

# 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井 取样技术与施工实践

吴纪修<sup>1</sup>, 李 宽<sup>1</sup>, 薛倩冰<sup>2</sup>, 李鑫森<sup>1</sup>, 梁 健<sup>1</sup>, 李小洋<sup>1</sup>, 张永勤<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程位于羌塘盆地西北部, 海拔 4998 ~ 5100 m。羌塘盆地是青藏高原年平均地温最低、冻土层相对较厚的地区, 所处的水文地质及工程地质环境极其复杂, 多年冻土层经反复冻胀融沉, 地层破碎。另外, 该处地层节理、裂隙、小断层和地下水极其发育, 施工条件十分恶劣和困难。从取心钻具结构改进、钻头设计、冲洗液配方以及钻孔结构等方面总结了近年在羌塘盆地实施天然气水合物钻探试验井工程的实践和经验, 为未来高海拔地区天然气水合物及其他矿产资源勘探提供参考。

**关键词:**天然气水合物; 钻探取样; 钻探试验井; 羌塘盆地

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2015)06 - 0006 - 05

**Sampling Technique in Gas Hydrate Drilling Test Well in Qiangtang Basin and the Construction Practice/WU Ji-xiu<sup>1</sup>, LI Kuan<sup>1</sup>, XUE Qian-bing<sup>2</sup>, LI Xin-sen<sup>1</sup>, LIANG Jian<sup>1</sup>, LI Xiao-yang<sup>1</sup>, ZHANG Yong-qin<sup>1</sup>** (1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The test well engineering of gas hydrate drilling is located in northwest of Qiangtang basin with altitude about 4998 ~ 5100 meters, where the hydrogeological and engineering geological environment is extremely complex with the lowest annual mean ground temperature and thick permafrost in Qinghai Tibet Plateau. The construction is very difficult with cleavage, fracture, small fault and groundwater extremely developed. In this paper, the practice and experience of test well engineering of gas hydrate drilling in Qiangtang basin are summarized on the improvement of coring tool structure, bit design, flushing fluid formulation and borehole structure, which could be reference to the exploration of gas hydrate and other mineral resources in high altitude regions in future.

**Key words:** gas hydrate; drilling sampling; drilling test well; Qiangtang basin

## 0 引言

我国地质学家认为, 青藏高原永久冻土区具备形成天然气水合物的温度和压力条件, 同时可能存在由“自保护效应”引起的轻烃类天然气水合物<sup>[1-2]</sup>。从 1999 年开始, 中国一些专家陆续提出了在青藏高原永久冻土区开展水合物调查研究的建议, 并于 2008 年 11 月 5 日在祁连山木里地区 DK - 1 井发现天然气水合物实物样品<sup>[3]</sup>。这一发现突破了陆域天然气水合物只存在于两极地区永久冻土带的认识, 成为世界上第一次在中低纬度高海拔冻土区发现天然气水合物的国家。2000 年中国地质科学院勘探技术研究所国内第一个开展陆地永久冻土区天然气水合物钻探取样钻具及施工工艺的研究, 为了满足陆地永久冻土区天然气水合物钻探取

样技术及地质调查取样实际需要, 研究开发了经济实用的陆地冻土天然气水合物钻探取样钻具、辅助器具、泥浆配方及制冷方法等, 为高原冻土天然气水合物调查钻探施工提供了成套的装备和可靠的技术支撑, 并在 DK - 1 井成功钻获天然气水合物样品, 使我国冻土区天然气水合物取样钻探技术取得重大突破。因此, 2011 年, 中国政府将陆域天然气水合物资源勘查作为国家专项实施。根据前期地质调查工作获得的有关地质资料, 羌塘盆地是青藏高原年平均地温最低、冻土层相对较厚、地温梯度低和成油成气好的地区, 具有很好的天然气水合物形成的温压条件和烃类气源条件。为了实现陆域冻土天然气水合物资源调查新的更大突破, 根据“中国陆域冻土区天然气水合物资源勘查”的总体部署, 2011 年 7

