finite Element Analysis on Asymmetrical Multi-arch Tunnel under Bias Condition/WANG Jia-xin¹, CHEN Zhen-bang², XU Yan¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Zhenjiang New District Administration Committee, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: Asymmetrical multi-arch tunnel is a special kind of tunnel, which has complicated mechanical characteristics of geometric asymmetry and structural asymmetry. In the asymmetrical multi-arch tunnel construction, it is inevitable to pass through the bias terrain, and the bias has great impact on the stress state of the tunnel. The finite element method is used to make numerical simulation analysis on the asymmetrical multi arch tunnel under bias terrain condition. According to the forced deformation characteristics of surrounding rocks and lining structures of the tunnels with large and small diameters in the left or right, it is concluded that the small one of the asymmetric twin-arch tunnel should be designed at the deeply-lying side in the biased state, which provides a theoretical basis for the design of the tunnel.

Key words: asymmetric tunnel; bias condition; multi-arch tunnel; numerical simulation

0 引言

连拱隧道因具有占地面积小、空间利用率高的优点,广泛应用于地形狭窄地段。非对称连拱公路隧道作为一种复杂的连拱隧道结构型式,虽然数量不多,但已有相关研究。汪海滨^[1]等结合实例,根据现场监测数据反分析,利用模拟试验,对非对称开挖后位移变化进行研究;朱合华^[2]等利用平面有限元方法对非对称连拱隧道进行数值模拟分析,研究其在施工过程中的应力应变情况;于海洋^[3]等利用有限元软件对非对称连拱隧道施工方法、加固效果进行了二维数值模拟分析,揭示了施工过程中不同施工方法和注浆措施对隧道周边变形和初期支护结构的影响;胡学兵^[4]等结合具体实例,对非对称隧道结构的力学机理进行研究;陈秋男^[5]等对中国公路连拱隧道的设计、施工研究作了一些综述;翁其能^[6]等用三维软件对双连拱隧道开挖进行仿真模拟分析。

受线路位置和地形条件的限制,非对称连拱隧道的修筑将不可避免地穿越偏压地形,偏压地形条件下非对称连拱隧道具有几何不对称、结构不对称和左右荷载不对称等复杂的力学特征^[7-8],目前对偏压条件下连拱隧道非对称支护结构受力特征研究较少。非对称连拱隧道两个洞径大小不一,在偏压隧道中就出现 2 种情况:一种是小洞径处于埋深小的一侧(下文简称“工况 1”),一种是小洞径隧道处于埋深大的一侧(下文简称“工况 2”),本文针对偏压状态下的非对称连拱隧道两种工况,进行围岩和衬砌结构受力和变形有限元数值模拟,研究两种工况下围岩及衬砌结构受力及变形特征,从而为隧道的设计提供一定的理论依据。

1 模型建立及参数设定

采用平面应变模型,岩体为理想弹塑性材料,仅

收稿日期:2017-07-05; 修回日期:2017-09-19

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“乾安泥林土的工程地质特性对泥林潜蚀作用影响机制研究”(编号:41702300)、“爆生气体作用下岩石裂纹的力学行为及扩展模型研究”(编号:41502270)

作者简介:王佳欣,男,汉族,1991 年生,硕士研究生在读,从事地质工程和岩土工程方面的研究,吉林省长春市西民主大街 938 号,418338590@qq.com。

考虑自重应力的作用。小隧道洞宽 11.368 m,洞高 7.848 m,大隧道洞宽 14.21 m,洞高 9.81 m。考虑隧道开挖的影响范围大于 3 倍洞跨,隧道底边距模型下边界 42 m,隧道两侧距模型左右边界各取 42 m。偏压坡度比为 1:2,最小覆盖层厚度为 12 m,属于浅埋偏压隧道(图 1、图 2)。本模型左、右和下边界均施加法向约束,上部为自由边界^[9],隧道采取全断面开挖形式。

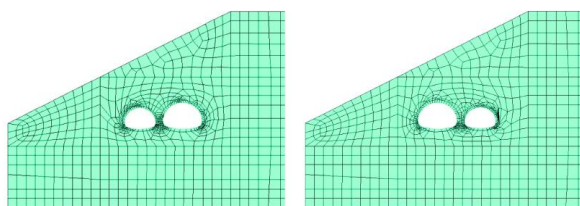


图 1 工况 1 隧道网格模型

图 2 工况 2 隧道网格模型

隧道围岩选取 V 级围岩,其围岩弹性模量、泊松比、重度、内摩擦角以及粘聚力根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)表 A.0.4-1 V 级围岩指标值确定,锚杆的加固效果采用提高围岩的物理力学参数进行模拟,具体方法为将锚杆加固范围的围岩等级提高一级^[10],加固厚度为 1.1 m,衬砌结构采用钢筋混凝土材料,厚度为 40 cm(表 1)。

表 1 围岩和衬砌物理力学参数

名称	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松 比 ν	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	粘聚力 c/MPa
V 级围岩	180	1.60	0.37	25	0.20
C25 衬砌	2500	29.50	0.15	54	2.42
加固圈围岩	2600	25.00	0.20	55	2.00

2 数值模拟分析

利用 ANSYS 软件分别对图 1 和图 2 所示隧道进行数值仿真模拟,分析其开挖支护后围岩总位移、围岩主应力值及衬砌内力。

2.1 围岩总位移分析

图 3、图 4 表示隧道经全开挖后围岩的总位移情况。图 3 所示围岩最大位移为 113.12 mm,图 4 所示围岩最大位移为 112.89 mm,两种工况位移量都很小,且相差不大。

2.2 围岩主应力

为描述不同偏压条件下隧道洞室的稳定性和衬砌结构的受力变化特性,引入偏压系数 λ 。偏压系数计算公式为:

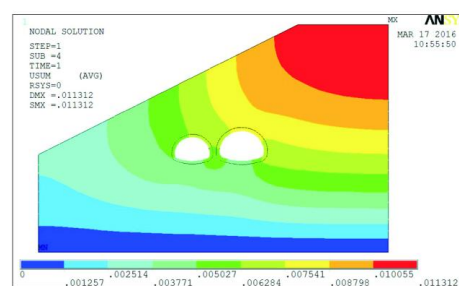


图 3 工况 1 总位移(单位:m)

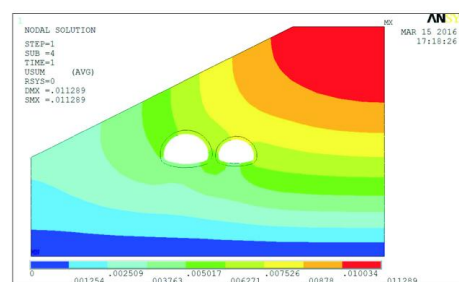


图 4 工况 2 总位移(单位:m)

$$\lambda = 1 + |(\sigma_{\text{左}} - \sigma_{\text{右}}) / \sigma_0| \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{左}}$ 、 $\sigma_{\text{右}}$ ——分别为左侧、右侧特征点围岩应力值,kPa; σ_0 ——平均围岩应力值,kPa。

通过软件模拟分析,得到各个特征点围岩的最大、最小主应力值。根据得到的最大、最小主应力值,通过式(1)计算出偏压系数,其数值如表 2、表 3 所示。表中主应力正值为拉应力,负值为压应力。

表 2 各特征点围岩最小主应力

位 置	工况 1		工况 2	
	小隧道 (左洞)	大隧道 (右洞)	大隧道 (左洞)	小隧道 (右洞)
拱顶/kPa	-95.008	-39.64	-63.287	-100.56
左/kPa	-201.073	-168.52	-119.929	-169.328
右/kPa	-79.415	-87.732	-87.916	-47.852
偏压系数	1.87	2.62	1.31	2.12
左/kPa	-288.089	321.116	-181.914	409.646
右/kPa	635.571	886.612	422.386	1052.134
偏压系数	1.75	1.94	1.79	1.89

表 3 各特征点围岩最大主应力

位 置	工况 1		工况 2	
	小隧道 (左洞)	大隧道 (右洞)	大隧道 (左洞)	小隧道 (右洞)
拱顶/kPa	-1090.00	-310.21	-727.094	-663.536
左/kPa	-2290.00	-2500.00	-2170.00	-2370.00
右/kPa	-1270.00	-1210.00	-1170.00	-903.698
偏压系数	1.57	1.70	1.60	1.89
左/kPa	-2170.00	2610.00	-1470.00	1700.00
右/kPa	5350.00	4850.00	3160.00	3820.00
偏压系数	1.85	1.60	1.73	1.77

分析表2、表3可知:

