

大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用

朱芝同¹, 刘晓林¹, 田烈余², 许本冲¹, 和国磊¹, 张欣¹

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000; 2.中国地质调查局广州海洋地质调查局,广东广州 517000)

摘要:通过对美国“格罗玛·挑战者号”、“乔迪斯·决心号”以及日本“地球号”大洋钻探船搭载的重入钻孔系统进行调研,介绍了大洋钻探重入钻孔技术现状、系统组成、工艺流程与应用。经过了大量实践验证的“挑战者号”和“决心号”上的重入钻孔系统和采用的重入方法是成熟可靠的,可为我国大洋钻探船的建造提供经验和借鉴。

关键词:大洋钻探;重入钻孔技术;重入钻孔系统;水下电视系统;重入锥

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)07-0008-08

Development and application of the reentry drilling technology and system in ocean drilling

ZHU Zhitong¹, LIU Xiaolin¹, TIAN Lieyu², XU Benchong¹, HE Guolei¹, ZHANG Xin¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou Guangdong 517000, China)

Abstract: In this paper, the reentry drilling systems on board of America's "Glomar Challenger" drill ship, "JOIDES Resolution" drill ship and Japan's "Chikyu" drill ship are investigated. This paper introduces the status of reentry drilling technology, the composition of the reentry drilling system, the process flow and application of reentry drilling in ocean drilling. The reentry drilling system and the reentry method adopted on the "Challenger" and the "JOIDES Resolution" drill ship have been verified by a lot of practices, which may provide full reference for design and manufacture of the drill ship for China.

Key words: ocean drilling; reentry drilling technique; reentry drilling system; vibration isolated television; reentry cone

0 引言

大洋钻探是地球科学领域迄今为止历史最长、成效最大的国际科学合作计划。自 1968 年以来,大洋钻探经历了深海钻探计划(DSDP, 1968-1983)、大洋钻探计划(ODP, 1985-2003)、综合大洋钻探计划(IODP, 2003-2013)和国际大洋发现计划(IO-DP, 2013-2023)四个阶段^[1-3]。成员国由 20 世纪 60 年代的美国,到 70-80 年代的苏联、英国、法国、德国、日本,再到目前包含中国在内的全球 26 个成员国共同参与^[4-5]。大洋钻探在 50 余年的执行过程中,从美国“格罗玛·挑战者号”(简称“挑战者

号”)和后来的美国“乔迪斯·决心号”(简称“决心号”)独立承担钻探任务,发展到了美国“决心号”、日本“地球号”、欧洲特定任务平台三方联合运作的局面^[6]。截至 2018 年初,这些钻探平台已经在世界各大洋执行 286 个航次,钻穿了接近 100 万 m 的沉积物和基岩,并采集了超过 40 万 m 的岩心^[1],这些地质资料为验证海底扩张和板块构造、揭示气候演化规律、发现深部生物圈和可燃冰等提供了重要参考^[7]。2013 年 10 月,大洋钻探进入全新的阶段——国际大洋发现计划(IODP),提出了探索海底深部,钻穿地壳探索上地幔的目标,对钻探作业水深

收稿日期:2020-04-23 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.07.002

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);南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)重大专项团队项目“天然气水合物钻采船单筒双井及大洋钻探技术研究”(编号:GML2019ZD0504);中国地质科学院勘探技术研究所科技项目“伸缩套管及配套工具研制”(编号:YB202010)

作者简介:朱芝同,男,汉族,1986 年生,工程师,地质工程专业,硕士,从事地质钻探设备及工艺研究工作,河北省廊坊市金光道 77 号,443543481@qq.com。

引用格式:朱芝同,刘晓林,田烈余,等.大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):8-15.

ZHU Zhitong, LIU Xiaolin, TIAN Lieyu, et al. Development and application of the reentry drilling technology and system in ocean drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 8-15.

