

深海钻探技术现状及发展动态

宁波¹, 沙志彬^{1*}, 李晶¹, 宋刚², 陈云龙³, 金雪梅¹

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州, 511458

2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊, 065000;

3. 北京探矿工程研究所, 北京, 100083

摘要: 在过去六十年, 通过一系列深海钻探计划的实施, 使我们对地球和海洋的认识取得了显著进步。本文通过回顾深海钻探技术的发展和演化历程, 探讨了动力定位、钻柱升沉补偿、钻孔重返、深水条件的泥浆循环以及各类型岩心采集等关键技术对深海钻探的支撑作用, 结合我国在深海钻探技术攻关方面的战略部署, 对在钻探试验航次中的使用情况以及在此过程中获得的科学经验和教训进行总结, 同时基于“梦想”号大洋钻探船, 提出了人工智能辅助、深海耐高温高压材料、高精度探测及高速通讯的深海钻探技术的重点发展方向, 旨在为后续深海钻探技术研究和应用提供参考依据。

关键词: 深海钻探; 钻孔重返; 升沉补偿; 泥浆循环; 取芯系统; 钻探船

中图分类号: P744 **收稿日期:** 2025-08-05

The development status and development trends of deep-sea drilling technology

Bo Ning¹, Zhibin Sha¹, Jing Li¹, Gang Song², Yunlong Chen³, Xuemei Jin¹

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 511458, China;

2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang, 065000, China

3. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing, 100083, China

Abstract: Over the past 60 years, the implementation of a series of deep-sea drilling programs has yielded remarkable advancements in our understanding of the Earth and oceans. This paper reviews the evolution of deep-sea drilling technology, examining key techniques such as dynamic positioning, heave compensation for drill strings, borehole re-entry, mud circulation systems under deep-water conditions, and various rock coring methods. Aligning with China's strategic initiatives to tackle deep-sea drilling challenges, the paper summarizes the application of these technologies during trial voyages and the scientific insights gained. Drawing upon the "Mengxiang" ocean drilling vessel, key development areas have been identified for deep-sea drilling technology, encompassing AI-assisted operations, materials resistant to high temperatures and pressures in the deep sea, high-precision detection, and high-speed communication, offering a valuable reference for future research and application in deep-sea drilling technology.

Keywords: Deep-Sea Drilling; Borehole Return; Heave Compensation; Mud Circulation; Coring System; Drilling Vessels

0 引言

海洋是地球不同圈层物质和能量交换的关键载体, 即是地球内外动力地质作用的交融地,

基金项目: 国家重点研发计划项目“深海钻井泥浆回收安全应急关键装备研发”(编号 2023YFC2813101); 中国地质调查局“天然气水合物钻探技术支撑”(编号 DD20230066) 和“深海科学与工程试验”(编号 DD20242659)

作者简介: 宁波(1985-), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为深海钻探与海洋能源, ORCID: 0000-0002-1982-7257. E-mail: 15022401058@139.com

通讯作者: 沙志彬(1972-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为天然气水合物资源勘察与研究, E-mail: shazb2008@163.com

也是不同来源物质的汇集地，地球漫长的地质演化过程都被深海沉积物所记录，深海始终是地球科学创新的源泉(中国大洋发现计划办公室 等, 2018)，通过深海科学钻探获取岩心，对认知地球生命起源、探索生物多样性、揭示地质灾害的诱发机制、研究矿产资源成藏规律等具有深远意义(Koppers et al., 2020; 李春峰 等, 2021)。

自 1872 年英国“挑战者”号首次利用自身重力取样装备对海底软泥和多金属结核进行取样以来，随着各国对海洋矿产资源的不断重视，海洋矿产资源探测取样技术与装备得到了快速发展，20 世纪 50 年代末，以美国地质学家哈利·哈蒙德·赫斯等为首的科学家，在美国科研资金的支持下，创立了著名的“莫霍计划”(MOHOLE)，旨在打穿地壳，进入上地幔，获取地壳与地幔边界（莫霍面）的样品，研究地幔的奥秘。该计划在 3558m 的水深下，成功钻入了 183m 的海底沉积岩和玄武岩。尽管距离莫霍面还非常遥远，但它首次证明了在深海环境下进行钻探取芯的可行性，为后续深海钻探计划铺平了道路。自 1968 年起，全球科学家发起并持续开展深海钻探、大洋钻探和综合大洋钻探等规模基础研究国际科学合作计划，利用美国“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(翦知湔, 2018; 汪品先, 2018; International Ocean Discovery Program, [2025a], [2025b])，截至到 2025 年 1 月，这些钻探平台已经在世界各大洋执行 317 个航次，累计完成大洋科学钻井 4247 余站位，钻穿了接近 1000km 的沉积物和基岩，获取了超过 484km 的岩心和大量数据(International Ocean Discovery Program, [2025c])，通过在全球范围内定期取回海底沉积物心和玄武质洋壳岩心样品，为地球科学和生命科学带来了前所未有的思维变革。各国学者利用这些地质资料实现了一系列科学突破，如验证海底扩张和板块构造、重建地质历史时期气候演化、证实洋壳结构、发现深部生物圈和可燃冰等等，这不仅使我们更加全面地认识地球的过去与现在，也为预测未来全球变化提供了重要参考(翦知湔, 2018; Becker et al., 2019)。

表 1 历届大洋钻探主要成果(International Ocean Discovery Program, [2025c])

Table1 Major achievements of previous ocean drilling projects (International Ocean Discovery Program, [2025c])						
计划名称	执行时间	调查船	调查船国家	航次数	钻井数/口	岩心长度/m
深海钻探计划	1968-1983	挑战者号	美国	96	1053	97056
大洋钻探计划	1985-2003	决心号	美国	111	1797	222704
综合大洋钻探计划	2003-2013	决心号	美国	35	439	57289
		地球号	日本	14	95	4886
		特定任务平台	欧盟	5	115	4131
		决心号	美国	46	599	93294
国际大洋发现计划	2013-今	地球号	日本	5	34	1820
		特定任务平台	欧盟	5	115	3801
		合计			317	4247