(1)从最大、最小主应力可以看出,不管是工况1还是工况2所示隧道,其浅埋一侧的隧道在拱腰、拱脚处应力值要小于深埋一侧的隧道应力值,但是拱顶处浅埋一侧应力值大于深埋一侧,这是因为开挖前后地层遭到扰动,此时主要以应力释放和沉降变形为主,随着变形增大,深埋侧地表开始出现拉应力,应力增大,拱顶上部浅埋地层会出现拉裂破坏。显然在本例中只在深埋侧地段出现了拉应力,抵消了一部分压应力,故深埋段拱顶压应力小于浅埋段拱顶压应力。

(2)从偏压系数的角度出发,工况1出现的偏压系数数值大普遍大于工况2,说明工况1的隧道围岩受力更不均匀。

2.3 衬砌内力

衬砌弯矩图和轴力图见图5~图8。

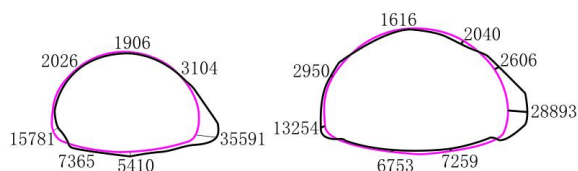


图5 工况1弯矩图(单位:kN·m)

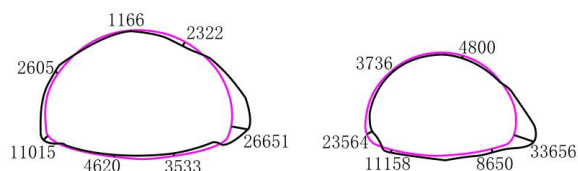


图6 工况2弯矩图(单位:kN·m)

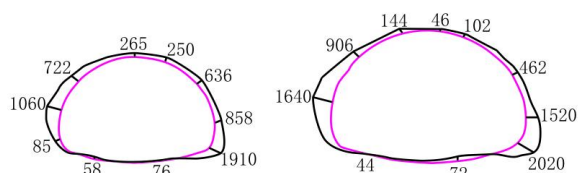


图7 工况1轴力图(单位:kN)

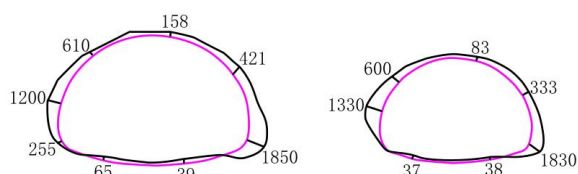


图8 工况2轴力图(单位:kN)

分析图5~图8可知:

(1)从弯矩图可以看出,2种工况拱脚两侧弯矩值较大,且深埋一侧弯矩值达到最大。所以应加强

拱脚的刚度,比如设置锁脚旋喷桩。

(2)从轴力图可以看出,深埋一侧拱脚处轴力值达到最大,拱底处出现拉应力。

3 结论

(1)非对称连拱隧道在偏压状态下受力复杂,不同于一般的隧道。围岩、衬砌内力处于非对称状态,且在同一个非对称连拱隧道中,大洞径隧道所受内力明显大于小洞径隧道,这是由于围岩受到扰动,围岩压力发生重分布,隧道围岩、衬砌内力也随之变化,大洞径隧道所受扰动大,围岩释放的应力大,所以其内力值就更大。

(2)综合分析围岩应力、衬砌内力,对比非对称连拱隧道的两种方案结果,可以得出这样一个结论:在偏压状态下,非对称连拱隧道中的小隧道应设计在埋深大的一侧。这样设计一方面可以减小由于偏压效应所导致的剪切破坏,另一方面可以减小压应力对隧道结构的破坏。

(3)在结构设计时,应对围岩受力不利的一侧适当加强支护,对围岩受力较好的一侧适当减小支护,即进行非对称结构设计。

参考文献:

- [1] 汪海滨,李小春,高波,等.城市浅埋大跨连拱隧道非对称开挖地表沉降偏态性研究及其对策[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3203-3209.
- [2] 王亚琼,张少兵,谢永利,等.浅埋偏压连拱隧道非对称支护结构受力性状分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3265-3272.
- [3] 朱合华,叶斌.大跨度非对称连拱隧道施工力学研究[C]//中国岩石力学与工程学会.岩石力学新进展与西部开发中的岩土工程问题:中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集,2002.
- [4] 胡学兵,肖博,吴胜忠.非对称连拱隧道设计技术研究[J].公路交通技术,2013,(1):91-96.
- [5] 陈秋南,张永兴,刘新荣,等.连拱隧道的设计理论与动态施工力学研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(1):156-160.
- [6] 翁其能,袁勇,杜国平,等.双连拱隧道开挖整体性态三维数值仿真分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):96-100.
- [7] 柳雁玲,何磊,刘永平.和龙沿江公路傍山隧道偏压特征分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(2):240-244.
- [8] 安鹏程,陈剑平,邱道宏.偏压连拱隧道围岩稳定性分析与现场监控量测[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(2):285-289.
- [9] 李权.ANSYS在土木工程中的应用[M].北京:人民邮电出版社,2005.
- [10] 李围.隧道及地下工程ANSYS实例分析[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

探槽爆破施工中电爆网路外来电流预防技术

孙宗席

(武警警种学院, 北京 102202)

摘要: 在分析探槽爆破施工中电爆网路外来电流的成因、类型及特性的基础上, 综述了探槽爆破施工中电爆网路外来电流预防技术及研究成果。获得的成果可为露天爆破施工电爆网路外来电流的预防提供参考。

关键词: 探槽爆破; 电爆网路; 外来电流

中图分类号: P633.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2017)12-0091-04

Technology of Preventing Foreign Current from Interfering Current Network in Trenching Blasting Construction/
SUN Zong-xi (College of Specialized Forces, CAPF, Beijing 102202, China)

Abstract: Based on the analysis on the causes, types and characteristics of the foreign current of the electric blasting network in the trenching blasting construction, the paper reviews the technology of preventing foreign current from interfering electric blasting network in trenching blasting construction and the research results. The achievements received can provide reference for the prevention of foreign current of the electric blasting network in the open blasting construction.

Key words: trenching blasting; electric blasting network; foreign current

0 引言

武警某部官兵承担着国家区调矿调和多金属勘查任务,点多线长面广,施工区遍布全国各地,不管是在寒冷的东北还是多雨的南方或是干旱的西部,人工挖掘探槽都相当困难,效率低下,所以,挖掘探槽主要依靠爆破施工来提高效率。但由于电爆网路中外来电流来源复杂,预防困难,经常导致早爆事故的发生,不单使工期延误,造成经济损失,甚至还发生多起亡人事故。究其原因主要是外来电流入侵电爆网路造成的,这一技术难题已困扰了部队多年,一直没能得到很好的解决,对官兵生命安全威胁很大。因此,解决好“探槽爆破施工电爆网路中外来电流的入侵问题”,是当前之急需、官兵之期盼,对确保部队安全顺利施工和官兵生命安全具有十分重要的意义,同时也可为其类似工程施工提供借鉴。

1 外来电流的成因

凡一切与专用起爆电流无关而流入电雷管或电爆网路中的电流都称之为外来电流。因施工区极其分散,施工环境复杂,外来电流产生的原因也是多种多样。在爆破作业中,因电爆网路被雷击或由此网路中产生感应电流;因动力电源漏电与大地连通或工业区散布于大地表面的各种杂散电流;物体之间

摩擦产生的静电或作业人员穿着化纤衣物之间摩擦产生的静电放电;无线电工业区各种频率的强大射频电场发生变化使电爆网路产生感应电流等等,均能产生外来电流。若探槽爆破施工区的电爆网路流入外来电流,且外来电流的强度超出电雷管起爆的安全电流就会引起早爆事故的发生。

2 外来电流的类型及特点解析

据调查分析,近十多年来在部队探槽爆破施工包括外包工程,因外来电流引起的早爆事故近20起,已造成多人伤亡事故。笔者认为,探槽爆破施工中电爆网路可能遇到的外来电流类型主要可分为:雷电、杂散电流、静电和射频电4种类型。

2.1 雷电

雷电是野外施工中遇到的最常见现象。雷电的形成起源于带有大量电荷的“雷雨云”,当电荷积累到一定程度时就会产生放电现象。雷雨放电时间短促,能量高度集中,放电电流可达几万到几十万安培,温度高达 2×10^4 ℃。如果雷电直接击中电爆网路,因电雷管脚线绝缘能力低,易被高压电击穿,在被击穿瞬间,网路与大地之间有电流流过,从而引爆网路中的全部炮孔或部分炮孔。即使远离雷击点的爆区,因闪电产生的强大电流引起的电场强度突

收稿日期:2017-07-19

作者简介:孙宗席,男,汉族,1971年生,副教授,地质工程专业,硕士,从事探矿、地球物理勘探的教学与研究工作,北京市昌平区南口镇, woszx1971@163.com。

