

大洋钻探孔内长期观测系统发展 及其在地震监测中的作用

崔淑英^{1,2}, 宋 刚^{1,2}, 田英英^{1,2}, 邵玉涛^{1,2*}, 陈晓君^{1,2}, 陈根龙^{1,2}

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 大洋钻探孔内长期观测系统的应用为多学科研究提供了珍贵资料。本文全面梳理了大洋钻探实施以来各类孔内长期观测系统, 着重剖析日本“地球号”配备的 Smart Plug、Genius Plug 微型观测系统及 LTBMS 长期观测系统的结构与安装详情。这些系统能捕捉到风暴、海啸及地震信号, LTBMS 联网数据还可以揭示孔隙压力变化与地壳变形的关联; 通过分析 Smart Plug 监测的温压数据可研究瞬变压力与地震、海啸的关系; 对比不同系统的压力数据能判断地壳是否变形; 综合多个联网孔内观测系统数据有助于探索地震孕育机制。深入探讨这些系统的作用及日本的实践经验, 对我国相关系统的研发具有重要启示, 对深入认识地球构造演化和地震活动规律有重大意义。

关键词: 大洋钻探; 孔内长期观测; 地震监测; Smart Plug; Genius Plug; LTBMS

中图分类号: P634; P715.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)05-0001-09

The development of long-term borehole observation systems in IODP and their role in earthquake monitoring

CUI Shuying^{1,2}, SONG Gang^{1,2}, TIAN Yingying^{1,2}, SHAO Yutao^{1,2*}, CHEN Xiaojun^{1,2}, CHEN Genlong^{1,2}

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*; 2. *Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, MNR, Langfang Hebei 065000, China*)

Abstract: Ocean drilling has been carried out for more than 50 years. Not only have a large number of cores been drilled to promote the progress of Earth Science, but also the application of long-term borehole observation systems has provided valuable data for multidisciplinary research. This paper comprehensively reviews various long-term borehole observation systems since the implementation of ocean drilling, and focuses on analyzing the structures and installation details of the Smart Plug and the Genius Plug micro-observation systems and the LTBMS long-term observation system equipped on the Japanese “Chikyu” drilling ship. These systems can capture storm, tsunami and earthquake signals, and the networked data of LTBMS also reveals the correlation between pore pressure changes and crustal deformation. For example, by analyzing the temperature and pressure data monitored by the Smart Plug, the relationship between transient pressure and earthquakes and tsunamis can be studied; by comparing the pressure data of different systems, it can be determined whether the crust has deformed; and by synthesizing the data of multiple networked borehole observation systems, it is helpful to explore the earthquake nucleation mechanism. Deeply exploring the functions of these systems and the practical experience of Japan has important implications for the research and development of related systems in China, and is of great significance for a deeper understanding of the tectonic evolution of the earth and the laws of earthquake activities.

Key words: ocean drilling; long-term borehole observation; seismic monitoring; Smart Plug; Genius Plug; LTBMS

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-05-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.05.001

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支持”(编号: DD20230400402)

第一作者: 崔淑英, 女, 汉族, 1983 年生, 高级工程师, 机械制造及其自动化专业, 硕士, 主要从事深海钻探工艺与器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 306011322@qq.com。

通信作者: 邵玉涛, 男, 汉族, 1982 年生, 高级工程师, 机械制造及其自动化专业, 从事钻探工艺与器具研究工作, 河北省廊坊市广阳区金光道 77 号, 23509007@qq.com。

引用格式: 崔淑英, 宋刚, 田英英, 等. 大洋钻探孔内长期观测系统发展及其在地震监测中的作用[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 1-9.

CUI Shuying, SONG Gang, TIAN Yingying, et al. The development of long-term borehole observation systems in IODP and their role in earthquake monitoring[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 1-9.

0 引言

继地面/海面观测、空中遥感观测之后,海底观测网成为人类对地球进行深入了解的第三个观测平台^[1]。在各类海底观测项目中,地震观测起步最早,这主要是由于全球80%的火山与地震活动都发生在海底区域,尤其是大洋中脊以及大洋俯冲带。为了增强地震仪监测的精准度,优化信噪比表现,将地震仪安置于海底钻孔深处,已然成为当下海底地震观测的首选策略。自1968年开展大洋钻探以来,累计钻孔4000余口^[2],为充分发挥大洋钻探钻孔的科研价值,一种名为CORK(Circulation Obviation Retrofit Kit)的孔内长期观测系统(又称“海底井塞”)被应用于大洋钻探孔内。该装置能够实现钻孔与海底环境的有效隔离,使受钻孔扰动的孔内水文系统逐渐恢复平衡,进而采集到带有时间序列的地层原位温压、应变、地震等物理信息和原位流体样品,为开展洋壳水文地质学、地震学和深海生物圈研究提供助力。

