

中国南海珊瑚岛礁钻探技术

宋继伟¹, 李勇², 班金彭³

- (1. 贵州省地质矿产勘查开发局一一二地质大队, 贵州 安顺 561000;
2. 贵州省地质矿产勘查开发局111地质大队, 贵州 贵阳 550081;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局一一五地质大队, 贵州 贵阳 551400)

摘要:中国南海珊瑚岛礁拥有巨大的资源潜力和科研价值。2013—2017年,贵州省地矿局一一五地质大队配合中国科学院在南海诸岛礁实施科研钻井数百口,施工过程中,合理解决了远离大陆封闭环境中的各种特殊困难,攻克了“珊瑚岛礁松散珊瑚砂层抽水试验成井下管”、“珊瑚岛礁第四系覆盖层钻探取心”、“珊瑚岛礁泻湖砂层钻探取心”、“珊瑚岛礁钻探事故预防与处理”等重要技术难题,形成了一套成熟完整的适用于岛礁勘查的钻探技术工艺体系,开我国岛礁钻探工程实践之先河。该技术体系能保证岛礁钻探工程安全和质量,对于我国今后岛礁勘查具有重要的指导意义。

关键词:南海;珊瑚岛礁;钻探技术;钻具组合;钻进参数;钻井液

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)06-0022-10

Drilling technology for coral islands and reefs in the South China Sea

SONG Jiwei¹, LI Yong², BAN Jinpeng³

- (1. 112 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Anshun Guizhou 561000, China;
2. 111 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550081, China
3. 115 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 551400, China)

Abstract: Coral islands and reefs in the South China Sea have great resource potential and scientific research value. From 2013 to 2017, 115 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, under auspices of the Chinese Academy of Sciences, drilled hundreds of boreholes for scientific research on various islands and reefs in the South China Sea. With properly tackling of the special difficulties in the secluded environment far away from the mainland during drilling, many important technical difficulties have been solved, including “Pumping test and well completion screen pipe placement for loose coral sand formation at coral island reef”, “Quaternary overburden core drilling at island reef”, “Lagoon sand core drilling at coral island reef”, “Prevention and treatment of drilling accidents at coral island reef”; and a complete proven drilling technology system suitable for island and reef exploration has been formed. The geological brigade is the pioneer in the practice and theoretical research of island reef drilling engineering in China. The drilling technology system can guarantee the safety and quality of island

收稿日期:2020-08-26; 修回日期:2021-02-21 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.06.004

基金项目:贵州省地矿局地质科研项目“贵州省利用小口径参数井多分支孔进行‘煤系三气合采’低成本勘查评价新模式探索”(编号:黔地矿科合[2018]18号)、“人工吹填珊瑚岛礁钻探取心技术研究及应用”(编号:黔地矿科合[2017]22号);贵州省科技计划项目“多分支定向井钻进技术在贵州省煤系地层‘三气共采’中的研究及应用”(编号:黔科合支撑[2018]2195)

作者简介:宋继伟,男,汉族,1982年生,研究员,博士,长期从事钻探工程管理和技术研究工作,贵州省安顺市西秀区西水路57号,343219784@qq.com。

通信作者:李勇,男,汉族,1988年生,工程师,长期从事钻探工程管理和技术研究工作,贵州省贵阳市观山湖区石林西路171号贵州地质科技园5号楼,243158792@qq.com。

引用格式:宋继伟,李勇,班金彭.中国南海珊瑚岛礁钻探技术[J].钻探工程,2021,48(6):22-31.

SONG Jiwei, LI Yong, BAN Jinpeng. Drilling technology for coral islands and reefs in the South China Sea[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):22-31.

and reef drilling projects, and has important guiding significance for the future exploration of island and reef in China.

Key words: South China Sea; coral reef; drilling technology; drilling assembly; drilling parameter; drilling fluid

0 引言

珊瑚礁在我国南海有着广泛的分布,是我国在南海唯一的陆地国土^[1],在维护祖国领土完整、行使国家主权和海洋资源供给等方面都发挥着重要作用。针对南海珊瑚礁的研究主要集中在珊瑚礁生态系统、气候变化、军事海洋学、资源(鱼类、油气和水合物等)和岛礁工程等领域^[2-5]。

2013—2017年,中国科学院武汉岩土力学研究所和南海海洋研究所联合在南海诸岛礁开展珊瑚礁科学研究项目。贵州省地矿局一一五地质大队作为钻探施工单位参与了研究过程,根据研究需要前后实施各类型科研钻井数百口,完成各类钻探工作量1万余米,配合实施各类科学实验,取得重大成果,获得中国科学院高度赞扬。

本文即阐述该系列工程主要工作内容和形成的钻探技术成果要点。

1 南海岛礁介绍

南海岛礁分为天然岛礁和人造岛礁2类。

1.1 天然岛礁

岛礁是由珊瑚生长、堆积形成的礁体(图1)。岛礁是人类在海上活动的支撑点。南沙群岛有230多个岛、洲、礁、沙、滩,但露出水面的极少,仅50个左右,因此,研究、保护珊瑚礁至关重要。