变,也可能通过电磁感应引爆起爆网路。

2.2 杂散电流

凡散布于大地中各种杂乱无章的电流统称为杂散电流。当爆区或爆区附近有电源(如:发电机、电池、变压器)输出电流时,电流经动力线路输入到各种用电设备以后,总会通过各种通道返回电源。电流通道主要有:(1)大地本身;(2)与大地绝缘的专用导体,如电线、电缆等;(3)与大地不绝缘的导体,如矿区铁轨、裸线等。如果用电设备和电源之间的回路被切断,那么电流就要用大地作为回路,从而产生强度很大的杂散电流。采用架线式电机车运输的地区普遍存在杂散电流,因为架线式电机车均使用轨道作为回路,铁轨与大地接触,其中就有一部分电流流入大地而形成杂散电流。当设备和导线的绝缘性遭受破坏产生漏电,也可产生杂散电流。另外,在装药过程中,散落在地面上的硝铵类炸药遇有水时可离解成带正电的铵离子和带负电的硝酸根离子,在大地自然电流的作用下形成化学电源,其电位差可达几十毫安。如果爆破施工时雷管的脚线或电爆网路中流入杂散电流,就容易造成早爆事故的发生。

2.3 静电

静电是由物体之间相互摩擦和接触过程中产生的。得到电子的物体带负电,失去电子的物体带正电。当静电荷积累到一定程度时,就可能产生静电放电。当放电电流超过电爆网路的安全电流时,就可能引起电雷管早爆造成事故。在探槽爆破作业中,最常见的静电早爆事故主要是作业人员穿着化纤或其它绝缘的工作服相互摩擦所产生的静电和压气装药系统所产生的静电引起。研究表明:在相对湿度为50%,穿有羊毛内衣和尼龙内衣且摩擦面积为 1 m^2 ,人体电容为 $200\text{ }\mu\text{F}$ 条件下,可产生高达2000多伏的静电,人体带电量可达 0.1 mJ ,而衣服之间的摩擦可达 13 mJ ,所以化纤衣物之间摩擦产生的静电引爆电雷管的危险性比较大。压气装药在输药过程中,积累起来的静电电压最高可达3万V,有的甚至可达5万V。以上两种情况积累的静电荷主要集中在3处:(1)操作者身上;(2)装药器及附属设备上;(3)炮孔内及电雷管脚线上。若这3个部位与大地绝缘,当静电荷积累到一定程度时就会突然产生放电,引起电雷管和炸药粉尘爆炸。

2.4 射频电

射频电通常是指一种高频交流变化的电磁波简

称。如电视台、无线电广播电台、雷达站等都发射强大的射频电磁场。空中传播的无线电波会被接收天线接收。没有任何屏蔽的电雷管和电爆网路,不管它们是开路还是短路,也不管它们是否连接到电路中,如果处在强大射频电的电磁场内,都起着接收天线的作用,都能接收到射频电能。如果这种电能产生的电流强度超过了电雷管的安全电流,就可能引起电雷管早爆。电爆网路距离射频发射源越近,发射机功率越大,电爆网路早爆的危险性越大。

3 电爆网路中外来电流的预防技术

为给部队官兵及合作施工单位提供一个安全的技术保障,尽快解决电爆网路中因外来电流入侵引起电雷管早爆的问题,课题小组分别在黑龙江大兴安岭、青海三江源、甘肃文县、西藏日喀则及新疆南疆昆仑山等地区不同环境条件下,进行了大量电爆网路安全起爆试验200余次,对不同环境条件下的外来电流的预防技术进行了全面分析研究,并在实践中反复应用,取得了非常好的效果。

3.1 雷电引起电雷管早爆的预防

通过调查分析,我们发现雷电引起的早爆事故中均有雷击出现。为确保作业安全,可在爆破作业区安装雷爆监测仪,尤其是在雷雨高发季节和地区,更要高度重视此项工作,以此监测雷电的距离。在雷电来临时,报警器会发出警报。当雷电距离爆区40 km时,要做好随时撤离的准备;当雷电距离爆区15 km时,应当将爆材留在爆区,撤离所有工作人员至安全区,待雷电远离爆区后再返回爆区工作。如在连线时突遇雷雨天气,应立即停止作业,迅速将电爆网路的母线与连接线或区域线断开,严防网路形成闭合回路,随后人员迅速撤离至安全地点。在做好上面工作的同时,还应采取以下措施预防电雷管早爆事故的发生:(1)及时收听或查阅当地天气预报信息,结合观察天气气象变化,避免在雷雨天气施工作业;(2)在爆区内设立避雷针系统,以便在雷电来临时将雷电引到安全距离之外;(3)在雷电来临之前,暂时切断一切通往爆区的导体,如:电线、金属管道等;(4)应尽量缩短爆破作业时间,争取在雷电来临之前起爆。通过以上各项措施及先进设备在实践中的应用,取得了非常好的应用效果,没有出现雷电早爆事故。

3.2 杂散电流引起电雷管早爆的预防

通过研究和大量实验,我们发现在均质的同类岩层中存在的杂散电流,其强度很弱,不具备引爆电雷管的能力。这是因为岩层的电阻率较高,彼此靠近的两点间电位差较小,但是当电爆网路的导线或电雷管脚线与导电地层、铁轨、金属管道或其它导体接触时,就有可能出现危险性很大的杂散电流。为防止电雷管早爆,在探槽爆破施工中,应采取积极措施进行预防。主要措施有:(1)检测爆区杂散电流。敷设电爆网路之前,可采用 B-1 型、ZS-1 型或 701 型等杂散电流测定仪检测爆区内杂散电流的大小。若其值超过 30 mA,则必须采用抗杂散电流的电雷管而不能采用普通电雷管。国产无桥丝抗杂毫秒电雷管和低电阻大电流的电雷管,其安全电压和安全电流可达到 5.0 V 和 2.8 A,可完全满足探槽爆破施工需要。(2)尽量减少杂散电流的来源。可采用无轨运输方式,如蓄电池机车、电缆机车、内燃机无轨运输;进行大规模爆破时,可采用局部停电或全部停电的方式,减少漏电及杂散电流的产生;装药爆破时,防止硝铵类炸药散落在潮湿的地面上,以免产生化学电源。(3)采用防杂散电流的电爆网路。可在电爆网路与电源主线的连接处加装一个降压元件,如氖灯、电容、二极管、互感器、继电器和非线性电阻等,均可达到抗杂散电流的目的。这些元件的特点是:低压时可阻止直流或交流电流流入电爆网路,在高压时可瞬间将强大的电流输入电爆网路,达到起爆的目的。通过以上措施的应用,在探槽爆破施工中,再无一例因杂散电流引起的早爆事故发生。

3.3 静电引起电雷管早爆的预防

通过对静电产生的原因进行分析,在探槽爆破作业中,静电引起的早爆事故主要是施工人员穿的化纤衣物或其它绝缘的工作服相互摩擦所产生的静电和压气装药系统所产生的静电引起的。针对以上原因,可采取以下措施对静电进行预防:(1)爆破现场作业人员严禁穿着化纤、毛与化纤混纺的衣物,特别是不能将毛衣与化纤衣物重叠穿着;(2)采用半导体输药软管,作为向大地排泄静电荷的通路;(3)采用金属装药器和金属附属设备,确保装药系统与大地之间的连通性;(4)为将炮孔中积累在炸药颗粒上的静电荷通过炮孔壁排泄到大地中去,炮孔中严禁采用非电炮孔套管;(5)采用抗静电电雷管。其特点是电雷管的塞栓采用导电体制作,使塞栓和脚线之间成为导体,形成静电及各种杂散电流冲击

时的泄放通道,可以有效地防止静电引起电雷管早爆的现象。

通过以上措施有针对性地对静电进行预防,在爆破施工中效果非常显著,基层官兵和承包单位非常满意,事故率为零。

3.4 射频电引起电雷管早爆的预防

在探槽爆破施工中,采用电爆网路时,为确保不因射频电发生早爆事故,对射频电的预防可采取以下 4 个方面措施:(1)确定合理的安全距离。如果爆区附近有无无线电发射台或发射机时,必须调查清楚发射机的类型、功率大小及离爆区的距离。若两者的距离小于最小安全距离,则应放弃电起爆而改用非电起爆系统。通过现场反复试验,最终确定了电力起爆网路的爆区与电视台或广播电台等发射机发射的强大射频电磁场的允许安全距离(见表 1~3)。从以上可以看出安全距离不但与发射机的功率有关,也与发射频率有关。(2)如在爆区运输电雷管或采用配有无线电发射机的交通运输工具时,应该注意 2 点:一是电雷管应当装在密闭的金属箱内,金属箱应符合当地运输电雷管的有关规定;二是开启金属箱取出或放入电雷管时应关闭发射机。(3)电爆网路的主线应采用双股绞线或相互平行且尽量靠拢的单股线,导线敷设于地面,尽量不使电雷管的两根脚线形成偶极天线或长天线。(4)在加工起爆药包、装药、堵塞及连线时,爆破现场均不得使用