及海底钻进深度提出了更高的要求,当钻进的孔深较大就出现了钻头重入钻孔的问题。

大洋钻探在绝大多数情况下采用无隔水管钻进方法施工,隔水管钻进的进尺不到大洋钻探总进尺的 2%。“地球号”虽然具有隔水管钻井功能,但在多数情况下还是采用无隔水管方法施工^[7-8]。在大洋钻探过程中,遇到坚硬的地层,取心钻头的磨损会非常严重,单次钻进的深度非常有限,为了达到更深的钻进深度,获取海底深部的岩心,需要更换钻头后重入原来的钻孔,在同一个井眼通过更换钻头和钻头重入,实现多次钻进。在无隔水管钻进中,要使新钻头进入钻孔是一个难题^[9]。除了换钻头之外,有时候处理孔内事故、测井以及下放监测仪器等,也需要重入钻孔。因此,重入钻孔技术是大洋钻探中关键的技术基础与保障之一,重入钻孔技术与装备研制也是我国自主研发制造大洋钻探船,进行深海科学钻探、深海油气钻探和可燃冰开采急需解决的关键技术难题^[10-13]。本文主要对国外大洋钻探船重入钻孔技术现状、系统组成以及重入工艺流程与应用进行介绍,为我国实现重入系统自主设计制造提供借鉴。

1 典型深海钻探船采用的重入钻孔技术简介

1.1 “挑战者号”

1968 年开始的深海钻探计划(DSDP)是由美国的“挑战者号”深海钻探船实施的。“挑战者号”船长 121 m,宽 19 m,排水量 10500 t,钻塔高度 43 m,最大工作水深 7000 m^[14]。除冰雪覆盖的北冰洋以外,钻井遍及世界各大洋,能在 9 级风速时进行正常作业^[14]。世界首套重入钻孔系统就是在“挑战者号”上装配并试验成功的。1970 年 6 月 14 日,重入钻孔试验取得首次成功。1970 年 12 月 25 日,DS-DP 第 15 航次 146 站位,在大西洋的加勒比海进行的重入系统的首次作业,得到广泛认可^[15]。

重入钻孔原理如图 1 所示^[16]，“挑战者号”主要依靠动力定位(DP)系统和重入系统完成重入钻孔过程,DP 系统主要由推进器和控制计算机构成,船上的 DP 系统通过接收海底声呐发生器(声呐信标)的信号来定位海底目标重入锥相对于船只的位置,并在风浪中保持船只和目标的相对位置^[17]。在重入钻孔时,通过安装在钻头上的声呐扫描器和重入锥附近的声呐反射器,来精确定位钻头相对于重入锥的距离和方位,然后通过 DP 系统设定船只移动

的方位和距离来移动钻头从而实现重入钻孔^[15]。

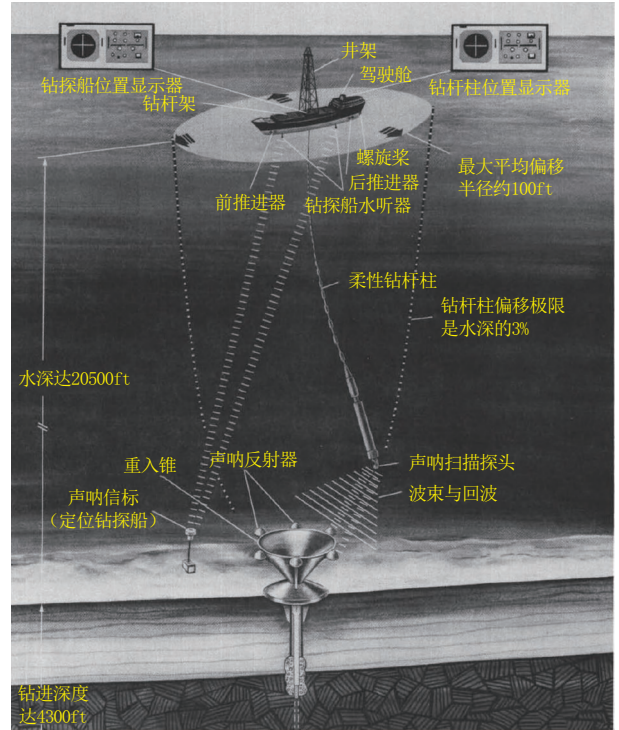


图 1 “挑战者号”重入钻孔原理示意

Fig.1 Reentry drilling principle of “Challenger”

由于钻头的移动滞后于船只的移动,利用 DP 系统进行重入钻孔时,每次移动船只后要等待钻头和钻杆移动到位并稳定,因此利用 DP 系统进行重入时,需要对操作人员进行培训并需要足够的经验。利用 DP 系统进行重入钻孔通常需要几十分钟至几个小时。如果声呐扫描系统丢失了目标,可能会找不到钻孔,该钻孔的重入可能会被放弃。