收稿日期: 2014 - 12 - 02

**基金项目:** 中国地质调查局天然气水合物勘查与试采专项(编号: 科[2013]GZHL - 01 - 05)、“羌塘盆地天然气水合物资源勘查(钻探试验井工程)”(编号: GZHL20110306)

**作者简介:** 吴纪修, 男, 汉族, 1985 年生, 山东聊城人, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事勘探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, Wujixiu2008@126.com。

月正式启动了羌塘盆地天然气水合物资源勘查项目(钻探试验井工程)。

## 1 钻探区水文地质及工程地质环境

青藏高原永久冻土区钻探施工工艺是我国面临的全新课题,尤其施工环境极其恶劣的羌塘盆地地区,该区位于青藏高原藏北地区最腹地,是青藏高原年平均温度最低和冻土最发育的地区,面积达 $40 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,计算推断冻土层平均厚度在 $100 \sim 200 \text{ m}$ <sup>[5]</sup>。由于野外地质工作条件极其恶劣,青藏高原藏北地区多年冻土的研究基本处于空白,现有的研究资料主要集中在藏北地区东部边缘沿青藏铁路沿线的狭长地带,冻土由于受季节变化和地下热温的影响,每年4月中下旬开始融化,10月初开始回冻,最大融化深度 $>2 \text{ m}$ 。每年4—10月份是施工季节,但由于地表融化,沼泽地面严重塌陷,轮式运载车辆难以行走,所以施工期间的所有物质都必须经过多次分解转运才能完成,这不仅给施工增加了运输成本,而且严重影响施工进度。

钻探区水文地质及工程地质环境以QK-2井为例进行详细阐述,羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程QK-2井处于冻土区水合物钻探试验井的典型区域,位于河道冲积扇的核心位置,且每年7—8月份地表径流量充沛,井位周围发育数个呈丘状隆起的冻胀丘,底部直径大小不一,最大直径可达 $20 \text{ m}$ ,高 $2 \text{ m}$ ,表面存在纵横交错的裂缝,最大裂缝宽度可达 $20 \text{ cm}$ ,局部裂缝见有地下水溢出,冻胀丘随地表气温不断上升其规模逐渐缩小,甚至消失。施工区域水文地质及工程地质环境见图1。

## 2 施工方案的思考

羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程的施工地层部分孔段为永久冻土层,部分地层段更是软硬互层、破碎且不稳定,地层条件极其复杂,施工难度较大,特别是永久冻土层,采用普通的钻井液循环容易发生地层融化和坍塌,护壁效果不佳。在钻遇天然气水合物异常地层段及钻遇水合物时如何才能取出真实而完整的岩心样品,并且能保证正常而高效地钻进是实现羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程钻探取样成功的关键所在。根据近年来我国在多年冻土区实施天然气水合物钻探取样的实践经验,在海拔 $5000 \text{ m}$ 的青藏高原冻土区开展天然气水合物

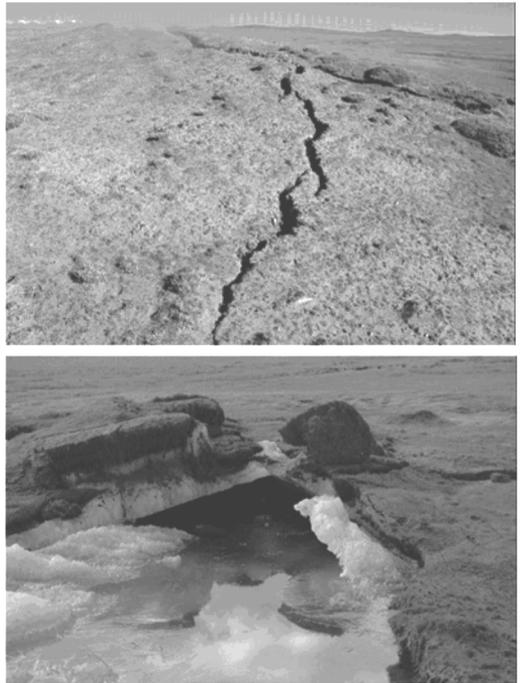


图1 施工区域水文地质及工程地质环境

钻探取样施工需要解决以下几方面的问题。

(1)在钻遇天然气水合物层时,随着地层压力下降及温度上升,导致水合物分解的同时会发生相变,所以取心要求必须尽量缩短时间,并能够采取尽可能保持接近天然气水合物原位状态的钻探取心技术。

