

海底硬岩钻探的现状与前景分析

刘协鲁, 陈云龙*, 阮海龙, 蔡家品, 赵义, 刘智键, 梁涛, 邓都都, 刘广治
(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:海底硬岩是世界大洋钻探实现“莫霍钻”目标必然钻遇的地层。世界大洋钻探实施的航次中已多次钻遇海底硬岩,不仅采获了岩心样品,也在钻进施工中发现了诸多问题。本文搜集了近年来世界大洋钻探实施的309、312、335、360和384等有关海底硬岩钻探航次的资料,在对航次情况简要介绍的基础上,重点阐述了目前海底硬岩钻探在钻头、井壁稳定以及取心工具等方面遇到的挑战以及采取的应对措施,并对今后海底硬岩钻探的发展进行了展望。

关键词:大洋钻探;硬岩钻探;取心钻具;钻头;井壁稳定;海底硬岩

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)01-0072-07

Status and prospect of subsea hard rock drilling

LIU Xielu, CHEN Yunlong*, RUAN Hailong, CAI Jiapin, ZHAO Yi, LIU Zhijian,
LIANG Tao, DENG Dudu, LIU Guangzhi

(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: Subsea hard rock is the stratum that ocean drilling will inevitably encounter to achieve the goal of “Moho Drilling”. During the many ocean drilling expeditions, hard rock were encountered subsea many times. Not only have core samples been collected, but also many problems have been discovered in the drilling operation. This article collects data on subsea hard rock drilling expeditions in ocean drilling carried out in recent years, including 309, 312, 335, 360 and 384. A brief review of the expeditions is made with focuses on the challenges encountered in the current subsea hard rock drilling in terms of drill bits, wellbore stabilization and coring tools, as well as the solutions; and a prediction is also made of the development of subsea hard rock drilling in the future.

Key words: ocean drilling; hard rock drilling; coring tools; drill bit; wellbore stabilization; subsea hard rock

0 引言

自1968年“深海钻探计划(DSDP)”实施以来,经过50余年的发展,世界大洋钻探已经历了“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)”4个阶段,取得了验证“大陆漂移”和“海底扩张”假说、揭示气候演变规律、发现海底“深部生物圈”等举世瞩目的成就。世

界大洋钻探已在全球各大洋钻井近4000口,获取了大量的实物岩心和数据,研发了一系列有关深海钻探的技术与装备,并在应用中逐渐改进完善^[1-6]。

迄今为止,世界大洋钻探在对大洋地壳实施大深度钻探和取心时,在钻头、取心钻具等技术装备方面,仍面临严峻的挑战^[7-12]。海底硬岩钻进取心中使用的回转取心钻具(RCB),在89个海底硬岩钻

收稿日期:2021-09-13; 修回日期:2021-12-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.010

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(北京探矿工程研究所)”(编号:DD20190586)

第一作者:刘协鲁,男,汉族,1985年生,地质工程专业,硕士,工程师,从事海洋钻探取样技术工艺研究与装备研发工作,北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488),liuxielu@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:陈云龙,男,汉族,1985年生,核燃料循环与材料专业,硕士,高级工程师,从事海洋钻探取样技术工艺研究与装备研发工作,北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488),cyunlong@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:刘协鲁,陈云龙,阮海龙,等.海底硬岩钻探的现状与前景分析[J].钻探工程,2022,49(1):72-78.

LIU Xielu, CHEN Yunlong, RUAN Hailong, et al. Status and prospect of subsea hard rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):72-78.