1.2 “决心号”

1983 年 DSDP 航程结束,“挑战者号”退役,随后的国际大洋钻探计划(ODP),综合大洋钻探计划(IODP)以及目前正在进行的国际大洋发现计划(IODP)由“决心号”服役。

“决心号”总排水量 18636 t,船长 143 m,宽 21 m。能在海上连续航行 75 d。钻塔高 61.5 m,能操作 9150 m 钻杆柱,钻探最大水深 8235 m,海底最大钻探深度为 4000 m 左右^[18]。该船作业的最恶劣环境海区在格陵兰东南端的拉布拉多(Labrador)海,那里阵风风速达 52 节,通常为 40 节,最大浪高 9 m^[19]。

“决心号”上的重入钻孔系统相比较“挑战者号”有了重大的改进,在保留原有装备的基础上引入了防震水下电视(VIT)系统^[20],见图 2、图 3。声呐扫

描图像分辨率低,可能出现错误定位造成重入失败。VIT 系统除了配备声呐扫描之外,还配备了深水摄像机,能实时传输视频图像,见图 4。该系统结合了声呐扫描探测距离远、视频图像分辨率高以及目标识别准确率高的优势,提高了重入钻孔时目标识别的效率和可靠性。

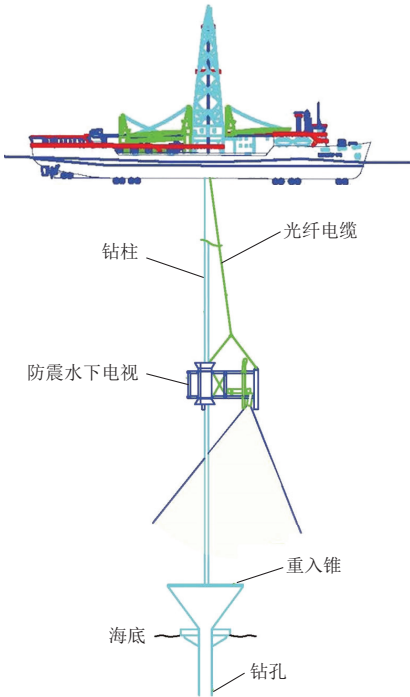


图2 防震水下电视(VIT)系统
Fig.2 Schematic of VIT system

1.3 “地球号”

与“挑战者号”和“决心号”无隔水管钻探船不同,“地球号”是为特定目标而建造的一艘隔水管钻探船^[21]。“地球号”船长 210 m,宽 38 m,排水量超过 57000 t,理论上可在 4000 m 水深的海域向海底钻进 7000 m^[22],可在 4.5 m 波高、23 m/s 风速、1.5 节海流的环境条件下定位^[6]。从 2007 年 9 月开始,“地球号”正式实施 IODP 科学钻探,十多年来,共完成 17 个航次,主要在日本周边海域实施钻探^[23]。“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。

“地球号”无隔水管钻探施工采用的钻孔重入系统与“决心号”类似,也装备有防震水下电视系统即 VIT 系统,见图 5、图 6。

2 重入钻孔系统组成和作用

2.1 动力定位系统



(a) 340T 航次 VIT 下放准备
(图片来源:Geetika Kapoor,IODP-USIO)



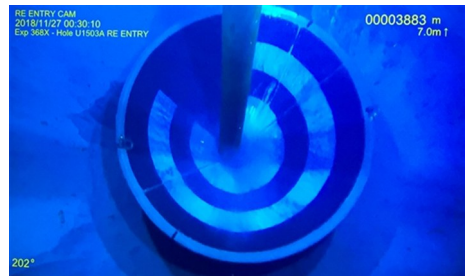
(b) 360 航次 VIT 提出月池
(图片来源:Bill Crawford,IODP-JRSO)

图3 “决心号”VIT 系统

Fig.3 VIT system of “JOIDES Resolution”



(a) 360 航次重入锥视频图像
(图片来源:Christopher MacLeod, IODP)



(b) 368X 航次重入锥视频图像
(图片来源:IODP)

