

我国实施大洋钻探工程的初步设想

叶建良¹, 张 伟², 谢文卫^{1,3}

(1.中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东 广州 510075; 2.中国地质调查局,北京 100037;
3.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000)

摘要:约占地球面积 71% 的海洋里蕴藏着海量的地质、生物、气候等信息和丰富的资源,我国“十三五”国家科技创新规划中,将“深海、深地、深空、深蓝科学研究”列为战略性前瞻性重大科学问题,并将“国际大洋发现计划(IODP)”列为 5 项国际大科学计划和大科学工程之一。但在深海钻探,作业环境和条件都较陆地上更加复杂,对钻探船、钻探工艺、环保措施、施工组织管理等都是严峻的考验。本文在概述大洋钻探的意义和成果,回顾世界大洋钻探的演进史和工程实施概况以及我国参加大洋钻探情况的基础上,针对大洋钻探的钻井特点和地层条件,探讨了海洋科学钻探核心技术、超深水条件的重入钻孔技术、跟管钻进下套管技术、超深水条件的泥浆循环等关键技术问题,提出了我国实施大洋钻探工程的初步设想。

关键词:大洋钻探;钻探工程;钻探船;钻探工艺

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0001-08

Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China

YE Jianliang¹, ZHANG Wei², XIE Wenwei^{1,3}

(1.Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 510075, China;
2.China Geological Survey, Beijing 1000037, China;
3.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The ocean which occupies 71% of the entire area of the earth contains huge amounts of information such as geology, biology, climate and rich resources. In the national science and technology innovation program of China's "13th five-year plan", "deep sea, deep earth, deep space and deep blue scientific research" were listed as strategic and forward-looking major scientific challenges, and the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) was selected as one of the five international major scientific programs and projects. However, in deep-sea drilling, the operating environments and conditions are more complex than those on land, which is a severe test for drilling vessels, drilling technology, environmental protection measures, and construction organization and management. This paper first summarizes the significance and achievements of ocean scientific drilling, reviews the evolution history and engineering implementation of ocean scientific drilling in the world, and introduces the situation of China's participation in ocean scientific drilling. Then, this paper discusses the key technical issues in ocean scientific drilling, such as the ocean scientific drilling coring technology, the re-entry drilling technology in ultra deep water conditions, the casing while drilling technology, mud circulation in ultra deepwater conditions. A tentative plan for the implementation of the ocean scientific drilling project in China is put forward.

Key words: ocean scientific drilling; drilling engineering; drilling ship; drilling technologies

收稿日期:2018-12-30 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.001

基金项目:自然资源部中国地质调查局项目“深海钻探技术与工程支撑(广州海洋地质调查局)”(编号:DD20190584)

作者简介:叶建良,男,汉族,1964年生,中国地质调查局广州海洋地质调查局局长,研究员,博士,探矿工程专业,主要从事钻探工程和天然气水合物探采研究工作,广东省广州市环市东路 477 号,jianliangye@hydzn.cn。

通信作者:张伟,男,汉族,1954年生,广州海洋地质调查局高级顾问,教授级高工,博士,探矿工程专业,主要从事大陆和大洋科学钻探的钻探技术研究和工程实施工作,北京市海淀区成府路 20 号春 43 楼 1 门 501 号(100083),1445719080@qq.com。

引用格式:叶建良,张伟,谢文卫.我国实施大洋钻探工程的初步设想[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):1-8.

YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):1-8.

0 引言

钻探是目前直接获取地球深部实物资料的唯一方法,但地球面积的71%被海水所覆盖,在海上实施钻探成为人类探索地球所面临的一项巨大挑战。美国自实施“莫霍面钻探计划”之后,于1968年启动了“深海钻探计划(DSDP)”,并逐渐发展成国际性的计划。此后相继实施了“大洋钻探计划(ODP)”、“综合大洋钻探计划(IODP)”和“国际大洋发现计划(IODP)”。世界海洋科学钻探实施50多年来,在全球各大洋钻井近4000口,获取了60余万米岩心和大量数据。根据获得的信息,验证了“大陆漂移”和“海底扩张”假说;创建了“板块构造”学说;揭示了气候演变的规律;发现了海底“深部生物圈”和“可燃冰”;在海洋的历史、古气候和古生物的演化、海底火山喷发、沉积作用、海底矿产分布等研究方面,取得了许多重大成果,推动了地球科学一次又一次的重大突破。

我国的“十三五”国家科技创新规划中,“深海、深地、深空、深蓝科学研究”被列为战略性前瞻性重大科学问题。对于这一类问题,国家将强化以原始创新和系统布局为特点的大科学研究组织模式,部署基础研究重点专项,实现重大科学突破、抢占世界科学发展制高点^[1]。