备注：数据截止日期 2025 年 1 月。

1 深海钻探技术的发展和演化

为了研究地球结构、气候历史、生命演化等科学问题，上世纪 60 年代起，深海钻探逐步进入学者视野，从深海钻探计划到国际大洋发现计划，相继验证了海底扩张学说，探索了气候变化、地球环境演化和深部生物圈、地震机制、深部生命、天然气水合物等变化演化机制。上述科学钻探的每一次飞跃都依赖于关键钻探技术的突破，动力定位系统、升沉补偿、

钻孔重返、泥浆循环、钻探取芯，这些技术的攻克开启了现代深海钻探新时代。

1.1 动力定位系统

1960 年 12 月 23 日，美国自然科学基金会与洛杉矶的环球海洋勘探公司签约，计划在 1961 年初进行第一次深海科学试钻，由于在深海无法采用常规的抛锚方式固定位置，为了实现深海钻探的目标，CUSS-I 钻探船加装了一套动力定位系统，通过在钻探船上安装了 4 个马达作为侧向推进器，当钻探船到达预定地点后，投放一个声呐信号装置沉入海底，该声呐装置不断从海底发出声波信号，船上的接收装置将收到的信号实时输入计算机，当船只发生位置漂移时，计算机就能根据声波信号测出漂移的方向和距离，并将数据传送到船侧的推进器，推进器立即开始工作，调整船只位置，自动校正发生的偏移，从而将位移控制在方圆 50m 的范围内(Robinson et al., 2024)。随后的“挑战者”号安装了第二代动力定位系统，成功采集到水深达 6100m 处的岩心，为地质学上的发现尤其是为板壳结构理论提供了大量有利证据。1985 年新建的“决心号”上安装了第三代动力定位系统，配置了 10 台 550kW 全回装伸缩推，2 台 550kW 侧推，同时采用声学、张紧索和竖管角三种位置基准传感器，系统的各个原件都有冗余，可长期不间断地运行，这一系统可保证“决心号”能在 7.5m 波高、60 节风速、3 节流速的环境条件下保持定位。日本“地球号”的动力定位系统采用电力推进的方式，配备 6 台 4200kW 的全回转推力器，借助先进的 DP-2 (Dynamic Positioning, 动力定位) 控制系统，可在波高 5.5m、风速 58kn 和流速 1.5kn 的环境条件下实现定位(Deepsea Drilling Project Reports and Publications, 2007a)。随着动力定位系统不断改进和完善，广泛应用于各种海洋工程、海上科考、水下工程等领域，成为深海资源开发不可或缺的关键支撑系统。

1.2 钻柱升沉补偿系统

在正常钻井作业中，需要保持一定的钻压来破碎岩石，如果钻压不稳定，可能会影响钻井速度和质量，甚至导致钻头脱离井底，发生钻井事故，而在深海钻探中，由于风浪的影响，钻柱会产生上下往复运动，伸缩钻杆导致钻头无法以恒定压力接触井底。为了降低钻探船随海浪颠簸对钻头的冲击，1961 年 CUSS-I 钻探船上的工程技术人员发明了一种可以吸收上下振动的“缓冲钻杆”，通过安装钻柱之中的伸缩钻杆，补偿钻探作业时因船只随着海浪上下颠簸产生的升沉落差(梁涛 等, 2019)。1968 年美国 Varco 公司研发了一套双液压缸的被动式升沉补偿装置，该装置通过补偿液压缸将钻机的吊钩与船体分离开，升沉补偿装置解决了钻井受风浪影响而摇摆不定的这一难题，从而提高了船只钻探时抗风浪的能力，1974 年“挑战者”号加装了一套游车型钻柱升沉补偿装置，减小了波浪对钻进和取样的影响，但该套系统运行时液压装置的运行能耗较高，而且控制精度差，对浪高的补偿能力有限。随着升沉补偿技术的不断发展，“决心号”的钻柱升沉补偿系统采用游车型液缸补偿结构，最大补偿能力达到了 400 吨，依靠海浪的举升力和船自身的重力来压缩和释放蓄能器中的压缩空气，从而实现钻柱的升沉补偿，为钻井作业的顺利进行提供了设备保障，并大幅提高了补偿的精度和能力，进一步降低了升沉补偿系统运行时的能耗。“地球号”采用更先进、补偿精度更高的天车型钻柱运动补偿系统，最大补偿能力超过 450 吨(Deepsea Drilling Project Reports and Publications, 2007a; International Ocean Discovery Program, [2025b])。升沉补偿装置是由深海钻探所催生出来的需求，经过应用验证后得到快速发展，广泛应用在油气钻井、海上吊装、救援打捞等高端船舶，为海洋工程的蓬勃发展提供了强大的技术保障。

1.3 钻孔重返系统

1961 年 3 月 23 日-4 月 12 日，CUSS-I 钻探船在墨西哥先瓜德普岛以东水深 3558m，钻了 5 口深海钻井，其中最大井深 183m，钻透了 170m 的沉积物，取上来 13m 的玄武岩，时任美国总统肯尼迪致电祝贺，称其为科学史上“历史的里程碑”(梁涛 等, 2019)。然而深海沉积物下的岩石十分坚硬，取芯钻头会很快发生磨损，导致单次钻进的深度有限，为了实

现钻到“莫霍面”的宏伟目标，需要不断更换钻头后重新钻进，而在起钻更换钻头之后，在数千米水深的洋底要重新找到上一次钻孔的位置就成了一件非常困难的事情，为解决这一问题，深海钻探计划工程技术人员经多年悉心研究，终于在 1970 年发明了重返钻孔装置(许靖华, 2006)。

