

大洋科学钻探井下长期观测装置研究进展及展望

吕 阳, 熊 亮, 田烈余

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 517000)

摘要:大洋科学钻探是一项对海洋底部进行科学探测和研究的重要手段,在地球科学、生命科学、资源勘探等诸多领域具有极其重要的意义。井下长期观测装置(CORK)是大洋科学钻探的重要补充,实现对海底环境从短期取样到长期动态观测的转变。过去几十年间,海底观测设备的技术手段不断提升,在初始CORK研发的基础上衍生出了另外4个新的版本,从最初的单一地层取样,发展到多地层取样,同时还可以进行原位测试。由我国主导的新一轮大洋钻探计划将要开始实施,亟需加大CORK技术的攻关力度,利用我国自己的资源和人才构建海底CORK观测系统,为尽快跻身世界海洋强国行列奠定坚实基础。

关键词:大洋钻探;长期观测;CORK;流体取样;封隔器

中图分类号:P634;P715.5 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)02-0001-09

Research progress and prospects of long-term observation devices for ocean scientific drilling and exploration wells

LÜ Yang, XIONG Liang, TIAN Lieyu

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong 517000, China)

Abstract: Ocean scientific drilling is an important means of scientific exploration and research of the ocean floor, and has extremely important significance in many fields such as earth science, life science, and resource exploration. Circulation Obviation Retrofit Kit (CORK) is an important supplement to ocean scientific drilling. CORK can achieve the transformation from short-term sampling to long-term dynamic observation of the seabed environment. Over the past few decades, the technological means of underwater observation equipment have also been continuously improved in this process. CORK has derived four new versions based on the initial development of CORK, which have evolved from single layer sampling to multiple layer sampling and can also perform in-situ testing. The new round of ocean drilling program led by our country is about to be implemented, and it is urgent to increase the research and development efforts of CORK technology, use our own resources and talents to build an underwater CORK observation system, and lay a solid foundation for quickly entering the ranks of world maritime powers.

Key words: ocean drilling; long-term observation; CORK; fluid sampling; packers

0 引言

大洋科学钻探计划实施50余年来,获得了大量岩心和海量观测数据,在固体地球和地球动力学、气候和环境演化、深部生物圈等领域取得了一系列重要认识和成果,提高了对地球和生命科学的认知,成为促进海洋科学发展的重要动力^[1-2]。

海底地下流体的活动及其与岩石或沉积物的相互作用,对海洋热通量变化、海底成矿作用、地球环境演化过程、地壳岩石物理特性等有重要的影响^[3-5]。因此,对海底地下流体进行长期监测,可以更好的认识海底地下流体的特征和状况,对海底热液系统、海底成矿机理、海底生物地球化学过程等

收稿日期:2024-08-21; 修回日期:2024-11-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.02.001

基金项目:国家重点研发计划“深水海底钻井系统关键技术与装备”(编号:2021YFB3401400)

第一作者:吕阳,男,汉族,1997年生,助理工程师,地质工程专业,硕士,主要从事大洋钻探技术方面的研究工作,广东省广州市南沙区海滨路1133号(511458),lvyang@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:吕阳,熊亮,田烈余.大洋科学钻探井下长期观测装置研究进展及展望[J].钻探工程,2025,52(2):1-9.

LÜ Yang, XIONG Liang, TIAN Lieyu. Research progress and prospects of long-term observation devices for ocean scientific drilling and exploration wells[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 1-9.

领域的研究有着重要的意义。

为了更好地对海底地下流体进行监测,充分发挥已有钻孔的科学研究价值,科学家们研发了一套井下长期观测装置(Circulation Obviation Retrofit

Kit,简称CORK),并且在1991年ODP 139航次成功完成首次布放^[6]。在全球4000余口钻孔中,目前已有42口钻孔部署了井下观测装置(图1),钻孔利用率1%。