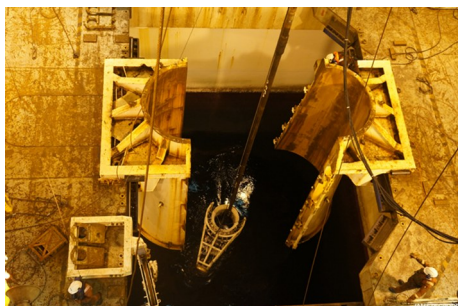
图4 “决心号”VIT 系统监测画面

Fig.4 VIT system monitor screen on “JOIDES Resolution”

“挑战者号”DP 系统主要由主推进器、4 个辅助电动推进器及控制计算机构成,计算机控制主推进器和辅助推进器的输出,在钻进作业时保持船的位置不



(a) VIT 下放准备(图片来源:JAMSTEC/IODP)



(b) 343 航次 VIT 通过月池下放(图片来源:JAMSTEC/IODP)

图 5 “地球号”VIT 系统
Fig.5 VIT system of “Chikyu”



(a) 343 航次钻柱视频图像(图片来源:JAMSTEC/IODP)



(b) 343T 航次钻柱视频图像(图片来源:JAMSTEC/IODP)

图 6 “地球号”VIT 系统监测画面
Fig.6 VIT system monitor screen on “Chikyu”

变。计算机同时接收海底声呐信标的信号并定位其位置,在需要对船进行移位时作为参考坐标^[24]。

“决心号”DP 系统使用长基线、短基线和超短基线技术,使船舶稳定在作业站位上,该系统包括 12 个

伸缩式侧推进器和 2 个主推进器,由船载的计算机动力定位系统统一控制管理,重入操作时海底声呐与 VIT 系统也受计算机的定时控制^[25]。在阵风 30 m/s,最大浪高 8.0 m,海流 1.25 m/s 时,DP 系统能保持船体仅在 25 m 直径的范围内作相对微小的移动,保证了船体和井位的准确定位^[9]。

“地球号”DP 系统安装了 6 个全回转推进器,3 台位于尾部,3 台位于首部^[26],计算机控制系统对采集的风、波浪的流速与流向等数据进行实时分析,通过对推进器动态控制实现精准定位。DP 系统能将“地球号”的船体固定于一个半径 15 m 的范围内^[9]。

2.2 声呐扫描系统

声呐系统主要包括:投放在海底的声呐信标,用于钻探船的定位;钻头上的声呐扫描仪和重入锥上的声呐反射器,用于探测重入锥的位置并在显示器上显示相对于钻头的平面距离和方位^[27],见图 1。

2.3 防震水下电视系统

VIT 系统设备主要用于在钻孔重入过程中对海底进行可视化观测,如图 7 所示,该系统主要由 VIT 机械框架、声呐设备、可视设备及控制系统等组成。VIT 机械框架(设有导向筒和防震装置)用于承载声呐、可视及控制系统等设备,导向筒和防震装置在 VIT 框架沿钻杆下放时起导向和缓冲作用。

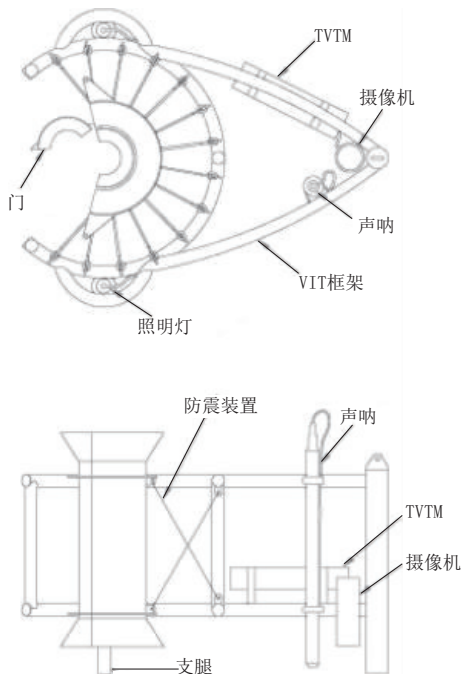


图 7 VIT 系统水下组件
Fig.7 VIT components

重入钻孔过程中,首先采用声纳设备对摄像范围以外的物体如重入锥进行定位。然后在微光条件下,通过黑白水下摄像机对钻探船和钻杆钻头进行定位。最后利用彩色水下摄像机通过云台(平移或者倾斜)和变焦功能来近距离指导钻头重入钻孔操作。另外彩色摄像机还可用于海底探测、检测机械设备(如CORKs系统)、定位通信电缆等^[20]。

