

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.209

引用格式: 熊亮, 李星辰, 谢文卫, 等. 我国深海科学钻探技术研究成果及进展[J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 29–39.
(Xiong L, Li X C, Xie W W, et al. Achievements and progress of deep-sea scientific drilling technology research in China[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 29–39.)

我国深海科学钻探技术研究成果及进展

熊亮^{1,2}, 李星辰^{1,2*}, 谢文卫^{1,2,3}, 于浩雨^{1,2}, 陈浩文³, 陈云龙⁴

(1. 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广东 广州 510075; 2. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000, 4. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 深海科学钻探是直接了解地球内部的关键手段, 大洋钻探计划(Ocean Drilling Project, ODP)的实施推动解决了一系列重大科学问题, 实现了工程技术和能源资源的重大突破, 开展深海科学钻探工程技术的研究对加快我国海洋能源资源勘探开发进程, 推动地球科学和海洋科学发展具有重要意义。通过全面总结国际深海科学钻探的工程技术成就, 系统梳理中国地质调查局实施“深海钻探技术与工程支撑”项目以来取得的成果, 结果显示: 项目开展深海科学钻探技术综合研究, 研发了系列水下工程技术装备, 完善了取心技术体系, 攻克了钻探事故预防与处理技术, 启动了超深井钻探关键技术预研究, 取得了一批创新成果和进展, 有力支撑了我国深海科学钻探技术体系的建立, 为促进地球系统科学研究提供了重要的技术装备支持。研究可为我国深海科学钻探技术的发展提供借鉴和参考。

关键词: 深海科学钻探; 取心; 水下工程技术; 高温高压; 护壁堵漏

中图分类号: P634; P715

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)01–0029–11

0 引言

深海科学钻探对于深入了解地球内部构造与演化、探索海底资源、研究海洋环境和气候变化、推动地球科学发展等具有至关重要的意义。国际深海科学钻探始于1968年由美国主导并组织实施的深海钻探计划(Deep Sea Drilling Project, DSDP), 之后该计划根据不同时期研究任务的调整几经更迭, 本轮正在执行的是国际大洋发现计划(International Ocean Discovery Program, IODP)。截至2023年5月, 该计划累计执行311个航次、1 768个站位, 施工4 124个钻孔, 进尺逾100万m, 取心达46万m, 并获取了大量科学数据, 取得了许多重大成果和辉煌成就, 引领了国际地球科学革命与创新发展^[1–3]。

我国的海洋钻探技术起步较晚, 截至2011年,

在深水钻探(水深>300 m)领域的进展仍是空白, 钻探作业水深超过300 m就需要租用国外钻探船, 取心工作量大、代价高, 严重威胁我国能源资源安全。我国南海蕴藏丰富的油气和天然气水合物资源, 早期的海洋调查工作基础薄弱, 缺乏深海动力定位钻探船、深水取样工具、深水钻机等。基于以上背景, 2019年4月国家发改委正式批复天然气水合物钻采船(大洋钻探船)项目可研。本文重点介绍近年来我国深海科学钻探技术研究成果及进展, 包括研发系列水下工程技术装备、研制深海钻探取心工具、攻克钻探事故预防与处理技术等。研究旨在为我国深海科学钻探技术的应用与发展提供借鉴与参考。

1 国际深海科学钻探工程成果

自1968年起, 美国先后投入“挑战者号”和

收稿日期: 2024–05–10; 修订日期: 2025–01–14。

基金项目: 国家重点研发计划“大洋科学钻探井下长期观测及原位取样关键技术(编号: 2024YFC2814300)”和中国地质调查局“深海钻探技术与工程支撑(编号: DD20190584)”项目联合资助。

第一作者简介: 熊亮(1983—), 男, 高级工程师, 主要从事深海钻探技术研究工作。Email: 36.8du@126.com。

通信作者简介: 李星辰(1993—), 男, 高级工程师, 主要从事深海钻探技术研究工作。Email: lixc17@mails.jlu.edu.cn。

“决心号”两艘钻探船从事海洋科学钻探,其钻探工作量占全球海洋科学钻探工作量的 94%。日本“地球号”钻探船于 2007 年投入运行,该船的排水量(57 000 t)远大于“决心号”(18 000 t),已完成 17 个海洋科学钻探航次,累计完成钻探进尺 46 407.95 m。此外,自 2013 年起,由欧洲国家成立的海洋科学钻探联合体

(European Consortium for Ocean Research Drilling, ECOED)按照不同的科学目标需求租用专业船舶,先后实施了 5 个海洋科学钻探航次,累计完成钻探进尺 7 340.96 m^[1]。截至 2023 年底,国际深海科学钻探 4 个阶段的钻探工作量统计见表 1,钻探工程方面取得的主要成果见表 2^[4]。

表 1 国际深海科学钻探 4 个阶段钻探工作量统计

Tab. 1 Statistics of the drilling workloads in the four phases of the international deep-sea scientific drilling								
钻探计划阶段	航次数/个	站位数/个	钻孔数/个	取心回次数/次	岩心总长度/m	平均岩心采取率/%	最大钻深/m	最大水深/m
DSDP(1968—1983 年)	96	624	1 053	19 119	97 056	57.1	1 741	7 044
ODP(1985—2003 年)	111	669	1 797	35 772	222 704	69.1	2 111	5 980
IODP(2003—2013 年)	54	250	649	12 094	66 306	80.2	3 059	6 929
IODP(2013—2023 年)	50	225	625	14 616	81 583	73.6	3 263	8 023
合计	311	1 768	4 124	81 601	467 649	—	—	—