规划提出的5项国际大科学计划和大科学工程中,“国际大洋发现计划(IODP)”位居其中。该项计划的目标是:瞄准国际前沿科学问题,验证大陆破裂形成海洋的重大理论假说,解决南海北部油气勘探开发中的关键问题。创新参与模式,提高我国的主导作用^[1]。

国务院已批准,由中国地质调查局承担建造天然气水合物钻采船(大洋钻探船)的任务。该钻探船的排水量为33000 t,其主要功能是开展海域天然气水合物试采和深海科学钻探,同时兼顾海洋油气勘探。按照计划,该船将于2021年6月前下水。

对于中国的地球科学家和工程技术人员来说,实施大洋钻探工程的任务已摆在我们面前。

1 世界大洋钻探的演进史

世界上最早的科学钻探活动始于海洋,第一个科学钻探计划是美国的“莫霍面钻探计划”。该计划于20世纪50年代末启动,目的是要钻透莫霍面(地壳和地幔的界面),实现地学研究的重大突破。

实施该计划采用CUSS1号钻探船。第一口科学钻孔于1961年3月在地拉霍亚海岸附近施工,在水深948 m的海底向下钻进了315 m。由于实施该计划技术难度大且费用高昂,1966年8月美国国会投票否决了对该计划的拨款预算,计划宣告终止。

“莫霍面钻探计划”虽然中途夭折,但其实施的重大意义,对于地球科学的发展起了不可估量的作用:一方面它开启了科学钻探的先河,宣告科学钻探作为一种新的地学研究手段开始得到应用;另一方面它证明了通过实施深海钻探获取洋底的沉积层和基岩样品在技术上是可行的。

1966年6月,美国科学基金会(NSF)与斯克利浦斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)签订合同,由科学基金会提供1260万美元,实施一项以揭示洋底上部地壳为目标的长期钻探计划,即“深海钻探计划”(Deep Sea Drilling Project, 简称DSDP),其做法是在世界各大洋施工数量较多但深度较浅的钻孔,广泛地采集沉积层样品和岩心。该计划由地球深部取样海洋研究机构联合体(JOIDES)实施,由斯克利浦斯海洋研究所牵头,采用“格洛玛·挑战者号”(Glomar Challenger)科学钻探船。“深海钻探计划”的实施时间是1968年8月至1983年11月。该计划起初由美国单独执行,后逐渐发展成有多国参加的国际性计划。

在“深海钻探计划”进行到最后阶段时,学者们认为,有必要将深海和大洋的钻探继续下去,应该制定一项更长期的国际性大洋钻探计划,提出了新计划组织框架和优先研究的领域,“大洋钻探计划(Ocean Drilling Program, 简称ODP)”因此诞生。大洋钻探计划(ODP)从1985年1月开始实施,于2003年9月结束。

参与该计划的最初有美国、德国、法国、日本、英国、加拿大、澳大利亚和代表12个国家的欧洲科学基金会,我国于1998年春天作为“参与成员”加入。ODP每年的经费预算约为4000万美元,美国科学基金会是最大的出资机构,其他成员出资不一,但其享有的权益(上船学者的人数和在各委员会和专题组中占的席位)与出资成比例。

大洋钻探计划(ODP)于2003年10月转入“综合大洋钻探计划(IODP)”的新阶段。综合大洋钻探以“地球系统科学”思想为指导,计划打穿大洋壳,揭示地震机理;查明深部生物圈和天然气水合物;了解

极端气候和快速气候变化的过程;为国际学术界构筑起新世纪地球系统科学研究的平台;同时为深海新资源勘探开发、环境预测和防震减灾等实际目标服务。IODP 的钻探范围扩大到全球所有海区(包括陆架浅海和极地海区),研究领域从地球科学扩大到生命科学,手段从钻探扩大到海底深部观测网和井下试验。美国、日本等国的投入有重大增加。IODP 的年度总预算将达到 1.6 亿美元,是 ODP 的 4 倍。

与 DSDP、ODP 仅仅依靠一艘钻探船的情况不同,综合大洋钻探计划的一个主要特点是同时采用多个钻探平台,除了类似于“JOIDES 决心号”这样的无隔水管钻探船以外,日本斥资 5.4 亿美元建造的五万吨级的隔水管钻探船“地球号(Chikyu)”也加盟到 IODP 计划中。此外,由 15 个国家组成的“欧洲海洋科学钻探联合体(ECORD)”采用一些能在海冰区和浅海区钻探的钻探平台(特定任务平台)

也加入了 IODP。

目前正在实施的“国际大洋发现计划(IODP, 2013—2023 年)”是“综合大洋钻探计划”的延续,是地球科学历史上规模最大、影响最深的国际合作研究计划。IODP 新十年科学计划的四大科学目标是:理解海洋和大气的演变;探索海底下面的生物圈;揭示地球表层与地球内部的连接;研究导致灾害的海底过程。目前,IODP 共有 26 个国家参与,包括美国、日本、欧洲 18 国、中国、巴西、印度、韩国、澳大利亚和新西兰等。该计划实施时,依然采用 3 种钻探平台,即美国的“决心号”、日本的“地球号”和欧洲的“特定任务平台”。