钻孔重返系统包括高分辨率的声呐扫描系统和漏斗状的重返锥装置。在首次钻探时，将重返锥安放在钻孔位置，钻杆通过重返锥钻入钻孔。钻头磨损后，要将钻杆取出更换，重返锥留在海底，重返锥上安装了数个声呐反射器。当钻杆试图再进钻孔时，其末端所设的高分辨率扫描声呐，可接收重返锥上声呐反射器发出的回波，从而寻找到原钻孔的位置。钻杆末端的扫描声呐，通过长达数千米的电缆与船上的控制中心相接，控制中心借助钻杆上的喷嘴喷射水流，使钻杆移向重返钻孔重返锥，最后进入原钻孔再次钻进。与重返锥配合的是一种先进的跟管钻进下套管工艺，即套管随着钻进的过程同步下入(周福根, 1978)，不仅简化了下套管的工序，显著节省了下套管施工时间，还极大地降低了下套管过程中遇阻的风险，为后续连续钻进提供了安全保障。

1970 年 12 月“挑战者”号在加勒比海的深海钻探第 15 航次上首次使用了钻孔重返装置，并获得成功。自此以后，使用钻孔重返系统已成为深海钻探中的常规作业(拓守廷 等, 2016)，随着计算机及电子技术的不断发展，钻孔重返系统增加了新型水下摄像机及推进系统，可以在船上通过观察海底摄像机，操控钻杆的自动对准装置，让钻头落入重返锥中，这就极大地提高了深海钻探的钻进能力，使深海钻探进入一个新时代(Deepsea Drilling Project Reports and Publications, 2007b)。目前这项技术已在全球 70 多个不同的站位进行了超过 230 次的重入钻孔操作，最大的作业水深达到了 7960m(朱芝同 等, 2020)。

1.4 泥浆循环系统

钻井泥浆作为钻井工程的“血液”，起到循环、冷却、携岩和悬浮岩屑、支撑井壁的作用。然而，世界大洋钻探 98% 的进尺都是采用无隔水管作业方式施工的，泥浆出井以后直接排海，作业期间不安装泥浆循环系统，设备器具简单，施工效率较高，作业成本低，但由于不能实现泥浆循环，对维持孔壁稳定不利，容易发生井壁坍塌和钻具卡阻事故，钻探深度受制约，且泥浆不回收对海洋生物的影响较大。若采用隔水管的作业方式，可利用隔水管建立井底到钻井船的泥浆循环路径，使携带岩屑的泥浆返回船上，将固相碎屑处理后可循环使用。隔水管系统可以很好地保护环境，并能在含油气地层进行钻探，避免污染海洋环境及预防井喷事故。

“挑战者号”和“决心号”均未配套装备隔水管系统和水下防喷器系统，无法进行泥浆循环和岩屑回收，因此海底钻进深度有限，更不能在有油气显示的海区钻探以防油气泄露污染海洋环境。“地球号”装备了 2500m 的隔水管系统，扩大了科学钻探的选址范围，但因为携带了巨大的隔水管，使得“地球号”船体十分庞大，运行经费倍增。采用无隔水管作业方式，存在着钻井深度有限，应急能力不足的局限，以及泥浆直接排放污染海洋的环保压力，而采用隔水管作业方式，需要使用沉重而巨大的隔水管来连接水面和井口，不仅增加了作业的复杂性，隔水管的安装和拆除需要大量的时间和人力，还带来了高昂的成本和环境风险。为此，挪威 ARG 公司研发了一种无隔水管泥浆循环系统(Riser-less Mud Recovery 简称 RMR)，不仅实现了泥浆回收循环，还简化了作业流程，让整个作业过程更加环保，降低了作业风险，这项技术已经在海外成功应用超过 350 井次，最大作业水深达到了 1419m(International Ocean Discovery Program, [2025d]; Myers G, 2008)。

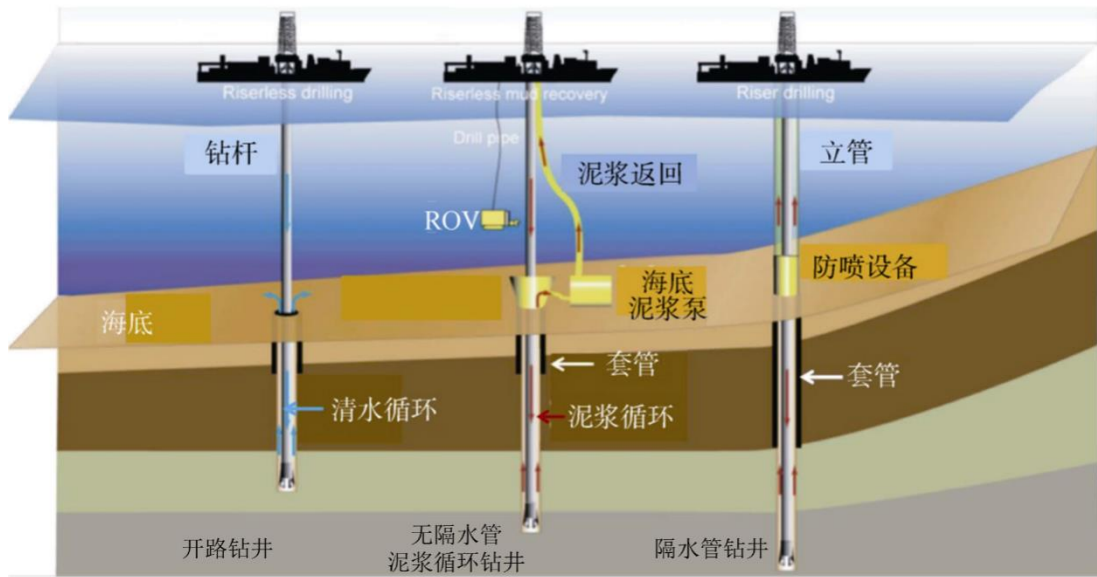


图 1 几种泥浆循环形式(拓守廷 等, 2016)