注:“—”为无数据。

表 2 国际深海科学钻探工程成果

Tab. 2 Engineering achievements of the international deep-sea scientific drilling			
工程名称	记录数据	水深/m	主要内容
最大钻进施 工水深	8 023	8 023	“地球号”钻探船, IODP 第 386 航次 M0081 站位, 2021 年 5 月 14 日, 日本哈达尔海沟
最大重入钻 孔水深	6 928.5	6 928.5	“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	7 752.31	6 883.5	“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	3 262.5	1 939	“地球号”钻探船, IODP 第 358 航次, 2019 年 3 月 31 日, 日本南海海槽
最大洋底取 心深度	2 848.5	1 939	“地球号”钻探船, IODP 第 358 航次, 2019 年 3 月 31 日, 日本南海海槽
最大取心钻 进深度	7 734	6 889.5	“地球号”钻探船, IODP 第 343 航次, 2012 年 5 月 22 日, 日本八户市近海
最大基岩进 尺	1 841	3 474	印度洋钻孔 504B, 共钻进 7 个航次
最大重入钻 孔次数	98	3 474	印度洋钻孔 504B, 共钻进 7 个航次
最大隔水管 应用深度	2 054	2 054	“地球号”钻探船, IODP 第 319 航次, 2009 年 5 月至 8 月, 日本南海海槽

注:“记录数据”中,最大重入钻孔孔次数的单位为“次”,其他工程的单位为 m。

2 我国参与的国际深海科学钻探活动

1998 年,经国务院批准,我国首次以“参与成员国”身份正式加入大洋钻探计划(Ocean Drilling

Project, ODP)。2004 年,在科技部的大力支持和推动下,中国 IODP 委员会、专家委员会及办公室正式成立,同年顺利加入综合大洋钻探计划,2013 年继续加入国际大洋发现计划^[5]。1999 年春,我国科学家首次在南海设计并主持了 184 航次,之后又分别于 2014 年、2017 年和 2018 年主导实施了 IODP 349、367 和 368/368X 航次。自加入 ODP 以来,国内已有 38 家科研院所,共 140 余位科学家亲身参与了 ODP/IODP 航次^[6-9]。

美国和日本均拥有各自专属的大洋钻探船, ECOED 通过租用特定任务平台组织实施钻探航次,也顺利进入了深海科学钻探的“领导层”,而我国在国际深海科学钻探中处于“参与成员”角色,离“领导层”还有一定差距^[6-9]。目前我国已启动自主建造一艘天然气水合物钻采船,但要自主实施规模巨大的深海科学钻探工程,除了需要先进的大洋钻探船外,还需要配套的深海科学钻探技术,如先进的钻探器具、施工工艺等。

基于我国的海洋地质钻探技术现状,围绕深海钻探目标任务,中国地质调查局于 2019 年启动了“深海钻探技术与工程支撑”地质调查二级项目,并确立了五大目标任务:①开展深海钻探技术综合研究,分析国际大洋钻探存在的主要问题并针对性地提出解决思路;②研发深海科学钻探水下工程技术与装备,创建深海科学钻探水下技术装备体系;③研发深海科学钻探取心技术,完善深海科学钻探取心技术体系;④研发深海科学

钻探事故预防与处理技术,为深海科学钻探施工提供安全技术保障;⑤研究深海超深井钻探关键技术,启动未来深海超深井施工的关键技术攻关和准备。

3 我国深海科学钻探技术研究成果及进展

3.1 深海钻探技术综合研究

结合文献调研和实际工作情况,总结出国际深海科学钻探工程技术方面主要存在 4 个问题,并针对性地提出了相应解决方案。

(1)岩心采取率低。国际深海科学钻探的平均岩心采取率相对较低,特别是在非固结沉积层、松散砂砾层、软硬交互地层及硬岩破碎带地层等。据统计,4 124 个钻孔的平均岩心采取率只有 62.2%,远低于大陆科学钻探水平,基岩钻探岩心采取率则更低,89 个基岩钻孔的平均岩心采取率仅有 40.8%。提高岩心采取率的解决方案为改进取心钻具,如采用井底局部反循环方法减少对岩心的冲蚀,或采用井底驱动金刚石取心钻进。根据地层特性,采用润滑性更好、成膜性更强的钻井液,改善泥浆流变性,减少钻进对岩心的扰动。

(2)孔内事故频繁。导致孔内事故发生的主要原因是钻具(钻杆和钻头等)的断裂和破坏,通常受到钻进方法和地层条件两方面因素影响。若采用顶部驱动牙轮的钻头钻进,钻杆柱回转时,钻杆柱变形较大,容易发生疲劳断裂。此外,钻头工作稳定性较差,则导致钻头寿命短且取心效果差。如果因地层较破碎而导致孔壁稳定性较差,则更容易发生钻具折断和钻头损坏事故^[10],复杂地层孔壁破碎产生的掉块还会导致卡钻。由于钛合金钻杆具有强重比高、耐高温和抗腐蚀性强等优点,在钻进深度和钻柱寿命方面都优于钢钻杆,因此对于超深井可考虑应用钛合金钻杆。可以同时开展不同钻杆级配优化组合研究,进一步提升钻杆柱的安全性和应用深度。

(3)开路钻进模式弊端多。出于经济角度考虑,国际深海科学钻探以无隔水管开路钻进为主(超总工作量的 98%)^[10],即以海水为冲洗液,不进行泥浆循环,易造成钻孔失稳坍塌,导致卡埋钻事故。解决思路为针对开路钻进的弊端,开发无隔水管泥浆回收(riserless mud recovery,RMR)钻井技

术,实现开路钻进条件下的泥浆循环利用,降低钻井作业的成本和施工风险。

(4)作业效率低而成本高。大洋钻探船(平台)运行费用高,如“地球号”日费约 40~50 万美元^[8-9]。目前隔水管技术应用的最大水深达 3 000 m,但隔水管作业程序复杂、效率低、施工成本高、周期长,遇到恶劣海况需要应急解脱等措施,作业风险也较高。解决思路为进一步提高钻探作业效率,降低作业成本,提高钻井系统可靠性,减少故障率,提高机械钻速和起下钻速度,增强钻探系统的升沉补偿效果,降低系统购置成本。

3.2 系列水下工程技术与装备研发

针对深海科学钻探无隔水管开路钻进泥浆消耗量大且成本高、破坏海洋生态环境、遇到复杂地层钻孔难以向深部延伸、重入钻孔频率高、下套管作业难度大且风险高等一系列技术难题,配套研发了系列水下工程技术装备,为深海科学钻探工程的实施提供了系统解决方案和关键技术装备。