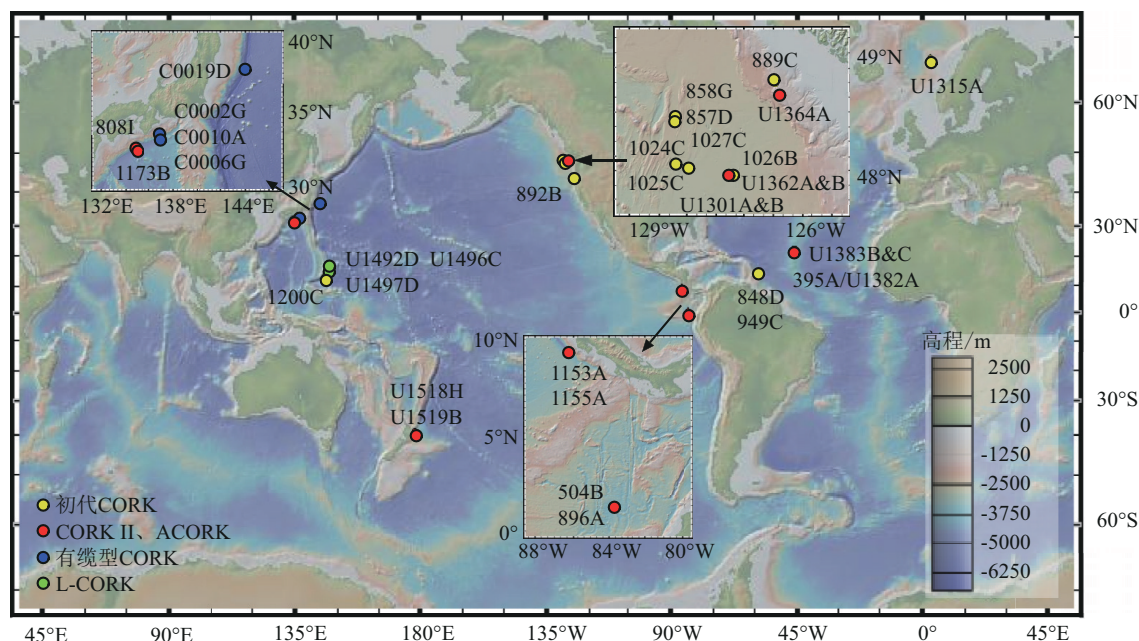


图1 IODP布放CORK装置钻孔分布

Fig.1 Distribution of drilling holes for IODP deployment of CORK device

本文首先对CORK的发展历程做简要回顾,重点介绍几种不同类型的CORK的设计特点,并对CORK在大洋科学钻探中的几种典型应用进行举例说明,最后对CORK未来的发展方向和我国在这方面的研究进行展望。

1 CORK的发展历程

CORK的概念最早由Carson等人于1989年提出^[7]。CORK装置的基本构成如图2所示,主要包括重入和套管系统、CORK本体和观测仪器三个部分。重入和套管系统为CORK观测仪器提供悬挂和隔离保护,可以根据观测仪器的结构尺寸选用不同尺寸的套管,套管在指定深度设置有筛管,用来进行长期的流体取样。CORK本体布设在井口,用于对井口进行密封,防止井内流体与海水进行交换,避免对观测结果造成干扰。观测仪器部分包括长期数据记录仪和传感器链,可以搭载温度、地震等各种传感器,获取地层信息。

目前,CORK已被用于对密封钻孔及对钻孔内

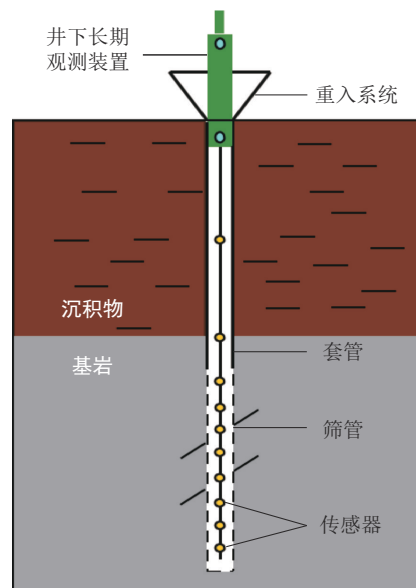


图2 CORK基本结构(据文献[8]修改)

Fig.2 CORK basic structure

流体、微生物进行长期观测的科学装置的统称,随着CORK技术发展,已经在初版CORK的基础上发

展衍生出诸如 ACORK、CORK II、有缆 CORK 以及 L-CORK 等不同类型的 CORK^[9-12]。

1.1 初版 CORK

初版 CORK(图3)主要包括 CORK 主体和观测系统。CORK 主体提供数据记录仪井下通道并实现内部密封。初版 CORK 布放需要先建立合适的钻孔重入装置,通常采用不同的套管组合与重入系统悬挂,形成一个井下观测系统到达目标地层的稳定通道。CORK 主体布设在 $10\frac{3}{4}$ in (1 in=25.4 mm,下同)的套管中,上端封装数据记录仪并在重入系统上方延伸约 1.5 m。井下观测系统穿过 CORK 主体内孔,在 CORK 本体的悬挂台肩上坐底并密封。观测系统包括多个功能不同的传感器。数据记录仪下方电缆上按照特定间距安装了多个温度传感器,用于测量密封钻孔内温度;数据记录仪上方和下方安装压力传感器,分别用于测量海底和密封钻孔压力,阵列分布的压力传感器可以提供额外的信息^[13]。早期 CORK 采用 $\frac{1}{2}$ in 的不锈钢或钛管进行取样,但是这种取样方法在布放过程中容易造成取样管损坏,后续的取样采用由渗透泵驱动的自给式长期流体“渗透取样器”^[10,14]。

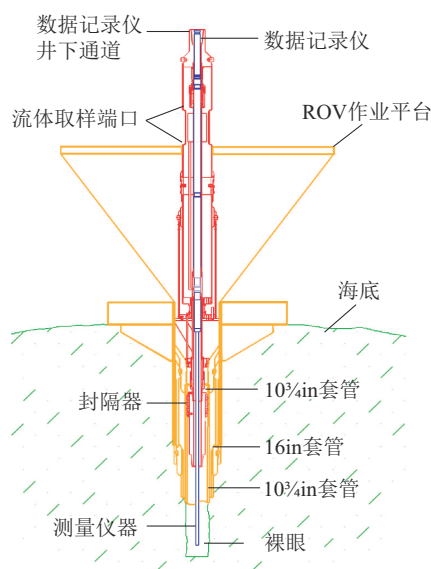


图3 初版 CORK(据文献[8]修改)