(2)由于冻胀和融沉作用,钻进过程中容易造成地基沉降、井壁坍塌及钻井液的漏失等。在多年冻土体中钻进,钻孔内的温度变化情况是确定钻井液类型、性能的关键因素之一,也是确定合理的多年冻土区钻井规程、保证正常钻进和避免钻探事故的重要依据。因此,需要采取行之有效的措施降低钻井液冰点,使用低温泥浆以减少冻土解冻坍塌和水合物分解后的井径扩大及钻井周围围岩应力重分布后的井壁失稳。另外,在钻进过程中要降低单位体积岩石的破碎功,减少孔底碎岩过程产生的热量,选取适合冻土条件高效钻进的碎岩工具和钻进工艺。

(3)青藏高原多年冻土带,海拔较高、地形复杂、常见地层压力异常孔段,局部蚀变严重,不但岩心采取困难,而且易憋泵,无法正常钻进。另外,羌塘盆地属于新探区,冻土层厚度及有关地层岩性资料较少,因此,必须考虑多种预防孔内事故的技术措施或多种钻孔结构。

(4)受羌塘盆地环境、工区交通、人员适应性、设备及有效施工期较短等客观因素影响,必须考虑

在有效施工期内完成钻探施工。因此,除了考虑高效的钻进工艺外,必须加倍准备各种施工物质和材料,减少施工过程中因材料及配件供应不足而造成的停滞时间。

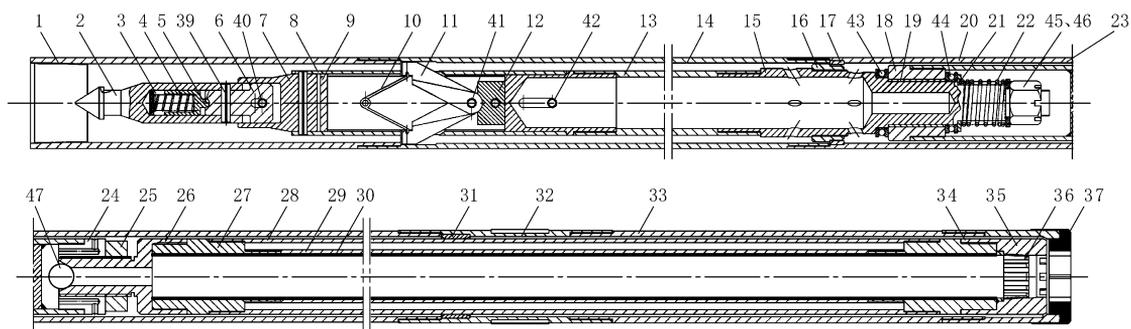
### 3 钻探取样技术应用及对策

#### 3.1 取心钻具结构改进

根据羌塘盆地的地理环境及冻土天然气水合物钻探施工目的,所采用的钻探取样工艺必须在保证岩心采取率的同时,取出水合物层段的真实水合物样品。目前国外在陆域冻土天然气水合物资源勘查所采用的工艺方法主要是大口径绳索打捞快速取心及低温钻井液辅助措施。除了上述钻进工艺及辅助技术措施外,在高海拔冻土区实施天然气水合物钻探获得成功还需要有适应高海拔作业的熟练的操作人员、可靠的钻探设备等。

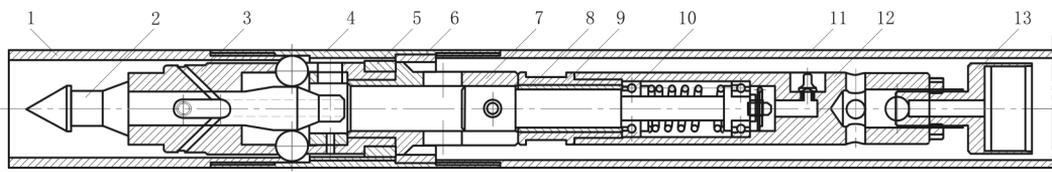
结合国外陆地永久冻土水合物取样钻探施工取样钻具以及在冻土层的钻探取样施工经验及羌塘盆地的地理位置及地层等客观条件,制定了以大口径绳索打捞不提钻快速取样钻具及低温泥浆制冷的经济实用的综合技术方案。由于该技术方案在钻遇水合