3.2.1 无隔水管泥浆回收钻井技术

无隔水管泥浆回收钻井技术可实现深海科学钻探下部小井眼开路钻进泥浆的回收利用,提升深海科学钻探的安全性、环保性和经济性^[11],实现泥浆“零排放”,降低泥浆和录井成本及浅层作业风险,这些优势在深海科学钻探领域尤为明显。全球油气领域应用无隔水管泥浆回收钻井技术的情况见表 3。

表 3 无隔水管泥浆回收钻井技术应用
Tab.3 Application of RMR drilling technology

应用地区	井眼数量/口	应用水深/m	应用时间
北海	35	85~430	2004—2009 年
里海	34	152	2004 年
澳大利亚	24	47~306	2006—2009 年
巴伦支海	7	76~350	2006—2009 年
地中海	7	85~108	2007—2008 年
南中国海	1	1 419	2008 年
墨西哥湾	1	620	2009 年
挪威周边海域	53	65~925	2004—2013 年
英国周边海域	9	85~600	2006—2013 年
加拿大周边海域	16	120	2010—2013 年

2021 年,中国地质调查局广州海洋地质调查局联合中国地质科学院勘探技术研究所自主研发了国内首套 400 m 级无隔水管泥浆回收系统(图 1),攻克了海底基盘搭载、泥浆闭路循环、泥浆液位自动控制、长距离变频驱动四大关键技术,有效解决了隔水管钻井成本高、泥浆循环压力大及无隔水管

钻井中泥浆消耗量大、海水污染等诸多难题,实现了核心装备完全国产化^[12]。2022 年年初,“海洋地质十号”船搭载该系统在南海北部 5 个站位(最大试验水深 384.7 m)开展不同工况条件下的泥浆回收试验,通过不断优化系统参数,完善作业流程,已形成一套 400 m 级无隔水管泥浆回收钻井工艺,为海洋无隔水管钻井提供了一套安全、环保、高效的解决方案,实现了我国在海洋钻探无隔水管泥浆回收技术领域“从 0 到 1”的突破。

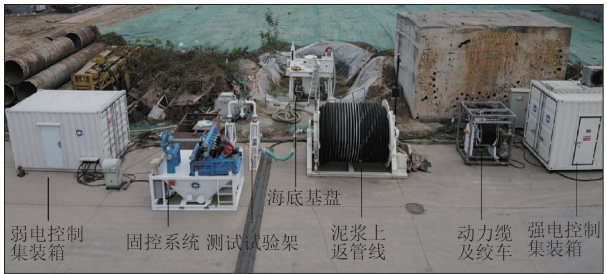


图 1 400 m 级无隔水管泥浆回收系统
Fig.1 RMR system at the 400 m level

3.2.2 钻具重入钻孔技术与随钻扩孔下套管系统

深海科学钻探开路钻进离不开钻具重入钻孔技术^[3],该技术不仅被用于辅助钻头(具)重新进入钻孔,还可以在海底孔口处留下永久性标记,未来如有需要可继续重返钻孔并进一步深钻、取心(样)或安装海底观测站等。

基于钻深 11 000 m 的深海钻探目标,考虑到重入作业频繁,时效与精度要求高等特点,通过经济技术合理性对比,首选水下电视重入钻孔技术。水下电视重入钻孔技术装备由防震水下电视(vibration isolated television, VIT)与重入锥套管组件(re-entry cone and casing, RECC)两个子系统组成(图 2)。VIT 的组件主要包括:深海照明灯、标清型黑白测距照相机、高清型彩色摄像机、平移及倾斜装置、遥控测量系统、单轴光纤陀螺仪、声呐探头、脐带缆、辅助重入推进器等。

广州海洋地质调查局研发的随钻扩孔下套管系统由内外两套管(杆)柱组成(图 3),其中内管柱包括先导钻头、接头、张敛式/双心扩孔器、泥浆马达、钻杆柱、套管送入工具等,外管柱包括套管靴、套管柱、防沉泥垫、套管挂、标准重返锥等。该技术通过配套泥浆马达、套管送入工具等装备,只需“一趟钻”即可完成钻进、扩孔及随钻下套管,既提高效率缩短了工期,又较好地解决了复杂地层采用

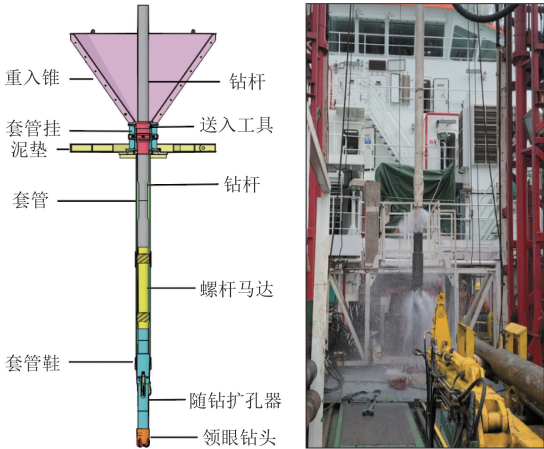


(a) 防震水下电视



(b) 海试情况
图 2 钻具重入钻孔技术

Fig.2 Drill string re-entry technology



(a) 原理图
(b) 海试情况
图 3 随钻扩孔下套管技术

Fig.3 Casing running technology with reaming while drilling

常规方法下套管风险高的问题,为深部钻进取心提供了安全技术保障。

3.3 取心技术体系

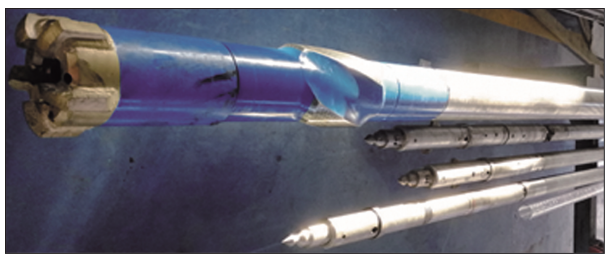
绳索取心可大幅减少起下钻次数和辅助作业时间,尤其适用于深海科学钻探。实践证明没有一种钻具足以应付所有地层情况,开展深海钻探作业时需针对不同地层选用合适的取心钻具,以满足高质量、高岩心采取率的要求。