2 大洋钻探施工数据统计

世界大洋钻探的钻进和取心数据统计(1968 年 8 月—2018 年 2 月)见表 1^[2-4]。

表 1 大洋钻探钻进和取心数据统计(1968 年 8 月—2018 年 2 月)
Table 1 Drilling and coring data of ocean scientific drilling(08/1968—02/2018)

| 钻探平台 | 航次号 | 航次数 | 钻进总进尺/m | 全面钻进进尺/m | 取心钻进进尺/m | 岩心总长度/m | 钻孔数 | 平均孔深/m | 单孔取心进尺/m | 岩心采取率/% | 取心回次数 | 取心回长度/m |
|---------------|---------|-----|-----------|------------|-----------|-----------|------|--------|----------|---------|-------|---------|
| DSDP 挑战者号 | 1~96 | 96 | 325548.00 | 155505.000 | 170043.00 | 97056.00 | 1105 | 294.61 | 153.89 | 57.1 | 19998 | 8.50 |
| ODP 决心号 | 100~210 | 115 | 438631.24 | 117186.740 | 321481.90 | 222007.27 | 1797 | 244.09 | 178.90 | 69.1 | 35772 | 8.99 |
| 两个阶段的地球号 | 301~346 | 42 | 89231.33 | 19574.330 | 69657.10 | 57289.09 | 439 | 203.26 | 158.67 | 82.2 | 8491 | 8.20 |
| | 349~372 | 19 | 86504.50 | 27722.400 | 57778.21 | 7369.00 | 264 | 328.00 | 218.86 | 12.8 | 7369 | 7.84 |
| IODP ECOED 平台 | 314~380 | 17 | 46407.95 | 38010.300 | 8397.65 | 5552.19 | 103 | 451.00 | 81.53 | 66.1 | 1060 | 7.92 |
| 合计 | | 296 | 993663.98 | 358839.600 | 633857.99 | 394300.51 | 3806 | 261.00 | 166.54 | 62.2 | 75735 | 8.37 |

由表 1 可知,3806 口海洋科学钻孔的平均孔深只有 261 m,主要的钻探施工是在沉积层中进行的。另外,岩心采取率较低,633858 m 取心钻进总进尺的平均岩心采取率只有 62.2%,明显低于陆地取心钻进的岩心采取率。实际上,海洋科学钻探基岩钻

进的岩心采取率更低。统计数据表明,89 个基岩钻孔总进尺 28470 m,平均岩心采取率仅为 40.8%^[5]。

世界大洋科学钻探的一些施工纪录见表 2,这些纪录反映了目前人类勘探海洋地壳钻进施工的能力。

表 2 大洋科学钻探的一些钻进施工纪录^[6-10]
Table 2 Some drilling records in ocean scientific drilling

| 纪录种类 | 数据 | 水深/m | 备注 |
|-------------|---------|--------|---|
| 最大钻进施工水深/m | 7044.0 | 7044.0 | “挑战者号”钻探船,DSDP 第 60 航次,钻孔 461A,1978 年,南菲律宾海 |
| 最大重入钻孔水深/m | 6928.5 | 6928.5 | “地球号”钻探船,IODP 第 343 航次,2012 年 5 月 5 日,日本八户市近海 |
| 最大钻进总深度/m | 7752.31 | 6883.5 | “地球号”钻探船,IODP 第 343T 航次,2012 年 6 月 12 日,日本八户市近海 |
| 最大洋底钻进深度/m | 3058.5 | 1939.0 | “地球号”钻探船,IODP 第 348 航次,2013 年 12 月 31 日,日本南海海槽 |
| 最大取心钻进深度/m | 7734 | 6889.5 | “地球号”钻探船,IODP 第 343 航次,2012 年 5 月 22 日,日本八户市近海 |
| 最长的基岩进尺/m | 1841 | 3474.0 | 印度洋钻孔 504B,共钻进 7 个航次 |
| 最多的重入钻孔次数/次 | 98 | 3474.0 | 印度洋钻孔 504B,共钻进 7 个航次 |
| 最大隔水管应用深度/m | 2054 | 2054.0 | “地球号”钻探船,IODP 第 319 航次,2009 年 5 月—8 月,日本南海海槽 |

统计资料还表明,世界大洋科学钻探在绝大多数情况下采用无隔水管方法施工。隔水管钻进的进尺,不到大洋钻探施工总进尺的2%。“地球号”虽然具有隔水管钻井的功能,但在多数情况下,还是采用无隔水管方法施工。