Fig1 Several forms of mud circulation(Tuo, Y.T., er al., 2016)

1.5 取芯系统

上世纪 50 年代, 在芝加哥大学工作的 C.伊米利尼首次用氧同位素曲线标示了古气候旋回(梁涛 等, 2019), 为了追溯更为久远的地质时代, 需要深部地层连续的长岩心。深海岩心由于其独特的沉积环境, 成为了分布最广泛、也最连续的地球气候历史档案。钻探取芯就是利用钻井工具和技术, 获取不同环境条件下的高质量岩心或沉积物样品, 通过深海钻探所取得的沉积物最早可追溯到约 2 亿年前, 从中获悉地质历史时期以来的地球古气候与古海洋演变历史, 对了解深部生物圈的起源、演化、生存环境、生物多样性和生物地球化学等方面的问题提供了可能性。

深海钻探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, 自 1962 年起, 深海钻探就采用了绳索取芯方法, 通过从钻杆内投入取芯钻具, 然后下入钢丝绳将携带岩心的工具打捞上来, 显著节省取芯施工时间。经过近 60 年的发展, 深海钻探取芯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芯钻具和施工工艺(见下表 2)。根据地层情况差异选用不同的取芯钻具, 包括在软泥层中使用的压入式取样器、液压活塞取样器; 在砂岩和软、硬交变地层中, 使用的伸缩式超前取芯钻具以及在坚硬地层中使用的回转式取芯工具, 配套金刚石、PDC (Polycrystalline Diamond Compact, 聚晶金刚石复合片) 等硬质取芯钻头; 在含水合物沉积物中, 使用具备保温保压功能的取芯钻具, 以获取地层原状岩心。

但从总体分析情况来看, 受海洋环境及深海沉积特征影响, 岩石软硬程度和胶结强度变化较大, 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。据统计, 4247 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%(熊亮 等, 2025)。

表 2 不同地层取芯钻具与适用地层

Table2 Core drilling tools for different geological formations and applicable formations

名称	代号	适应地层
高级活塞取芯钻具	APC	软泥岩

伸缩式超前取芯钻具	XCB	砂岩和软硬交变地层
回转取芯钻具	RCB	硬岩层
保压取芯钻具	PCB	水合物等

1.6 随钻技术

国际大洋钻探作为探索地球深部海洋、岩石圈及全球变化的科学计划，其核心目标是获取海底以下数千米的岩芯与地质数据。然而，传统岩芯钻探存在岩芯回收率低（尤其在破碎地层、软泥或盐岩层）、无法实时获取地层连续参数等局限。为此，随钻测量（MWD）与随钻测井（LWD）技术被引入大洋钻探，此技术统称为随钻技术，可实现“边钻井、边测量、边分析”的实时地质探测，成为弥补岩芯不足、揭示深部地质过程的关键手段。

随钻测量（MWD）技术是利用泥浆脉冲将钻井工程参数和井眼几何参数实时传至地面，目标是保障钻井安全与井眼质量，为钻井工程师提供实时工程反馈，避免卡钻、井漏、井斜超标等风险，一般在定向井作业中使用（如IODP375航次在 Hikurangi 俯冲带的定向钻井作业中实现精确命中）。随钻测井（LWD）不仅可以实时监测钻井方向，还可以测量地层岩石物理参数、地层岩性和流体信息，主要是为了获取连续地质数据，尤其在破碎地层，岩芯回收率低时，LWD 数据成为唯一的连续地层记录，大洋钻探 LWD 测井是一个常规作用流程，一般在取心后的钻孔内进行。

传统的 MWD 与 LWD 都不能随取心测井，随取心测井技术（Logging-while-coring）是绳索取心与随钻测井相结合，可在同一钻孔内同时获取岩心和测井数据，无需单独取下钻作业。在 2002 年 7 月的 ODP204 航次中首次采用了随钻测井技术对井下岩心进行测量[21]，由拉蒙特 - 多尔蒂地球观测所、德克萨斯农工大学和斯伦贝谢三个团队共同攻关，在 ODP 的 MDCB（螺杆马达取心筒）取心工具的基础上，通过改造优化锁紧机构、动力电池、扶正器等部件，与 RAB-8™随钻电阻率仪相结合，先是在 1249 站位的南部水合物脊顶开展了测试，在泥线以下 30m 成功实现了取心-测井的目标，最后在 1249B 取心 45m，取心直径 2.35-2.56in，实现同一钻探区间的岩芯一测井数据匹配，数据与邻孔的 1249A 常规随钻测井数据对比，吻合度非常高，证明了数据有效性(Goldberg et al., 2006)，该系统所需时间与单独取心作业相同，节省了施工时间。

2 我国深海钻探技术的发展情况

自 1998 年起，我国正式加入国际大洋钻探计划，通过搭载“决心号”或“地球号”钻探船，开展一些与大洋钻探相关的地质研究工作，并成功实施了 4 个由我国科学家主导的大洋钻探航次，共钻探 17 个站位，其中 11 处水深超过 3000m，取回岩心近万米，在揭示低纬气候演变规律及南海构造演化模式等领域取得了重要进展，但我国迄今为止，还未以作业者的身份开展过深海科学钻探，缺乏实施海洋科学钻探所需的工艺和器具(叶建良 等, 2019)。

中国地质调查局自 2019 年启动实施深海钻探技术的攻关，设立了“深海钻探技术与工程支撑”、“天然气水合物钻探工程支撑”等地质调查二级项目，为“梦想”号建成入列后开展深海科学钻探打基础做准备，通过开展深海科学钻探技术综合研究，研发了一系列的装置样机和器具等，历经实验室试验、陆地现场试验和海上浅水和浅孔综合试验，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(Myers G, 2008)，为我国后续利用“梦想”号开展深水试验及作业提供了重要的技术装备支持。