1 孔内长期观测系统的发展及应用现状

1989年,在钻孔和海底进行长期观测的理念指引下,CORK手绘草图问世。1991年,在ODP139航次首次布放2个初始CORK^[3]。经过30余年的发展,依据地层情况、观测需求和科研需求的不同,在初始CORK的基础上已经演变出了10余种类型的孔内长期观测系统(见表1)。所有的长期观测系统均具备封隔钻孔、孔内原位温压监测的基本功能,大部分具备原位流体取样功能,部分专门进行地震监测和信息采集。

孔内长期观测系统大多依赖大洋钻探船完成布放,如美国的“乔迪斯·决心号”布放的初始CORK、ACORK、CORK II、L-CORK,以及日本的“地球号”布放的Smart Plug、Genius Plug、LTBMS等。截至目前,在已布放的孔内长期观测系统中,已有多个并网到海底观测网,其中并网到加拿大海底观测网的ODP889节点,主要用于观测地震、地质滑坡对天然气水合物分布的影响,ODP1027节点用于观测温压变化、地震、热液对流和板块拉张的响应^[4],U1362A主要观测俯冲带流体运移与地震活动;并网到日本DONET海底观测网的C0002G、C0010A和C0006G 3个节点^[5-6],主要用于对地震和海啸进行实时监测,并为板块俯冲带的地震机制研

究提供科研数据。

日本作为一个地震多发国家,对地震和海啸的监测及预警是其进行海底观测的主要目的。日本开展的大洋钻探目标之一就是调查汇聚板块边缘中大地震的机制、周期以及构造和物质循环^[7],基于此,钻探位置的选择至关重要。依据7个世纪以来的地震和海啸记录,南海海槽恰好位于被称为“megaspaly区”的发震带上,在该区域深海发生的地震可能导致海底破裂并产生海啸,因此,南海海槽成为日本大洋钻探的理想位置。自2007年“地球号”开展大洋钻探任务起,完成的18个航次钻探任务中,除337航次外均在南海海槽进行^[8]。这是一项多年、多阶段、多航次的钻探项目,也被称为南海海槽发震带试验项目。

南海海槽发震带试验的具体任务是在大俯冲地震发生的位置建立一个跨越孕震和海啸活动上倾极限的分布式观测站,用于观测俯冲巨型逆冲的水文地质行为和巨型逆冲系统的抗震-地震过渡^[9]。该项目通过4个阶段开展,目前已全部完成。第一阶段涵盖IODP314、315和316航次^[10],3个航次瞄准前缘逆冲区、中坡巨扇断层区和熊野弧前盆地3个区域^[10],共选定8个站点进行无隔水管钻井,对主要断层系统的沉积物和相对浅层区域进行取样和表征^[9]。第二阶段包括IODP319、322、332和333共4个航次,旨在第一阶段的基础上描述菲律宾海板块俯冲特征,并安装孔内长期观测系统^[11]。第三个阶段始于IODP326航次,包括338、348、365、380和358航次^[12-13],专注于在5500~6000 m的发震带进行隔水管钻探并安装孔内观测系统^[14]。截至目前已经在4个航次安装了5套孔内观测系统,不包括刚刚结束的IODP405航次计划在JTCT-01A孔安装新的孔内长期观测系统。

下面重点对日本安装的孔内观测系统的功能结构和应用情况进行介绍,并通过典型案例说明深孔长期原位观测在地震和海啸监测方面取得的成果。

2 日本南海海槽发震带孔内长期观测系统安装应用

2.1 已安装的大洋钻探孔内观测系统

日本“地球号”于南海海槽发震带安装应用的孔内观测系统共有3种,分别为Smart Plug、Genius

表 1 各类大洋钻探孔内长期观测系统应用统计

Table1 Statistical table of multiple long-term borehole observation system applications