3 我国参加大洋钻探的情况

我国于1998年加入ODP,年付会费50万美元。2004年加入IODP,年付会费100万美元。2013年10月,经习近平、李克强等国家领导人批示,我国加入国际大洋发现计划,并大幅度提高资助强度,除了每年支付300万美元会费,还以匹配经费的形式资助IODP的航次,在新IODP运行的前4年(2014—2017年),中国为IODP提供了3000万美元的资助,成为仅次于美、日和欧洲的第四大资助方。我国参加IODP的相关工作由科技部牵头,协调财政部、自然科学基金委、国土资源部(现自然资源部)、教育部、海洋局(现隶属于自然资源部)和中科院等相关部门共同领导,同时成立了中国IODP专家咨询委员会和中国IODP办公室负责具体组织实施,办公室设在同济大学^[11]。

中国参与国际大洋发现计划突出的贡献在于组织领导国际科学家团队在南海成功实施的4个IODP航次,即2014年1—3月执行的IODP 349航次、2017年2—6月执行的IODP 367、368航次和2018年11—12月执行的IODP 368X航次。4个航次在南海北部海域钻探12个站位,总进尺12000多米,获取岩心4100余米,获得大量珍贵的沉积物和玄武岩岩心样品。其中在南海3800 m水深最深站位,成功向海底以下钻进1710 m(进入基底玄武岩超过110 m),是大洋钻探历史上第五深站位。上述4个大洋钻探航次均由同济大学汪品先院士领衔的团队设计领导,推动实施。同济大学作为中国IODP办公室所在地,也是中国IODP的研究基地^[12-13]。

我国参与国际大洋科学钻探的主要方式是,按一定的配额派科学家参加“决心号”的海洋科学钻探航次和相关的研究活动。至今,实施了4个以中国科学家为首席科学家的南海大洋科学钻探航次。总的来说,我国在世界海洋科学钻探活动中居次要地位,作用和影响力较弱,其主要原因是我国没有深海科学钻探船,不具备在深水或超深水条件下直接获

取洋底地层样品和数据的能力。建造我国自己的钻探船,研发自己的深海钻探技术,实施由中国主导的海洋科学深钻,是改变目前不利局面的最佳方案。据介绍,中国IODP“三步走”战略目标已经确定:第一步,实现2~3个以我国科学家为主导的大洋钻探航次;第二步,仿效欧洲,争取成为IODP又一个平台提供者;第三步,建造中国自己的大洋钻探船。目前,中国IODP“三步走”战略目标中的第一步已圆满完成,建造大洋钻探船已经提上议事日程,中国科学家和工程技术人员的大洋钻探梦即将实现^[14-15]。

中国地质调查局下属的与海洋及钻探技术有关的研究单位,如广州海洋地质调查局、探矿工程研究所、勘探技术研究所等,多年来一直在开展大洋钻探工程技术研究工作:一方面长期跟踪世界大洋钻探的进展,分析研究大洋钻探实施中采用的各种技术,包括取心技术、重入钻孔技术、跟管钻进下套管技术等;另一方面开展了海洋取心技术的研发,相继研发成功可适应不同地层条件的多种常规取心钻具和保压取心钻具。利用国产的钻探船(如海洋地质十号钻探船)进行了多轮取心钻具试验,常规取心钻具的最大作业水深达到了1720 m,保压取心钻具的最大作业水深达到了1309 m^[16-18]。广州海洋地质调查局目前正组织开展天然气水合物试采/大洋钻探船的建造和大洋钻探技术研发。

4 大洋钻探的主要工程技术问题

4.1 海上钻井施工的特点

(1)海上钻井日费用非常高,万米钻井船日费用达几十万美元。因此,减少辅助时间,提高施工效率,是海上钻进技术设计的首要考虑因素,钻井技术方案围绕着这一点进行制定,强调高效率和可靠性。

(2)漂浮在海上的钻井船在海浪和洋流的作用下是动荡的,既有垂直方向的起伏,又有水平方向的移动和摇摆。必须采取与常规陆地钻井完全不同的特殊技术措施手段,保障钻进施工的平稳性和避免钻具异常损坏。

(3)钻井船上的工作平台与洋底的井口有长段的水体相隔,给钻进施工操作带来很大困难。必须采取一些特殊的技术手段,才能保证钻井施工正常进行和任务目标的实现。

4.2 海洋科学钻探的地层条件

海洋科学钻探的地层条件在不同地点变化较

大。一般来说,最上层是沉积层,下部的岩性依次为玄武岩、辉长岩和橄榄岩(地幔岩)。沉积层的厚度很不一样,在大洋中脊部位,基本上没有沉积层;有的地方沉积层厚几十到几百米;有的地方沉积层厚达数千米。而沉积层也有软泥层、硬土层和较硬的砂岩地层之分。在较软的沉积层中,往往含有较硬的夹层,如碳酸岩结壳、燧石等。总之,钻进的条件是复杂多变的,在取心钻进技术方面,需要采取不同的对策。