图1 天然岛礁

Fig.1 Natural reef

1.2 人造岛礁

除了保护已有的天然岛礁,我国还在南海开展另外一项工程:人工造岛。所使用的技术就是:吹

填(图2)。

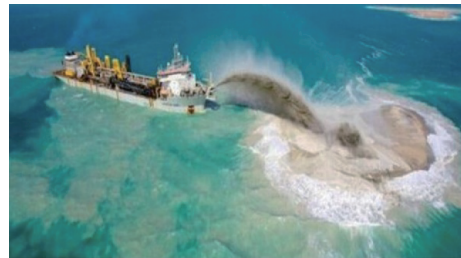


图2 吹填造岛示意

Fig.2 Schematic diagram of island reclamation

南沙填海,以前采用从大陆运输材料。由于填海所需要材料数以亿万立方米计,远洋运输极端困难,费用极其高昂,因此造岛效率极低。越南和菲律宾等国目前仍采用该方法,所造陆地基本可以忽略。

南海有大面积的浅水礁盘,周围有更大面积的浅滩,浅滩里有大量海砂,吹填就是将这些砂子吹到礁盘内堆积成岛。

我国南海吹填造岛是由一艘“天鲸号”挖泥船完成的,该船能以每小时4500 m³的速度将海砂、海水的混合物排放到最远6 km外,每天吹填的海砂达10多万立方米。装备是亚洲最强大的挖掘系统,绞刀功率达到4000 kW,使其不会被礁盘上的珊瑚礁损坏而影响工作。

2 研究目的

珊瑚岛礁科学钻探主要目的:

- (1)利用钻探岩心和井内试验,揭示珊瑚岛礁形态、结构、力学性能,建立岛体空间模型;
- (2)研究岛礁内淡水生成规律;
- (3)研究珊瑚礁生长和岛礁发育演变规律,为珊瑚岛礁保护提供依据。

3 项目概况

2013—2017年,贵州省地矿局一一五地质大队先后3次为中国科学院在南海诸岛礁实施科学钻探(表1)。

3.1 中国南海北部珊瑚礁本底调查钻探施工

施工地点在西沙群岛之琛航岛,施工1口1500

表1 南海科学钻探项目简况

Table 1 Brief introduction of the South China Sea drilling projects

| 时 间 | 项目名称 | 施工地点 | 工 作 量 | 业 主 |
|-----------------|-------------------|---------------|--------------------------|----------------|
| 2013.04—2013.12 | 中国南海北部珊瑚礁本底调查钻探施工 | 西沙群岛之琛航岛 | 2口千米井 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 |
| 2016.06—2017.12 | 某岛礁钻孔抽水试验与钻探取心 | 南沙群岛2号、5号、7号点 | 18口200 m井、数百口抽水试验及传感器埋设井 | 中国科学院武汉岩土力学研究所 |
| 2017.05—2017.12 | “南部钻探”地质勘查 | 南沙群岛某号点 | 1口3000 m井 | 中国科学院南海海洋研究所 |

m直井,定名为“琛科1井”,目标为钻穿珊瑚礁进入基岩,全井取心、钻孔摄像。琛科1井原设计为1口井,施工结束后,因为泻湖砂层岩心综合采取率极低,仅8%,导致全井岩心综合采取率仅49.3%,远未达到预期要求。经研究决定补钻1口井,将原设计井定为“琛科1井-1”,补钻井定为“琛科1井-2”。最终成果:2口井钻深均千米以深,都钻穿珊瑚礁进入基岩,琛科1井-2岩心质量良好,满足科研需要。

“琛科1井”是我国第一口成功钻穿珊瑚礁并实现全井取心的钻井。

3.2 某岛礁钻孔抽水试验与钻探取心

在南沙群岛2号、5号、7号点实施18口深200 m井,数百口抽水试验及传感器埋设井。通过钻井资料建立岛礁200 m深度内空间模型;通过抽水试验研究岛礁渗透率及淡水生成规律;通过传感器对岛礁地层进行力学性能检测和变形监测。

所施工抽水试验井是我国在岛礁研究领域首例。

3.3 “南部钻探”地质勘查

在南沙群岛某点施工1口3000 m直井,钻穿珊瑚礁进入基岩,全井取心。

完成的NK-1井最终井深2000余米,达到全部预期目的,目前是岛礁钻探世界第一。

4 岛礁地层

4.1 吹填层

吹填层为珊瑚砂、珊瑚断枝、贝类,特性类似于陆地上的碎石土(图3)。

4.2 天然岛体地层

地层总体分3个系,8个地层单元,分别是第四系、上新统南沙组、永兴组、中新统永乐组、宣德组、西沙组、风化壳,完井于前寒武系上统^[6-9]。地层岩



图3 吹填层实物

Fig.3 Material of the backfilled layer

性则主要分为4类:

(1)第四系:松散微弱风化、无胶结珊瑚砂、珊瑚断枝、贝类;

(2)石灰岩:生物砂屑、砾屑、藻粘结灰岩、碎屑灰岩、泥粒灰岩,胶结松散,沉积变质程度低,为较软松散岩—较软岩,可钻性1~3级;

(3)白云岩:泥屑、灰砂、核形石、礁格架,胶结松散,沉积变质程度极低,为较软松散岩—较软岩,可钻性1~3级;

(4)基岩:某种岩,完整坚硬致密。

其中(2)、(3)规律互层交替。

4.3 依钻探属性地层分类

以上地层描述是从岩性角度来进行的。从钻探工程角度,根据地层物理学性状,将岛礁地层层位粗略归纳为以下4大类:

(1)第四系覆盖层:将吹填层和第四系合并称为第四系覆盖层^[10-13]。包含珊瑚砂、珊瑚断枝、贝类。

(2)泻湖砂层:第四系覆盖层以下基岩层以上,地层主要为无胶结或轻微胶结细粒珊瑚砂的均归为此类。包含生物泥屑、砂屑、砾屑、灰砂等,岩心松散或手捏可散。

(3)礁坪层:第四系覆盖层以下基岩层以上,除泻湖砂层外的其它层位均归为此类。包含藻粘结灰岩、碎屑灰岩、泥粒灰岩、核形石、礁格架等^[14]。岩石沉积胶结较紧密,有一定强度和硬度,岩心呈短柱状或碎块状。

(4)基岩层。

5 工程难点

5.1 方案设计难题

受海岛施工特殊地理环境影响,运输补给极端困难,根据预定设计方案准备物资登岛后,即使发现技术方案和物资不适合也难以调整。

5.2 第四系覆盖层取心及成井下管难题

根据研究要求,第四系覆盖层除全段取心外(综合采取率 $\geq 80\%$),还实施大批抽水试验井。之前中国科学院自购钻机使用常规钻具取心并配合浓稠泥浆护壁成井,岩心采取率极低、污染严重,且地层过水通道全部被泥浆堵塞,无法抽水。本次施工采取何种工艺保证采取率,并能同时兼顾稳定井壁和保护通道畅通是难题。

5.3 泻湖砂层取心难题

岛礁地下普遍存在多层厚层泻湖砂层,单层厚度在十几米至上百米不等,主要结构为无胶结或轻微胶结的细粒珊瑚砂,扰动、水冲即散,岩心采取极端困难。例如,受泻湖砂层采取率低影响(该种层位采取率仅8%),“琛科1井-1”全井综合采取率不足50%。

5.4 钻探事故预防与处理难题

岛礁主要地层均沉积变质程度低,胶结松散或无胶结,溶蚀发育,钻井全漏失,任何钻井液基本都失去了护壁堵漏功效,仅能依靠套管稳定井壁,但在下套管前裸眼钻进时,容易垮塌、超径,卡埋钻、断钻事故繁多,成井困难。比如,“琛科1井”共发生卡埋钻事故10次;因钻井超径引起的断钻事故2次,钻杆接头弯曲、错位濒断2次;掉块划伤钻杆140 m(划成螺纹);事故极度频繁。

6 钻探工程概况

针对上述岛礁施工难题,认真研究解决方案和技术措施,确保施工顺利完成。

6.1 施工环境

(1)进出场:人员、设备进出场只有乘坐军舰一个途径,而且体检、政审等手续极复杂。

(2)气候:酷热、空气高盐、暴雨、台风频繁、蚊虫肆虐。2013年,“琛科1井-2”施工期间,台风“蝴蝶”经过,树倒船翻,渔民伤亡惨重,钻机被刮移位1 m。

(3)生活:不准携带任何智能电子设备(相机、手机),只能使用老人机(不带摄像头的),基本与世隔绝。无电视,无任何娱乐。生活艰苦,缺乏淡水和蔬菜。

6.2 设备选型

6.2.1 抽水试验井、200 m井、1500 m井钻井设备

(1)该种地层稳定性差,孔壁极易垮塌,长孔段裸眼钻进非常危险,因此要大量使用跟管钻进技术,机械传动立轴式钻机行程短,难以满足跟管要求,故选用长行程全液压动力头式岩心钻机。

(2)该项目大口径抽水试验井,钻进需要扭矩很大,小型号钻机难以满足,需使用大型号钻机“大马拉小车”。

综合上述2条因素,结合单位已有设备情况,最终选择使用了1台YDXD-1800型便携钻机和2台YDX-1800型履带全液压钻机。

6.2.2 3000 m井钻井设备

3000 m深井工程浩大,时间漫长,同时针对该地区高温、高湿、高盐和高腐蚀条件特点,所采用设备除满足施工能力需求外,应尽可能具有故障率低、易维护、操作简单、劳动强度小、控制性预见性强等性能。

国内钻探设备满足施工需求的主要有XY-8(9)DB型立轴钻机、HXY-9型立轴钻机、XD-30(40)DB型电动顶驱钻机。最终权衡项目技术要求、行动突然性、经费等综合因素,选用了XY-8DB型钻机,使用效果良好。

6.3 设备材料维修加工

岛上没有居民和其它设施。岛上施工期间所有设备损坏维修,正常钻进及处理事故用所有特殊工具、材料,都要自行解决。出发前充分考虑了该问题,登岛后搭建了简易车间,能完成除金属热处理之

外的所有维修和加工,比如修康明斯柴油机、加工钻杆螺纹等均可实现。参与该项目施工的所有钻探人员基本都掌握多技术工种。

6.4 钻探用水

没有淡水,只有海水,但是也不能直接从海里抽水过来使用,主要原因:

(1)涨退潮对水泵在海里的安装位置影响巨大;
(2)近海岸波浪激动对铺设在海底的电缆和管路损害严重;

(3)台风随时会把安装在海里的所有抽水设备物资卷走;