物层时,取心直径大,包含的水合物样品就会增多,所以在低温泥浆保持岩心样品处在较低温度的同时,所钻获的岩心样品中的水合物分解的比例就会减小,大直径岩心内部就能保持较真实的水合物样品。另外,绳索打捞不提钻快速取心的辅助时间短,不仅降低了水合物分解的时间,而且提高了钻探效率。为了达到快速取心的目的,在钻具结构的改进设计时,采用了半合管及PC透明保心衬管,快速取样低温保存方法,即钻具打捞地表后,掰开半合管,抽出透明的岩心衬管。为了获得更真实可靠的水合物样品,在钻进工艺参数方面,控制了回次进尺长度,在钻遇水合物层段时,规定每个回次钻进1.5 m,岩心采取率>90%。为进一步提高钻具的可靠性和工作效率,对原有的大直径绳索取心钻具尝试进行了优化,为了避免原来的弹卡机构在钻进过程中弹卡钳有时不能回收而造成打捞失败的缺点,将弹卡定位机构改为球卡定位机构,防止了岩心堵塞造成的内管总成卡死事故,减少提大钻的次数,通过钻探试验井工程,进一步验证了改进的绳索取心钻具的可行性和稳定性。(图2为研制的大直径绳索取心钻具结构示意图,图3为改进后的球卡钻具结构示意图)。



1—弹卡挡头,2—捞矛头,3—垫片,4,22—弹簧,5—定位块,6—捞矛座,7—中间接头,8—回收管,9—弹卡架,10—张簧,11—弹卡钳,12—弹卡座,13—弹卡架短接,14—外弹卡室,15—过水轴,16—悬挂环,17—座环,18—外隔套,19—滑套,20—外管,21—垫片,23—单动接头,24—回水阀接头,25—调节螺母,26—调节接头,27—保温管接头,28—保温外管,29—保温内管,30—塑料管,31—扶正环,32—扶正器,33—球阀外管,34—卡簧座,35—卡簧挡圈,36—卡簧,37—钻头,39~42—弹性圆柱销,43,44—推力球轴承,45,46—六角螺母、平垫圈,47—钢球

图2 大直径绳索取心钻具结构示意图



1—球卡挡头,2—捞矛头,3—球座,4—球卡室,5—悬挂环,6—座环,7—接头,8—铜套,9—过渡接头,10—轴承挡圈,11—外管,12—单动接头,13—调节接头

图3 改进后的球卡钻具结构示意图

### 3.2 钻头设计

在进入钻杆内的冲洗液的温度和孔内冻结岩层温度相近情况下,孔底温度的升高主要由钻头破碎功所决定,为保证正常钻进和提高钻进效率,除了加强冲洗,还应该减少孔底碎岩产生的热量,为此该地区钻头结构形式主要以特制唇面的大水口和带底喷水眼金刚石复合片钻头为主。

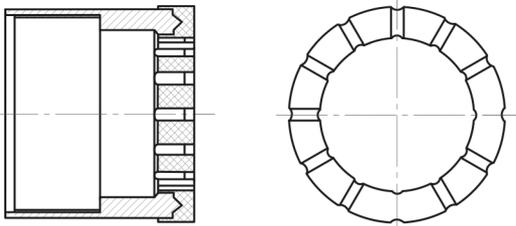


图4 钻头结构示意图

### 3.3 冲洗液配方

根据水合物钻探施工技术要求所提的分解抑制法,高原冻土天然气水合物钻探用泥浆不仅要具备良好的冷却钻头、清洁井底、携带岩屑的基本能力,还要保证泥浆的低温特性和高压特性,只有将含有水合物的地层段在钻开后其附近的温度、压力条件控制在温度低于水合物平衡条件、压力高于水合物平衡条件,才能抑制水合物的分解,即采用低温大密度泥浆。但是,在采用低温大密度泥浆的过程中既要考虑温度过低造成的水合物再生成,又要考虑地层的破裂压力以及塑性地层的防塌护壁、低温高压泥浆的流变性和泥浆的侵入。