Fig.3 Initial CORK

初版 CORK 装置实现了对钻孔的密封,阻止了钻孔内外流体的交换,并对钻孔内流体进行长期监测,是大洋科学钻探一项重要的技术革新。然而初版 CORK 也存在明显不足:(1)只能在孔口处进行

密封,不能在同一个钻孔中进行不同层位的监测;(2)设备布放和数据回收等主要工作需要钻探船来完成;(3)传感器外径受到限制,制约了传感器的选用。

1.2 高级 CORK(ACORK)

为了解决初版 CORK 存在的问题和不足,引入封隔器技术对钻孔内流体进行分层监测,形成高级 CORK(ACORK)(图4)。

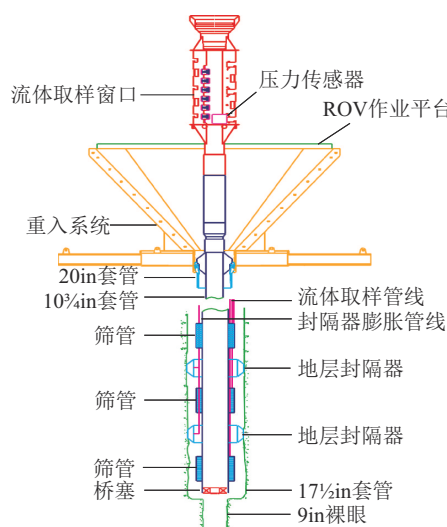


图4 ACORK(据文献[8]修改)

Fig.4 ACORK

相较于初版 CORK, ACORK 最大的改进是在目标地层的套管处安装地层封隔器。ACORK 布放方式和初版 CORK 也不同,在完成重入系统及 20 in 套管布放后通过随钻测井获取地层资料,确定需要长期观测的地层深度。ACORK 在钻台下方进行组装,封隔器、筛管和传感器等通过管线连接至井口处的取样端口和数据记录仪。ACORK 通过由泥浆马达驱动的扩孔器在不旋转的情况下进入钻孔,在到达指定观测深度后,对封隔器打压,使其膨胀填充井眼环空,实现不同观测层位的密封,套管底部则用桥塞进行密封。

不同观测层位布设有不同的筛管和传感器,并将数据通过套管外部的管线上传到 CORK 顶部。此外,套管中还可以布设 1 套观测系统。由于 ACORK 系统在安装上存在一定的技术难度,没有大规模布放,只在 ODP 196 航次布放了 2 套^[15]。

1.3 CORK II

在 ACORK 的基础上进一步改造和扩展,科学

家们提出了CORK II(图5)。相较于ACORK, CORK II在安装布设和地层取样上进行了改进,设计更加合理,功能也更加完善^[10]。

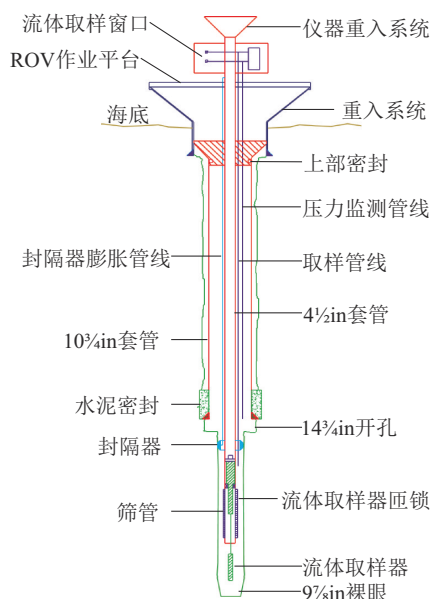


图5 CORK II(据文献[8]修改)

Fig.5 CORK II

CORK II的布放方式和之前的CORK系统有所不同。在完成钻探取心任务后,下16 in套管建立钻孔重返系统,之后下10 3/4 in套管,在底部用固井水泥进行密封。将带有封隔器和筛管的4 1/2 in套管进行组装,封隔器和筛管的位置根据需要观测和取样的地层位置来确定。最后将CORK主体部分与套管进行连接,并安放入钻孔中。在将CORK主体悬挂在重入系统之前,首先安装并锁定流体取样器匝锁,然后通过CORK上部的仪器重入系统将取样器缓慢降入取样器匝锁上,以此保持取样器与周围环境温度和压力的平衡^[16]。

取样器布放到位以后,将CORK仪器主体部分固定到重入系统上,给封隔器打压开始进行压力监测和流体取样^[17],还可以进行微生物采样和井下实验^[18-19]。CORK-II最开始被部署在哥斯达黎加俯冲带的2口钻孔中,在不破坏地层压力的情况下进行长期的流体取样和原位测试。

1.4 有缆型CORK

有缆型CORK是一种不依赖于钻探船,通过脐带缆连接至船上的海底观测装置^[20]。有缆型CORK由控制舱、支持舱、上下封隔器和监测系统

组成(图6)。其中支持舱内部装有数据记录仪、动力源和遥测装置等,封隔器和监测系统的位置根据观测目标来确定,上封隔器与支持舱相连接^[12]。布放时控制舱与支持舱软连接,在控制舱的控制下,封隔器和监测系统通过钻孔重返系统重新进入海底钻孔,布放就位后操作封隔器膨胀,运载工具和支持舱脱开,布放完成。与其他CORK监测系统一样,有缆型CORK同样配备有长期流体采样器、原位微生物实验设备和应变监测仪,可以实现流体取样和原位测试^[21-22]。2套有缆型CORK已于2001年布放在哥斯达黎加裂谷南部的新生洋脊上^[12]。