(4)岛上正在建设,公路纵横、车辆如流、开挖频繁,引水管路需要根据岛上施工需求随时调整或拆除,疲于应对。

解决措施:主井旁边直接钻探施工一口小井做供水井(图4)。岛体与大海联通,水量补给充足。



图4 供水井实景

Fig.4 Water supply well

6.5 钻井结构设计

钻井结构设计是保证钻井工程顺利实施的重要因素。岛礁地层特殊复杂,研究内容要求繁多,因此采用合理的井身结构确保钻井成功更是尤为关键。以3000 m深井为例,该井设计5开6级结构,具体如表2所示。

设计说明:如果准备S76施工至3000 m,根据这个地层的情况,S96至少应施工至2000~2500 m,S122至少应施工至1000~1500 m。目前的核心问题是该井地层极其不稳定,无任何把握能直接把S122施工至1000~1500 m,上部孔段使用单管普通钻具根本不可能施工太深,所设计普通钻具到100 m都是克服困难希望达到的比较理想状态。这一级

表2 3000 m深井井身结构设计数据

Table 2 Structural design data of the 3000m deep well

| 开次 | 钻井口径/mm | 钻深/m | 套管尺寸/mm | 备注 |
|----|---------|-----------|---------|------|
| 井口 | 222 | 30 | 219 | 导向管 |
| 一开 | 172 | 100 | 168 | 技术套管 |
| 二开 | 150 | 500 | 139 | 技术套管 |
| 三开 | 122 | 1000~1500 | 118 | 技术套管 |
| 四开 | 96 | 2000~2500 | 92 | 技术套管 |
| 五开 | 76 | 3000 | 裸眼 | 完井 |

普通钻具之后,必须再通过一级变径下套管护壁,即所设计 $\varnothing 150$ mm一级。该级施工时,使用普通钻具已行不通。因此该级是该井钻进的一个重点问题,当时考虑2种方案。

方案1:使用S150绳索取心钻具直接钻进;

方案2:使用S122绳索取心钻具取心后,换用高强度 $\varnothing 139$ mm钻杆配合小外出刃扩孔钻头大泵量、高转速跟管扩孔。

最终使用方案2钻进至预期井深。

6.6 钻井液

珊瑚岛礁地层钻进,都是全井全漏失,根本没有堵漏返水的可能性。因为钻井液消耗量太大,粘土粉用量巨大,运输、搬运困难,配制劳动强度太高,在这种施工条件下根本不适合使用粘土粉。

在该区域钻井主要考虑使用高分子处理剂配置无固相钻井液,加量少、运输轻松。高分子处理剂往往水解困难,所以尽可能采用速溶处理剂,同时做好提前连续发酵。所谓速溶也是相对的,比常规材料水解速度稍快一点,现场提前发酵也无法满足用量,因此主要采取现搅的方式。搅拌机搅高分子处理剂效果并不好,因此主要以高速水冲为主,但是处理剂性能发挥不充分。

海水对钻井液性能会有影响,但在珊瑚礁钻探中,全井全漏失,钻井液都是一次性消耗,没有连续使用的可能性,所以海水对钻井液材料影响可以忽略。这种情况下钻井液的主要作用就是在钻头新破碎地层、克取岩心时能起到短暂、临时性保护,当然也不用再考虑钻井液性能的维护问题,只需重视钻井液的初始性能即可。

虽然不返水,但是不存在上部井段干孔摩阻大的问题。因为钻井井口在海拔1 m左右,井内水位

是海平面,所以水位基本在井口,没有干井段。纯海水润滑效果不好,因此辅以油脂润滑,本项目使用喷涂式二硫化钼,既润滑又兼顾管材防腐。

6.7 钻井成果

在南海西沙群岛和南沙群岛诸岛礁前后共完成千米深井2口、3000 m深井1口、200 m深度取心井18口、其它包括抽水试验井在内的各类型用途浅井300余口,总工作量16000余米,钻井成果基本满足中国科学院所有研究需求。

7 核心钻探技术

7.1 珊瑚岛礁第四系覆盖层钻探取心及抽水试验成井下管技术

珊瑚岛礁第四系覆盖层既要取心,又要成井进行抽水试验,结合该要求针对地层特性开展研究,提出“长行程液压钻机+套管跟进”钻进方法,形成“套管连续跟进干钻取心技术”。该工艺方法经现场实际应用验证效果真实可行,取心质量合格,优质完成抽水试验。“套管连续跟进干钻取心技术”要点为4个操作步骤。

第一步:普通钻具干钻取心钻进,钻具装满后轻压,提钻取心。此步关键点:钻具直径不宜过大也不宜过小(控制在108~168 mm为宜)、单回次进尺不宜过长(控制在1 m以下)。钻具直径过大、单回次进尺过长时,松散岩心容易在张力和重力作用下脱落;钻具直径过小时,岩心容易塞死,不易退出。不开水干钻,可防止岩心被冲散;略微轻压对于防止岩心掉落有重要帮助。

第二步:干钻取心一段距离后,井壁出现垮塌,采用大一级套管跟进至原井深,此时垮塌及大径切削下来的岩土体堆积在套管内。此步关键点:总结该地层规律,第一步一般钻进3 m即会发生垮塌,所以应及时跟进套管。

第三步:套管内下入之前取心所使用小径钻具,开泥浆泵循环排出套管内松散岩土体,直至原井底。此步关键点:循环液中加入聚丙烯酰胺(PHP)效果极好,加量为6~8 kg/m³。

第四步:从新鲜井底重新开始普通钻具干钻取心钻进。此步关键点:采用第一步方式连续短回次取心钻进,总的超前掏心深度为2.5~3 m之间,不可浅也不可深,深度过浅(<2.5 m)会造成套管跟不下去,深度过深(>3 m)会造成小径钻具顶端离开套