表 1 调频广播(FM)、甚高频(VHF)和超高频(UHF)电视发射机的允许安全距离

发射机功率/ W	FM/VHF 允许安全距离/ m	UHF 允许安全距离/ m
1 ~ 10	1.5	0.7
10 ~ 10 ²	6.0	2.4
10 ² ~ 10 ³	18.0	7.5
10 ³ ~ 10 ⁴	59.0	24.0
10 ⁴ ~ 10 ⁵	181.0	76.0
10 ⁵ ~ 10 ⁶	600.0	240.0
> 10 ⁶		600.0

表 2 中长波调幅(AM)广播电台的允许安全距离

发射机功率/ W	允许安全距离/ m	发射机功率/ W	允许安全距离/ m
2 ~ 25	28	1000 ~ 2500	300
25 ~ 50	44	2500 ~ 5000	450
50 ~ 100	65	5000 ~ 10000	660
100 ~ 250	100	10000 ~ 25000	1050
250 ~ 500	135	25000 ~ 50000	1500
500 ~ 1000	195	50000 ~ 100000	2100

表3 移动式调频(FM)发射机的允许安全距离

发射机功率/ W	允许安全距离/ m	发射机功率/ W	允许安全距离/ m
1~10	1.4	60~250	8.5
10~30	3.0	250~600	12.0
30~60	4.0		

手机、对讲机等通讯设备,以防产生感应电流,引起早爆事故。

4 结语

电爆网路中外来电流的预防技术一直是爆破施工中的一个难题,尤其是地表的探槽爆破施工,因其露天作业气候多变、施工环境复杂等原因,外来电流来源广泛,控制电爆网路中外来电流的入侵有一定的难度。通过在大兴安岭、三江源、文县、日喀则及昆仑山等地区的大量现场爆破试验和技术攻关,结果表明,只要根据爆区周边环境 and 天气变化情况,合理运用各种手段对外来电流进行综合预防,是可以达到理想效果的。近5年来,爆破施工早爆事故率下降100%,创下了爆破施工无一人伤亡的历史性

记录。为部队和承包单位节约了施工经费数十万元,确保了人员施工安全,深受部队官兵和地方施工单位的欢迎。

参考文献:

- [1] 孙延宗,孙继业. 岩巷工程施工掘进工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [2] 姚天波. 电爆网路设计施工中爆破安全技术浅谈[J]. 水电勘测设计,2009,42(2):18-20.
- [3] 翁春林,叶加冕. 工程爆破[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [4] 陈星东,徐冲,高卫东,等. 河北某铁矿掘进爆破参数的优化与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):79-83.
- [5] 郭学彬,张继春. 爆破工程[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [6] 肖汉甫,吴立,陈刚,等. 实用爆破技术[M]. 湖北武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [7] 孙宗席. 冻土层条件下探槽爆破施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):70-72,76.
- [8] 陈作彬. 岩土爆破工程危险源辨识、风险评价和控制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(3):78-81.
- [9] 赵亮. 武警黄金部队工程爆破器材安全管理工作浅探[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(6):73-75.
- [10] 研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):108-111.
- [5] 张益. 我国城市生活垃圾处理现状及对策[J]. 建设科技(建设部),2010,(15):38-41.
- [6] 陈佑钢,王宪周. 城市生活垃圾处理技术综述[J]. 一重技术,2010,(1):1-4.
- [7] 赵树青,宋薇,刘晶昊. 我国生活垃圾焚烧二恶英污染现状及减排建议[J]. 环境工程,2011,29(1):86-88.
- [8] 吕志刚. 城市生活垃圾焚烧发电的现状与发展对策[J]. 中国环保产业,2010,(12):37-40.
- [9] 何晶晶,陈森,杨娜,等. 我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素——以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J]. 中国环境科学,2011,31(3):402-407.
- [10] 王健,万元坤. 悬浮分离压块馏化减少垃圾焚烧污染——一项生活垃圾焚烧制能预处理工艺[J]. 资源与人居环境,2011,(5):58-60.
- [11] 程叶青,王哲野,张守志,等. 中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量[J]. 地理学报,2013,68(10):1418-1431.
- [12] 赵鹏,王木平. 城市生活垃圾处理技术和资源化应用探讨[J]. 再生资源与循环经济,2010,3(4):36-39.
- [13] 李家坤,何保定. 垃圾焚烧发电存在的问题及应对措施[J]. 水电与新能源,2010,(3):75-78.
- [14] 刘燕华,葛全胜,何凡能. 应对国际CO₂减排压力的途径及我国减排潜力分析[J]. 地理学报,2008,63(7):675-682.
- [1] 别如山,宋兴飞,纪晓瑜,等. 国内外生活垃圾处理现状及政策[J]. 中国资源综合利用,2013,(9):31-35.
- [2] 张英民,尚晓博,李开明,等. 城市生活垃圾处理技术现状与管理对策[J]. 生态环境,2011,20(2):389-396.
- [3] 张倩,徐海云. 生活垃圾焚烧处理技术现状及发展建议[J]. 环境工程,2012,30(2):79-81.
- [4] 颜俊,卢薇艳. 采用地质工程手段处治垃圾填埋场渗滤液方法

《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志2017年第44卷总目次

第1期

【综述】

2016年探矿工程十大新闻 本刊编辑部(1)

【钻探与钻井工程】

地质钻探孔内复杂情况和孔内事故种类梳理分析
..... 孙建华,刘秀美,王志刚,尹浩(4)伊朗Y油田深井油套环空封隔液评价与优化研究
..... 何汉平,何青水,鲍洪志,黄在福,王朝明(10)汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-4S孔卡钻事故处理
..... 翟育峰(15)深井分层真空抽水试验及机理分析
..... 何计彬,潘德元,李炳平,叶成明(18)三江盆地富地1井软塑地层钻探技术
..... 赵帅,谷波,孙友宏,郭威,贾瑞,陈光华,张鹏宇(24)高分子聚合物无固相冲洗液在牛头山深钻CUSD3孔的应用研究
..... 李生海,马智跃,邓光明,段志强,韩国园,刘晓阳,康鑫(29)南堡滩海大位移井钻井关键因素优化设计
..... 朱宽亮,吕艳,胡中志,周岩,刘永辉(33)江西城门山矿区ZKJ4-10孔螺杆定向纠斜技术
..... 陈克林,罗康杰,付宝华,程洪文(37)密集交叉井网井眼轨道精确制导技术的应用
..... 陈虎,和鹏飞(41)

永553低渗砂砾岩区块一体化(IPM)钻井技术 董志辉(46)

渤海低渗油田定向井井身结构优化
..... 边杰,和鹏飞,侯冠中,席江军,张鑫(52)内蒙古某煤矿投料井钻成井施工工艺及控制要点
..... 张军旗,于俊超,王庆军(57)

【钻掘设备与器具】

双主卷扬配合“环形道活门机构”的快速提下钻系统
..... 田炯,宋伟,刘虎,耿建璞,赵文涛,张西坤,高占听(61)新型大口径立轴式钻机分动及卷扬装置的研制
..... 彭莹,尹鑫,谭鑫,魏治利,毕进(65)

【岩土工程】

复杂环境中深基坑综合支护设计与施工技术
..... 林书成,周振荣,唐咸远(70)旋挖钻机在急倾斜煤层火区治理中的取煤试验
..... 贾学强,张继光,张泉波(75)

【金刚石与磨料磨具工程】

若尔盖铀矿田金刚石钻头的应用与研究
..... 李俊萍,吴金生,胡立,邓伟(79)坚硬地层NBS高效孕镶金刚石钻头的应用与研究
..... 沈立娜,路杲,尹建民,阮海龙,吴海霞,李春(84)

【安全管理工程】

虚实结合的地质工程实践教学方法改革探索——钻探虚拟仿真实验
教学平台研究 韦猛,霍宇翔,李谦(87)

第2期

【综述】

勘探技术与地质钻探学国家自然科学基金项目资助分析
..... 孙平贺,赵研,王瑜,王胜,刘天乐,王稳石,张杰(1)

【钻探与钻井工程】

南海深水水基钻完井液防水合物技术
..... 赵学战,方满宗,刘和兴,徐一龙,刘智勤(6)

涪陵页岩气田高曲率区水平井压裂特征及调整对策 刘立之(11)

延长油田西部区域水平井固井水泥浆体系优化技术 刘云(17)

页岩气基础地质调查万地1井钻井堵漏技术
..... 李得新,首照兵,吴金生(23)汶川地震断裂带科学钻探项目WFSD-4S孔冲洗液技术
..... 王鲁朝,李晓东,翟育峰(27)

胜坨油田老区加密井钻井技术及其应用 张晓明(32)

贵州碳酸盐地层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究
..... 赵华宣,李强,陈涛,陈浩,苏宁,王虎(37)绳索取心钻进工艺在非金属矿产资源勘探中遇到的问题与对策
..... 吴景华,王文臣,谢俊革,温继伟,何智浩(43)基于新型中压堵漏试验仪的堵漏试验研究
..... 杨宽才,王兴乐,梁丽,孔二伟,李大鹏,蔡记华(49)