在船舶建设方面，2024 年 11 月 17 日我国首艘大洋钻探船“梦想”号正式入列，“梦想”号由自然资源部中国地质调查局与 150 余家单位密切协同建造，排水量 42600 吨，总长 179.8m、型宽 32.8m，续航力 15000 海里，自持力 120 天，稳性和结构强度按 16 级台风海况安全要求设计，具备全球海域无限航区作业能力。配置了全球首台兼具油气钻探和岩心钻取功能的液压升降钻机，顶驱提升能力达到 907 吨，具备 11000m 钻探能力。“梦想”号装

备了 3 台 4000kW 全回转主推和 3 台 3500kW 全回转伸缩推以及 1 台 1500kW 侧推，安装了 Kongsberg 公司最先进的 DP-3 系统，可以在 2 级流、6 级风的海况下实现 0.35m 的位置定位精度，0.1° 的艏向保持精度和 1m 的航迹保持精度。“梦想”号的钻柱升沉补偿系统采用“被动补偿+主动补偿”模式，被动补偿载荷为 540t，主动补偿载荷为 30t，最大补偿行程 $\pm 7.62\text{m}$ ，最大补偿速度 1.31m/s。“梦想”号的建成有力支撑我国实施大洋钻探国际大科学计划，提升“深海进入、深海探测、深海开发”能力(叶建良 等, 2019)。

表 3 主要大洋钻探船技术参数对比

Table3 Comparison of Technical Parameters of Major Ocean Drilling Ships			
关键参数	决心号	地球号	“梦想”号
总长, m	143	210	179.8
型宽, m	21	38	32.8
吨位, t	9000	57500	42600
最大作业水深, m	5965	2500, 隔水管模式 7000, 无隔水管模式	11000
最大钻探深度, m 泥线以下	2115	立管模式: 3,600 无立管模式: 7,000	
井架高度, m	62	70	70
动力定位	DP-1	DP-2	DP-3
钻探特点	无隔水管钻探	隔水管钻探	无隔水管+隔水管钻探

在钻孔重返方面，中国地质调查局基于钻深 11000m 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，开展钻孔重返装置关键系统应用及优化设计研究，完成水下防震电视系统（VIT）的研制，研制了重返锥、送入工具及套管挂、张敛式随钻扩孔器等跟管钻进关键器具样机，2022 年 2 月搭载“海洋地质十号”钻探船在在北部湾东方水深 384.7m 海域开展了钻孔重返样机装置的综合性海试，实现安放重入锥、表层井段钻进和表层套管下入一次性完成，并成功观测到重入锥水下画面，观测距离约 12-15m，同时，通过推进器开启实现装置自身姿态调整，验证了钻孔重返样机装置系统功能，并进一步验证了重入工艺方法的合理可行(人民日报, 2024; 宋刚 等, 2022)。除了 VIT 可辅助进行钻孔重入以外，“梦想”号配备两台 6000m 作业级水下机器人（ROV），为水下作业提供支持和守护，ROV 作为钻孔重入的辅助设备较 VIT 更加便捷，具备移动、抓取、推拉等主动作业能力，但 ROV 的运行和维护成本相对较高。



图 2 水下电视系统(宋刚 等, 2022)

Figure 2 Underwater TV (Song, G., et al., 2022)

在泥浆循环系统方面，新建成的“梦想”号按照“小吨位、多功能、模块化”设计建造理念，可以在“传统隔水管、传统无隔水管、轻型隔水管、无隔水管泥浆闭式循环”等 4 种作业模式中进行切换，装备了 2500m 的隔水管，具备在油气富集区开展钻探的能力。为系统掌握无隔水管泥浆循环技术，中国地质调查局研发了国内首套 400m 级无隔水管泥浆回收系统，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。2022 年年初，“海洋地质十号”钻探船搭载该系统在南海北部 5 个站位(最大试验水深 384.7m)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 400m 级无隔水管泥浆回收钻井工艺，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(崔淑英 等, 2022; Myers G, 2008)，见下图 3。目前正在开展 2000m 水深的无隔水管泥浆闭式循环技术攻关和相关设备研制工作，并有望在不远的将来实现超深水工程应用，这对于进一步降低深海钻探装备的规模 and 成本具有重要意义。

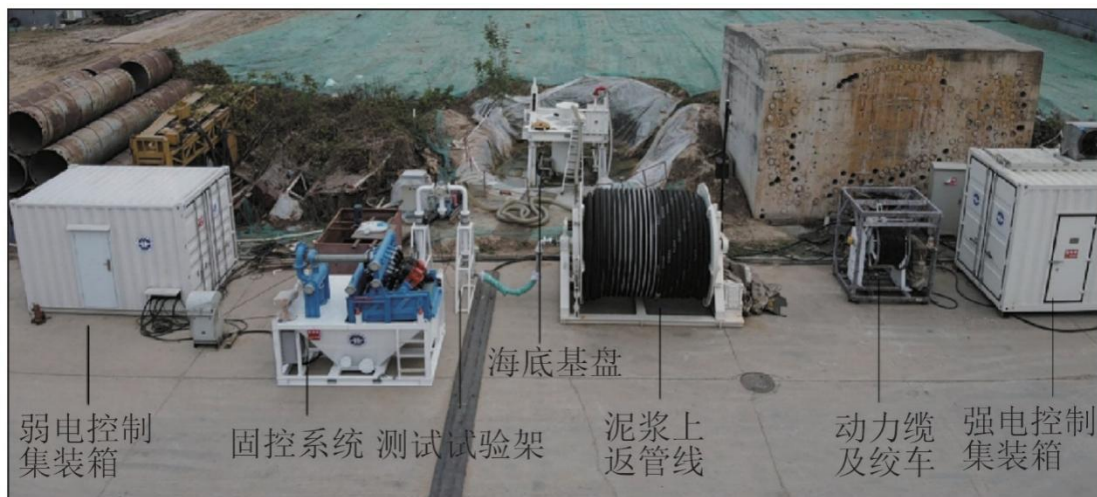


图 3 400 m 级无隔水管泥浆回收系统(熊亮 等, 2025)