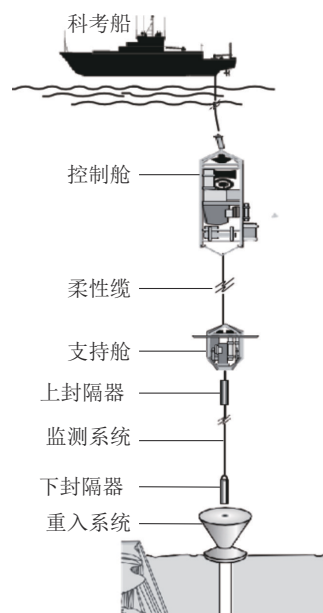


图6 有缆型CORK(据文献[8]修改)

Fig.6 Wireline CORK

有缆型CORK布放不依赖于钻探船,因此实施灵活、经济。不过,受到脐带缆可用载荷的限制,通常最多只能封隔3个层位^[7]。

1.5 L-CORK

L-CORK是在CORK II的基础上发展而来的。L-CORK在观测舱下方设置一根连通钻孔内部的横向取样管(图7)。与CORK II相比L-CORK做了一些改进:(1)增加了一个4 in的球阀,可以通过打开球阀连接泵、流量计或示踪剂注入装置等,在不干扰井下取样和实验系统的同时,还可以测量地层流体短暂特性(例如溶解氢);(2)增加了一个顶部阀门,用来解决CORK布放过程中可能存在的因压力过大导致布放失败的问题;(3)增加了遇水膨

胀型封隔器,由一种能与在海水发生反应并膨胀的材料组成,有助于填充封隔器元件和16 in套管之间的环状间隙,强化对钻孔的密封效果;(4)改套管为钻铤,用来维持CORK套管的稳定,钻铤上设置有筛孔,用来进行流体取样和微生物实验,钻铤外表面有特殊的涂层以减少对微生物的污染^[23]。L-CORK在IODP 327航次布放于1362A孔和1362B孔,用于研究地壳演化、水文地质、微生物生态和生物地球化学过程^[24]。

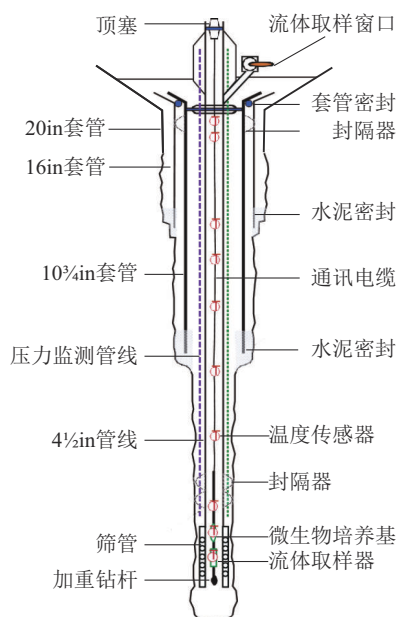


图7 L-CORK(据文献[23]修改)

Fig.7 L-CORK

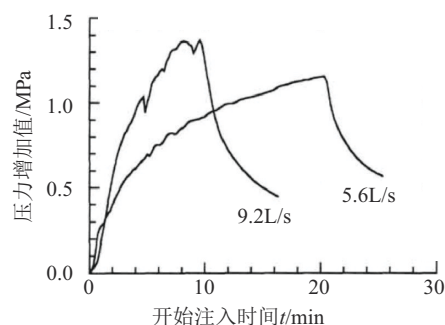
2 CORK在大洋钻探中的应用

CORK系统自20世纪90年代初问世以来,已发展迭代30余年,成功应用到洋壳水文地质学、固体地球物理、流体地球化学、深部生物圈微生物学和生物地球化学、海底地质灾害监测等方面。

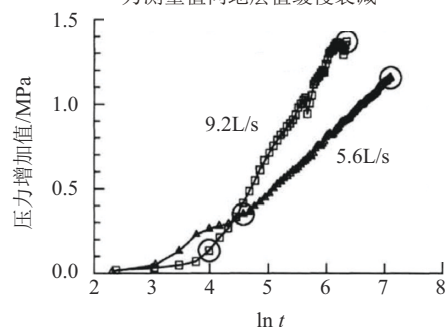
2.1 洋壳水文地质学研究

洋壳水文地质是井下长期观测系统最重要的应用领域之一^[25]。海洋水文地质学主要研究控制流体流动和储藏的性能,流体的流动路径、通量、驱动力和源汇,以及温度和压力等参数的变化。ODP 139航次在胡安·德·富卡洋中脊北段中央裂谷扩张中心880钻孔和857D钻孔成功布放CORK并进行观测,获取了长时间尺度下洋壳地层温度、压力等参数数据,通过响应模型估算了基底渗透率(见表