3.3.1 常规多功能取心钻具

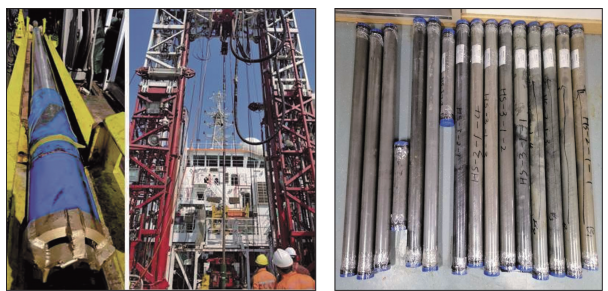
考虑海洋钻探的特殊性,为了操作简便并提高

工作效率,通用外管总成 (bottom hole assembly, BHA)需要兼容针对软地层至超硬地层的 3 种不同取心钻具和全面中心钻头。因此,设计采用相同尺寸的座环并实现多种内钻具的高效互换,最终可实现一次下钻高效完成不同地层取心的目的^[13]。通用外管总成总长 11.7 m,钻头(配外管总成)规格为 $\phi 215\text{ mm}/\phi 101.6\text{ mm}$,外管总成内外径规格为 $\phi 180\text{ mm}/\phi 104.8\text{ mm}$,适配钻杆规格为 $\phi 127\text{ mm}$ 、 $\phi 140\text{ mm}$ 。

常规多功能取心钻具包括水压活塞取心钻具、超前伸缩取心钻具、硬岩回转取心钻具、全面中心钻头钻具等(图 4)。海试情况显示,水压活塞取心钻具平均岩心采取率为 94.89%,伸缩式取心钻具平均岩心采取率为 69.73%,均满足海洋地质取样规程要求。



(a) 多功能取心钻具



(b) 海试情况 (c) 岩心样品

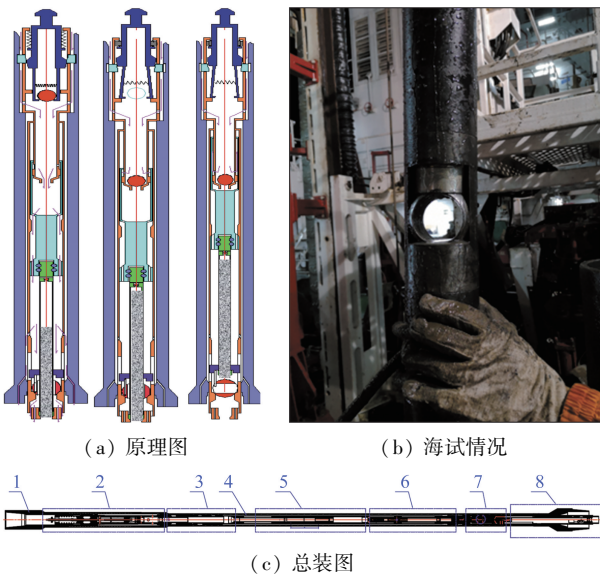
图 4 多功能取心钻具

Fig.4 Multifunctional coring drilling tools

3.3.2 天然气水合物保压取心钻具

保压取心钻具是天然气水合物取心的关键技术装备之一,主要由 8 个机构组成(图 5),包括:外管总成、锁紧限位机构、快接机构、内管总成、启动机构、蓄能机构、歧管机构和球阀机构^[14]。

通过多次试验及结构优化改进,保压取心钻具各机构的动作可靠性不断提高,目前底部球阀翻转成功率可达 70% 以上,保压能力得到有效提升。



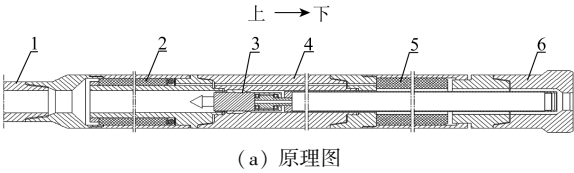
1. 外管总成; 2. 锁紧限位机构; 3. 快接机构; 4. 内管总成; 5. 启动机构; 6. 蓄能机构; 7. 歧管机构; 8. 球阀机构

图 5 保压取心钻具

Fig.5 Pressure coring drilling tools

3.3.3 中空井底动力液动锤取心钻具

海洋钻探中的硬岩钻进取心是世界性技术难题,硬岩钻进通常要求钻进速度快、钻头使用寿命长、岩心采取率高^[15],为解决这一系列技术难题,研发了中空井底动力液动锤取心钻具(图 6)。该



(a) 原理图



(b) 试验情况 (c) 岩心样品

1. 绳索取心钻杆接头; 2. 孔底马达(涡轮钻具); 3. 取心钻具外、内总成; 4. 悬挂外管; 5. 液动冲击器; 6. 取心钻头

图 6 中空井底动力液动锤取心钻具

Fig.6 Hollow bottom-hole powered hydraulic hammer coring drilling tools

钻具采用集成式中空涡轮钻具、中空液动锤及内总成“三合一”结构,在相同尺寸的井眼内采用相同排量,实现涡轮钻具与液动锤工作效率的最大化,可有效提高钻具的回转扭矩和冲击功,配合金刚石取心钻头可大幅提高钻进效率和岩心质量^[16]。

在雄安某地热井 2 300 m 深度应用中空井底马达液动锤取心钻具,岩心采取率达 95.78%,远超同类地层采用的常规金刚石绳索取心工艺。

3.3.4 气举反循环连续取心(样)钻进技术

气举反循环连续取心(样)钻进技术是一种通过压缩空气驱动冲洗液,从钻杆柱内通道携带岩屑及岩心(样)上返至钻台的新型取心(样)钻进技术^[17]。该技术的主要优势有:①采用开路钻进方式可实时获取来自海底地层的连续实物信息(固体、流体),判层及时准确;②该技术配套简单,与常规钻进工艺转换方便;③钻进取心效率高,特别是硬岩钻进优势更加明显。