Fig3 400m level riser-less mud recovery system

在钻井取芯方面，中国地质调查局相继研发成功可适应不同地层条件的多种常规取芯钻具和保压取芯钻具。常规多功能取芯钻具包括液压活塞取芯钻具、匀速贯入取芯钻具、超前伸缩取芯钻具、硬岩回转取芯钻具、自加压回转钻进取芯钻具、全面中心钻头钻具等六种(王 偲 等, 2020)。为天然气水合物取芯研制的保温保压钻具，包括球阀式和翻版式两大类(刘协鲁 等, 2021a)，并通过“海洋地质十号”钻探船进行了多轮取芯钻具试验，常规取芯钻具的最大作业水深达到了 1720m，保压取芯钻具的最大作业水深达到了 1392m，水压活塞取芯钻具平均岩心采取率为 94.89%，伸缩式取芯钻具平均岩心采取率为 69.73%，保压取芯钻具的平均岩心采取率为 75%(阮海龙, 2016)。

针对松软沉积物，2014 年成功在南海 1720m 超深水区进行海上取芯作业，完成 100m 全孔连续取样，刷新我国海域钻探取样作业水深纪录，成为我国超深水第一钻(吴时国, 2022)。2023 年 8 月 25 日“海洋地质十号”钻探船首次在南海北部陆架开展 302.07m 进尺全取岩心科学钻探，刷新了我国陆架海域第四系全取岩心的深度纪录(新华网, 2023)。通过使用自主研发的液压活塞取芯器和沉积物绳索锤击取芯器，创新了海洋深孔钻井工艺，在一半松散一半固结砂层上实现了地质钻探技术方法新突破，实现黏土取芯率约 91%，钻孔砂层取芯率约 79%，为我国自主开展深海钻探提供了重要技术支撑和经验储备。

针对硬岩取芯试验，2023 年在陆地试验场开展中空螺杆硬岩取芯钻具的试验，预埋单

轴抗压强度为 125MPa 花岗岩岩块作为模拟取芯地层,开展了 10 轮次的短距离取芯试验和 4 轮次长回次取芯试验,试验取芯率 100%,最高取芯钻效达到了 17.74m/h,2023 年 10 月搭载“海洋地质十号”钻探船,采用自主研发的中空螺杆动力钻具+绳索取芯的方式,在汕尾海域成功完成了海试,成功在花岗岩地层中钻进 10.1m,取芯 8.69m,取芯率达到 86.4%(陈晓君 等, 2024),远超 IODP 硬岩取芯水平,标志着我国在大洋钻探硬岩取芯关键器具攻关方面取得了突破性进展,为深海钻探硬岩取芯提供了一套全新的解决方案。

针对水合物保温保压的取芯要求,2019 年 9 月,依托“海洋地质十号”钻探船,在南海水深 786m 处实施保温保压取芯钻具的海试,累计开展了 7 回次保压取样,回次取样长度 3m,样品直径 51mm,保压成功率 100%,样品采取率 77%,对其中 3 回次采集到的样品进行了气体采集均点火成功(刘协鲁 等, 2021b)。通过此次海试,对自主研制的保温保压取样技术装备、自主探索的深海钻探取样工艺以及相应的技术人员都进行了充分的实战检验,有效推进了我国海域天然气水合物勘查评价设备的国产化进程。

3 总结和展望

60 多年以来,随着深海钻探计划的不断发展和演化,深海钻探技术也成为解密地球科学的重要手段,推动世界科技发展变革的引擎,从地球深处获取了大量宝贵的深海沉积物和岩石的样品及数据,在地球动力学、气候演变规律、生命起源与演化和海洋自然灾害等多个领域取得突破性成果,颠覆了人类对于地球科学的传统认知(汪品先, 2018)。深海钻探技术的发展不仅提高了工业和科学的水平,激发了数十年的科学大洋钻探和国际合作,由此催生出技术、工程和管理相关的科学交叉融合,汇聚了由数千人组成的庞大的多学科科学社区,不断推动着突破性的发现和科学进步。

作为我国自主建造的新一代钻探平台,“梦想”号具备全球海域无限航区作业能力和海域 11000m 的钻探能力,通过开展深海钻探相关工艺和器具配套研究,不仅可以有力促进深海钻探技术发展,结合深网观测、深潜探索的“三深”技术,支撑我国以平台提供者和作业者的身份进入到新国际大洋钻探计划体系中,为延续大洋钻探的科学使命注入新生力量,还将为深海资源产业开发提供强有力的技术保障,这对于我国实现重大科学突破、抢占世界科学发展制高点、建设海洋强国具有重要的现实意义和战略意义。

深海钻探为人类探索海洋未知领域,研究地球深部奥秘提供重要的支撑,其未来发展蕴含着巨大的科学潜力与工程挑战,基于当前的技术进展与科学认知,建议深海钻探技术的重点发展方向可瞄准于以下几方面:

(1) 人工智能辅助。人工智能(Artificial Intelligence, AI)是一项引领未来的战略技术,是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动,有望成为推动人类社会进入智能时代的决定性力量,“梦想”号是目前全球最先进的钻探平台,搭载了由超过 26000 多个感知节点、多套高速传输网络以及分布式计算系统组成的“船舶智慧大脑”,后期可以通过逐步引入人工智能,物联网,大模型,区块链,5G 和无人载具等新兴科技应用技术,实现钻探测试的智能自动化,船岸管理的协同一体化,物料补充的敏捷柔性化,管理决策的科学智慧化,将新一代信息技术与科学钻探业务深度融合,创新深海钻探发展新模式。