根据美国在阿拉斯加北坡实施的天然气水合物钻探施工使用的泥浆温度(华氏30度),及以往我国在冻土区实施天然气水合物钻探的实践经验,决定将泥浆温度控制在 $-1 \sim -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,并采用美国百瑞得泥浆材料,取得了较好的钻进及取心效果。首先,采用美国百瑞得公司(Baroid)的泥浆材料配合国产抗盐高聚物配置低温高性能泥浆。泥浆材料主要有粘土粉(QUIK-GEL)、降失水剂(PAC-LE)、增粘剂/稳定剂(EZ-MUD)、堵漏剂(N-SEAL)、钻杆润滑剂(IDP214h)、国产增粘剂(抗盐共聚物)等。加入粘土粉和处理剂前先在水中加入适量小苏打,将pH值调整至 $8.5 \sim 9.5$ 。孔壁稳定时泥浆性能参数为:泥浆密度 $1.02 \sim 1.04 \text{ g/cm}^3$ ,粘度在26s左右,失水量 $8 \sim 10 \text{ mL/30 min}$ ,含砂量 $< 0.6\%$ ,钻遇不稳定地层的泥浆调配及配方用量见表1。

表1 不同地层情况冲洗液配比

地层情况	冲洗液配方
孔壁稳定	(3% ~ 6%) QUIK-GEL + (2% ~ 3.5%) PAC-LE
缩径	(3% ~ 6%) QUIK-GEL + (5% ~ 8%) PAC-LE
塌孔或掉块	(3% ~ 6%) QUIK-GEL + (5% ~ 8%) PAC-LE + EZ-MUD + (15% ~ 25%) 200目以上重晶石粉
	(7% ~ 10%) 膨润土 + 0.5% 纯碱 + (0.8% ~ 1.5%) CMC(高粘) + (1.5% ~ 2%) 植物胶 + 0.5% (300 ~ 800 ppm) PHP + (5% ~ 10%) 重晶石
地层微漏	(3% ~ 6%) QUIK-GEL + (5% ~ 8%) PAC-LE + N-SEAL
严重漏失	灌注高粘堵漏剂
涌水或者井喷	(3% ~ 6%) QUIK-GEL + (5% ~ 8%) PAC-LE + EZ-MUD + (20% ~ 30%) 重晶石粉

由于钻进过程中受地下水、岩粉、漏失地层以及环境变化等多方面影响,泥浆的性能会发生改变,因此要时刻观测泥浆的性能以便及时调整泥浆各项参数。

### 3.4 钻孔结构

钻孔结构设计的主要任务是确定各级钻具的钻进深度、套管的下入层次,下入深度,泥浆泵返深,及钻头尺寸。应遵循以下主要原则:一是避免产生井漏、井塌、卡钻等井下复杂情况和事故;二是当未知层出现漏失、坍塌等复杂情况必须下套管隔离时,要留有足够的空间保证继续钻进取心正常进行;三是当实际地层压力超过预测值发生溢流时,在一定范围内,具有处理溢流的能力。羌塘地区地层结构复杂,钻进过程中坍塌、掉块、漏失、缩径等岩心钻探技术难题经常遇到,必须合理设计钻孔结构,留足套管隔离复杂地层的口径。所以,根据羌塘盆地所钻岩石的物理、力学性质,设计深度、倾角,钻进方法、钻探设备的技术参数及水合物钻探对钻孔结构的要求,羌塘盆地天然气水合物钻探试验井自2011年QK-1井的钻孔结构见图5,3年来共完成钻孔5个,均保证了钻探顺利实施。

## 4 施工注意事项

(1) 采用高密度泥浆时,加强对泥浆密度的监测,尽可能做到每次测一次密度,记录密度变化情况,随时调整密度。泥浆循环系统必须及时清理、捞砂,水源池内保持无杂物,沉淀池内沉淀物不得超过容积的 $1/5$ 。进行化学处理的同时,及时清除泥浆中的砂砾,保持泥浆性能稳定。