孔的平均岩心采取率仅为40.8%^[13],明显低于陆地取心钻进的岩心采取率,应用效果相对较差。在较大深度的海底硬岩钻孔的实施过程中,发生了多次钻具损坏、钻头失效等事故,严重制约了钻进取心工作。为了解决这些问题,IODP开展了一些工程试验航次,对不同类型钻头、新型取心工具进行了试验,并取得了较大进展。本文以近些年实施的有关海底硬岩钻探的典型航次为例,对海底硬岩钻探的所面临的挑战进行分析。

1 海底硬岩钻探典型航次

1.1 IODP 309 航次

2005年7月实施的IODP309航次是在ODP206航次基础上对1256D钻孔继续向下钻探,其计划是完成一个穿越火山基底和下伏席状岩脉复合体的连

续断面,并进入最上层深成岩的钻探任务^[14]。为了减少井下钻头失效的风险并确保井眼直径符合规格,该航次每50 h更换一次钻头,累计使用了9只钻头,具体见表1。在钻进取心过程中,技术人员多次发现泥浆压力异常下降等情况,经提钻检查后发现,在钻头短节、5 in(1 in=25.4 mm,下同)钻杆上出现了裂缝,及时规避了钻头、钻杆掉落等事故的发生,保证了该航次的顺利实施。

该航次累计钻进503 m,总深度为1255.1 m,累计作业时间为39 d,每日进尺约为15 m。尽管在最后钻进至块状玄武岩中的岩心采取率达到了73%,但该航次平均岩心采取率仍较低,仅为36%,这对后续将岩心资料与电缆测井进行结合研究比对带来了极大的困难^[15]。

表1 IODP309航次钻进情况
Table 1 Expedition IODP309 drilling results

钻头编号	尺寸/in	取心进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	取心时间/h	机械钻速/(m·h ⁻¹)
1256-1	9%	69.1	25.20	36.5	51.7	1.34
1256-2	9%	76.8	18.02	23.5	52.1	1.47
1256-3	9%	61.1	14.85	24.3	52.8	1.16
1256-4	9%	20.4	9.52	46.7	17.8	1.14
1256-5	9%	72.1	20.56	28.5	50.1	1.44
1256-6	9%	57.6	21.45	37.2	50.8	1.13
1256-7	9%	36.3	17.70	48.8	42.5	0.85
1256-8	9%	58.6	17.74	30.3	57.8	1.01
1256-9	9%	51.3	37.57	73.2	53.1	0.97
总计		503.3	182.61			1.17

1.2 IODP312 航次

IODP312航次与309航次于同一年实施^[16],也是为了加深1256D钻孔,但312航次中遇到了诸多问题。在钻柱组合下放至927 m时遇阻,经通井、扩眼等工作后下放至井底开始取心。在从1255.1 m钻到1372.8 m后,出现了钻头失效事故,牙轮钻头上的3个牙轮和大部分的第四个牙轮均掉在了钻孔中。经4次打捞后,恢复取心,经过约11 d的钻进取心后,将钻孔深度加深至1507.1 m。

该航次钻进情况见表2。总作业时间为38.6 d,累计进尺256 m,1256D钻孔的深度为1507.1 m。因下钻遇阻、钻头失效等引起的非正常作业时间总共为9.5 d,占用总时间的24.6%,其中通井5.2 d,打

捞和铣削钻头锥体4.3 d。该航次所有钻头的平均机械钻速为0.8 m/h,岩心采取长度为46.52 m,平均岩心采取率为18.5%^[17]。

1.3 IODP335 航次

2011年实施的IODP335航次是1256D钻孔的第4航次,其目的是将其从海底以下1507 m推进到下地壳辉长岩中数百米。早在ODP206航次中就在1256站位下入穿越250 m厚沉积盖层的套管及与其连接的重入锥,并进行了固井。之前该孔已完成了首次从上洋壳的熔岩穿过席状岩墙进入上部辉长岩的取样工作,并钻至海底以下1507 m,其中取心500 m后进入基底,1250 m进入火成岩洋壳,1407 m处首次钻遇辉长岩^[18]。

表2 IODP312航次钻进情况

Table 2 Expedition IODP312 drilling results

作业内容	取心进尺/m	岩心长度/m	岩心采取率/%	耗时间/d
清洗、扩眼等				5.2
取心钻进	54.6	8.58	15.7	4.2
	33.8	5.54	16.4	3.6
	24.0	1.31	5.5	3.3
	5.3	0.53	10.0	2.2
打捞、铣削等				4.3
取心钻进	25.8	1.39	5.4	3.6
	46.0	10.68	23.2	4.0
	62.5	18.49	29.6	4.1
测井等				4.2
合计	252.0	46.52	18.5	38.6