(2) 耐高温高压材料。深海钻探面临的突出难题是高温高压腐蚀海水环境,随着钻探深度的增加,地层温度急剧上升,部分异常高温地区,井底温度可能超过 350℃,压力甚至会超过 130MPa,现有电子元件、密封材料(橡胶、聚合物)大部分会失效(Wang et al., 2022),严重影响钻探设备的工作能力以及信息采集的准确性与时效性。另外高温将严重降低钻井液性能,影响井筒清洁与井底压力控制,加速钻头及井下器具的磨损。因此亟需研制耐高温电气元件、高温稳定钻井液(刘智勤 等,2019)、耐高温钻具,提高钻探的工作效率,延长井下器具的作业寿命,以实现“钻穿地壳、达到上地幔”的宏伟目标。

(3) 高精度探测及高速通讯。实现海底松散、破碎、坚硬等复杂地层的原位、连续、

高保真样品采集一直是钻探取芯的行业难题，通过开展钻进、取芯、测量、监测等一体化的随钻探查取芯技术研究，以及地面井下信息传输技术与设备研究，破解井下高速大容量信息传输的瓶颈，提升信号传输速度与处理效率，满足钻井过程随钻实时采集、传输、处理、反馈的需求，研发功率密度大、感知能力强、计算速度快、控制精度高的井下器具，以准确快速获取深部真实样本，结合地球物理、地球化学以及生物学等数据的分析及应用，提前预测钻探工程风险，为实现打穿地壳、进入地球深部的终极目标提供技术支撑。

References

- Becker K, Jr J A A, Exon N, et al., 2019. Fifty Years of Scientific Ocean Drilling[J]. *Oceanography*, 32(1): 17-21.
- Chen, X.J., Song, G., Wang, S.J., et al., 2024. Development and test of hollow screw motor bottom hole power wire-line core drill. *Drilling Engineering*, 51(5):36-44(in Chinese with English abstract). DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.05.004
- Cui, S.Y., Song, G., Tian, Y.Y., et al., 2022. Flow field analysis and optimization for the reaming mechanism of the expandable underreamer. *Drilling Engineering*, 49(1): 25-33(in Chinese with English abstract). DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.01.004
- Deepsea Drilling Project Reports and Publications, 2007a. Dynamic positioning[EB/OL]. [2025-07-31]. <http://deepseadrilling.org/trepts/TRNOTE-03.PDF>.
- Deepsea Drilling Project Reports and Publications, 2007b. Drill-in-casing system[EB/OL]. [2025-07-31]. http://deepseadrilling.tnotes/TNOTE_02.PDF.
- International Ocean Discovery Program, [2025a]. DSDP Phase: Glomar Challenger[EB/OL]. [2025-07-31]. http://iodp.tamu.edu/publicinfo/glomar_challenger.html.
- International Ocean Discovery Program, [2025b]. Program History[EB/OL]. [2025-07-31]. <http://iodp.tamu.edu/publicinfo/drillship.html>.
- International Ocean Discovery Program, [2025c]. Expedition Statistics[EB/OL]. [2025-07-31]. <https://www.iodp.org/expeditions/expedition-statistics>.
- International Ocean Discovery Program, [2025d]. JOIDES Resolution[EB/OL]. [2025-07-31]. <http://iodp.Index.html.tamu.edu/tools/index.html>.
- IODR—China Office, State Key Laboratory of Marine Geology, 2018. Fifty Years of Ocean Drilling(in Chinese).Shanghai: Tongji University Press
- Jian Z.M., 2018. Towards the scientific frontier of deep-sea research-Progress of China's participation in ocean drilling. *Chinese Science Bulletin*, 63(36):3877-3882(in Chinese with English abstract). Doi: 10.1360/N972018-01159
- Koppers A A P, Coggon R, 2020. Exploring Earth by scientific ocean drilling: 2050 science framework[M]. University of California, San Diego.
- Liang, T., Chen, Y.L., Zhao, Y., 2019. Introduction to the Drilling System of “Chikyu” Drilling Vessel. Proceedings of the 20th Annual National Symposium on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Tunneling Engineering). Xining, Qinghai, China: 348-356(in Chinese with English abstract). DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.033533
- Liu, X.L., Ruan, H.L., Chen, Y.L., et al., 2021a. Progress in domestic conventional marine geological coring technology. *Drilling Engineering*, 48(3): 113-117(in Chinese with English abstract). Doi: 10.12143/j.ztgc.2021.03.016
- Liu, X.L., Ruan, H.L., Chen, Y.L., et al., 2021b. Progress in domestic conventional marine geological coring technology. *Drilling Engineering*, 48(3): 113-117(in Chinese with English abstract). Doi: 10.12143/j.ztgc.2021.07.006
- Myers G, 2008. Ultra-Deepwater Riserless Mud Circulation with Dual Gradient Drilling[J]. *Scientific Drilling*, 6: 48-51. DOI:10. 04/iodp.sd.6.07. 008
- Robinson R S, Tikoo S, Fulton P, 2024. Sea changes for scientific ocean drilling[J]. *Physics Today*, 77(2): 28-34.