通过多次陆地试验及结构优化改进,目前该技术应用深度已突破 2 200 m,岩心长度及完整性显著提高,实现了在破碎灰岩地层的反循环连续取心。应用 $\phi 311$ mm 牙轮取心钻头,获取岩心直径为 60~67 mm,单体岩心长度为 20~180 mm,平均岩心采取率为 85%^[13](图 7)。



图 7 反循环取心情况

Fig.7 Reverse circulation coring situation

3.4 钻探事故预防与处理技术

针对深海钻探事故频发的问题,研究了钻探事故预防与处理技术,主要包括树脂凝胶护壁技术、膨胀套管护壁技术等,对于无法挽救的事故钻孔,配套研发事故处理技术装备,为深海钻探安全作业保驾护航。

3.4.1 护壁堵漏树脂凝胶体系

由于硬岩破碎带地层裂隙发育,易出现钻孔漏

失,常规的桥塞、注水泥浆等护壁技术在破碎带地层往往很难奏效。此外,深海钻探作业条件恶劣,地层压力大、温度高,进一步增加了施工难度^[18]。树脂凝胶具有交联时间可控、胶结强度高、抗扰动能力强、适应地层范围广等优点,在钻探护壁堵漏领域得到了越来越广泛的应用。

按照正交实验法开展了抗高温树脂凝胶组成配方设计,以评价不同加量的悬浮剂、交联剂、成胶剂和堵漏剂等对树脂凝胶堵漏剂性能的综合影响。实验结果表明,抗高温树脂凝胶最佳配方为“10% 悬浮剂 A + 1.5% 交联剂 B + 10% 成胶剂 C + 12% 堵漏剂 D”。

通过在山东某金属矿区破碎带地层开展现场护壁堵漏试验(图 8),在钻穿破碎带地层后注入树脂凝胶浆液,候凝 48 h 后继续下钻扫孔钻进,泥浆循环恢复正常,堵漏材料强度满足施工要求,堵漏效果良好。



图 8 现场配置堵漏树脂凝胶浆液

Fig.8 On-site preparation of leakage plugging resin gel slurry

3.4.2 膨胀套管护壁技术

膨胀套管护壁技术是挽救事故钻孔的有效手段,该技术能够有效地封隔事故孔段且不增加孔径,进行护壁后可采用原规格钻头继续钻进。根据深海科学钻探护壁技术需求,分别从膨胀套管的材质优选、膨胀管成型、下入工艺、送入工具、扩孔器设计等方面开展系统研究,着力攻克了低温套管膨胀、高压管壁疏导、悬挂介质优选、耐高压低应力套管焊接等关键核心技术^[19]。

根据技术需求,通过综合对比截面形式、可加工性、实际加工难度及模具设计成本等,最终将成型的膨胀管截面设计为 6 瓣梅花形(图 9(a))。在膨胀套管护壁原理性试验(图 9(b))和孔口功能性试验的基础上,成功完成单次连续 30 m 长距离的膨胀套管护壁试验(图 9(c)),从裸孔段扩孔、膨胀套管送入、多焊道现场对接、液压膨胀到切头去尾,

对大尺寸、长距离膨胀套管护壁技术进行了全面验证。膨胀后套管内通径达 241 mm,悬挂承载能力超 15 t,膨胀套管首尾部分顺利回收,各参数指标符合预期,为挽救事故钻孔提供了一种有效的解决手段。

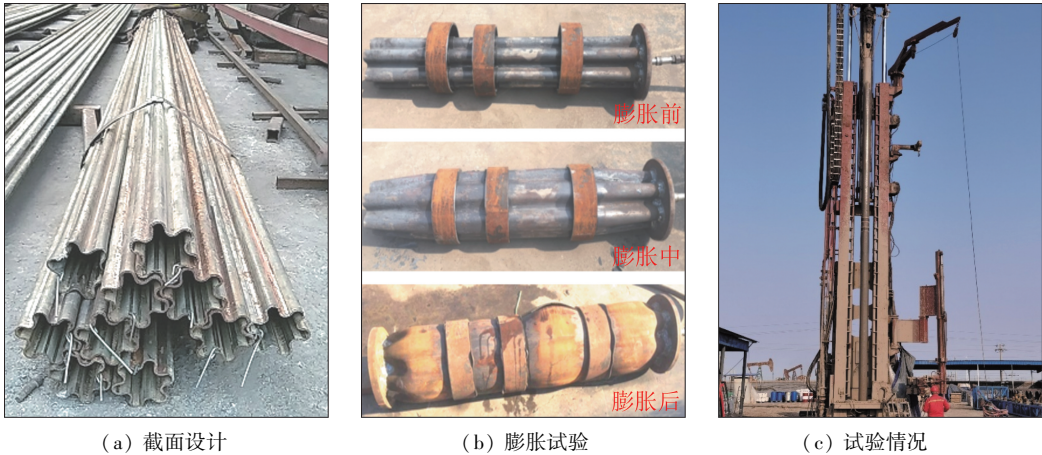


图 9 膨胀套管膨胀护壁试验

Fig. 9 Expansion and wall protection test of expandable casing

3.4.3 事故处理工具

为提升事故预防与应急处理能力,解决深海科学钻探卡钻、埋钻事故,实现快速处理,配套研发了割捞一体打捞器等事故处理工具。

割捞一体打捞器是一种可以在打捞的同时传递扭矩的新型打捞工具。配合水力割刀和机械割刀使用,一趟钻完成切割和打捞作业。配合钻机补偿功能,可解决海上作业时波浪升沉导致工具不能固定切割位置等问题。研发的割捞一体打捞器 LM-TM50 工具(图 10)规格为 $\phi 98$ mm,水眼 $\phi 31.8$ mm,打捞落鱼内径规格为 $\phi 121$ mm,许用拉力为 30 kN,适用水深 $\leq 3\,500$ m。