该航次中,花费了4周的时间将钻孔深度从海底以下1507 m,钻进至1522 m,仅推进了15 m,而且取心占用的时间仅为4%,主要的作业时间都花费在了钻孔的修复和稳定上(表3)。其原因主要是:(1)在下钻至在海底920~950 m之间遇到阻碍,花费16 d,又进行了8次重入后,以尝试钻透、固结

该层段,最终在该层段上部重新钻了一个新孔到达孔底。(2)在不到30 h的作业时间内进行了13 m的取心钻进后,钻头出现问题,提钻后发现钻头上的牙轮全部掉落,于是在随后的19 d里主要进行了打捞作业,同时对此前取心钻进时产生的大量岩石碎屑进行了清洗^[19]。

表3 IODP335航次作业情况

Table 3 Expedition IODP335 operation time

阶段	作业内容	花费时间/d	重入次数
1	开孔、固井(920~960 m)	15	9
2	取心	≈2	1
3	打捞作业、清洗井孔	19	13
4	测井	≈2	1
5	取心、固井	≈1.5	1

该航次采用的取心工具是回转取心器(RCB),取心深度主要为海底1507.1~1521.6 m,平均机械钻速为0.9 m/h,岩心采取率为11%。与1256D孔之前数据相比,其岩心采取率和平均机械钻速没有明显提高(见表4)。

表4 1256D孔的机械钻速和岩心采取率

Table 4 Penetration rate and core recovery of 1256D hole

站位/航次	主要岩性带	取心长度/m	平均岩心采取率/%	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)
206站位和309/312航次	熔岩和过渡带	785	41	1.5
	上部岩墙	287	37	0.9
	花岗变晶岩墙	63	7	0.5
	辉长岩	72	35	1.2
	粒状玄武岩	24	11	0.9
335航次	粒状玄武岩	26.7	11	0.9
	合计		37	1.3

1.4 IODP360航次

2015年实施的IODP360航次是一个多期钻井项目的第一个航次,目的是钻透超慢扩张的西南印度洋中脊的地壳/地幔边界。该航次计划在之前ODP的735B和1105A孔附近的站位钻至1.3 km的深度,其最终的目标是钻探至约3 km。735B孔在此前的2个航次中成功取心至海底1508 m,后因钻柱掉入孔中才被终止。在安装完重入系统后,该航次在约11 d的时间内成功钻进至海底410 m处。此后,由于钻头出现问题,不得不进行打捞作业。最终

该孔继续钻探至海底以下789.7 m^[20]。

360航次使用的取心工具仍是回转取心钻具(RCB),其总钻进深度为789.7 m,回收岩心469.4 m(见表5)。在该孔上部9.5~410.2 m取心钻进时,采取岩心长度207.0 m,采取率为52%。此后因钻头故障,进行打捞作业。恢复取心后,在410.8~481.7 m取心时,由于岩心破碎程度高,尽管钻进速度较快,但岩心采取率较低,采取岩心20 m,岩心采取率28%。此后,再次因为钻头故障进行打捞作业,并在481.7~519.2 m之间进行了全面钻进,并与取心

钻进的钻速进行了对比,结果发现,钻进速度相差不大。此后,继续取心钻进至789.7 m,由于该段是在变形较小的辉长岩中钻进,取心条件较好,最终采取

岩心241.9 m,岩心采取率达到89%。该孔平均岩心采取率达到了59%^[21]。

表5 IODP360航次钻进记录
Table 5 Expedition IODP360 drilling record

时间	钻进深度/m	类型	岩心长度/m	岩心采取率/%
2015.12.19—30	9.5~410.2	取心钻进	207	52
2016.01.07	410.2~410.8	取心钻进	0.5	83
2016.01.08—11	410.8~481.7	取心钻进	20	28
2016.01.13	481.7~519.2	全面钻进		
2016.01.14—27	519.2~789.7	取心钻进	241.9	89