2.4 重入锥

安装在井口的漏斗状的装置,用于重入钻孔引导。安装有声呐信源装置即声呐反射器,是钻杆控制系统的“靶子”,特殊的涂装图案可为视频导引提供距离和方位信息^[28],见图8。



(a) 367 航次 U1500B 孔重入锥下放
(图片来源:Yifeng Chen, IODP JRSO)



(b) 327 航次 U1362B 孔重入锥下放
(图片来源:William Crawford, IODP/TAMU)

图8 2种结构形式的重入锥

Fig.8 Two structural forms of the reentry cone

在沉积软层的洋底,重入锥可直接坐落在软层上,如图9所示,具体方法是:钻进成孔后,将重入锥套在钻杆上,使其自由降落至洋底^[29]。对于覆盖层较浅的洋底,由于岩石较硬,采用跟管钻进的方法安放重入锥^[30],钻进可采用液动潜孔锤,提高硬岩中的钻进效率^[31]。如图10所示,重入锥与钻具同步下行,钻到一定深度后,提出可收缩钻头,将重入锥和孔口导管留在洋底,然后可进行取心钻进^[32]。

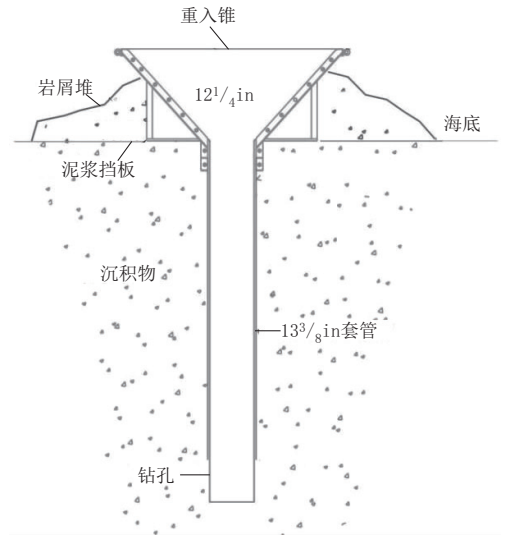


图9 在沉积层中安装的自由降落锥体

Fig.9 The free-fall funnel deployed in sediment

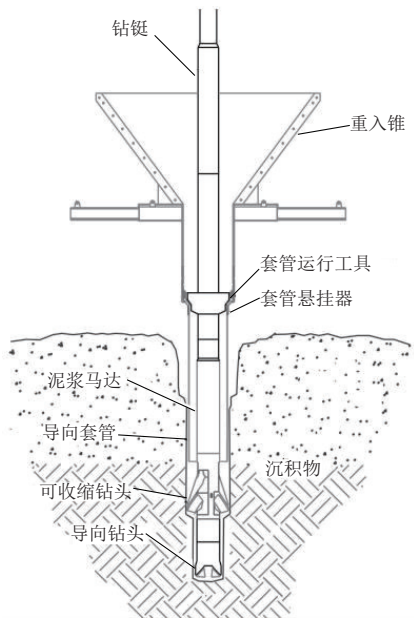


图10 跟管钻进方法安装的重入锥

Fig.10 Underreaming ahead of the conductor casing in unstable sediment cover to set the reentry cone

2.5 钻柱控制装置

在大洋钻探时,几千米的钻杆要顺利进入钻孔,仅靠移动船只来推动钻杆重入钻孔难度极大,要求操作人员具有丰富的操作经验和技巧。钻杆控制装置是在船体不动的情况下,借助推进器或钻柱下端的可调喷嘴实现钻杆可控的运动,辅助DP系统使钻头进入重入锥。

“挑战者号”使用喷水嘴进行辅助重入钻孔时,需使用封隔器堵塞钻头前端出水孔,重入完成后还要起

下电缆工具移除封隔器并关闭喷水嘴,节约的时间不足以弥补起下工具所需的时间。“挑战者号”将喷水嘴去掉,仅使用 DP 系统进行钻杆移位重入的方案,并在后续试验中取得成功^[15],该方法在后续的重入钻孔操作中被采用。

3 重入钻孔工艺流程

3.1 “挑战者号”重入钻孔工艺流程

“挑战者号”重入钻孔第一次试验时,使用 DP 系统和喷水嘴重入钻孔的主要工艺流程如下^[15]:

(1)上提钻杆更换钻头过程中,海底声呐信标和船上 DP 系统保持船的位置不变。

(2)钻杆下放过程中使用钻头上的声呐扫描仪探测重入锥,当探测到重入锥时,重入锥上的 3 个声呐反射器会在船上的声呐显示屏幕上显示出 3 个亮点。

(3)下放到距离海底一定深度时停止下放,根据声呐信标和重入锥的位置计算出移动船只的偏移量,输入 DP 系统的计算机,DP 系统自动进行定位。

(4)由于钻杆的移动比船的移动滞后,每次船只移动后需要等待 15 min 以上,等待钻杆钻头移动到位置并且摆动幅度最小。

(5)重复下放、移动钻杆钻头,当钻头靠近重入锥时,船上泥浆泵向钻杆内带压注入海水,由于钻头前端的出水孔被封隔器堵塞,水流从喷水嘴向钻杆侧方喷出,推动钻杆和钻头移动。通过控制钻杆的旋转可以控制喷水的方向,调节喷嘴流量控制钻杆移动速度,在声呐扫描器的检测下,喷水嘴可以推动钻杆钻头快速对正重入锥。

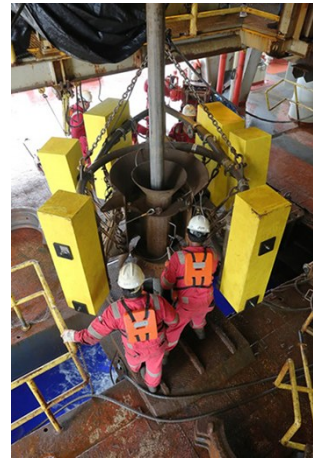
(6)当钻头对正到重入锥正上方且距离重入锥很近时,下放钻杆钻头使其进入重入锥并滑入重入锥中间的钻孔。

3.2 “决心号”、“地球号”VIT 系统下放流程

“决心号”和“地球号”在“挑战者号”的重入系统基础上均配备了 VIT 系统,在钻头下放靠近重入锥时,通过月池沿着钻柱下放 VIT 系统,VIT 系统实时传输的视频图像为钻探船或者钻柱驱动装置移动钻头对正重入锥提供了重要参考。VIT 系统下放过程见图 11、图 12,具体下放流程如下^[20]:

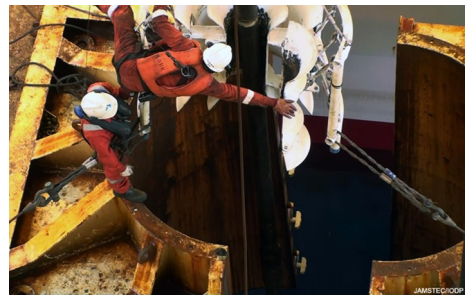
(1)在钻台甲板将脐带缆(铠装光电复合缆)与 VIT 系统连接并进行信号调试。

(2)操作脐带缆绞车,将 VIT 系统吊至井口,打开 VIT 框架导向装置侧门,使钻柱侧向进入导向筒,



(a) “决心号”VIT 系统

(图片来源:Richard Arculus,IODP)



(b) “地球号”VIT 系统

(图片来源:JAMSTEC/IODP)

图 11 VIT 系统下放准备工作

Fig.11 Preparation for VIT system deployment

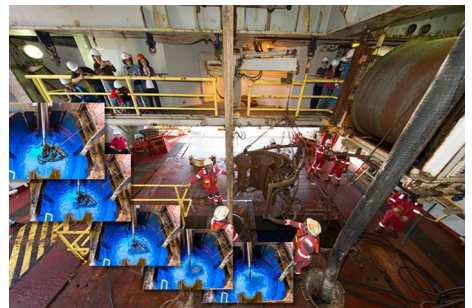


图 12 367 航次 VIT 系统下放

(图片来源:William Crawford, IODP JR50)

Fig.12 VIT system deployment on Leg 367

关闭侧门并插销锁紧。

(3)打开月池盖板,操作脐带缆绞车缓慢沿钻柱下放直至钻头附近,下放过程中开启绞车恒张力系统,避免电缆缠绕钻杆柱。

(4)VIT 系统沿钻柱下放到位后,通过甲板测控软件观察水下设备倾斜和方位状态、设备周围影像和离地高度,根据水下设备数据信息指导钻探船或钻柱驱动装置移动钻头进入重入锥,完成重入钻孔流程。