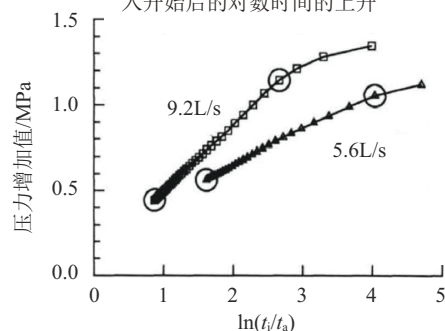
1),摸清了不同深度地层渗透率的变化规律(图8)^[6,26]。



(a)封隔器膨胀后,井中静水压力测量值向地层值缓慢衰减



(b)注入期间校正压力相对于注入开始后的对数时间的上升



(c)注入结束后井中校正压力的衰减

图8 通过在857D孔中布放的CORK进行地层渗透率计算(据文献[26]修改)

Fig.8 Calculation of formation permeability by deploying CORK in Hole 857D

此外,还通过开展示踪实验研究流体运移方向和流动速率^[27-28]。通过对示踪剂空间分布的研究,获取了流体-热、流体-溶质等的传输方式路径^[29]。通过对密封钻孔中示踪剂的长期观测,还计算出了钻孔中流体与围岩火山岩地层流体的交换量(图9)^[30]。

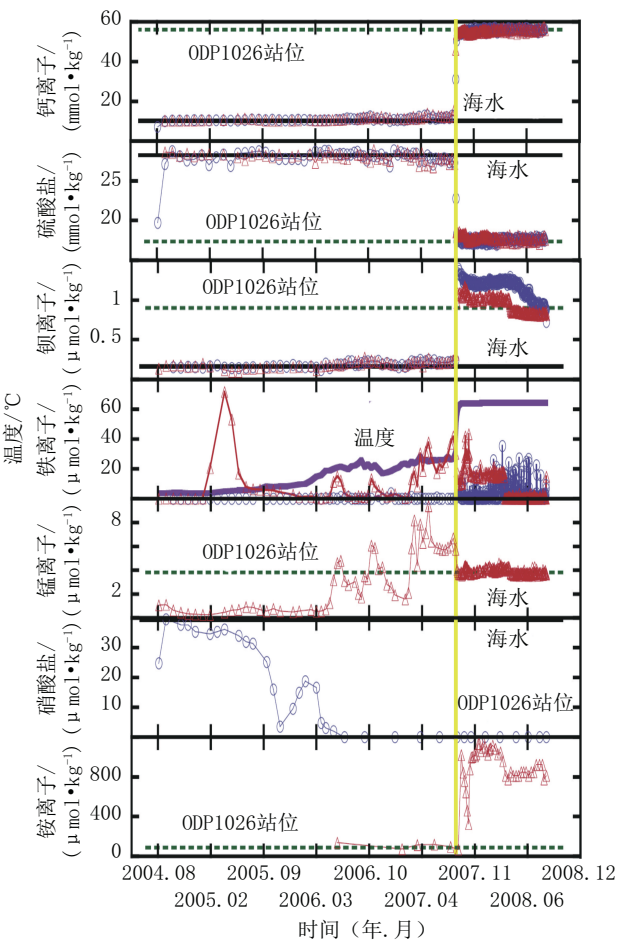
2.2 天然气水合物稳定性研究

天然气水合物是一种清洁能源,但它的分解和

表1 地层渗透率计算结果(据文献[26]修改)
Table 1 Calculation results of formation permeability

注入速度/ (L·s ⁻¹)	导水性(T)/ (10 ⁻⁵ m ² ·s ⁻¹)	渗透率(Kh)/ (10 ⁻¹⁴ m ²)
9.2	1.40	1.05
0	1.91	1.44
5.6	1.42	1.07
0	2.17	1.63

释放不仅可能诱发全球气候变暖,还可能导致大规模海底滑坡^[31]。因此,对天然气水合物稳定性的监测和研究至关重要。IODP 328航次U1364A钻孔中布放的ACORK成功获取了温度-时间-深度序列,以及BSR(海底模拟反射层)深度处的原位温度和线性温度梯度,这种线性的温度梯度分布特征有助于孔隙流体以极慢的速度向上运移,并将深部的甲烷气体输送到天然气水合物稳定带^[32](图10)。



紫色线表示周平均温度,黑色实线表示海底海水浓度,绿色虚线表示ODP 1026B孔中流体浓度,蓝色符号来自示踪剂连续取样系统,红色符号来自酸化连续取样系统,垂直的黄线标志着2007年9月产生的流向逆转

图9 IODP 1301A孔中CORK系统得到的不同离子浓度、每周平均温度与时间的关系(据文献[30]修改)
Fig.9 Relationship between different ion concentrations obtained by CORK system in IODP 1301A hole and average weekly temperature and time

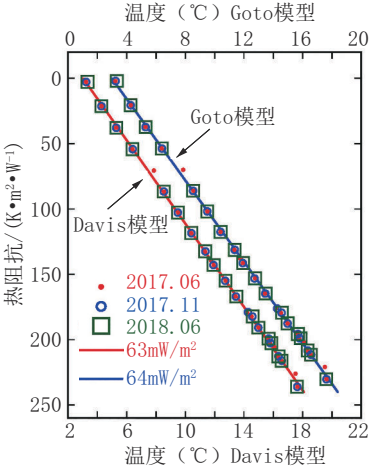


图10 IODP U1364A钻孔中CORK得到的温度与热阻抗的关系(据文献[32]修改)