1.5 IODP384航次

基于335和360航次的钻探取心经验,2020年实施的IODP 384航次对钻头、扩孔器、钻井液等进行了试验,钻头的试验是在穿过沉积物进入海底玄武岩基底后,继续钻进100 m,对比不同钻头的机械钻速和使用寿命,期望能够获得一种最优的取心钻头结构和类型(表6)。该航次中共计对3种类型的钻头进行了试验,分别是常规的三牙轮钻头、PDC钻头、PDC和牙轮混合的复合钻头。试验中,使用了井底马达将转速提高到不小于120 r/min,钻头直径均为12 1/4 in。此外,384航次还对活塞取心器(APC)的磁定向功能、扩孔器进行了测试^[22-23]。

该航次的试验结果表明,部署在U1555A、U1555C和U1555E 3个钻孔中的牙轮钻头性能最佳,其机械钻速最高,达到了约4 m/h,而且耐用性也较好,钻头寿命较长。同时通过在U1555A和U1555E钻孔中对比是否使用泥浆马达,对比了旋转速度对牙轮钻头在玄武岩中钻进速度的影响。其结果表明,旋转速度并不是影响机械钻速最为关键的因素。相比之下,PDC钻头以及复合钻头的性能并不好。但在测试中发现,使用圆锥形复合片的PDC钻头的使用效果要好于使用圆柱形复合片的PDC钻头。

表6 IODP384航次不同孔位中使用的钻头类型及其机械钻速对比

Table 6 Comparison of the types and the penetration rates of drill bits used in different holes of IODP384 operation time

孔位	钻头类型	钻进条件	进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)
U1555A	牙轮钻头	带泥浆马达	97.4	4.2
U1555B	复合钻头	带泥浆马达	24.2	1.3
U1555C	牙轮钻头	带扩孔器	39.2	1.8
U1555D	PDC钻头	锥形复合片,带泥浆马达	33.9	1.7
U1555E	牙轮钻头	不带泥浆马达	98.8	4.1

2 海底硬岩钻探的挑战与应对措施

2.1 钻头

如何在钻进过程中对钻头的状态进行监测,对钻头失效进行提前预测,从而降低钻头在井底发生故障的风险,以及如何提高机械钻速和钻头寿命,成为深孔硬岩钻探航次中的一项挑战。在309航次中,得益于现场技术人员通过泥浆压力等参数变化

发现钻头接头、钻杆出现刺漏,及时避免了事故的发生,保障了钻进取心作业顺利实施。但在312、335以及360航次中,因钻头故障、失效引起的打捞、通井等作业占据了大量的作业时间,甚至要远高于正常取心钻进耗费的时间,这严重制约了高效、经济地开展大洋科学钻探。尽管钻井作业人员通过机械钻速、扭矩等钻进参数能够推测井底钻头的使用情况,但大多数情况下,这些参数是在钻头发生故障后才

有明显变化。

在IODP深孔硬岩钻探航次中,也对钻头的机械钻速和使用寿命进行了试验。360航次的对比试验发现,全面钻进与取心钻进的速度相差不大。384航次中对牙轮钻头、PDC钻头和复合钻头的试验结果表明,牙轮钻头在机械钻速、使用寿命等指标上均要优于PDC钻头和复合钻头,而且使用牙轮钻头时,泥浆马达对机械钻速的提高并不明显,圆锥形PDC复合片的使用效果要好于圆柱形PDC复合片。

尽管在近些年中实施的海洋硬岩钻探航次中,在钻头方面所面临的问题与挑战并没有得到明显解决,但却对深海钻探钻头的结构及发展等指出了方向。

2.2 井孔

在深孔钻探中,保持井壁稳定不仅有利于实现高效、经济钻探,同时也是降低取心钻头失效风险、减少孔内事故发生的一种方法。从335航次的经历就能够发现,如果之前的1256D孔的套管深度能够从海底以下263 m调整至1000 m,335航次中就不必再花费2周的时间自海底以下920~950 m处重新开始钻探。尽管套管送入需要一定的作业时间和经费支持,而且在送入过程中也存在操作风险,但对于进行海底深部钻探和取心来说,下套管固井是保持井孔稳定的一个合理的方案,同时对于井孔清洁也有一定的帮助。