4.3 海洋科学钻探取心技术

以美国为首的一些发达国家实施大洋科学钻探已经 50 多年了,在深海取心钻进技术方面开展了大量研发,在施工方面积累了丰富的经验,摸索出了一套适合于不同地层条件的取心钻具(参见表 3,图 1~4)和施工工艺^[19]。实践表明,有些钻具和工艺应用效果较好,但在某些地层,钻具和工艺应用效果依然较差。

表 3 大洋钻探取心钻具

Table 3 Core drilling tools for ocean scientific drilling

| 名称 | 代号 | 功用 |
|-----------|-----|-------------|
| 高级活塞取心钻具 | APC | 软泥层取心 |
| 伸缩式超前取心钻具 | XCB | 砂层和软硬交变地层取心 |
| 回转取心钻具 | RCB | 硬地层取心 |
| 保压取心钻具 | PCB | 水合物等保压取心 |

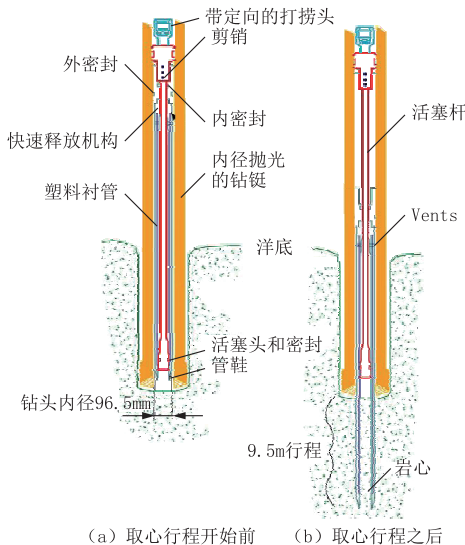


图 1 高级活塞取心钻具 (APC)

Fig.1 Advanced piston core drilling tool

海洋钻探一般深度较大,有时仅水深就有几千米。为了减少起下钻和钻头重入钻孔次数,DSDP、ODP 和 IODP 都采用了绳索取心方法,可显著节省

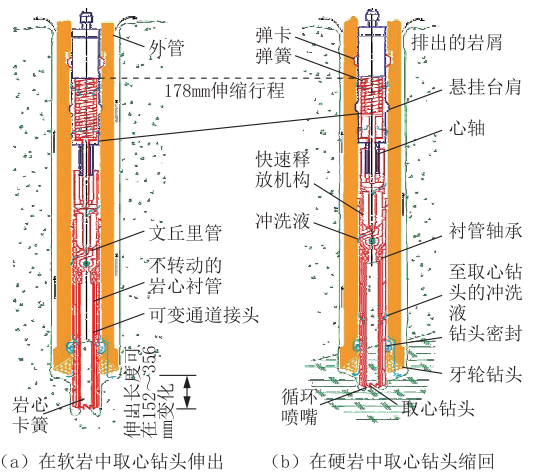


图 2 伸缩式超前取心钻具 (XCB)

Fig.2 Telescopic advanced core drilling tool

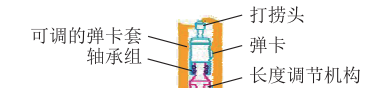


图 3 回转取心钻具 (RCB)

Fig.3 Rotary core drilling tool

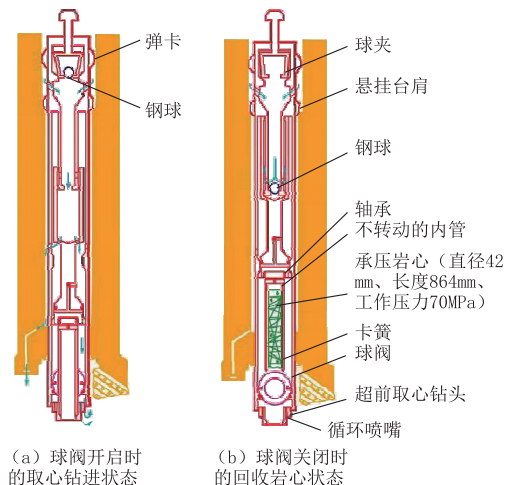


图 4 保压取心钻具 (PCB)

Fig.4 Pressure core drilling tool

施工时间。此外,绳索取心钻杆还作为测井仪器的通道,为测井提供高效施工和安全的保障。绳索取心钻杆柱为内平、外加厚结构;不管是多大的钻杆外径,都保证钻杆柱内径为 105 mm,以适应于各种 ODP 取心、取样和测量器具。钻杆单根的长度为 9.65 m。

目前大洋钻探取心钻进的主要问题是:

(1) 岩心采取率低。

岩心采取率低的情况在 3 类地层中存在,即砂层、软硬交变地层和破碎的硬岩层。造成岩心采取率低的原因除了地层条件之外,还与钻头种类和取心钻具结构有关。大洋钻探的几种取心钻具都是由带牙轮钻头的外钻具和具有不同作用的内钻具组成。牙轮钻头能适应各种地层条件,并且在钻探寿命和机械钻速方面都可获得较好的效果。不过,牙轮钻头取心钻进的岩心采取率较低。采用牙轮钻头是权衡各方面因素后的决策结果。牙轮钻头直径为 250.8 mm。要满足这么大直径的钻孔的岩屑排出,需要的泵量比较高,因此牙轮取心钻进对岩心的冲蚀作用较强。砂层、软硬交变地层和破碎的硬岩层都是怕冲蚀的地层,高泵量会使岩心采取率显著下降。南海大洋钻探第 367 航次钻孔 U1499A 取心钻进时,在松散的砂层中岩心采取率极低;第 37~43 回次,孔深 337.0~404.9 m,进尺 67.9 m,岩心长度仅为 1.37 m,岩心采取率 2%;第 51~57 回次,孔深 472.8~540.7 m,进尺 67.9 m,岩心长度仅为 1.82 m,岩心采取率 2.7%^[20]。

(2) 硬岩钻具容易损坏导致事故。

硬岩取心钻进主要采用牙轮钻头。由于钻探船随波起伏以及在海水段钻柱无约束等方面原因,孔内钻具受力恶劣,经常发生钻具断裂、牙轮落井等孔内事故。

4.4 超深水条件的重入钻孔技术

大洋钻探进行取心钻进施工时,常常是在一个牙轮钻头寿命的范围内便完成了取心或取样,不存在钻头重入钻孔的问题。但有时需要钻进的孔深较大,采用一个钻头不能完成钻进任务,这时候就出现了提钻换钻头的问题。换完钻头后再下钻,要使新钻头进入钻孔是一个难题。除了换钻头之外,有时候处理孔内事故和测井等,也需要重入钻孔。著名的 504B 钻孔施工时重入钻孔的次数达到了 98 次。为了解决重入钻孔问题,研发了一种钻头重入钻孔系统。该系统设有一个称之为“重入锥”的大直径

喇叭体,用以将钻头导入钻孔。重入锥附近安放有声纳发射器,其信号经船上的接收器接收并处理后,可以确定重入锥的位置。根据测量结果移动钻探船,可实现钻柱的初步定位。等到下钻至接近重入锥时,沿钻杆柱下入水下电视,观察洋底重入锥的位置,根据观察结果移动钻探船,实现钻头位置精调。只要钻头落在重入锥的内锥面上,钻头便可沿着锥面滑向钻孔,最终进入钻孔(参见图 5)。采用该技术,目前已实现的重入钻孔最大水深是 6928.5 m。

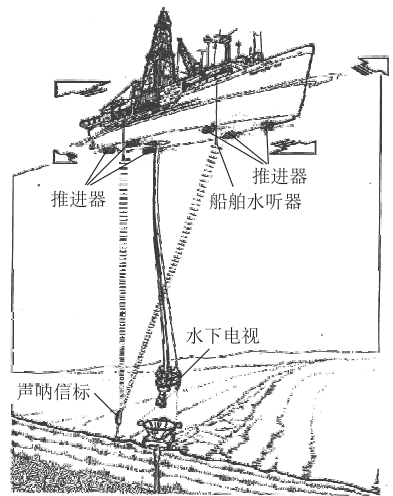


图 5 海洋钻进重入钻孔原理

Fig.5 Re-entry drilling principle of ocean scientific drilling

4.5 跟管钻进下套管技术

按照常规的钻进施工程序,下套管至少分成两步来实施,即先钻成大于套管直径的钻孔,然后将套管下入。在下套管的过程中有可能发生由于钻孔缩径,导致下套管遇阻、套管不能下到位等情况。在大洋钻探实施过程中,开发了一种先进的跟管钻进下套管工艺,即套管在钻进的同时跟进。这样既简化了套管的工序,显著节省了套管施工时间,还可大大减轻下套管过程中套管遇阻和下套管失败的风险。在我国南海实施的 IODP 第 367 航次钻探施工中,曾采用该技术,一次下入直径 273 mm 的套管 723.7 m。同时,还实现了重入锥的安放。跟管钻进下套管钻具由钻杆、套管送入工具、螺杆马达、套管下扩孔器和牙轮钻头等组成。

4.6 超深水条件的泥浆循环问题

迄今为止,世界大洋钻探 98% 的进尺都是采用无隔水管钻探船施工的。采用这种方式施工,设备器具简单,施工成本低。但是,由于不能实现泥浆循环,对维持孔壁稳定不利。在松散破碎地层,该因素