鸭西背斜钻井提速技术试验及效果分析 郭宝林,孙庆春(53)

【钻掘设备与器具】
螺旋传动卡盘的设计及应用
..... 魏治利,尹鑫,彭莹,毕进(57)科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析
..... 梁健,顾艳红,岳文,孙建华,刘俊秀,杨远航(60)【金刚石与磨料磨具工程】
难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势
..... 蔡家品,贾美玲,沈立娜,欧阳志勇,
阮海龙,张建元,赵尔信(67)

善钎焊金刚石钻头制造工艺的研究 王聪,王振宇,卜长根(74)

【地质灾害防治与环境保护工程】
北京百泉山风景区崩塌地质灾害防治方法分析 樊金桂(77)【岩土工程】
地下连续墙钢筋笼吊装参数的验算与选择 董建忠,沈斌(82)复杂环境工况下大型深基坑工程施工技术
..... 罗晓伟,车国喜,刘斯全(86)

第3期

【钻探与钻井工程】
层理性地层钻井稳定性分析模型
..... 丁立钦,王志乔,王瑜,刘宝林,吕建国(1)三层管底喷取心钻具在海相第四系和新近系中的应用
..... 宋世杰,张英传,田志超,栗国栋(10)液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨
..... 苏长寿,阴文行,冯红喜,宋利丰(14)沙漠地区页岩气地质调查井施工技术
..... 尹亮先,李得新,田小林,谢治国(17)充气泡沫泥浆治理长孔段漏涌地层施工工艺探讨
..... 翁克胜,姜同升,韩银龙(21)绿色勘查技术在青海格尔木铜金山矿区钻探施工的应用分析
..... 刘海声,穆元红,刘鹏,高元宏,
窦斌,汪洪民,鹿怀玮,张世元(27)塔河油田SX2井火成岩地层化学固结堵漏技术
..... 刘金华,刘四海,王西江,陈曾伟(31)

国产旋转导向及随钻测井系统在渤海某油田的应用 陈 虎,和鹏飞,万圣良(35)

【钻掘设备与器具】

新型分层抽水管内止水装置的研制 郝国利,于建丛,李国民,姚文永,和 新(39)

HMD-7500型多功能全液压锚固钻机的研制 罗诗伟,张联库(44)

顶板高位大直径水平长钻孔配套钻具研制 董萌萌,田东庄,朱 宁(48)

【地质灾害防治与环境保护工程】

破损山体治理新思路 孙廷仁,张闻璟(53)

【岩土工程】

粉细砂地层条件下声频振动注浆的试验研究 马成伟,王贵和,肖晓阳,王 瑜,刘宝林(58)

宁波某厂房室内地坪沉降原因分析及处理措施 李 钢(65)

中宁县黄河滩地傍河取水工程辐射井设计与施工 张志军,张 伟,陈 霄,李海伟(69)

复合土钉墙在市区深基坑支护工程中的应用 刘文峰,陈之伟,苏白济(73)

【金刚石与磨料磨具工程】

青海东昆仑、祁曼塔格地区金刚石钻头的研究 吴海霞,欧阳志勇,李 春,沈立娜,梁 涛(77)

【隧道与爆破工程】

开敞式TBM过类泥石流不良地质洞段施工处理技术 苗双平,李 强,高健冬(81)

铁路张集线旧堡隧道渗漏及治理效果 孙 涛,刘晓伟,唐世杰(85)

【安全与管理工程】

北京岩溶水资源勘查评价项目工程监理 秦 沛,曾令强,熊宗喜(88)

第4期

【钻探与钻井工程】

绿色地质勘查综合技术应用分析 贾占宏,高元宏,梁 俭,刘海声,陈佰辉(1)

塔里木盆地顺北地区长裸眼钻井液技术 金军斌(5)

南黄海大陆架科钻CSDP-02井第四系、新近系地层海水冲洗液研究与应用 宋世杰,李晓东,陈师逊(10)

无固相冲洗液在变质岩系复杂地层绳索取心钻进中的应用 刘志峰(14)

牛D1井复杂构造带绳索取心钻探工艺技术研究 麻 坦,邵晓勇(19)

宜昌磷矿北部整装勘查项目深孔复杂地层钻探技术 张所邦,谭建国,王爱军,叶辉兵,李晓文,郑新华,周鹏飞(23)

欠平衡钻井适用地层及钻井效果影响因素分析 刘 磊(28)

地质钻探液动冲击回转钻进技术再(新)认识 刘秀美,李小洋,孙建华(31)

空气跟管钻进在南苏丹供水井流沙层中的应用实践 周作明(36)

【钻掘设备与器具】

半周期自修正防弯钻具(XBZX)的研制与应用 夏本玉,孙 旭,杜 亮,丁凤柱,祁洪岩,王惠军(39)

GRY-1型超高温干热岩地层钻孔测斜仪研制及应用 周 策,罗光强,李元灵,谭现峰(44)

基于地下VLF人工信号源的定位技术研究 黄 河,乌效鸣,张 峰,许 洁,杨 晖(49)

钢缆投捞式一把抓打捞器的研制与应用 范加兴(53)

【岩土工程】

榆木沟尾矿库自流式辐射井排渗系统施工关键技术 汪拾金(56)

南京下关软土深基坑施工引起的变形及控制研究 赵 翔,刘祖春,王道华(61)

廊坊市工程地质问题及防治措施 王德强,熊 伟,关 鉴(66)

天津崇德园基坑支护工程技术 沈治新,贾万鑫,宋国龙(71)

【金刚石与磨料磨具工程】

深部各向异性硬岩钻进新型金刚石钻头试验研究 汤凤林,沈中华,段隆臣,高中友,彭 莉,Чихотки В. Ф.(74)

【地质灾害防治与环境保护工程】

滑坡灾害防治工程效果评价方法初探 宋 军,尉壮岩,程英建,张 勇(80)

【安全与管理工程】

三山岛北部海域金矿海上钻探施工管理 刘 治,孙宏晶(85)

第5期

【综述】

雾霾及地下水土壤污染的地质作用 卢予北,吴 烨(1)

【钻探与钻井工程】

贵州铜仁地区页岩气钻井施工难点及对策 章 术,尹亮先,首照兵(10)

SAGD技术应用于陆域冻土天然气水合物开采中的理论研究 王志刚,张永勤,梁 健,王汉宝,吴纪修,李 宽,李鑫森,尹 浩,李小洋(14)

山东平邑石膏矿难大口径救援钻孔施工技术 杨 涛,杜兵建(19)

C6H水平井三维轨迹优选与控制技术 边 杰,崔爱贞,和鹏飞,袁则名,齐 斌(24)

煤层气洞穴完井技术 徐云龙,李亚男,夏文安,张晓明(27)

可退式捞矛在深孔钻探事故处理中的应用 张英传,翟育峰,王年友(31)

江西武山铜矿区螺杆钻定向钻探技术研究与应用 刘 敏,刘云山,段元清,孟祥瑞(34)

程家沟-沙沟银多金属矿区坑道钻探工艺 时志兴,杨 春,翟东旭(39)

小秦岭金矿田大口径电缆通风孔钻进实践与研究 杨宽才,孔二伟,宁赞格,王利锋(44)

【钻掘设备与器具】

DB30型多功能电驱动钻机的研发与应用 胡向阳,左立朝(48)

分水钻具的设计及其数值模拟分析 张鹏宇,郭 威,贾 瑞,赵 帅(53)

煤矿用锚杆钻头的应用现状与发展趋势 孙荣军(58)

【岩土工程】

SJP水泥浆封堵强涌水钻孔可控注浆工艺技术研究 裴向军,王文臣,谢俊革,张佳兴,杨福全,杜 野(62)

高压脉冲放电技术对桩径影响的研究 王茂森,博 坤(68)

砂砾石大坝填筑碾压的相关试验与研究 张朋辉,韩赛超,李晓帅,张小东(72)

高富水、强透水卵石地层深基坑降水设计与实践 时 钟(78)

【金刚石与磨料磨具工程】

深部钻探金刚石钻头设计思路 王 强,朱恒银,杨凯华(84)

【非开挖工程】

郑东新区顶管施工中顶进阻力的确定方法探讨 王 刚,景兆凯,吕小凡,师永霞,何 波(88)

第6期

【钻掘设备与器具】

- 便携式钻机在水泥灰岩矿勘查中的应用 周旭林,尹辉曦,周子幸,李成(1)
- 液动锤套管起拔器的研制与应用 孙天,苗晓晓,叶兰肃,刘建福,王建兴,孙秀梅,刘莎莎,王越光(6)
- 冷组装铝合金钻杆螺纹副力学性能测试及失效分析 刘宝昌,李闯,张弛,马少明,孙永辉(13)
- 新型并置式双卷扬车载钻机的研制 孔令沪,满国祥,王士昭,李艳丽,程林(18)
- 旋挖钻机碎岩计算方式的分析探讨 贾学强,张继光,罗延严,耿倩斌,邱红臣(23)
- ZDY4000LS型煤矿用履带式全液压坑道钻机的研制 胡海峰,魏斌斌,陆惠明(28)