除此之外,如何利用泥浆维持井壁稳定和进行井孔清洁也是一个具有挑战性的问题。在深孔钻探中,目前采用的无隔水管钻探工艺无法实现泥浆循环,难以维持孔壁稳定。在松散破碎地层中,由于没有泥浆护壁和冲蚀作用较强,极易发生钻具遇阻和埋钻等孔内复杂问题^[24]。此外,必须花费一定的时间用泥浆进行井孔清洁,以免留下大量的岩石碎屑,从而对井孔稳定和钻头的使用造成影响,这在335航次中已经得到了验证。

2.3 取心工具

在海底硬岩钻探中,普遍应用的取心工具是回转取心钻具(RCB)。在309、312、335以及360航次也是使用该型取心钻具,但从取心效果可以看出,在海底硬岩地层特别是破碎地层中,回转取心钻具始终难以获得高质量的岩心和岩心采取率。

近年来,为了解决这个问题,日本研发了一种新的绳索取心钻具,即涡轮驱动取心钻具(TDCS)。

钻具包括外管总成(BHA)以及由泥浆马达(涡轮马达)、活塞和内岩心管组成的内管总成。涡轮马达由钻探船上泵送的泥浆驱动,旋转带动给进活塞缸、内管和底部钻头。给进活塞随着进尺逐渐下压,岩心进入内管^[25]。

在取心前,在钻井甲板投入内管总成,在钻柱中自由下落坐在外管总成中。然后循环泥浆,开始取心。当给进活塞到达活塞缸底部,完成取心,通过绳索打捞内管总成。完成取心后,使用外钻头将取心孔扩大至取心的深度(使用外钻头扫孔),再继续用TDCS进行下一个回次取心。钻具的主要参数见表7。

表7 TDCS主要参数

Table 7 Main parameters of TDCS

参数名称	数值
总长/m	17
外管总成(内径/外径)/mm	104/216
钻头外径/mm	95
岩心外径/mm	60
岩心管长度/mm	4500
轴向载荷(推力负载)/kN	5~10
旋转速度/(r·min ⁻¹)	0~1300
扭矩/(N·m ⁻¹)	200~1000
流量/(L·min ⁻¹)	800~1200
压力损失/MPa	4~7
钻头处流量/(L·min ⁻¹)	100~150

TDCS经过了室内的水平和垂直取心试验。水平取心试验利用斑岩、白色大理石、红色大理石、白云岩、凝灰岩和凝结煤对钻具的取心效果进行了验证,56组试验结果表明,岩心采取率超过90%,其中3/4为100%。9组垂直试验结果表明,除去2组试验因岩心管被堵,其余试验岩心采取率均达到了100%。

在2018年IODP 376航次中,对TDCS进行了试验。该航次采用回转取心钻具钻进1244 m,采取岩心222.4 m,岩心采取率为18%。在U1528C和U1531E钻孔中对TDCS进行了试验。在U1528C钻孔中,使用TDCS自海底以下22 m取心钻进至53.5 m,采取岩心3.6 m,岩心采取率为12%。但在U1531E孔中,TDCS卡在了BHA中,没有完成相应的试验^[26]。

尽管 TDCS 在 IODP376 航次中的试验效果并不理想,但作为对深海硬岩钻探取心工具的一种新的尝试,或许经历多个航次的试验与改进,适配 TDCS 的取心工艺成熟后,会在取心效果方面有所改善。

3 海底硬岩钻探展望

从不同的海洋地壳中钻取海底硬岩样品,不仅为深入了解地球内部本质及其动力学行为提供基础信息,也有助于理解地球内部与地壳,海洋和大气之间的热量、质量和挥发物的交换过程。因此,为了实现从海洋地壳钻入上地幔的终极目标,需要创新的解决方案来应对迄今为止所遇到的挑战。