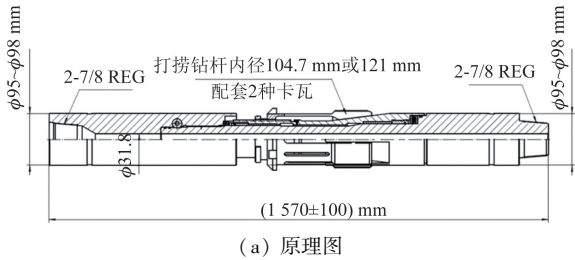


图 10 割捞一体打捞器

Fig. 10 Integrated cutting and fishing tool

水力割刀被用于切割井下钻杆,其原理是依靠泥浆推动刀头伸出,并在钻杆驱动下回转切割事故钻杆。在应用于海洋钻探时,该装置需要配合割捞一体打捞器或伸缩短节使用。研发的 ND-S140 机械式内割刀工具(图 11)接头规格为 $\phi 98$ mm,水眼规格为 $\phi 32$ mm,切割管柱规格为 $\phi 140$ mm,许用拉力为 400 kN,许用扭矩为 5 kN·m。

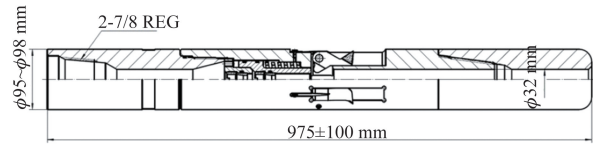


图 11 ND-S140 机械式内割刀工具示意图

Fig. 11 Schematic diagram of ND-S140 mechanical internal cutter tools

3.5 深海超深井钻探关键技术

深海超深井钻探面临的突出难题是高温高压环境,对于深度 11 000 m 的超深井,理论上地层温度将达到 260 ℃,压力甚至会超过 130 MPa,这对钻探器具和泥浆材料提出了极大挑战,而目前市面上的钻孔测量仪器无法同时满足温度和压力的应用环境要求。随着无隔水管泥浆回收钻井技术的不断发展进步,需要开展海洋高温钻井液体系研发,为解决高温条件下的井漏问题,需对高温堵漏材料开展系统研究。

3.5.1 高温高压测斜仪

钻孔测量是钻探工程的重要工作之一,在检测钻孔质量及实施定向钻进等方面起着重要作用。通过测斜数据能够准确掌握孔内钻具的姿态和钻孔轨迹的走向,测斜仪是测量钻孔倾角和方位角的

核心工具。

研发的深海型高温高压测斜仪(图 12(a))主要由承压外管、无磁真空隔热管、测温测压测斜探管等组成^[20-21]。室内试验(图 12(b))时将高温高

压测斜仪试验样机(带压力温度传感器)置于高温高压测试井中,通过高压柱塞泵提供压力环境,利用循环加热硅油系统对测试井进行加热加压,从而获得所需的温度压力条件。

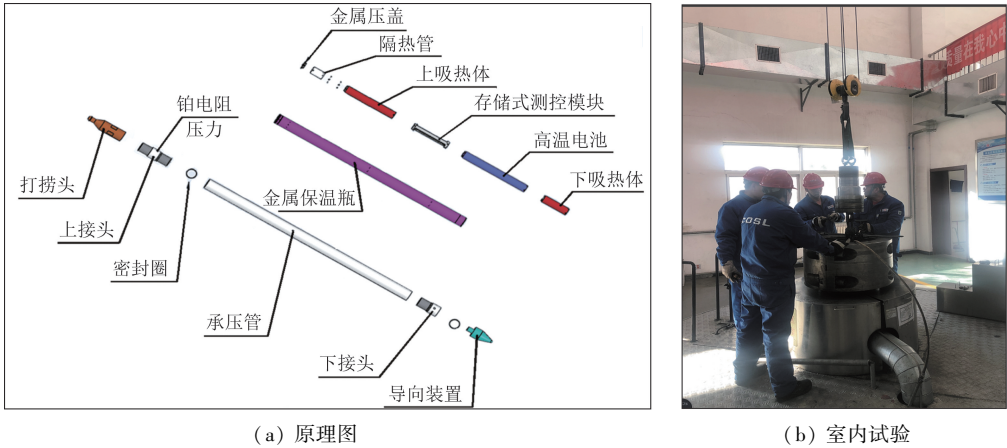


图 12 高温高压测斜仪
Fig. 12 High – temperature and high – pressure inclinometer

试验结果表明(图 13),该仪器顺利通过第三方耐温 255 ℃、承压 130 MPa 的双重环境条件测试。样机在青海共和干热岩井中先后完成 3 次入井试验,测量作业方便,测量数据可靠、精度高,为深海超深井钻探温度、压力及孔斜等多参数的综合测量提供了技术支撑和装备保障。

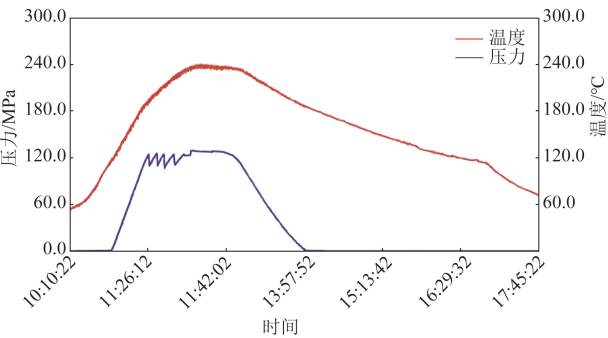


图 13 温度压力测试曲线

Fig. 13 Temperature and pressure testing curves

3.5.2 海洋高温钻井液体系

随着无隔水管泥浆回收钻井技术的不断发展,

需研发适合深海超深井钻探应用的海水基高温钻井液体系。

首先,采用单因素法对海水基钻井液各处理剂进行优选,筛选出性能最佳的造浆材料、抗温抗盐降滤失剂与增黏剂、高温防塌剂与稳定剂等。之后,在单因素优选组分的基础上,采用正交实验法进一步优化海水基钻井液体系配方。通过对表观黏度、滤失量、高温高压(high temperature high pressure, HTHP) 滤失量等正交实验参数进行极差分析,找出最优组合。最终,优选出耐 230 ℃ 高温海水基钻井液配方,即“海水 + 1% 氢氧化钠 + 3.5% 钠膨润土 + 2.5% 抗盐黏土 + 1% 高温降滤失剂 DDP + 1.5% 聚合物降滤失剂 GSP - 1 + 3% 高温降黏降滤失剂 GSO + 3% 耐 230℃ 高温无荧光防塌剂 GPC - 230 + 5% 高温稳定剂 WTD - 1 + 重晶石粉”^[22]。