序号	类型	布放数量/个	对应航次	钻探船	主要功能	特点	存在不足
1	初始 CORK	15	139、169、146、156、168、174B、195、306	乔迪斯·决心号	钻孔密封、温压监测、渗透压流体采样	初代孔内长期观测系统,采用单一密封,仅能监测孔内平均压力及采集单一流体样本,无法获取局部压力或多个地层的压力梯度	
2	ACORK	5	196、328、375	乔迪斯·决心号	钻孔密封、分层温压监测、渗透压流体采样	采用 10 ³ / ₄ in(注:1 in=25.4 mm,下同)大通径管柱,可满足下一级钻具下入,并继续钻孔	采用充液式封隔器,密封效果不可靠
3	CORK II	6	205、301、375	乔迪斯·决心号	钻孔密封、分层温压监测、渗透压流体采样	采用 1/4 in 小直径管柱可满足更深基底钻孔安装需求	与 ACORK 相同,密封效果不可靠;仪器串位于主体管柱以下的裸孔内,塌孔可能导致仪器无法回收
4	L-CORK	4	327、336	乔迪斯·决心号	钻孔密封、分层温压监测、分层渗透压流体采样、原位微生物定殖培养	具备充液式 and 自膨胀式 2 种密封形式,密封可靠;增加井口球阀,满足大流量流体采样;仪器串位于穿孔管柱内,有效防止塌孔被埋	安装时需要下入多层套管并进行固井作业,耗时较多
5	Wireline CORK	2	140、148	常规科考船	钻孔密封、单层或双层温压监测、流体采样、原位微生物定殖培养、应变监测	不依赖钻探船,利用常规科考船上的专用运载工具通过缆线安装	仅能在具有重入锥、状况良好的遗留孔内进行安装
6	CORK Lite	1	MSM20/5	玛利亚·西碧拉·梅里安	钻孔密封、单层温压监测、渗透压流体采样、原位微生物定殖培养	成本低、安装简单,采用 12 ³ / ₄ in 大直径管柱,可满足大直径仪器安装	仅能进行单层温压监测和流体采样,需要 ROV 辅助安装,并需对标准 ROV 平台进行改造
7	SCIMPI	1	341S	乔迪斯·决心号	温压监测、电阻率测量等	成本低、模块化、安装快,无需重入锥、套管或 ROV,直接下放至钻杆,提钻后依靠沉积层坍塌自动密封	传感器模块布放位置精度依赖钻杆精度,无法主动调节;不适用于基岩地层
8	Smart Plug	1	319	地球号	钻孔密封、温压监测	结构小巧、成本低、安装简单	功能单一,无法进行分层监测;需固定到套管串内,套管串中需连接筛管;无法进行联网
9	Genius Plug	1	332	地球号	钻孔密封、温压监测、渗透压流体采样、原位微生物定殖培养	结构小巧、成本低、安装简单	同上
10	LTBMS	3	332、365、380	地球号	钻孔密封、分层温压监测、地震监测、地壳变形监测等	全面监测地壳活动,可联网	无流体采样功能、无可回收的仪器串

Plug 和 LTBMS (Long-Team Borehole Monitoring System)。这3种系统共计在4个航次、3个钻孔中进行了安装,见表2。其中C0010A作为主要观测孔先后在3个航次中安装了3类系统,获得了最长时间的孔内原位观测信息,C0002G在目前南海海槽发震带安装了最深的孔内长期观测系统,该站点也是未来进行深部立管钻井的站点。

表2 日本大洋钻探孔内安装的长期观测系统统计
Table 2 Statistical table of long-term observation systems installed in Japan's IODP holes

名称	安装年份	航次	安装孔位	回收年份
Smart Plug	2009	IODP319	C0010A	2010
Genius Plug	2010	IODP332	C0010A	2016
LTBMS	2010	IODP332	C0002G	未回收
LTBMS	2016	IODP365	C0010A	未回收
LTBMS	2017	IODP380	C0006G	未回收

2.2 Smart Plug 功能结构及安装应用

Smart Plug 是最早应用于南海海槽发震带试验钻探项目的临时井内观测系统,该系统设计的观测时间为1~2年,主要用于监测大储层断裂带的温度和孔隙压力。Smart Plug 内部仪器包括2个压力表、2个精密压力周期计数器、1个数据记录仪和4个温度传感器^[15](见图1)。4个温度传感器分别为数据记录仪中的铂温度传感器、压力传感器中的温度传感器和1个独立的微型温度传感器(Miniature Temperature Logger, MTL)。MTL 的采样间隔设置为60 min,其余采样间隔为1 min。2个压力传感器,一个用于监测海底静水压力(由于井口安装了带有密封圈的腐蚀帽,实际记录的是套管内的压力),其测压端口安装在封隔器密封面上方;另一个用于监测断层带孔隙压力,其测压端口位于封隔器密封件下方。其他部分包括1个以1 min/次的采样频率工作的内置电池组,可连续供电7年;1个AWQ连接器,用于连接计算机下载数据^[16-17]。