(2) 每次提大钻时,必须每提3根钻杆,正循环灌注泥浆,以保持一定的井内液面,保持孔内液柱压力。

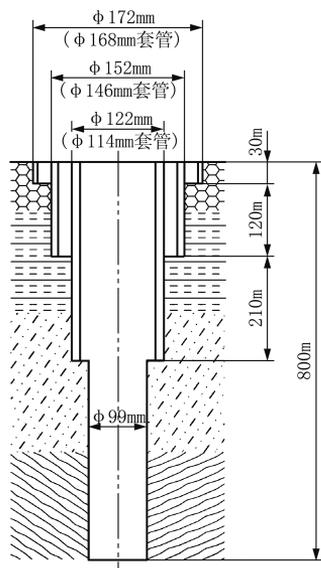


图5 QK-1井钻孔结构示意图

采用全断面钻进时,每一单根必须冲孔、划眼,以保证孔底无沉砂,井径规则。

(3)随时注意钻头磨损状况,以确保井径一致,在更换新钻头时,提下钻时要匀速缓慢提放,严禁猛提快下导致孔内掉块增加,避免在长孔段扫孔时又造成钻头损坏而提钻的恶性循环,同时避免发生顿钻、夹钻事故。下入套管时,要充分冲孔、并调整泥浆密度。套管下部应带套管引鞋,或套管下部收缩,遇阻后严禁开车。

## 5 结语

(1)根据陆地水合物生存的地质条件及施工现场的环境温度、钻探取样施工的地质等具体情况,采用大直径快速打捞不提钻绳索取心钻探技术,配合低温泥浆护心的措施,有效地钻取了水合物岩心样品,满足了地质要求。为了解决坍塌、破碎及缩径等复杂地层钻进施工困难的技术难题,总结出了对付上述困难的技术措施,较大幅度地提高了钻探施工效率和取样质量。

(2)在泥浆配方及泥浆性能方面进行了新的探索和研究,提出了不同泥浆性能配方,优化了泥浆性能,为不同类型地层取样钻探提供了技术保障。

(3)海拔5000 m以上的羌南和羌北盆地组织施工队伍进行陆地冻土水合物调查评价取样钻探施工,锻炼了队伍,总结了高原冻土钻探施工经验,为未来青藏高原冻土天然气水合物实施大规模钻探施工提供了保障。

(4)羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程项目实施几年来,面对海拔高,施工难度大,地层极其复杂,特别是冻土层经过反复冻融遇一般钻井液易融化坍塌的特点,在泥浆耐低温和护壁保心等方面进行了不断的试验研究,取得了一定的成效。

## 参考文献:

- [1] 张永勤,孙建华,贾志耀,等.中国陆地永久冻土带天然气水合物钻探技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,(S1):22-28.
- [2] 张永勤,祝有海,祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用[J].地质通报,2011,30(12):1904-1909.
- [3] 郭祖军,陈志勇,胡素云,等.天然气水合物分布及青藏高原有利勘探区[J].新疆石油地质,2012,(3):266-271.
- [4] 张永勤.国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):1-8.
- [5] 库新勃,吴青柏,蒋观利.青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究[J].天然气地球科学,2007,18(4):588-592.
- [6] 姚彤宝.天然气水合物钻探的关键技术[J].地质装备,2010,11(5):30-33.
- [7] 首照兵,章述,向昆明.绳索取心钻进冲洗液的性能控制技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(4):29-30,38.
- [8] 吴纪修,张永勤,梁健,等.羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程井壁稳定性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(6):8-13.
- [9] 王绍令,边纯玉,王健.青藏高原多年冻土区水文地质特征[J].青海地质,1994,(1):40-47.
- [10] 程国栋,赵林.青藏高原开发中的冻土问题[J].第四纪研究,2000,20(6):521-531.
- [11] 郭祖军,陈志勇,胡素云,等.天然气水合物分布及青藏高原有利勘探区[J].新疆石油地质,2012,(3):266-271.
- [12] 赵江鹏.天然气水合物钻控泥浆制冷系统及孔底冷冻机构传热数值模拟[D].吉林长春:吉林大学,2011.
- [13] 张强.漠河盆地MK-1与MK-2井天然气水合物钻探施工关键技术[D].吉林长春:吉林大学,2012.
- [14] 贡建林.大口径绳索取心钻进技术在天然气水合物勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):20-23.