管保护后被垮塌埋钻。

上述4个步骤循环重复,交替钻进,又称之为“四步法”^[15]。使用该工艺取得以下良好的效果:

(1)实现岩心采取率达到95%以上,且基本保持了岩心原状性;

(2)不使用泥浆,岩心干净无污染;

(3)地层过水通道不会被任何外来物体堵塞;

(4)钢制滤水管连续跟进下入,同时满足了保护井壁和抽水试验2项要求。

7.2 珊瑚岛礁泻湖砂层钻探取心技术

泻湖砂层是珊瑚岛礁的主要层位,约占到所钻工作量的1/3~1/2。该种地层取心极其困难,表现为采取率不足,岩心原状性差。投入如此巨大资金和人力进行科学钻探工作的核心最主要就是为获取岩心,因此良好合理的取心工艺是钻进的重点,总结经验确定该种地层总体采取率保证措施为:

(1)绳索取心工艺精确控制钻进参数;

(2)合理选用钻具组合;

(3)重视钻井液性能。

7.2.1 钻进参数

泻湖砂层钻探取心钻进参数控制原则为:轻钻压、慢转速、小泵量。

钻压:因为泻湖砂层几乎没有胶结压入硬度,不需要压力辅助碎岩,只需回转碎岩就可以实现钻进,所以应采用极低钻压,能保证跟随回转碎岩进尺速度实现同步给进即可。避免高压力和瞬间压力造成超压、超前而挤压破坏地层和岩心。

转速:因为泻湖砂层几乎没有胶结强度,可钻性极强、研磨性极弱,不需要钻头高速回转大频次研磨,只需慢速回转刮削即可实现快速碎岩进尺。必须杜绝为追求钻速而盲目开高转速钻进,避免高速回转产生高频震动、重复研磨破碎岩心。

泵量:因为使用低压、慢转,所以钻头部位不会产生高温,冷却问题不是考虑的重点,泵量只需配合钻探进尺速度能实现有效排砂保持井底干净即可。因进尺速度受到控制较慢,所以采取小泵量。坚决杜绝大泵量在井底造成高速射流、紊流、串流冲刷破坏岩心。

综上分析,经现场摸索试验,最终确定泻湖砂层钻探取心钻进参数:钻压<2 kN,转速100~200 r/min,泵量30~40 L/min。

钻压、转速、泵量应通过控制相互匹配,钻压实

现随进尺匀速给进,泵量实现随进尺清洁排砂,即是最合理钻进效果。

在控制以上3个钻进核心参数之外,还要注意短回次、勤提钻、慢提升等辅助操作细节。

7.2.2 钻具组合

泻湖砂层钻探取心合理钻具组合要点为:防冲刷钻头、大口径绳索取心钻具、半合管衬管。

钻头:使用常规钻头,钻井液会直接冲刷岩心,泻湖砂层会直接被冲散而取不到岩心。琛科1井-1施工中因为事先无法掌握地层具体性状,采用普通钻头钻进,导致该层岩心采取率极低。琛科1井-2、NK-1井在初步了解泻湖砂层性状的基础上,采用底侧喷钻头、超前底侧喷钻头,有效避免了钻井液直接冲刷岩心,明显提高了岩心采取率。

绳索取心钻具:通过琛科1井-1、琛科1井-2、NK-1井3口井钻井实践探索证明,泻湖砂层钻探取心,大口径绳索取心钻具取心效果远远优于小口径绳索取心钻具。

琛科1井-1因对地层不了解,上部地层过早地出现较多事故,技术口径提前使用完,最终导致绝大部分井段仅能使用NQ(76 mm口径绳索取心钻具)钻进,泻湖砂层岩心综合采取率仅8%。吸取经验后,琛科1井-2、NK-1井施工中,对于上部地层可能出现的问题做了充分准备,确保开始设计的技术口径基本钻到了预期深度。琛科1井-2主体井段采用HQ(96 mm口径绳索取心钻具),泻湖砂层岩心综合采取率达到83%,但原状性略差;NK-1井主体井段采用PQ(122 mm口径绳索取心钻具),泻湖砂层岩心综合采取率达到96%,且原状性极好。

分析原因认为,泻湖砂层拥有一定的堆积压实强度及部分胶结,岩心越粗,整体性越好。使用NQ钻具,岩心直径仅46 mm,钻进过程中震动、冲刷、剥蚀等作用于如此之细的岩心上,极易造成岩心断裂、破碎、磨蚀,而HQ钻具所采岩心直径为64 mm、PQ钻具所采岩心直径为84 mm,大直径岩心抗震动、冲刷、剥蚀能力更强,在经受钻进过程中的上述破坏之后,仍能保持较好的“芯柱”。

使用大口径绳索取心钻具是泻湖砂层岩心采取率和原状性实现质的飞跃的核心关键。今后在珊瑚岛礁钻探工程中,应该充分考虑,留出更多技术空间,尽可能使用大口径绳索取心钻具。

半合管:半合管绳索取心钻具又称为三套管绳

索取心钻具,其原理是在常规绳索取心钻具基础上再增加一层由两半圆拼合的内管,该设计有3个优势:一是提高了内管的单动性,二是能有效避免岩心被钻井液冲刷,三是“剖开式退心”方式能更好地确保岩心原状性。基于这些,使用半合管绳索取心钻具(配合超前底侧喷钻头、植物胶冲洗液)是目前保证岩心采取质量最好的技术措施。琛科1井-2、NK-1井泻湖砂层使用半合管绳索取心钻具井段,岩心采取率达到99%。