要想完全钻穿洋壳,需要有组织地分阶段、分步骤进行实施,而且随着深度和温度的增加,海底硬岩钻探技术还需要克服保持井壁稳定、延长钻头寿命、提高岩心采取率、在高温下钻入岩石可能导致钻孔壁热破碎等一系列挑战。同时,还需要研发新的测井工具、井下传感器等,可以在海底深孔中超过 200 °C 的条件下进行连续工作或长期监测。

此外,信息技术、人工智能等技术的发展也将给海洋科学钻探的技术革新带来新的机会。在钻探取心的同时,每个航次都会对地球物理、地球化学以及生物学等数据进行采集。通过岩心分析、井下测量以及观测站监测的数据,与区域地质和地球物理观测结合后,将极大地增加数据的数量与质量。海洋科学钻探将越来越依赖这些海量的数据(大数据)用以分析计算,提前预测钻探工程风险,避免不必要的打捞、修井等作业,进而加快实现从洋壳钻入上地幔的步伐。

4 结语与建议

在世界大洋钻探的 50 多年历程中,已成功实施了多个对洋壳较大深度的钻探取心航次。但由于大洋钻探实施难度巨大,至今仍未穿越洋壳。通过近些年实施的 309、312、335、360 以及 384 等航次硬岩钻探经验,对于如何实现经济、高效的海底深孔硬岩钻探,需要考虑以下几个方面。

(1) 钻头。在提高钻头碎岩效率方面,通过对钻头类型、结构、材料等方面的改进,从而提高机械钻速和使用寿命;在工况监测方面,考虑在钻头上安装传感器接头,实现对钻头扭矩、压力和机械钻速实时

监测,提前预测钻头发生事故的可能性。

(2) 取心工具。研发高效、高质量取心钻具,考虑通过改变钻具结构、岩心管材质等方式提高破碎地层的岩心采取率。

(3) 井壁稳定性。考虑通过使用膨胀套管、增加套管下入深度等方式,增强井壁稳定性,建立泥浆返回系统,清洗井底残留岩屑,提高钻井效率和井筒完整性。

(4) 数据集成与分析。充分利用岩心、测井、地震等数据资料,引入大数据、人工智能等技术,预测钻探工程风险。

参考文献(References):

- [1] 汪品先. 大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J]. 科学通报, 2018, 63(36):3868-3876.
WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3868-3876.
- [2] 田军, 拓守廷. 新十年科学大洋钻探——照亮地球的未来[J]. 自然杂志, 2015, 37(4):239-250.
TIAN Jun, TUO Shouting. New decadal scientific ocean drilling: Illuminating Earth's past, present, and future [J]. Chinese Journal of Nature, 2015, 37(4):239-250.
- [3] 汪品先. 我国参加大洋钻探的十年回顾与展望[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.
- [4] 郭慧, 李亚萍, 王学明. 国际大洋科学钻探计划简介[J]. 中国地质, 2018, 45(3):638-639.
GUO Hui, LI Yaping, WANG Xueming. A brief introduction to the International Ocean Drilling Program [J]. Geology in China, 2018, 45(3):638-639.
- [5] 赵义, 蔡家品, 阮海龙, 等. 大洋科学钻探船综述[J]. 地质装备, 2019, 20(3):11-14.
ZHAO Yi, CAI Jiapin, RUAN Hailong, et al. Summary of ocean scientific drilling ship [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019, 20(3):11-14.
- [6] 田雪, 赵建亭, 吴雪峰. 大洋勘探船钻探及岩芯采集系统总体设计研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, 7(4):208-214.
TIAN Xue, ZHAO Jianting, WU Xuefeng. General design of drilling and coring system for ocean drilling ship [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2020, 7(4):208-214.
- [7] 王健, 李春峰. 莫霍钻:未来十年大洋钻探的终极目标与挑战[J]. 科学, 2012, 64(1):8-12, 4.
WANG Jian, LI Chunfeng. Mohole Drilling Project: The ultimate goal and challenge of the international ocean discovery [J].