Fig.10 Relationship between temperature and thermal impedance by the CORK in IODP Hole U1364

2.3 海底地质灾害监测

CORK在地震监测上发挥着重要作用,部署在马里亚纳、哥斯达黎加俯冲带、日本南海海槽、日本海沟等俯冲带区域的CORK成功观测到地震震前、震中和震后造成的地层压力变化,对地震等自然灾害的评估具有重要意义。ODP168/IODP301航次在胡安·德·富卡洋中脊1027C孔安装的CORK系统,观测到了1996年和1999年地震产生的地层压力对区域应变的响应,压力瞬时升高了约0.2kPa,瞬时压力变化指数与根据断裂滑移预测的应变一致^[33](图11)。

2.4 深部生物圈微生物学和生物地球化学研究

深部生物圈的发现,是大洋钻探的一项重大成果。目前海洋和深部生物圈的认识大多来自海洋科考和深海钻探,但是随着研究程度的不断深入,科研学者越来越清晰地认识到,研究这些生物需要长期的、不同时间和空间尺度上取得的观测数据,

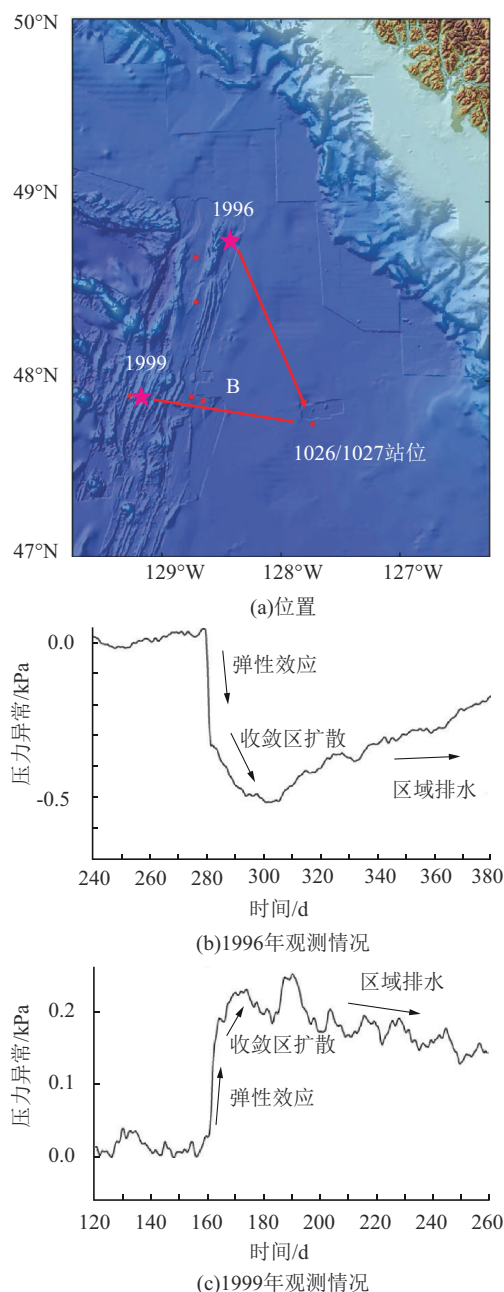


图11 CORK系统观测到的海底扩张和地震产生的地层压力变化(据文献[33]修改)

Fig.11 Formation pressure changes caused by seafloor expansion and earthquakes observed by the CORK system

具有进行原位实验和实时数据采集的能力也至关重要。

CORK提供了一个新的监测短周期变化的途径。ODP 186航次利用CORK中的长期渗透取样器,记录了连续5天的Cl、Mn和Fe等元素以及对应的潮汐高度和温度数据,如图12所示^[34]。温度和潮

汐高度数据证明了热液流体在上升过程中与围岩发生反应,并与海水混合而冷却。热液流体和海水之间的混合比率在24%~10%之间,循环周期为1天。

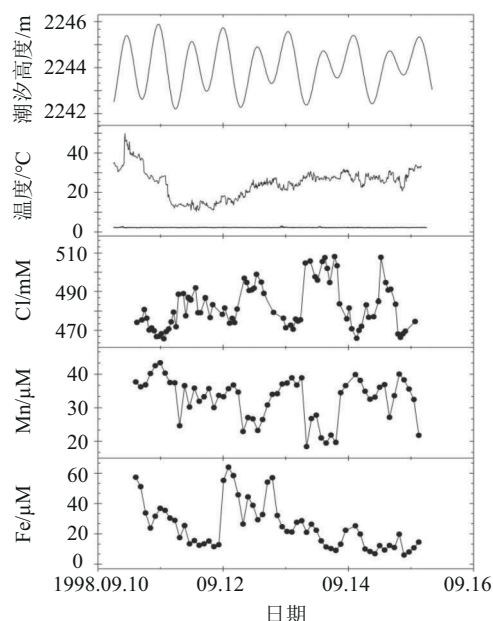


图12 通过CORK获取的Cl、Mn、Fe、潮汐高度和温度数据(据文献[34]修改)

Fig.12 Cl, Mn, Fe and corresponding tidal height and temperature data obtained by the CORK