【钻探与钻井工程】

- 测试压裂分析技术在渤海B油田的应用 张彬奇(33)
- 泡酸解卡技术在TZ4SH井的实践与认识 邓昌松,宋周成,李兴亭,申川峡,马小龙(38)
- 青海盐溶地层钻探水泥浆配方研制及应用 徐培远,袁志坚(41)
- 空气反循环连续取样钻进技术在紫金山金铜矿区的应用 李永,王德龙,王占丑,罗强(45)
- 采用空气潜孔锤钻进技术在井筒内施工泄水孔实践 李广兵,叶礼明,李泉,石民,宋毅鑫(48)
- 大同盆地北部油气预查钻井工程实践 徐学军(52)
- 龙凤山气田易漏失井固井工艺技术研究与应用 马艳超(58)
- 煤层顶板砂岩水定向钻孔预疏放效果检验 刘卫卫,彭旭,王庆,孙阳(62)
- 沁水地区煤层气水平对接多分支井钻井工艺研究 申鹏磊(65)

【地质灾害防治与环境保护工程】

- 狮尾河流域地质灾害治理防护堤工程施工设计问题讨论 王新建,闫新亮,李锋(69)

【岩土工程】

- 长螺旋钻孔压灌混凝土后插钢筋笼灌注桩工法在液化地层及厚砂层组合条件下施工可行性探讨 刘学亮,宋锦峰,曹风学(74)
- PRC管桩在基坑支护工程中的应用 常玉军,刘毅,张吉庆,邵海波(78)
- 福州江滨地区超高层建筑灌注桩成孔工艺分析 张志刚(84)

【金刚石与磨料磨具工程】

- 关于切削型多节刮刀钻头的分析研究 汤凤林,沈中华,段隆臣,柳少青,孙环平,Чихоткин В. Ф.(88)

第7期

【综述】

- 美国近期陆地油气钻井业逐步回升的态势分析 左汝强(1)

【钻探与钻井工程】

- 油页岩原位开采井钻井工艺设计与施工 陈强,郭威,李强,孙友宏,赵帅(9)
- 延长油田罗庞源区水平井钻井液防塌技术研究 张文哲,李伟,符喜德,李红梅,王波(15)
- 煤层气勘探井井斜原因分析及预防措施 李向荣,田智生(19)
- 分层止水技术在污染场地环境调查中的应用 常林祯,杨文轩,徐树,景龙,康欣,李斌(24)

- 五层集式监测井成井工艺与材料研究 冯建月,王营超,叶成明,解伟,李小杰(29)

【钻掘设备与器具】

- 绳索取心复合钻柱的动力学行为研究 梁健,郭宝科,王志刚,孙建华,李鑫森,尹浩(34)
- 电磁波电阻率悬挂孔应力集中分析及优化设计 郭宝左,刘金柱,于芳芳,姚波,刘栋梁,康凯,顾维俊(41)
- 南极冰下基岩热水驱动快速取心钻具研究 杨阳,范晓鹏,达拉拉伊,刘安,杨巍(48)
- 带有预紧功能的新型钻杆夹持器的研究 杨红东,明威,张书磊,赵宪富(52)
- 91单动三重半合管钻具的研制与应用 叶兰肃,苗晓晓,王建兴,刘建福,孙秀梅,饶剑辉(56)
- 轻便无水取样钻机研制与试验 卢倩,唐守宝,卢猛,祝强,苏兴涛(62)

【地质灾害防治与环境保护工程】

- 高边坡稳定性案例分析及支护结构优化设计 王德亮,聂庆科,黎培德,占否平(67)
- 预应力锚索地梁在矿山已变形边坡加固中的应用 魏万鸿,宿星,叶伟林,吴玮江,申虎军,杨涛(71)

【岩土工程】

- 基坑竖向位移监测与地表沉降分析 孙廷仁(76)
- PA-10型钢管柱安装机的研制及在新型PBA工法施工中的应用 陈根龙,宋刚,崔淑英,邵玉涛,陈晓君(80)
- 应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究 宋刚练,牌卫卫,江建斌,何健(85)

【隧道与爆破工程】

- 大前石岭隧道进口岩堆体的稳定性分析评价 张颖(90)

第8期

【综述】

- 加拿大Mallik陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾 左汝强,李艺(1)

【钻探与钻井工程】

- 水平对接井钻井技术在天然气水合物试采中的应用 李鑫森,张永勤,尹浩,梁健,王汉宝,李小洋,王志刚(13)
- 南海西部高温高压小井眼水平井钻完井储层保护技术研究及应用 吴江,李炎军,张万栋,韦龙贵,任冠龙(18)
- 高压涌水及高含硫化氢页岩气井绳索索取心钻进技术 何勇,苏时才,陈杨,冯心涛,张秀军,杨发胜,冯国文(23)
- 地质勘探孔内被卡钻柱的卡点测量与计算方法分析 王志刚,吴纪修,孙建华,刘秀美(29)
- 渤海浅部疏松地层旋转导向轨迹控制关键技术 孙晓飞,和鹏飞,韩东东,张玉强(33)
- 柴家沟矿复杂地层岩心钻探技术 王洪涛(37)
- 新疆昌吉庙煤1井钻探施工技术 张英传(41)
- 城探1井工程设计优化与钻井实践 袁后国(45)
- ADM6-4H井四开水平段钻井液技术 刘春明(51)
- 双弯螺杆纠斜效果分析与应用 靖伟东(55)
- 徐深气田开展天然气钻井的可行性分析 谷玉堂,盖兆贺,陈绍云,于洪波,陈琳琳(59)

【岩土工程】

- 深层搅拌桩内插钢管新方法及其应用 周永山,余忠(63)
- 强腐蚀环境下锤击PHC管桩施工技术 彭波,董宜辉,邢庆银(67)

武汉老浦片工程逆作法钢格构柱施工技术……曾纪文,贺春梅(72)

【钻掘设备与器具】

非均匀载荷和内压作用下石油套管的抗挤能力分析……周雄,林国庆,钟莹莹,方丽萍,梁金禄(76)

轻便浅层取样机具在大兴安岭森林植被覆盖区化探样品采集中的应用研究……杨汉水,苏兴涛,卢猛(81)

YZX108型液动潜孔锤的研制与试验……王跃伟,刘秀美,李得新,苏长寿,齐力强,杨泽英,首照兵(85)

轴向间隙对Ø89 mm 涡轮钻具性能的影响分析……赵志涛,翁炜,黄玉文,杨鹏,徐军军(89)

第9期

【钻探与钻井工程】

梯子崖-富子岭矿区复杂地层钻探技术问题与对策……祁恩强,朱金军(1)

轻便机动惯性泵在CMT监测井采样中的应用研究……王明明,解伟(7)

天然气水合物试采对接井卡钻事故分析与处理……李鑫森,张永勤,李宽,刘秀美,尹浩,李小洋,王志刚(12)

深部钻探关键设备选择原则及配置优化……张正,朱恒银(17)

SAGD平行井套管内磁引导模拟实验……陈剑焱(21)

巨厚砂砾层裸孔钻进施工技术……殷宝兵,黄留新,张瑞琼(26)

小口径岩心钻探技术在页岩气地质调查井中的应用分析……刘治(32)

新疆塔里木盆地西南坳陷云地1井钻探施工技术……肖长城,贾中芳(38)

川南煤田古叙矿区大村勘查区复杂地层钻探施工技术……李得新,首照兵,杨刚(44)

多种钻探工艺技术在白洞铁矿区的应用实践……李光宏,李红梅(49)

本溪市东风湖地热井施工和固井技术……耿印,于志坚,邢运涛,于保国,李明,王越,王景章(53)

【金刚石与磨料磨具工程】

关于金刚石钻头底出刃锐化处理的试验研究……汤凤林,沈中华,段隆臣,柳少青,孙环平,Чихоткин В. Ф.(58)

【钻掘设备与器具】

新型双管取心钻具及其在软土地层中的应用……欧阳涛坚,程春红(65)

Ø127 mm 涡轮钻具在干热岩钻井取心钻进中的试验研究……翁炜,张德龙,赵志涛,朱迪斯(68)

小口径膨胀波纹管护壁技术在四川煤炭普查ZK3-1孔的应用……崔淑英,邵玉涛,陈晓君,陈根龙(73)

【非开挖工程】

液压裂管技术在污水管道原位置换中的应用……伍晓龙,董向宇,王舒婷(77)

【岩土工程】

药剂真空预压排水方法处理废弃泥浆的试验研究……黄伟钧(81)