Smart Plug 首次在 IODP319 航次中的 C0010A 孔进行安装,虽然这是一个相对简单的孔内观测装置,但它标志着南海海槽钻探项目首台观测系统的成功安装^[18]。C0010A 孔在 319 航次的钻孔深度约 555 m,在孔内下入 $\varnothing 245$ mm 套管至海底以下约 515 m,套管中包含了2根筛管,筛管位于海底以下 385.11~407.6 m 处,此区间正好处于断裂带(图2中

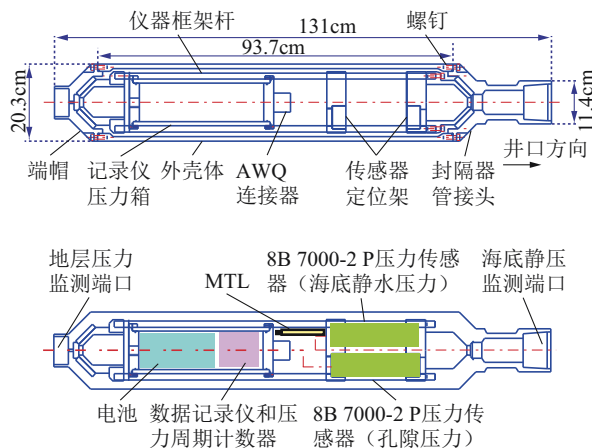
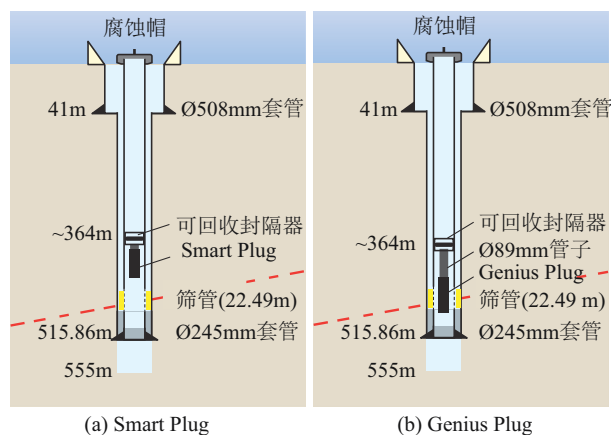


图1 Smart Plug 结构示意图(据文献[15]修改)

Fig.1 Structure diagram of Smart Plug

红色虚线)位置,便于将断裂带流体导入套管内部。可回收套管封隔器及其下方的 Smart Plug 安装到筛管以上位置^[19-20],向下通过地层压力监测端口和4个温度传感器可监测大断层内的流体压力和温度,向上通过海底压力监测端口可监测海底静水压力。套管内部通过套管封隔器与海水隔离,通过水泥固井与孔底隔离;套管环空一方面通过套管坐挂在井口形成密封,另一方面依靠筛管上方约400 m的环空沉积物和逆冲楔坍塌挤压到套管上与海水隔离^[20]。基于以上隔离环境的建立,可使 Smart Plug 仅测量断裂带的孔隙压力和温度变化。



(a) Smart Plug

(b) Genius Plug

图2 Smart Plug 和 Genius Plug 安装示意(据文献[17]修改)

Fig.2 Installation diagram of Smart Plug and Genius Plug

2.3 Genius Plug 功能结构和安装应用

Genius Plug 是对 Smart Plug 的升级,在其基础上增加了一个扩展舱^[21-23](图3a),扩展舱与 Smart Plug 通过隔板隔离,扩展舱内包括渗透压流体采集

系统和微生物定殖培养系统^[16](见图3b)。渗透压流体采集系统可采集隔离层段带有地球化学时间序列的孔隙流体,用于评估流体流动或者地球化学瞬变,主要由1个渗透泵和1组化学流体取样线圈组成。微生物定殖培养系统用于原位培养微生物种群,评估微生物群体的周转率,并对腔室中不同底物上的微生物种群进行DNA测序,主要由1个定殖装置(FLOCS)、2个相同的渗透泵和1组微生物流体取样线圈组成。化学流体取样线圈长150 m,可容纳170 mL流体,按照73 mL/年的采集速度,可满足2.3年的使用需求,微生物流体取样线圈长度也为150 m,可以保留14个月的流体^[9-10]。