- Ruan, H.L., 2016. Sea area gas hydrate drilling and pressure-temperature coring technology. China Geological Survey. 100 techniques of geological survey in China. Beijing: Geological Publishing House, 193-196(in Chinese).
- Song, G., Cui, S.Y., Xie, W.W., et al., 2022. Research and application of reentry cone and drilling in casing. *Marine Geology Frontiers*, 38(7):75-85(in Chinese with English abstract). Doi: 10.16028/j.1009-2722.2021.233
- Tuo, S.T., Jian Z.M., 2016. Scientific Ocean Drilling Vessels: Review and Prospect. *Journal of Engineering Studies*, 8(2): 155-161(in Chinese with English abstract). DOI: 10.3724/SP.J.1224.2016.00155
- Wang, C., Xie, W.W., Zhang, W., et al., 2020. Adaptability of RMR for marine gas hydrate drilling. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(2):17-23(in Chinese with English abstract). Doi: 10.12143/j.tkgc.2020.02.002
- Wang, Y., Wang, B., He. S., et al., 2022. Unraveling the effect of H₂S on the corrosion behavior of high strength sulfur-resistant steel in CO₂/H₂S/Cl⁻ environments at ultra high temperature and high pressure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 100: 104477(in Chinese with English abstract). DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104477
- Wang, P.X., 2018. Fifty years of scientific ocean drilling: review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 63(36):3868-3876(in Chinese with English abstract). Doi: 10.1360/N972018-01162
- Wu, S.G., 2022. Evaluation of Geological Risks in Deep-water Drilling Engineering in the South China Sea: Key Technologies and Applications. *Management And Research On Scientific & Technological Achievements*. 17(5):84-87(in Chinese with English abstract). Doi: 10.3772/j.issn.1673-6516.2022.05.027
- Xiong, L., Li, X.C., Xie, W.W., et al., 2025. Achievements and progress of deep- sea scientific drilling technology research in China. *Geological Survey of China*, 12(1): 29-39(in Chinese with English abstract). Doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.209
- Xu, J.H., 2006. Ein Schiff revolutioniert die Wissenschaft. *Geology Press*
- Ye, J.L., Zhang, W., Xie, W.W., 2019. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China. *Exploration Engineering (Rock&Soil Drilling and Tunneling)*, 46(2):1-8(in Chinese with English abstract). Doi: 10.12143/j.tkgc.2019.02.001
- Zhou, F.G., 1978. The discover of deep ocean drilling. *Chinese Journal of Nature*, 1978(4):250-252 (in Chinese).
- Zhu, Z.T., Liu, Xi.L., Tian, L.Y., et al., 2020. Development and application of the reentry drilling technology and system in ocean drilling. *Exploration Engineering (Rock&Soil Drilling and Tunneling)*, 47(7):8-15(in Chinese with English abstract). Doi:1672-7428(2020)07-0008-08
- Goldberg D, Myers G, Iturrino G, et al., 2006. Logging-while-coring – new technology for the simultaneous recovery of downhole cores and geophysical measurements[M]//Rothwell R G. *New Techniques in Sediment Core Analysis: Vol. 267*. Geological Society of London.

中文参考文献

- 陈晓君, 宋刚, 王诗竣, 等, 2024. 中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的研制与试验[J]. 钻探工程, 51(5): 36-44.
- 崔淑英, 宋刚, 田英英, 等, 2022. 扩张式随钻扩孔器扩孔机构流场分析与优化. 钻探工程, 49(1): 25-33.
- 李春峰, 周多, 李刚, 等, 2021. 西太平洋地球动力学问题与未来大洋钻探目标. 地球科学, 46(03): 759-769.
- 翦知湑, 2018. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展. 科学通报, 63(36): 3877-3882.
- 梁涛, 陈云龙, 赵义, 2019. “地球号”钻探船钻井系统介绍. 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. 中国青海西宁: 348-356.

- 刘协鲁, 阮海龙, 陈云龙, 等, 2021a. 国内常规海洋地质钻探取心技术进展[J]. 钻探工程, 48(3): 113-117.
- 刘协鲁, 阮海龙, 赵义, 等, 2021b. 海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J]. 钻探工程, 48(7): 33-39.
- 人民日报, 2024. 我国首艘大洋钻探船“梦想”号正式入列[EB/OL]. (2024-11-17)[2025-07-31]. <https://www.peopleapp.com/column/30047385551-500005921960>.
- 阮海龙, 2016. 海域天然气水合物钻探和保温保压技术[C]//中国地质调查局. 中国地质调查百项技术. 北京: 地质出版社.
- 宋刚, 崔淑英, 谢文卫, 等, 2022. 钻孔重入与跟管钻进技术研究与应用[J]. 海洋地质前沿, 38(7): 75-85.
- 拓守廷, 翦知湑, 2016. 科学大洋钻探船的回顾与展望. 工程研究, 8(2): 155-161.
- 汪品先, 2018. 大洋钻探五十年:回顾与前瞻. 科学通报, 63(36): 3868-3876.
- 王偲, 谢文卫, 张伟, 等, 2020. 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), 47(2): 17-23.
- 吴时国, 2022. 南海深水钻探工程地质风险评价关键技术及应用[J]. 科技成果管理与研究, 17(5): 84-87.
- 新华网, 2023. “海洋地质十号”船刷新我国陆架海域第四系全取岩心深度纪录[EB/OL]. (2023-08-25)[2025-07-31]. https://www.news.cn/2023-08/25/c_1129825466.htm.
- 熊亮, 李星辰, 谢文卫, 等, 2025. 我国深海科学钻探技术研究成果及进展. 中国地质调查, 12(1): 29-39.
- 许靖华, 2006. 搏击沧海: 地学革命风云录. 何起祥, 译. 地质出版社.
- 叶建良, 张伟, 谢文卫, 2019. 我国实施大洋钻探工程的初步设想. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(2): 1-8.
- 中国大洋发现计划办公室, 海洋地质国家重点实验室, 2018. 大洋钻探五十年[M]. 同济大学出版社.
- 周福根, 1978. 深海钻探的发现[J]. 自然杂志(4): 250-252.
- 朱芝同, 刘晓林, 田烈余, 等, 2020. 大洋钻探重入钻孔技术与系统发展应用. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(7): 8-15.
- 刘智勤, 余意, 徐一龙, 等, 2019. 莺-琼盆地新型高温高压水基钻井液技术. 地球科学, 44(08), 2729-2735.