对该配方钻井液开展了 230 ℃ 高温老化 16 h 前后性能的对比实验,结果见表 4。该配方首次将国内海水基钻井液的耐温能力由 200 ℃ 提升至 230 ℃,进一步拓宽了我国大洋超深钻探的选址范围。

表 4 最佳耐 230 ℃ 高温海水钻井液配方的性能

Tab. 4 Performance of the optimal drilling fluid formula resistant to high – temperature seawater at 230 ℃

实验条件	密度/(g · cm ⁻³)	表观黏度/mPa · s	黏度恢复值/%	动塑比	静切力	压滤失量/mL	HTHP 滤失量/mL
常温	1.1	48.5	—	0.44	2/7	4.8	—
230 ℃ × 16 h	1.1	60.0	—	0.59	3/4	7.2	24
常温	1.3	65.0	—	0.52	3.5/10	3.6	—
230 ℃ × 16 h	1.3	76.5	—	0.45	3.5/6.5	6.0	18

续表

实验条件	密度/(g·cm ⁻³)	表观黏度/mPa·s	黏度恢复值/%	动塑比	静切力	压滤失量/mL	HTHP 滤失量/mL
常温	1.5	88.5	86.1	0.41	5/13.5	2.8	—
230 ℃ ×16 h	1.5	93.0	86.1	0.49	6/11.5	4.8	18
指标要求 230 ℃ ×16 h	≤1.5	—	≥70	—	—	≤15	≤35

注：“—”为无数据。

3.5.3 高温护壁堵漏材料及工艺

当海洋钻探遇到浅部地层漏失时,通常会利用海水顶漏钻进并快速通过,之后下套管或注水泥封固。对于裂隙、溶洞等引起的漏失,可采用堵漏剂封堵;对于因工程因素造成的漏失,往往通过改进施工工艺解决,如严格控制起下钻速度、降低泥浆排量、调节泥浆性能等;对于因压井、试压或加重泥浆引起的压裂性漏失,则要通过下套管进行地层封隔^[23]。

根据高温堵漏需求设计的堵漏配方包括刚性颗粒、弹性自适应颗粒、拉筋剂、片状材料、悬浮剂和填充剂(表 5)。通过室内实验及配方调整,完成微漏及小漏 1 mm 裂缝堵漏材料配方的优选,通过高温堵漏仪器检验,可达到对小漏裂缝的封堵,在260 ℃ 高温条件下,由 10% 浓度的堵漏材料形成的封堵隔墙承压可达 11 MPa。中型漏失(裂缝宽度 2~4 mm)高温堵漏材料配方设计实验表明,加量约 10% 即可完成对大裂缝的架桥封堵,承压可达 10 MPa。较大漏失(裂缝宽度达 5 mm)情况下的高温堵漏材料配方设计^[24]实验表明(表 5),加量约 10% 即可完成对大裂缝的架桥封堵,承压可达 10 MPa。

表 5 高温堵漏材料配方

Tab. 5 Formulas of high-temperature leakage plugging materials

材料	小型漏失		中型漏失		大型漏失	
	级配/目	比例/%	级配/目	比例/%	级配/目	比例/%
刚性颗粒	16~60	39.0	7~40	38.0	4~16	47.0
弹性颗粒	20~40	8.0	20~40	16.0	20~40	9.0
拉筋剂	50	13.0	—	9.5	—	11.5
填塞剂	片状材料	7.0	—	7.5	—	8.0
悬浮剂	—	3.0	—	5.0	—	5.0
填充剂	—	30.0	—	24.0	—	19.5

注：“—”为无数据。

4 结论

(1)我国深海科学钻探技术研究起步较晚,随

着天然气水合物钻采船即将建成服役,迫切需要研发配套的先进深海钻探技术与装备。中国地质调查局自 2019 年启动实施“深海钻探技术与工程支撑”地质调查二级项目以来,通过对深海科学钻探工程技术进行全方位、系统化研究,开展了深海科学钻探技术综合研究,研发了系列水下工程技术装备,完善了取心技术体系,攻克了钻探事故预防与处理技术,启动了超深井钻探关键技术预研究,取得了一批创新成果和进展,有力支撑了我国深海科学钻探技术体系的建立,为促进地球系统科学研究提供了重要的技术装备支持。

(2)下一步工作要继续围绕天然气水合物钻采船的未来工程需求,开展深海科学钻探技术研发,重点开展无隔水管泥浆回收钻井、高质量取心、安全高效钻进、钻探事故预防与处理等关键核心技术研发,推进深海钻探关键核心技术装备国产化,进一步提升我国实施大洋科学深钻的能力,为促进地球系统科学研究提供有力的技术与装备支持。

参考文献(References):

[1] 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 J L,Zhang W,Xie W W. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling),2019,46(2):1-8.

[2] 王成善,冯志强,吴河勇,等. 中国白垩纪大陆科学钻探工程:松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报,2008,82(1):9-20.
Wang C S,Feng Z Q,Wu H Y,et al. Preliminary achievement of the Chinese cretaceous continental scientific drilling project - SK-1[J]. Acta Geologica Sinica,2008,82(1):9-20.

[3] 宋刚,崔淑英,谢文卫,等. 钻孔重入与跟管钻进技术研究与应用[J]. 海洋地质前沿,2022,38(7):75-85.
Song G,Cui S Y,Xie W W,et al. Research and application of re-entry cone and drilling-in casing[J]. Marine Geology Frontiers,2022,38(7):75-85.