的影响作用十分明显。由于没有泥浆护壁和冲蚀作用较强,在松散破碎地层经常发生钻具遇阻和遇卡等孔内复杂问题甚至孔内事故。此外,无法采取井控措施,不能在含油气的高压地层施工。目前的隔水管技术,可以在3000 m水深条件下使用。隔水管钻进施工的成本高,并且风险也较高。新出现的一种无隔水管泥浆循环钻井技术(RMR),虽然免除了隔水管钻井的高成本和高风险,但该技术目前才用到1500 m左右的水深,要实现3000~4000 m甚至更大水深条件的泥浆泵举,难度非常大,必须考虑新方法。

5 我国实施大洋钻探工程的初步设想

迄今为止,我国还没有大洋钻探的工程技术手段,即深海钻探船和配套的钻进工艺器具,只能搭载“决心号”或“地球号”钻探船,开展一些与大洋钻探相关的地学研究工作。虽然实施了少数几个以我国科学家主导的大洋钻探航次,但总的来说,我国在大洋钻探和相关的地学研究领域还不能起主导作用。我国拥有自己的钻探船和钻探技术,能成为世界大洋钻探的主要力量之一,是我国地学领域的科学家梦寐以求的事。如今好梦即将成真,我国已决定要建造自己的大洋钻探船,并研发与之配套的钻进工艺和器具。我国自主建造的大洋钻探船计划于2021年下水。经过栖装,大概在2023年能够具备实施大洋钻探的条件。我们应该在此时间之前完成大洋科学钻探施工装备以及取心钻进工艺与器具的配套。对于钻探船的建造以及大洋钻探工艺与器具的研发,我们有以下一些粗浅的考虑。

5.1 钻探船建造

我们对钻探船的初步考虑是:该钻探船开展天然气水合物试采和深水油气勘探时,采用隔水管;而开展大洋钻探时,原则上不用隔水管。钻探船的钻深能力(水深+孔深)为11000 m,以保证可钻穿莫霍面。钻探船配备高精度的动力定位系统和升沉补偿系统,以保证在一定风浪级别条件下钻进施工能正常进行。

钻井系统是钻探船的核心。海洋科学钻探船的钻井系统主要包括:钻机及其配套装置、钻杆柱、隔水管柱、防喷器、钻进器具(包括取心和全面钻进)、重入钻孔装置等。

考虑到该钻探船的每日运行费大约40~50万

美元,一些影响钻探船施工时间或效率的因素将作为钻探船钻井系统设计时优先考虑的因素。

影响因素按重要性排序如下:

(1)可靠性。如果船上的钻井系统可靠性差,常出故障,会造成全船停待或者施工不正常,将直接影响钻探船的运行成本。

(2)施工效率。主要体现在起下钻速度方面。大洋钻探以取心钻进为主,起下钻次数多、时间长。如果起下钻效率高,可节省钻探船的施工时间。

(3)钻进系统的升沉补偿效果。该因素对钻杆和钻头寿命、起钻间隔和岩心采取率等有直接影响作用。

(4)系统购置成本。

(5)对海洋环境污染的潜在风险。该因素会影响钻探船的运行成本。

(6)对运营团队技术素质要求。系统的使用操作要求较低和运行维护更加容易和便利。

5.2 钻进工艺器具研发

我国迄今为止尚未自主实施海洋科学钻探工程,目前缺乏实施海洋科学钻探所需的工艺和器具,开展此方面的研发工作已是迫在眉睫。世界大洋钻探已经实施50多年了,实施过程中,在大洋钻探工艺和器具的研发和应用方面,积累了丰富的经验。首先,我们应该学习和吸收现有的先进大洋钻探技术,包括特深井绳索取心钻进工艺、适用于不同地层条件的取心钻具、重入钻孔技术、跟管钻进下套管技术等。此外,应该针对目前大洋钻探技术存在的弱点和不足,开展技术创新研发,内容包括井底动力驱动的绳索取心钻具、气举反循环取心(样)技术、无隔水管泥浆循环技术、膨胀套管护壁技术等。

技术研发工作从现在就开始,研发出的样机和样具等,先进行实验室试验、陆地现场试验和在海洋地质十号钻探船上进行浅水和浅孔条件的试验。通过不断的试验和改进,待研发的器具比较完善和钻探船建造完成后,再进行深水或超深水条件的试验。

开展大洋钻探技术的研发时,要充分调动国内相关钻探技术研发单位的积极性和创造性,吸收各单位的先进技术和经验,以便高效率地完成技术研发任务。

5.3 大洋钻探工程的组织实施

广州海洋地质调查局计划组建中国地质调查局莫霍钻工程技术中心,该中心的主要任务是:组织开

展我国大洋科学钻探项目的工程实施,包括运行大洋钻探船,开展项目实施过程中的钻进、测井、取心、取样和现场样品测试等工作,为我国大洋钻探项目地学研究目标的实现提供技术支撑。