3 总结与展望

随着技术的发展,CORK经历了多次变革和改进,出现了不同型号的CORK,如初版CORK、ACORK、CORK II和L-CORK等。这些不同类型的CORK针对不同的科学需求和应用环境进行了优化和改进,是大洋岩石圈地壳的温压计,是监测深海海底生物活动性、海洋水文地质变化、洋壳物性变化、地震海啸等地质灾害的利器,也是实现透明海洋、建立四维地球动力学模式的重要手段,对海洋地质学乃至地球系统科学的发展都非常重要。

3.1 目前CORK存在的问题与不足

(1)大洋钻探面临的特殊应用环境,如高温、高压等,对井下观测仪器和取样装置的性能指标和可靠性要求较高,据了解,目前CORK成功率不足30%,主要由仪器失效导致;

(2)不同的观测单元具有不同的井下安装要求,以及各自不同的安装工艺,如地震计、应力应变仪等,如何协调各观测单元在井下的整体安装,是

保证综合观测系统成功运行的前提;

(3) 采样装置的材料对化学和微生物采样有一定的污染,目前尚无法满足保压、保光、保量、保温、保湿、保活性回收要求;

(4) 关于流体化学元素测定,目前依赖于原位采样地面测试,还不能达到原位识别判定;

(5) 数据采集技术目前仍然需要通过ROV,采用高压水密件实现,成本非常高昂。

3.2 展望

目前我国大洋钻探还处于起步阶段,相关的研究也都集中在钻探取样技术上^[35-38],大洋钻探海底及井下长期原位观测技术尚属空白。随着我国首艘大洋钻探船“梦想”号的入列和由我国主导的新一轮大洋钻探计划的实施,亟需开展大洋科学钻探井下长期观测和原位取样装备技术研究,加大有关CORK技术的攻关力度,主要包括以下几个方面:

(1) 流体取样技术:井口密封、井下分层封隔器、井下流体长期观测传感器链等关键技术。

(2) 井口装置技术:长期原位观测面临的水下供能、实时通讯、数据传输、运维保障等技术。

(3) 井中长期监测技术:井中地球物理、地球化学观测与原位流体及微生物取样技术。

(4) 协同作业技术:深钻、深潜与深网协同作业关键技术。

CORK系统在我国具有广阔的发展前景,将为我国的科学研究、资源勘探、海洋工程和灾害预警等领域提供重要的技术支持。支撑构建我国“深钻+深潜+深网”三深技术体系,促进我国深海科技自立自强,进一步提高我国深海深地战略科技力量。

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):3866-3876.
WANG Pinxian. Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(36):3866-3876.
- [2] 冉骝, 张涛. 近十年大洋科学钻探进展与未来重点发展方向[J]. 中国地质, 2024, 51(3):1091-1094.
RAN Hao, ZHANG Tao. Progress of scientific ocean drilling over last decade and future priorities[J]. Geology in China, 2024, 51(3):1091-1094.
- [3] Hofmeister A M, Criss R E. Earth's heat flux revised and linked to chemistry[J]. Tectonophysics, 2005, 395(3/4):159-177.
- [4] Fisher A T, Urabe T, Klaus A. The hydrogeologic architecture

- of basaltic oceanic crust: compartmentalization, anisotropy, microbiology, and crustal-scale properties on the eastern flank of Juan de Fuca Ridge, eastern Pacific Ocean[Z]. Integrated Ocean Drilling Program Expedition 301 Scientific Prospectus, 2004.
- [5] Fisher A T, Wheat C G, Becker K, et al. Scientific and technical design and deployment of long-term seafloor observatories for hydrogeologic and related experiments, IODP Expedition 301, eastern flank of Juan de Fuca Ridge[C]//Proc. IODP, 301, College Station TX, 2005.
- [6] Davis E E, Becker K, Pettigrew T, et al. Cork: a hydrologic seal and downhole observatory for deep-ocean boreholes[J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program: Initial report Part, 1992, 139:43-53.
- [7] Becker K, Davis E, Design I C. Advanced CORKs for the 21st century[C]//Scripps Institution of Oceanography Engineering Meeting. Texas A&M University, 1998.
- [8] Becker K, Davis E E. A review of Cork designs and operations during the Ocean Drilling Program[C]//Proc. IODP, 301, College Station TX, 2005.
- [9] prepared by the Ocean Drilling Program, Texas A & M University, in cooperation with the National Science Foundation and Joint Oceanographic Institutions, Inc.. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Initial reports [R]. College Station, Tex.: Ocean Drilling Program, 2002.
- [10] Jannasch H W, Davis E E, Kastner M, et al. CORK-II: long-term monitoring of fluid chemistry, fluxes, and hydrology in instrumented boreholes at the Costa Rica subduction zone¹ [C]//Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 2003, 205:1-36.
- [11] Becker K, Davis E E. Plugging the seafloor with CORKs[J]. Oceanus, 2000, 42(1):14-16.
- [12] Spiess F N, Boegeman D E, Lowenstein C D. First ocean-research-ship-supported fly-in re-entry to a deep ocean drill hole[J]. Marine Technology Society Journal, 1992, 26(3):3-10.
- [13] Foucher J P, Henry P, Harmegnies F. Long-term observations of pressure and temperature in hole 948D, barbados accretionary prism[J]. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific results, 1997, 156:239-245.
- [14] Alt J C. Hydrothermal fluxes at mid-ocean ridges and on ridge flanks[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2003, 335(10/11):853-864.
- [15] Mikada H. Proceedings of the Ocean Drilling Program, 196 Initial Reports [C]//Proceedings of the ocean drilling program, Ocean Drilling Program. 2002.
- [16] Fisher A T, Urabe T, Klaus A. IODP expedition 301 installs three borehole crustal observatories, prepares for three-dimensional, cross-hole experiments in the Northeastern Pacific Ocean[J]. Scientific Drilling, 2005, 1:6-11.
- [17] Nakagawa S, Inagaki F, Suzuki Y, et al. Microbial community in black rust exposed to hot ridge flank crustal fluids[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(10):6789-6799.
- [18] Steinsbu B O, Thorseth I H, Nakagawa S, et al. Archaeoglo-