(5)重入钻孔完成后,操作脐带缆绞车将 VIT 系统提至甲板。

4 重入钻孔系统应用

“挑战者号”在 1970 年第 15 航次重入钻孔作业首次取得成功并被广泛认可后,1973 年第 30 和 34 航次共进行 4 次重入钻孔作业,然后重入系统装备被从船上卸载并对其进行重大改进。随后在第 37 航次中,共进行了 10 次重入,其中 332 站位重入 9 次,333 站位重入 1 次。设备再次卸载进行改进升级,为接下来的 DSDP/IODP 大洋钻探阶段做准备。从 1975 年 12 月第 45 航次开始到 1983 年 11 月,在 23 个不同的站位共进行了 146 次重入。到 DSDP 结束,成功进行了总计 160 次重入作业(见表 1),最大作业水深 5629 m^[33]。

表 1 “挑战者号”重入钻孔记录表
Table 1 Summary of reentries on “Challenger”

航次	站(孔)位	水深/m	重入次数
15	146	3939	2
30	288A	3030	2
34	319A	4296	1
34	320B	4487	1
37	332B	1841	9
37	333	1682	1
45/78B	395A	4485	13
46	396B	4465	7
47	398D	3900	2
48	400A	4399	1
50	415A	2817	3
50	416A	4203	9
51B/52	417D	5489	10
52/53	418A	5519	13
55	433C	1874	3
57	4388	1575	1
58	442B	4645	2
61/89	462A	5186	19
65	482D	3012	1
65	4838	3084	7
69	504A	3468	2
69/70/83/92	504B	3474	27
76	534A	4976	8
79	547B	3952	3
81	553	2339	2
88	581B	5478	2
91	5958	5629	3
92	597C	4145	2
93	603B	4644	4
合计			160

由“决心号”和“地球号”服役,DSDP 计划结束后的 1985 年至 2018 年间,大洋钻探船已在 70 多个不同的站位进行了重入钻孔操作,目前已实现的重入钻孔最大水深是 7960 m^[34]。重入钻孔系统已成为向海底深部钻进的重要利器,在未来的大洋钻探活动中将得到更加广泛的应用。

5 结语

“挑战者号”和“决心号”上搭载的重入钻孔系统和采用的重入方法,是经过大量实践验证的成熟可靠的重入钻孔技术。特别是“决心号”上的重入钻孔系统,是当前最先进的无隔水管深水钻进重入钻孔系统,值得我们在自主设计制造时学习和借鉴。

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^[7],重入钻孔系统作为大洋钻探船的关键配套设备之一,其自主设计及制造水平一定程度上决定着大洋钻探船的先进性。开展重入钻孔系统的研究应充分吸收现有深海钻探装备及器具的关键技术和成功经验,利用计算机模拟仿真技术、人工智能(AI)、虚拟现实(VR)等现代科技手段,提高重入钻孔系统的效率及可靠性。

参考文献(References):

- [1] 中国大洋发现计划办公室.大洋钻探五十年[M].上海:同济大学出版社,2018:2-3.
IODP—China Office. Fifty years of ocean drilling[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018:2-3.
- [2] 丁仲礼.中国大洋钻探二十年[J].科学通报,2018,63(36):3866-3867.
DING Zhongli. Twenty years of ocean drilling in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(36):3866-3867.
- [3] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望——回顾探矿工程事业 70 年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):27-28.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):27-28.
- [4] 汪品先.大洋钻探五十年:回顾与前瞻[J].科学通报,2018,63(36):3868.
WANG Pinxian. Fifty years of ocean drilling: review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(36):3868.
- [5] 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]. Chinese Geology, 2018,45(3):638-639.