半合管绳索取心钻具虽然取心效果极好,但缺点也非常突出,主要表现为结构精密、极易损坏、消耗高昂、取心速度较慢等,因此,半合管绳索取心钻具仅适合在岩心极端难以采取情况时采用。

7.2.3 泻湖砂层钻井液

钻取泻湖砂层这种松散地层,对于钻井液性能要求是:为保证循环通畅、携砂干净,要选择适中粘度,过高则循环阻力大、过低则排砂能力不足;为保证不浸泡侵入破坏地层及岩心,要选择极低失水量。

基于上述条件,泻湖砂层钻探取心选用钻井液材料主要有:聚丙烯酰胺(PAM)、高粘羧甲基纤维素(CMC)、水解聚丙烯腈铵($\text{NH}_4\text{-HPAN}$)、降滤失剂、SH(或SM)植物胶、广谱护壁剂、高效润滑剂。以上材料均选用速溶产品。

基础配方为:1 m³海水+2 kg PAM+3 kg CMC+2 kg $\text{NH}_4\text{-HPAN}$ (或降滤失剂)+1 kg 植物胶+20 kg 广谱护壁剂+2 kg 高效润滑剂。

钻井液核心性能参数为:粘度控制在22~35 s,滤失量 ≤ 5 mL/30 min。

该无固相钻井液,对岩心保护效果很好,取出的岩心外表形成一层均匀透明的保护膜,整体性强(图5)。



图5 使用专用钻井液取心效果

Fig.5 Cores with special drilling fluid

钻井液性能一旦不合格,取心效果会急剧下降(图6),因此,使用过程中必须严格保证钻井液性能,认真测定钻井液参数,发现性能参数不满足要求时,立即调整。



图6 钻井液性能不合格情况取心效果

Fig.6 Cores with poor performance drilling fluid

综合来说,“超前底侧喷钻头+大口径绳索取心钻具+S系列植物胶钻井液体系+精确控制钻进参数”是泻湖砂层取心效果较好、钻进速度最快、机具寿命最长的合理技术组合。

7.3 珊瑚岛礁钻探事故预防与处理技术

7.3.1 事故预防技术

7.3.1.1 卡埋钻事故预防

使用优质钻井液短暂保护井壁,延长裸眼稳定期,精确控制钻进参数快速钻进穿过,及时下入套管封隔。

7.3.1.2 断钻杆事故预防

钻井液并不能阻止井壁垮塌,始终会形成钻井超径,这就容易造成钻杆断裂,这种情况下,主要通过控制钻进参数来预防,即:降低钻压和转速,减小钻杆因较大压力和回转离心弯扭造成断裂。

7.3.2 事故处理技术

7.3.2.1 卡埋钻事故处理

(1)优选能同时实现“强顶、强扭、操作劳动强度低”的钻机;

(2)使用全自动反打冲击器,该装置对于解决有震动液化特性地层的卡埋钻事故尤其有效;

(3)多重管交替冲洗井技术;

(4)水锤效应震动松卡。

其中(2)、(3)、(4)项是施工过程中总结独创的方法。

7.3.2.2 断钻杆事故处理

(1)快速使用丝锥打捞;

(2)反丝钻杆反取;

(3)直接放弃,绕障钻进,该地层极易实现。

7.3.3 核心技术简介

7.3.3.1 大钻用自动打吊锤装置

这种地层最多发的就是卡埋钻。这种地层的掉块卡钻不会形成威胁,因为岩石强度低,一搓即碎,根本卡不住,所以核心的难题就是砂层垮塌埋钻,解决好该问题钻进就非常容易。松散层尤其是砂层埋钻,静力起拔一般效果不好,钻机油缸或者千斤顶的行程往往只能抵消钻柱系统的弹性变形,而且力量始终偏小。最好是能在强顶强扭到极限时再辅以震击,根据动量定理,震击能产生瞬间巨大力,同时砂层有震动液化重新排列的特性,所以会产生极好的效果。工程勘察用小钻机“打吊锤”很普遍,大钻机由于结构和力学体系限制很难实现,如果能生产出配合大钻机打吊锤的机具,基本可处理绝大多数埋钻事故。基于此,研究设计了可用于大钻机的自动打吊锤简易装置,效果极好。

7.3.3.2 多重管交替冲洗井

巨厚的泻湖砂层就是个砂子堆,经常埋钻。以某次事故处理为例:使用S96绳索取心钻具正常钻进,被埋于360 m处,使用千斤顶及吊锤处理均无效;初步考虑换径钻进,但是这个阶段换径一是太早再也没有退路,二是消灭悬挂环和钻头胎体太困难;最后研究决定使用 $\varnothing 73$ mm绳索取心钻杆变径配合头部开水口镶硬质合金的 $\varnothing 50$ mm普通钻杆($\varnothing 73$ mm钻杆通不过S96绳索取心钻具悬挂环和钻头)开大泵量去冲扫井底,目的是希望 $\varnothing 50$ mm钻杆能穿出 $\varnothing 96$ mm钻头端部冲刷及震动使其松动。实际效果良好, $\varnothing 50$ mm钻杆超出钻头2 m长度后,连续通水低速转动2 h, $\varnothing 92$ mm钻杆终于松动,事故处理成功。该3套钻具配合交替前进方法多次使用。