- bus sulfaticallidus sp. nov., a thermophilic and facultatively lithoautotrophic sulfate-reducer isolated from black rust exposed to hot ridge flank crustal fluids[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2010, 60 (Pt 12): 2745-2752.
- [19] Orcutt B N, Bach W, Becker K, et al. Colonization of subsurface microbial observatories deployed in young ocean crust[J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(4):692-703.
- [20] Becker K, Davis E E, Spiess F N, et al. Temperature and video logs from the upper oceanic crust, Holes 504B and 896A, Costa Rica Rift flank: implications for the permeability of upper oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3/4):881-896.
- [21] Davis E E, Becker K, Wang K, et al. A discrete episode of seismic and aseismic deformation of the Nankai trough subduction zone accretionary prism and incoming Philippine Sea plate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242 (1/2): 73-84.
- [22] Davis E E, Villinger H W. Transient formation fluid pressures and temperatures in the Costa Rica forearc prism and subducting oceanic basement: cork monitoring at ODP Sites 1253 and 1255[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245 (1/2):232-244.
- [23] Wheat C G, Jannasch H W, Kastner M, et al. Fluid sampling from oceanic borehole observatories: design and methods for Cork activities (1990-2010)[C]//Proc. IODP, 327. 2011.
- [24] Fisher A T, Wheat C G, Becker K, et al. Design, deployment, and status of borehole observatory systems used for single-hole and cross-hole experiments, IODP Expedition 327, eastern flank of Juan de Fuca Ridge[C]//Proc. IODP, 327. 2011.
- [25] Davis E E, Horel G C, Macdonald R D, et al. Pore pressures and permeabilities measured in marine sediments with a tethered probe[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1991, 96(B4):5975-5984.
- [26] Becker K, Morin R H, Davis E E. Permeabilities in the middle valley hydrothermal system measured with packer and flowmeter experiments[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 1994, 139:613-626.
- [27] Elderfield H, Wheat C G, Mottl M J, et al. Fluid and geochemical transport through oceanic crust: a transect across the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172(1/2):151-165.
- [28] Wheat C G, McDuff R E. Mapping the fluid flow of the Mariana Mounds ridge flank hydrothermal system: Pore water chemical tracers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B5):8115-8131.
- [29] Fisher A T, Davis E E, Hutnak M, et al. Hydrothermal recharge and discharge across 50 km guided by seamounts on a young ridge flank[J]. *Nature*, 2003, 421(6923):618-621.
- [30] Wheat C G, Jannasch H W, Fisher A T, et al. Subseafloor seawater-basalt-microbe reactions: Continuous sampling of borehole fluids in a ridge flank environment[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010, 11 (7). DOI: 10.1029/2010GC003057.
- [31] 吴能友,陈弘,蔡秋蓉,等.科学大洋钻探与天然气水合物[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(5):753-758.
- WU Nengyou, CHEN Hong, CAI Qiurong, et al. Scientific ocean drilling and gas-hydrates[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(5):753-758.
- [32] Becker K, Davis E E, Heesemann M, et al. A long-term geothermal observatory across subseafloor gas hydrates, IODP hole U1364A, cascadia accretionary prism [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8:568566.
- [33] Kastner M, Becker K, DAVIS E E, et al. New insights into the hydrogeology of the oceanic crust through long-term monitoring[J]. *Oceanography*, 2006, 19(4):46.
- [34] Jannasch H W, Wheat C G, Plant J N, et al. Continuous chemical monitoring with osmotically pumped water samplers: OsmoSampler design and applications [J]. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2004, 2(4):102-113.
- [35] 王诗竣,宋刚,王瑜,等.中国主导的IODP航次取心所遇问题分析及探讨[J]. *钻探工程*, 2023, 50(1):10-17.
- WANG Shijun, SONG Gang, WANG Yu, et al. Analysis and discussion of the coring problem for China? led IODP voyages [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(1):10-17.
- [36] 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.
- [37] 熊亮,谢文卫,张伟,等.跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(7):16-22, 35.
- XIONG Liang, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Application of casing-while-drilling technology in ocean drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(7):16-22, 35.
- [38] 王世栋,田烈余,王俊珠,等.海洋地质十号船钻探系统及其在海洋地质调查中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(2):24-29.
- WANG Shidong, TIAN Lieyu, WANG Junzhu, et al. Drilling system on Marine Geology 10 Ship and its application in marine geological survey[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(2):24-29.

(编辑 王跃伟)