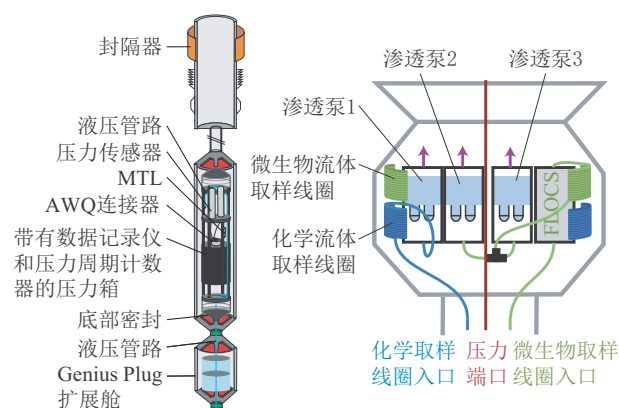


图3 Genius Plug结构示意图(据文献[23]修改)

Fig.3 Structure diagram of Genius Plug

2010年11月,在IODP332航次Genius Plug对Smart Plug进行了原位替换。与Smart Plug一样,Genius Plug也是安装到套管封隔器下方,同时,在套管封隔器与Genius Plug间增加了2个 $\varnothing 89$ mm的管接头,使Genius Plug可以进入筛管段(见图2b),便于直接采集断裂带带有时间序列的流体。

2.4 LTBMS功能结构和安装应用

2.4.1 功能结构

LTBMS与CORK相似,是一个大型的孔内长期观测系统,它在温压监测的基础上,增加了体积应变仪、宽带地震仪、倾斜组合和热敏电阻串,具备了捕捉缓慢地壳变形和高保真地震记录的能力^[18,22]。整个系统以中心油管为支撑,所有井下管线和仪器均固定到管道外壁随之下放到井底,同时该管道还可以作为固井水泥的灌注导管^[23]。中心油管顶部与LTBMS头连接,通过专用送入工具与LTBMS头锁定后,将系统从甲板整体下放到海底,

最终LTBMS头坐挂到井口。如图4所示。

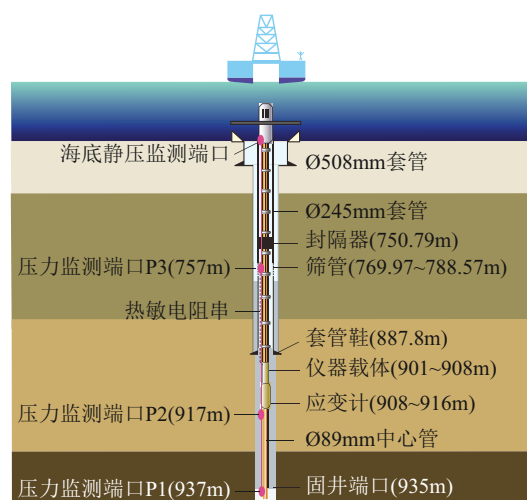


图4 C0002G孔安装的LTBMS(据文献[22]修改)

Fig.4 LTBMS installed in C0002G hole

在数据监测方面,所有的压力传感器单元(见图5a)均布置在井口的LTBMS头内,通过管线监测不同层位的压力和海底静压力^[12];其余仪器布置到井底,且通过水泥(采用斯伦贝谢公司的固井水泥“FlexSTONE”,具有不收缩特性^[24])固结到孔内,与地层形成良好耦合,使地层的细微变形可通过水泥精准传递给仪器。体积应变仪直径是传统的陆基应变计的2倍多,可承受70 MPa的环境压力^[25];宽带地震仪、倾斜组合和热敏电阻串均布置在一个H梁结构的仪器载体上(见图6),避免下入过程黑潮的冲击影响。宽带地震仪包含3个传感器,可用于测量1/360~50 Hz频率范围内的X、Y、Z 3个正交轴的地面速度。倾斜组合用于测量地面运动和地壳变形,主要包括倾斜仪、倾斜记录仪、温度数字化仪及安装到一个钛壳体内的三分量地震检波器和加速度仪。热敏电阻串用于长期监测井筒内温度,通常由5个热敏电阻节点组成,每个节点的位置由仪器载体的安装深度自动确定^[23,26-27]。