7.3.3.3 正循环大泵量异地层洗井

琛科1井-1井深540~591 m段51 m长度范围为礁格架夹砂,砂充填于珊瑚礁骨架内,有轻微胶结。初钻至该层时,取出样品为骨架夹砂呈柱状。钻进过程中,经多次岩心内管抽吸后,井眼周边一定范围内珊瑚砂松动从骨架进入井内又出现埋钻。综合研究,该层砂有一定胶结强度,不经剧烈扰动能保持稳定,钻井液在该层不漏失,而该层上部436~540 m处礁坪溶蚀严重,溶隙、溶洞繁多,因此决定使用具有护壁效果的“海水+聚丙烯酰胺无固相钻井液”絮凝携砂从上部地层排砂方法除净该层段井

壁邻近区域珊瑚砂,同时严格控制失水量确保不再造成新的冲垮。连续通水半天时间后,通水及回转再无阻力,确认井内已非常干净。该层至完井再未产生过任何负作用。

7.3.3.4 水锤效应震动松卡

琛科1井-1井深720~839 m段为119 m砂层,有了上述2层砂的经验,该层使用S76高胎体长寿命钻头配合优质钻井液一次性通过。但钻穿后至855 m时因发生断钻事故反复起下大钻4次,重新导致上部砂层发生垮塌挤死钻具,千斤顶和吊锤同样无效。此时现场已无更小一级钻具可通过 $\varnothing 73$ mm钻头。仔细分析地层发现,本层砂下部地层仅轻微渗漏水,钻井液能开通但泵压极高,同时考虑细砂具有震动液化的特性,研究决定使用钻机双油缸400 kN升力全力上顶整套钻具至极限,泥浆泵使用最大泵量5.3 L/s间歇通水,每次通水时间15 s,停顿10 s,靠水的反冲及憋压震动钻具,称为水锤效应,原理是希望依靠水锤产生多次的轻微震动使砂发生液化重新排列。连续憋压4 h,钻具松动上行,处理成功^[16]。

总之,事故的预防与处理方式丰富多样,以上所列内容是经过施工检验,较适于该种地层的工艺。绳索取心工艺配合好上述措施,能够保证在该种地层正常钻进,顺利成井。

8 珊瑚岛礁地质钻探施工体会

8.1 施工方案制定

受海岛施工特殊地理环境影响,运输补给极端困难,设备物资一旦登岛,总的施工方案难以再做调整。因此在该区域开展钻探工作所设计施工方案必须正确合理、充分全面、针对性强。

8.2 无水干钻重要性

对于吹填层和第四系覆盖层,使用高密度、高粘度泥浆不能解决取心难题,而且会堵塞伤害地层,这一点对于抽水试验井影响更是突出,因此无水干钻是最好的工艺。

8.3 岩心采取率保障

该种地层钻探施工的一个主要难点就是地层胶结松散、沉积变质程度低,岩心极其难以采取,因此周全适用的岩心采取工艺是实现钻井效果的关键。

8.4 钻井事故预防与处理

该种地层钻探施工的另一个主要难点就是地层

极其不稳定,事故频发,因此周密合理的事故预防与处理措施是钻井成功的关键。

8.5 “准、稳、快、及时”原则

总结认为珊瑚岛礁钻探应该遵循“井内情况判断准,操作稳,钻进快速穿过,技术套管跟进及时”的原则。

8.6 钻探风格原则

这种基本全井段以珊瑚礁为目的层的钻井,有别于常规的陆地钻探甚至是很多其他海上深井钻探。巨厚层的珊瑚礁地层,以其极端的特殊性,钻探过程有很多独有的特点,很多情况与其它钻探截然不同甚至是完全反常规的,因此其它的钻井施工经验可借鉴性较弱。这就要求:在这种地层钻探,施工人员要有极强的思考创造力,不墨守成规,面对各种问题能临机决断,充分发挥钻探行业“势无定法、灵活多变、不拘一格”的特点。

9 结论

(1)“长行程液压钻机+套管跟进”钻进工艺是珊瑚岛礁第四系覆盖层穿越的合理方法,具有取心质量高、保护井壁、防止过水通道堵塞的多重优点。“四步法”是确保珊瑚岛礁第四系覆盖层岩心能取上、套管能跟下去的技术关键。

(2)在珊瑚岛礁钻探取心过程中,综合研究钻井液、钻进参数、钻具组合3个钻探要素,总结出“超前底侧喷钻头+大口径绳索取心钻具+S系列植物胶钻井液体系+精确控制钻进参数”多要素组合钻探取心技术,该技术能保证泻湖砂层岩心采取质量。

(3)大钻用自动打吊锤装置、多重管交替冲洗井、正循环大泵量异地层洗井、水锤效应震动松卡等设备和技術能确保泻湖砂层钻进安全。

(4)“珊瑚岛礁松散珊瑚砂层抽水试验成井下管技术”、“珊瑚岛礁第四系覆盖层钻探取心技术”、“珊瑚岛礁泻湖砂层钻探取心技术”、“珊瑚岛礁钻探事故预防与处理技术”联合形成了较完整的珊瑚岛礁钻探技术工艺体系。

参考文献(References):