钻孔灌注桩桩顶混凝土下沉冒水泛砂原因分析……骆嘉成(85)

跨江特大桥旋挖钻孔灌注桩入海口水上施工实践……杨联锋,刘成博(89)

第10期

【综述】

美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物研究和成功试采……左汝强,李艺(1)

【钻探与钻井工程】

CMT技术在地下水多层监测中的应用研究……解伟,王明明(18)

基于井内实时水力学模型的环空压力计算及分析……李亚刚,冯辉,王文深,刘艳杰,赵光耀,刘伟(22)

西藏鸭湖地区天然气水合物调查井钻探施工技术……李宽,王舒婷,张永勤,李鑫森,董泽训,王金平(26)

贵州织金煤层气非储层水平井开发技术研究……李勇,黄明勇,宋继伟,班金彭(31)

塔里木盆地顺北地区二叠系随钻堵漏技术……肖绪玉,史东军,李国楠,于培志(37)

江西省朱溪矿区钻探施工回顾与思考……黄忠高,李志强,杨启文(42)

松软煤层穿层孔挠性钻具强造斜机理与过程研究……张福涛(47)

GL-1井抗260℃白油基油包水钻井液的应用研究……任金萍(51)

【金刚石与磨料磨具工程】

关于提高金刚石钻头胎体工作能力的试验研究……汤凤林,沈中华,段隆臣,柳少青,孙环平,Чихоткин В. Ф.(55)

【岩土工程】

南通市南山湖综合楼基坑工程降水数值模拟分析……殷宝兵,周爱兆,姜彬霖(61)

【钻掘设备与器具】

冰钻电动机机械钻具孔内升降运动特性试验研究……宋佳宇,徐会文,张楠,韩丽丽(66)

基于Ansys Workbench通地1井的绳索取心钻杆接头疲劳分析……高建龙,马银龙,王丹丹,计胜利(70)

Fann 50SL流变仪测试高粘流体爬杆问题的机理研究及解决方法……邓都都,赵建刚,陈延滨,石凯,王琪,李进,许云博,王雪竹(79)

深海底钻机动力的钻杆自行抛弃和冲击卸扣机构……魏治利,钟路,谢振权,臧龙,彭莹(84)

【安全与管理工程】

小口径岩心钻探海上施工安全风险管控……孙宏晶,刘治(88)

第11期

【综述】

风雨兼程六十载,不忘初心向前行——纪念《探矿工程》杂志创刊60周年历史回顾……李艺,周红军(1)

【钻探与钻井工程】

空气反循环取样钻探与岩心钻探的地质找矿效果对比研究……陆生林,邓梦春,李正前(8)

湖南龙山矿区钻孔偏斜规律分析及控制……彭桥梁,李天虎,刘瑞,易金春,谢彪武(12)

“双孔方案”在沧州盐矿深部取心钻探的应用……景龙,李伟,崔国树(16)

强封堵油基钻井液体系的研究和应用……唐国旺,宫伟超,于培志(21)

高性能水基钻井液体系研制与应用……郭盛堂(26)

泡沫固井水泥浆密度与环空液柱压力变化规律研究……李明忠,蒋新立,李德红,刘福,李季(30)

钻探技术在煤矿水害防治工作中的应用……王永全,周兢(35)

渤海35油田非均质储层钻井应对技术……袁则名,和鹏飞,丁胜,边杰,马志忠(42)

【钻掘设备与器具】

多功能地质勘察平台关键结构设计与应用……宋宝杰,王鲁朝,梁东平,孙晓玉(46)

- CTG-200型全液压工程钻机的研制与应用 邱 华,彭儒金,戴圣海(50)
- 深孔复杂地层绳索取心钻具优化设计思路 李鑫森,刘秀美,尹 浩,李 宽,张永勤,孙建华(56)
- 棘爪机构伸缩式钻孔水力开采装置的设计与试验 王盛俊,陈 晨,高 帅,孙友宏,李 刚,赵富章(60)
- 【岩土工程】
- 北斗卫星导航技术在建筑深基坑变形监测中的应用研究 唐咸远,林 俊,周振荣(66)
- 组合桩在唐山沿海地区的试验应用 郑恩光,冯士广,纪燕祥,赵志杰,何若梅,刘建兵,孙宇佳(71)
- 基坑开挖引起周围管位位移分析 尤 弋,江南宁(78)
- 【金刚石与磨料磨具工程】
- 各向异性岩石破碎过程分析及其钻进用钻头设计研究 汤凤林,沈中华,段隆臣,彭 莉,柳少青,Чихоткин В. Ф.(83)
- 【地质灾害防治与环境保护工程】
- 高压潜孔锤钻进在阳麟高速公路采空区治理中的应用 郭淑娟,邢云虎,康智鹏,赵青岩,王振福(89)

第12期

- 【综述】
- 日本南海海槽天然气水合物取样调查与成功试采 左汝强,李 艺(1)
- 【钻探与钻井工程】
- 油气地质调查钻井技术与对策 张德龙,翁 炜,黄玉文,朱文鉴,郭 强(21)
- 西藏尼玛盆地超2000 m油气调查井施工技术实践 郭如伦,王志祥(26)
- 涪陵页岩气田深层气井酸处理技术研究 张 驰(30)
- 平桥南区页岩气水平井优化设计 龙志平,王彦祺,周玉仓,贺 庆,刘广庆(34)
- 新疆吉木萨尔县准页4井钻探施工技术 熊虎林,张 飞(38)
- 钻探技术在敖汉旗浅覆盖区1:5万地质填图中的应用研究 谭春亮,宋殿兰,岳永东,林广利(43)
- 乌兰哈夏煤田灭火工程复杂地层钻进施工技术 陈 磊,王 军(48)
- 河南内乡板厂铜多金属矿ZK1724孔钻探施工技术 韩明耀,柳硕林(54)
- 【钻掘设备与器具】
- 海底天然气水合物取样器冷却技术研究现状 朱黄超,陈家旺,刘芳兰,肖 波,秦华伟(59)
- 深孔绳索取心液动锤钻具的研制与应用 杨泽英,齐力强,崔淑英,王跃伟,苏长寿,王建华(66)
- 【岩土工程】
- 气举反循环清理地下连续墙槽底沉渣数值分析 曾纪文,胡福洪,閻 超,陈 锋,王润甜(71)
- 【地质灾害防治与环境保护工程】
- 基于正交设计的堆积体稳定性影响因素的敏感性分析 王 冰,王常明,张索煜,卢长伟(75)
- 桂林七星公园危岩落石治理工程被动防护网设计与施工 黄晨忱,许曼钰(79)
- 馏化法处理垃圾新工艺探讨 颜 俊,卢薇艳(83)
- 【隧道与爆破工程】
- 偏压状态下非对称连拱隧道有限元分析 王佳欣,陈振邦,徐 燕(88)

- 探槽爆破施工中电爆网路外来电流预防技术 孙宗席(91)

增刊

- 【理论与综述】
- 中国铀业钻探工程发展态势及重要举措 姜德英,闭义德(1)
- 页岩气勘探钻探关键技术方法研究综述 朱恒银,王 强,蔡正水,张 正,张文生,程红文(4)
- 深孔岩心钻机评价准则初探 张 伟,刘跃进,朱江龙(11)
- 南极冰下湖钻进与采样技术研究进展 孙友宏,李 冰,范晓鹏,王如生,Pavel Talalay(16)
- 新疆东部地区岩心钻探施工技术与管理综述 李志峰,付兆友,贾宏福,罗 刚(23)
- 伊犁盆地砂岩型铀矿勘查技术综述 贾中芳(27)
- 地下技术和工程研发交叉合作团队(SubTER)研究计划与成果 田 青,胡远彪(31)

【钻探与钻井工程】

1. 钻探工程

- 超声波振动花岗岩破碎机理初探 赵大军,周 宇,尹崧宇,孙梓航,王美艳,翟国兵,张书磊,袁 鹏(36)
- 大位移水平井最大机械钻速分析研究 李 鑫,高德利(42)
- 井下工具在弯曲井眼内的可通过性分析 秦 星,高德利(47)
- 基于绿色勘查的浅钻技术及应用 赵洪波,宋殿兰,卢 猛,冉灵杰,郭 强,祝 强,苏兴涛(52)
- 定向钻进技术在杨柳矿采空区瓦斯治理中的应用 魏 林,冯达晖,徐 瑞,王建强,何伯稳,张 杰(57)
- 大顶角钻孔施工探讨 时志兴,翟东旭(61)
- 云南某锡多金属矿区坑道内钻探施工技术 康善修,刘 磊(64)
- 空气反循环钻进工艺在白杨河地区的应用研究 仲思柏(68)
- 复杂地层的钻探工艺与泥浆的应用 褚忠铎(72)