- Science, 2012, 64(1):8-12, 4.
- [8] 李福建, 王志伟, 李阳, 等. 大洋钻探船深海钻探作业模式分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2018, 5(5):320-326.
LI Fujian, WANG Zhiwei, LI Yang, et al. Technical analysis of deep-sea drilling operation modes for ocean drilling ship [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(5):320-326.
- [9] 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]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2017, 32(12):1229-1235.
- [10] 熊亮, 谢文卫, 于彦江, 等. 大洋钻探随钻扩孔下套管关键技术[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3):74-80.
XIONG Liang, XIE Wenwei, YU Yanjiang, et al. Key technology of drilling casing in ocean drilling [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(3):74-80.
- [11] 熊亮, 谢文卫, 卢秋平, 等. 我国深海钻探重入钻孔技术优选及设计思路[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7):1-7.
XIONG Liang, XIE Wenwei, LU Qiuping, et al. Optimization and design approach for deep-sea drilling well reentry technology in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7):1-7.
- [12] 王艳丽, 尹献涛, 殷国乐, 等. 深海硬岩连续取心钻头的研制[J]. 钻探工程, 2021, 48(7):26-32.
WANG Yanli, YIN Xiantao, YIN Guoyue, et al. Development of the continuous coring bit for hard rock formation in deep-sea [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):26-32.
- [13] Final report of Deep Crustal Drilling Engineering Working Group [DB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/publications/JRSO/DCDEWG-Final-Report-2017>. 2017.
- [14] IODP309航次——超速扩张的地壳[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3):52.
Integrated Ocean Drilling Program Expedition 309—Superfast spreading crust [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(3):52.
- [15] Damon A.H Teagle, Susumu Umino, Neil R. Banerjee, and the Expedition 309 Scientists. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 309 Preliminary report [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/309/. 2005.
- [16] IODP312航次——一个完整的形成于超速扩张带的上部洋壳剖面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4):32.
Integrated Ocean Drilling Program Expedition 312—A complete section of the upper oceanic crust formed in the superfast spreading zone [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(4):32.
- [17] Damon A.H Teagle, Susumu Umino, Neil R. Banerjee, and the Expedition 309 and 312 Scientists. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 312 Preliminary report [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/312/. 2005.
- [18] IODP335航次——超快速扩张速率的地壳[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(2):20.
Integrated Ocean Drilling Program Expedition 335—Superfast spreading rate crust [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2):20.
- [19] Teagle, Ildefonse, Blum, and the Expedition 335 Scientists. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 335 Preliminary report [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/335/index.html. 2011.
- [20] IODP360航次——西南印度洋中脊地壳与莫霍面(慢扩张脊的下地壳和莫霍面性质)[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(3):10.
Integrated Ocean Drilling Program Expedition 360—Southwest Indian Ridge Lower Crust and Moho (The nature of the lower crust and Moho at slower spreading ridges) [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(3):10.
- [21] MacLeod, Dick, Blum, and the Expedition 360 Scientists. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 360 Preliminary report [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/360/. 2016.
- [22] Peter Blum, Bill Rhinehart, Gary D. Acton. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 384 Preliminary report (Engineering Testing) [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/384/. 2020.
- [23] B Rhinehart, B., and Blum P. Expedition 384 Scientific Prospectus: Engineering Testing. International Ocean Discovery Program [DB/OL]. <https://doi.org/10.14379/iodp.sp.384.2020>.
- [24] 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 implementtition of the ocean drilling project in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2):1-8.
- [25] Eigo Miyazaki, Yuichi Shinmoto, Massanori Kyo, et al. Development of turbine driven coring system for hard rock sampling [C]//Offshore Technology Conference. Houston, TX, United states, 2014:1-18.
- [26] Cornel E.J. de Ronde, Susan E. Humphris, Tobias W. Höfig, and the Expedition 376 Scientists. Intergrated Ocean Drilling Program Expedition 376 Preliminary report [DB/OL]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/376/. 2018.

(编辑 李艺)