- [1] 周胜男,施祺,周桂盈,等.南沙群岛珊瑚礁砾洲地貌特征[J].海洋科学,2019,43(6):48-59.
ZHOU Shengnan, SHI Qi, ZHOU Guiying, et al. Geomorphic features of coral shingle cays in the Nansha Islands[J]. Marine

- Sciences, 2019, 43(6):48-59.
- [2] 汪稔, 吴文娟. 珊瑚礁岩土工程地质的探索与研究——从事珊瑚礁研究30年[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1):202-207.
WANG Ren, WU Wenjuan. Exploration and research on engineering geological properties of coral reefs—Engaged in coral reef research for 30 years[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1):202-207.
- [3] 余克服, 张光学, 汪稔. 南海珊瑚礁: 从全球变化到油气勘探——第三届地球系统科学大会专题评述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11):1287-1293.
YU Kefu, ZHANG Guangxue, WANG Ren. Studies on the coral reefs of the South China Sea: From global change to oil-gas exploration[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11):1287-1293.
- [4] 袁征, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁岩土的工程地质特性研究进展[J]. 热带地理, 2016, 36(1):88-93.
YUAN Zheng, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Research progress in the engineering geological characteristics of coral reefs[J]. Tropical Geography, 2016, 36(1):88-93.
- [5] 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义. 南海诸岛自然科学调查研究概述——纪念中国政府收复南海诸岛70周年(2)[J]. 热带地理, 2017, 37(5):650-658.
ZHAO Huanting, WANG Lirong, YUAN Jiayi. Scientific investigations and research on the South China Sea Islands: The 70th anniversary of recovery of the South China Sea Islands (2)[J]. Tropical Geography, 2017, 37(5):650-658.
- [6] 汪进超, 王川婴, 朱长歧, 等. 数字全景钻孔摄像系统在西沙琛航岛地质调查中的应用[J]. 三峡大学学报, 2014, 35(5):69-71.
WANG Jinchao, WANG Chuanying, ZHU Changqi, et al. Application of digital borehole panoramic camera system to Chenhang Island geological investigation[J]. Journal of China Three Gorges University, 2014, 35(5):69-71.
- [7] 汪稔, 宋朝景, 朱长歧. 南沙群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997:10-25.
WANG Ren, SONG Chaojing, ZHU Changqi. Engineering geology of coral reefs in Nansha Islands [M]. Beijing: Science Press, 1997:10-25.
- [8] 张明书. 西沙西永1井礁相第四纪地层的划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(2):57-64.
ZHANG Mingshu. Quaternary reef stratigraphic division in Hole Xiyong-1[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1990, 10(2):57-64.
- [9] 张海洋, 许红, 赵新伟, 等. 西永2井中新世白云岩储层特征及成岩作用[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(3):41-47.
ZHANG Haiyang, XU Hong, ZHAO Xinwei, et al. Reservoir characteristics and diagenesis of the miocene dolomite in Well Xiyong-2[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(3), 41-47.
- [10] 崔永圣. 珊瑚岛礁岩土工程特性研究[J]. 工程勘察, 2014, 32(9):40-44.
CUI Yongsheng. Study on geotechnical characteristics of coral reef[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 32(9):40-44.
- [11] 黄云, 胡其高, 张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究[J]. 国防科技, 2018, 39(3):51-60.
HUANG Yun, HU Qigao, ZHANG Shuoyun. Research on the marine environmental impact on reef structures maintenance [J]. National Defense Science and Technology, 2018, 39(3):51-60.
- [12] 黄云, 胡其高, 张硕云. 吹填岛礁地基稳定性问题研究综述[C]//第27届全国结构工程学术会议论文集(第II册). 北京: 《工程力学》杂志社, 2018:12-15.
HUANG Yun, HU Qigao, ZHANG Shuoyun. Research on stability of filling sea islands foundation [C]//Proceedings of the 27th National Structural Engineering Conference (Volume II). Beijing: Engineering Mechanics Magazine, 2018:12-15.
- [13] 王哲, 俞演名, 翁凯文, 等. 珊瑚礁钙质砂工程力学特性研究综述[J]. 科技通报, 2019, 35(7):7-9.
WANG Zhe, YU Yanming, WENG Kaiwen, et al. A review of mechanical properties of coral reef calcareous sand[J]. Science and Technology Bulletin, 2019, 35(7):7-9.
- [14] 刘志伟, 李灿, 胡昕. 珊瑚礁礁灰岩工程特性测试研究[J]. 工程勘察, 2012, 40(9):17-21.
LIU Zhiwei, LI Can, HU Xin. Experimental study on engineering properties of coral reef calcareous rock[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012, 40(9):17-21.
- [15] 宋继伟, 蒋国盛, 李勇, 等. 中国南海珊瑚岛礁第四系覆盖层钻探取心技术[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3):211-215.
SONG Jiwei, JIANG Guosheng, LI Yong, et al. Coring drilling technology of coral-reef Quaternary overburden in South China Sea[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3):211-215.
- [16] 宋继伟, 蒋国盛, 李勇. 南海珊瑚礁本底调查“琛科一井”钻探工艺[J]. 地质科技情报, 2017, 36(5):232-237.
SONG Jiwei, JIANG Guosheng, LI Yong. Drilling technologies of “Chenke-1 Well” for the background value survey of coral reef in South China Sea[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(5):232-237.

(编辑 周红军)