2. 钻井工程

- 单坐封水力压裂技术在安徽五河地热井中的试验 李小杰,叶成明,王营超,冯建月(74)
- 贵州省地热钻井工艺现状及发展探讨 陈 怡,王 虎,王 剑,李 勇,苏 宁(80)
- 车载钻机地热钻井多工艺组合钻进配套 王 虎,苏 宁,王 剑,陈 怡,李 勇(86)
- 西安草滩中深层换热对接井工艺研究 张晓宏,王俊立,陈粤强(93)

3. 钻井液

- 高温地热井微珠低密度水泥体系设计与性能研究 冯建月,郑秀华,李小杰,贾小丰,王营超(99)
- 脲醛树脂水泥球结合泡沫泥浆堵漏技术分析与应用 邹 博,史亚运(104)
- 化学凝胶堵剂的研究与应用 唐国旺,于培志(107)
- 空心钢化玻璃球水基钻井液在煤层气L型井的应用 王新敏(111)
- 抗高温水基钻井液体系的研究与应用 吕忠楷,于培志(114)
- 无机凝胶与有机凝胶GNJ-2触变堵漏技术研究与应 李晓东,景文兴,王景章,鲁生彪(118)
- 羌塘盆地冻土带异常孔隙水压力极复杂地层钻探护壁堵漏 吴纪修,薛倩冰,刘秀美,李鑫森(123)
- 纳米复合水泥基注浆材料在堵水工程中的应用 王 胜,袁超鹏,汪靖康,刘 义,陈礼仪(127)
- 桥接堵漏材料室内封堵实验研究 董洪栋,李之军,陈礼仪,乔有浩,侯淑鹏(132)

- 汶川地震断裂带岩样水化及强度衰减的时间效应研究 朱金勇,陈礼仪,王 胜(136)
- 常温液态沥青的制备与固化特性试验研究 侯淑鹏,陈礼仪,丁 修,叶长文,伍 洋(140)
- 【新能源钻采工程】**
- 贵州省长页1井施工工艺探讨 童 强,杨丕祥(144)
- 深水浅覆盖层天然气水合物钻井地层压力计算方法 薛倩冰(147)
- 梳状钻孔水力压裂技术在1930矿煤巷条带瓦斯预抽中应用 莫海涛,郝世俊,陈建杰,陈冬冬,韩 磊(152)
- 新能源地质调查钻井中的难题对策研究与实施 吴金生,张统得,赵远刚,刘卫东,首照兵,李明星(160)
- 油气区砂岩型铀矿钻井技术的探讨 邓梦春,吴金生,石绍云,李正前(166)
- 折流板式井中电加热器的数值传热模拟 王振东,郭 威,孙中谨,李 强,赵 帅,陈 强(172)
- 转角煤层气井WH-8绳索取心器应用效果分析 田智生,刘小康,张晓宏,樊战龙(178)
- 吉林农安油页岩地下原位裂解先导试验工程 白文翔,孙友宏,郭 威,李 强(182)
- 【科学钻探工程】**
- 松科2井深部抗高温泥浆的研配要素分析 乌效鸣,郑文龙,许 洁,王稳石,张林生,朱旭明,徐蓝波(188)
- 松科2井高温高压随钻井温仪研制与应用 胡郁乐,刘乃鹏,喻 西,张恒春(193)
- 松科2井Φ177.8mm尾管超高温固井水泥浆体系 李 艳,李社坤,孙 丽,孙 悦(196)
- 松科2井三、四开钻井液技术 许 洁,张林生,张恒春,闫 家,曹龙龙,王稳石,乌效鸣(200)
- 松科2井超高温固井工艺技术 姚平均,钟 声,王美漫,宋绍光,黄 亮,张 维,丁泰虎(205)
- 松科2井6500m绳索取心绞车研制 张恒春,胡郁乐,陈福练,王敏敏,张国芳,张 惠,朱永宜(209)
- 松科2井三、四开次取心钻头技术对策与应用效果 曹龙龙,朱永宜,王稳石,张恒春,闫 家,朱芝同,王跃伟(213)
- 松科2井涡轮钻取心钻进现场试验 闫 家,朱永宜,王稳石,张恒春,曹龙龙,许 洁(217)
- 南极冰下沉积物自同步振动式取样器研制 杨 阳,宫 达,范晓鹏,杨 巍,刘 安,达拉拉伊(221)
- 南极冰架热水钻除水系统试验研究及应用 王如生,刘 安,达拉拉伊,杨 阳,李 泉(226)
- 【钻掘设备及器具】**
- 3500m岩心钻探装备的研制及应用 刘凡柏,任启伟,伍晓龙,汤小仁,高鹏举,赵 远,董靖瑶(231)
- 3500m岩心钻探装备在金矿勘查中的示范应用 任启伟,刘凡柏,李 宽,赵 远,董靖瑶(237)
- 4000m直驱电传动高速顶驱的研制 沈怀浦,何 磊,高明帅,朱江龙,刘凡柏,刘跃进(243)
- 带有到位报信绳索取心钻具的设计与分析 孙雪娇,杨红东,赵大军(247)
- φ89涡轮钻具的耐温性测试 翁 炜,赵志涛,张德龙(253)
- 大直径高强度耐磨铝合金钻杆研究 刘宝昌,李 闯,张 弛,马少明,孙友宏(257)
- 激光熔覆处理对铝合金钻杆表面耐磨性和组织的影响 张 弛,孙友宏,马少明,高 科,刘宝昌,李 闯(262)
- TGLW220型钻井液离心机在青藏高原五龙沟矿区的应用 蒋 睿,朱迪斯,尹建民,冯美贵,高元宏,徐国辉,翁 炜,黄玉文,李晓东(267)
- RB-T100钻机在贵州地热井中的应用探讨 余继强(270)
- 国外绳索取心钻具弹卡机构设计与分析 李鑫森,李 宽,吴纪修,张永勤,孙建华(276)
- 超高温钻孔轨迹测量装置的机械设计及优化分析 冯志峰,张 宜,季伟峰,罗光强,刘一民(280)
- 碎软煤层多层孔大功率坑道钻机研制与应用 梁春苗,彭 涛(286)
- 液压尾管悬挂器在地热井施工中的应用 任良治,卞光升,李俊福,罗中良(290)
- 砂岩型铀矿钙质砂岩地层、致密泥岩地层钻头的研究及应用 要二仓,杨爱军,李军委(294)
- 川8-3取心器在陆相页岩气钻井中的应用 田智生,刘小康,杨甫(299)
- 超高温干热岩光纤测井温度传感系统研究 周 策,刘一民,罗光强(303)
- 绳索取心钻具弹卡机构顶卡分析及结构优化设计 尹 浩,李鑫森,王汉宝,张永勤,梁 健,李小洋(307)
- 基于人工神经网络的钻孔倾斜仪校正方法 李 扬,李 忠,刘一民,黄磊博(312)
- 潜孔锤取心跟管钻进机具的优化及工程地质勘察应用 黄晓林,李政照,姜昭群(317)
- 【金刚石与磨料磨具工程】**
- PDC钻头技术研发热点分析及启示 思 娜,王敏生,李 婧,邓 辉,光新军(322)
- 高效金刚石铣鞋的研制与应用 沈立娜,孙贵生,张纯峰,鲁生彪,吴海霞,蔡家品(327)
- 仿生异型齿钻头在铀矿预查钻探中的应用与经济性评价 闫立鹏,王海才,郝长旭(330)
- 龙岗70井新型孕镶金刚石钻头的研究与应用 吴海霞,刘海龙,李 春,梁涛,沈立娜(335)
- 转速对钻头切削热的影响分析 郭 程,周 琴,夏 昕,张 涛(340)
- 基于数值计算的硬质合金切削齿与典型岩石力学耦合研究 骆中山,曹 函,孙平贺,刘能文,张绍和(346)
- 【岩土工程与地质灾害防治】**
- 无粘结预应力护坡桩受力性状试验研究 何世鸣,陶 韬,郁河坤,刘 航(352)
- 桩孔钻进的旋挖钻头选型与应用研究 李粮纲,刘 娜,赵 晶(363)
- 浅谈环氧树脂混凝土在垃圾填埋场截污坝防渗处理中的应用 孙晓东,甄胜利,刘力奇,齐长青,郑 峰,郑中华,郭 智,丁仕文(369)
- 金属矿山地质环境问题及治理技术研究 高 喜,翟东旭,徐川川,胡运通(373)
- 综合排水系统在黑多滑坡治理工程中的应用 赵 怀,王春磊(376)
- 帕隆藏布流域冰碛物堆积体稳定性研究 杨 栋,王军朝,刘建康,杨东旭(382)
- 全孔多滑面连续测斜系统中方位角测量技术研究 刘一民,李扬,赵兰保,黄磊博(387)
- 【管理工程】**
- 《浅海地质钻探技术规程》编制 刘 治(392)
- 浅谈岩土工程勘察报告的编制 金杰明(396)
- 泥石流风险评价研究 张益飞,许水林,袁菲菲(400)