“挑战者号”退役后,随后的大洋钻探计划主要

- [6] 拓守廷, 翦知潜. 科学大洋钻探船的回顾与展望[J]. 工程研究, 2016, 8(2): 155-158.
TUO Shouting, JIAN Zhimin. Scientific Ocean Drilling Vessels: review and prospect [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 155-158.
- [7] 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 projection China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2): 1-8.
- [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] 宁伏龙. 大洋科学钻探[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009: 232-234.
NING Fulong. Ocean scientific drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009: 232-234.
- [10] 翦知潜. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3877-3882.
JIAN Zhimin. Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China's participation in ocean drilling [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36): 3877-3882.
- [11] 张永勤, 李鑫森, 李小洋, 等. 冻土天然气水合物开采技术发展及海洋水合物开采技术方案研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 154-159.
ZHANG Yongqin, LI Xinmiao, LI Xiaoyang, et al. Technical progress of gas hydrate production in permafrost and research on oceanic gas hydrate production[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 154-159.
- [12] 赵尔信, 蔡家品, 贾美玲, 等. 我国海洋钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 43(9): 43-45.
ZHAO Erxin, CAI Jiapin, JIA Meiling, et al. Marine drilling technique in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 43(9): 43-45.
- [13] 杨磊, 秦升杰, 景春雷, 等. 我国大洋钻探船的建造需求和功能设计[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(2): 68-71, 85.
YANG Lei, QIN Shengjie, JING Chunlei, et al. Construction requirements and function design of China's ocean drilling vessels[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(2): 68-71, 85.
- [14] 刘成名, 李洛东, 韦斯俊. 大洋钻探计划与大洋钻探船[J]. 中国船检, 2018(8): 92-93.
LIU Chengming, LI Luodong, WEI Sijun. Ocean drilling program and ocean drilling ship[J]. China Ship Survey, 2018(8): 92-93.
- [15] Re-entry [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/trepts/TRNOTE_02.PDF.
- [16] 宋帅华. 地学革命的冲锋者——大洋钻探计划[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/Krqi8ocimXGBfl7p_UGlYw.
SONG Shuaihua. The leader of the geoscience revolution—the ocean drilling program[EB/OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/Krqi8ocimXGBfl7p_UGlYw.
- [17] Dynamic positioning [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/trepts/TRNOTE_03.PDF.
- [18] 乔迪斯·决心号大洋钻探船[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item>.
JOIDES Resolution [EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item>.
- [19] Barry W. Harding, 侯桂卿. 大洋科学钻探的技术开发[J]. 国外地质勘探技术, 1989(2): 5-8.
Barry W. Harding, HOU Guiqing. Technological development of ocean scientific drilling[J]. Foreign Geological Exploration Technology, 1989(2): 5-8.
- [20] Vibration Isolated Television (VIT) Frame [EB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/tools/index.html>.
- [21] 梁涛, 陈云龙, 赵义. “地球号”钻探船钻井系统介绍[C] // 中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社, 2019: 348-356.
LIANG Tao, CHEN Yunlong, ZHAO Yi. Introduction to the drilling system on “Chikyu” drilling vessel[C] // Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 348-356.
- [22] 刘淮. “地球”号深海钻探船[J]. 船舶工业技术信息, 2004(4): 38.
LIU Huai. “Chikyu” drilling ship[J]. Technology and Economy Information of Ship Buildings Industry, 2004(4): 38.
- [23] 田军, 拓守廷. 新十年科学大洋钻探——照亮地球的未来、现在和未来[J]. 自然杂志, 2015, 37(4): 241-242.
TIAN Jun, TUO Shouting. New decade scientific ocean drilling: Illuminating earth's past, present and future[J]. Chinese Journal of Nature, 2015, 37(4): 241-242.
- [24] Dynamic positioning [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/trepts/TRNOTE_03.PDF.
- [25] 栾锡武. “决心号”“弃船”事件[J]. 国土资源科普与文化, 2019(3): 55-56.
LUAN Xiwu. The “ship abandonment” incident of “JOIDES Resolution”[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2019(3): 55-56.
- [26] 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): 12-13.
ZHAO Yi, CAI Jiapin, RUAN Hailong, et al. Overview of ocean scientific drilling ships[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019, 20(3): 12-13.
- [27] 许靖华. 地学革命风云录[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 8-10.
XU Jinghua. Events in geoscience revolution [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 8-10.
- [28] Re-entry cone [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/tnotes/TNOTE_03.PDF.
- [29] Free fall funnel (FFF) [EB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/tools/index.html>.
- [30] Drill-in-casing system [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/tnotes/TNOTE_02.PDF.
- [31] Hard rock reentry system (HRRS) [EB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/tools/index.html>.
- [32] Reamers [EB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/tools/index.html>.
- [33] Operational technica achievements [EB/OL]. http://deepseadrilling.org/tnotes/TNOTE_06.PDF.
- [34] JOIDES Resolution [EB/OL]. <http://iodp.tamu.edu/tools/index.html>.