[4] 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 L,Xie W W,Lu Q P,et al. Optimization and design approach for deep-sea drilling well reentry technology in China[J]. Explo-

- ration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7):1-7.
- [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 Y, Cai J P, Ruan H L, et al. Overview of ocean scientific drilling vessels [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019, 20(3):11-14.
- [6] 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 P X. Fifty years of scientific ocean drilling: review and prospect [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3868-3876.
- [7] 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 P X. China's participation in the ocean drilling program: decade retrospect and future prospect [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3):322-326.
- [8] 翦知湔. 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 Z M. 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.
- [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 P X. Towards the new decade of ocean drilling: Preparing its science plan [J]. Advances in Earth Science, 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 L, Xie W W, Yu Y J, et al. Key technology of drill in casing in ocean drilling [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(3):74-80.
- [11] 王偲, 谢文卫, 张伟, 等. RMR 技术在海域天然气水合物钻探中的适应性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(2):17-23.
- Wang C, Xie W W, Zhang W, et al. Adaptability of RMR for marine gas hydrate drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(2):17-23.
- [12] 陈浩文, 于彦江, 王艳丽, 等. 气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(2):9-15.
- Chen H W, Yu Y J, Wang Y L, et al. Feasibility analysis of gas lift technology for application in deep-sea riserless mud recovery drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):9-15.
- [13] 刘协鲁, 阮海龙, 陈云龙, 等. 国内常规海洋地质钻探取心技术进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(3):113-117.
- Liu X L, Ruan H L, Chen Y L, et al. Progress in domestic conventional marine geological coring technology [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):113-117.
- [14] 黄柳松, 卢春华, 赵慧斌, 等. 天然气水合物样品带压转移装置的抓捕机构设计[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):34-40.
- Huang L S, Lu C H, Zhao H B, et al. Capture mechanism design for the pressure transfer device for gas hydrate samples [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):34-40.
- [15] 成海, 郑卫建, 夏彬, 等. 国内外涡轮钻具钻井技术及其发展趋势[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(4):28-31.
- Cheng H, Zheng W J, Xia B, et al. The development trend of turbo-drilling technology [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(4):28-31.
- [16] 谢文卫. 科学钻探深孔钻进用液动潜孔锤研究[R]. 河北省: 中国地质科学院勘探技术研究所, 2008.
- Xie W W. Research on Hydraulic Downhole Hammer for Scientific Drilling of Deep Holes [R]. Hebei Province: Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [17] 殷国乐, 王艳丽, 陈浩文, 等. 气举反循环连续取心工艺探索[J]. 钻探工程, 2022, 49(2):22-29.
- Yin G Y, Wang Y L, Chen H W, et al. Air lift reverse circulation continuous coring technology [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2):22-29.
- [18] 彭博一, 于培志. 破碎带地层钻探化学凝胶护壁堵漏技术的研究与应用[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):64-71.
- Peng B Y, Yu P Z. Research and application of chemical gel wall protection and plugging technology in fractured zone formation drilling [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):64-71.
- [19] 崔淑英, 宋刚, 田英英, 等. 扩张式随钻扩孔器扩孔机构流场分析与优化[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):25-33.
- Cui S Y, Song G, Tian Y Y, et al. Flow field analysis and optimization for the reaming mechanism of the expandable underreamer [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):25-33.
- [20] 周策, 罗光强, 李忠, 等. 深海钻探大深度超高温测斜仪的研制[J]. 西部探矿工程, 2020, 32(8):87-90, 94.
- Zhou C, Luo G Q, Li Z, et al. Development of ultra-high temperature inclinometer for deep-sea drilling at large depth [J]. West-China Exploration Engineering, 2020, 32(8):87-90, 94.
- [21] 李忠, 赵燕来, 罗光强. 存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(2):35-41.
- Li Z, Zhao Y L, Luo G Q. Development and application of storage high temperature and high pressure borehole thermometer [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):35-41.
- [22] 邹志飞, 熊正强, 李晓东, 等. 耐 230℃ 高温海水钻井液室内实验研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):49-56.
- Zou Z F, Xiong Z Q, Li X D, et al. Laboratory research on 230℃ high temperature-resistant seawater-based drilling fluids [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):49-56.
- [23] 严君凤, 吴金生, 蒋炳, 等. 高温高压堵漏评价仪器的研制[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(2):212-217.
- Yan J F, Wu J S, Jiang B, et al. Development of a device for evaluating lost circulation materials at high temperature high pressure [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(2):212-217.
- [24] 蒋炳, 严君凤, 张统得. HTD-3 型高温堵漏材料研制及性能评价[J]. 钻探工程, 2022, 49(1):57-63.
- Jiang B, Yan J F, Zhang T D. Development and performance evaluation of HTD-3 high temperature plugging material [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1):57-63.

Achievements and progress of deep – sea scientific drilling technology research in China

XIONG Liang^{1,2}, LI Xingchen^{1,2}, XIE Wenwei^{1,2,3}, YU Haoyu^{1,2}, CHEN Haowen³, CHEN Yunlong⁴

(1. *National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou Guangdong 510075, China*; 2. *Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510075, China*; 3. *Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang Hebei 065000, China*; 4. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China*)

Abstract: Deep – sea scientific drilling is the key approach to investigate the earth’s interior. Ocean Drilling Project (ODP) has promoted the settlement of critical technical problems, and achieved the breakthrough of engineering technology and energy resources. The engineering technology research of deep – sea scientific drilling is of great significance for the exploration and exploitation progress of marine energy resources, and for the promotion of earth sciences and marine sciences of China. The engineering technology achievements of international deep – sea scientific drilling were summarized in this paper, and the achievements of deep – sea drilling technology and engineering support project by China Geological Survey were sorted. The research results show that comprehensive research of deep – sea scientific drilling technology were carried out, and a series of deep – sea drilling underwater engineering technology and equipment were developed. The drilling coring technology system was improved, and the drilling accident prevention and treatment technology was obtained. Besides, pre – research on key technologies for deep – sea ultra – deep well drilling was initiated, and a number of innovative research results and progress were obtained. These achievements have strongly supported the establishment of China’s deep – sea drilling engineering technology system, and provided strong technical and equipment support for promoting earth system scientific research, which could provide references and guidance for deep – sea scientific drilling technology in China.

Keywords: deep – sea scientific drilling; coring; underwater engineering technology ; high temperature and high pressure; wall protection and leakage plugging

(责任编辑: 魏昊明)