6 结语

大洋科学钻探是世界科学技术史上浓墨重彩的一笔,催生了地球科学领域的许多重大理论和重大发现,对人类认识地球系统及其运动规律作用巨大。尽管大洋钻探实施已经50多年,但由于世界海洋面积广阔和大洋钻探实施难度巨大,此方面的工作方兴未艾,还有许许多多的地球奥秘需要通过大洋钻探予以揭示。随着我国经济能力和科学技术实力的增强,我国的科学家和工程技术人员将作为主要力量之一,参与到大洋钻探这一世界性的巨大科学工程之中,为地球科学和人类自身的发展,贡献中国的力量。钻井工程作为大洋钻探的核心技术支撑,对大洋钻探项目成功实施具有重要作用。鉴于我国大洋钻探船即将面世,开展大洋钻探的工程技术准备和技术研发工作已是迫在眉睫。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知(国发〔2016〕43号)[DB/OL]. www.gov.cn/jzhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.

[2] DSDP Phase: Glomar Challenger[DB/OL]. http://www.iodp.tamu.edu/publicinfo/glomar_challenger.html.

[3] ODP legs 100-210 general information[DB/OL]. <http://www-odp.tamu.edu/index.html>.

[4] Completed Integrated Ocean Drilling Program Expeditions. Oct. 2017 [DB/OL]. <http://www.iodp.org/expeditions/completed-integrated-ocean-drilling-program-expeditions>.

[5] Final Report of Deep Crustal Drilling Engineering Working Group [DB/OL]. http://iodp.tamu.edu/publications/JRSO/DCDEWG-Final-Report_2017.pdf.

[6] Peterson M N A, MacTernan F C. DSDP OPERATIONS RESUMES LEG 55 through LEG 70. Mar. 1980 [DB/OL]. http://deepseadrilling.org/trepts/TRNOTE_11.PDF.

[7] Chester F M, Mori J J, Toczko S, et al. Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). IODP Expedition 343/343T Preliminary Report, Oct. 2012 [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/343343T/343343TPR.PDF.

[8] Tobin H, Hirose T, Saffer D. NanTroSEIZE plate boundary deep riser 3. Integrated Ocean Drilling Program Expedition 348 Preliminary Report, Aug. 2014 [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/348/348PR.PDF.

[9] Alt J C, Kinoshita M. OCEAN DRILLING PROGRAM LEG 148 PRELIMINARY REPORT HOLE 504B, Apr. 1983 [DB/OL]. <http://www-odp.tamu.edu/publications/prelim/148PREL.PDF>.

[10] Saffer D, McNeill L, Araki E, et al. NanTroSEIZE Stage 2: NanTroSEIZE riser/riserless observatory. Integrated Ocean Drilling Program Expedition 319 Preliminary Report, Nov. 2009 [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/319/319PR.PDF.

[11] 中国 IODP 简介 [DB/OL]. http://www.iodp-china.org/content.aspx?info_lb=14&flag=1

[12] 中国大洋钻探学术委员会. 中国加入国际大洋钻探计划的5年总结(1998-2002) [J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 656-661. Science Committee of ODP-China. Chinese Participation in ODP: A five-year (1998-2002) summary [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(5): 656-661.

[13] 中国大洋钻探学术委员会. 中国加入综合大洋钻探(IODP)科学计划(2003-2013) [J]. 地球科学进展, 2003, 18(5): 662-665. Science Committee of ODP-China. Chinese national science plan (2003-2013) for participation in IODP [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(5): 662-665.

[14] 汪品先. 我国参加大洋钻探的近十年回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 322-326. WANG Pinxian. China's participation in the ocean drilling program: decade retrospect and future prospect [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 322-326.

[15] 汪品先. 未雨绸缪——迎接大洋钻探学术新计划的制定 [J]. 地球科学进展, 2017, 32(12): 1229-1235. WANG Pinxian. Towards the new decade of ocean drilling: preparing its science plan [J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(12): 1229-1235.

[16] 赵尔信, 周扬锐, 蔡家品, 等. 南海深水取样海试的研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(S2): 141-144. ZHAO Erxin, ZHOU Yangrui, CAI Jiapin, et al. Research on seawater sampling in the South China Sea [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(S2): 141-144.

[17] 赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 等. 海洋深水随钻天然气水合物取样钻探设备关键技术研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 40-44. ZHAO Erxin, CAI Jiapin, JIA Meiling, et al. Key technology of drilling equipment for sampling of gas hydrate while drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(S1): 40-44.

[18] 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. CAI Jiapin, ZHAO Yi, RUAN Hailong, et al. Research on the pressure-temperature core sampler for ocean exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(2): 60-63.

[19] Overview of Ocean Drilling Program Engineering Tools and Hardware [DB/OL]. <http://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/tn31/ahc/ahc.htm>.

[20] Sun Z, Stock J, Klaus A, et al. Testing hypotheses for lithosphere thinning during continental breakup: drilling at the South China Sea rifted margin. IODP Expedition 367 Preliminary Report, Aug. 2018 [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/367/367PR.PDF.