在数据采集方面,压力传感器单元内部的数据记录器、应变计、宽带地震仪和倾斜组合测得的数据,均可以通过ROV与安装在LTBMS头上的水下可匹配连接器端口(见图5b)连接并下载数据,也可以将水下可匹配连接器端口与海底地震和海啸网络系统(DONET)接口单元的RS422接口连接,通过电缆直接与陆地连通^[12,28]。

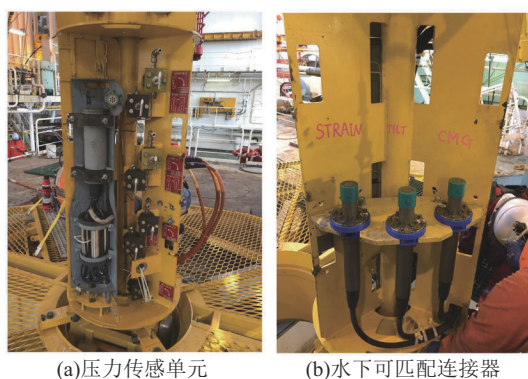


图5 LTBMS头局部结构(据文献[12]修改)

Fig.5 The local structure of LTBMS head

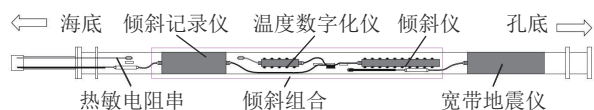


图6 仪器载体结构示意图(据文献[27]修改)

Fig.6 Structure diagram of instrument carrier

2.4.2 LTBMS安装应用

截至目前,在南海海槽共安装了3个LTBMS,包括锁定带上倾边缘上方的C0002站点、巨型张开断层带及其下盘的C0010站点和增生棱柱趾端的C0006站点,位置关系如图7所示。3个站点联合起来,可以对巨型张开断层和整个板块边界中具有不同活动特征的区域内部及其上方进行监测,有可能捕捉到从近海沟到发震带的横断面上跨越广泛时间尺度的应力和变形^[25]。表3统计了3个LTBMS的详细信息,可以看出,井底仪器的安装深度均在海底以下数百米,可极大地优化信噪比;压力监测点均在封隔器以下,在封隔器密封较好的情况下,钻孔经过数月恢复后能监测到原位孔隙流体压力和温度。

3个观测站分别于2013年、2016年和2018年连接到DONET 1海底观测网^[5,27],由于改为电缆供电,压力数据采集间隔从60 s提高到了1 s^[11],联网

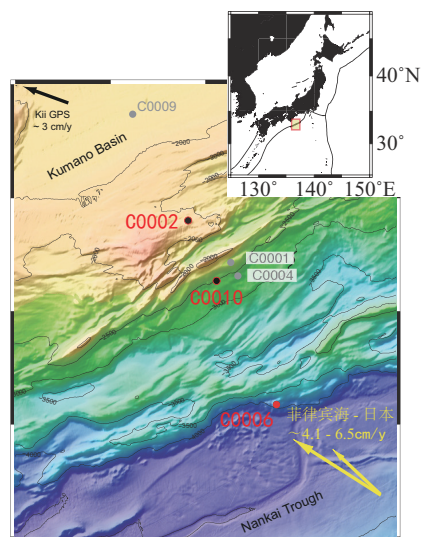


图7 LTBMS安装站点位置(据文献[6]修改)

Fig.7 Location map of three sites for installing LTBMS

后的地层压力数据可在门户网站上实时查看和下载^[12]。

3 孔内长期观测系统在地震监测方面的作用

3.1 分析瞬变压力数据与地震、海啸的关系,为地震、海啸预警提供依据

通过对Smart Plug 15个月布放期间记录的温压数据进行分析,得出在钻孔温度已基本恢复至原位状态的前提下,系统对地层变形和海底加载引起的瞬态应变具有不同的响应,主要体现在压力变化上。例如,由潮汐、风暴和海啸产生的海浪对海底施加载荷产生的压力变化大于地层,而由瑞利波引起的地层压力变化大于海底,但对于深度大于200 km的深源地震,因其主要以体波震相为特征,故海底静水压力的振幅大于地层孔隙压力振幅^[29]。图8展示了地层压力和海底静压对海啸和地震波的不同响应。图8(a)中,智利M8.8级地震引起的海啸波在地震24 h后到达C0010站点,海底静水压力和地层压力均发生了明显变化。图8(b)中,Smart

表3 C0002G、C0010A和C0006G孔内观测系统安装参数统计

Table 3 Installation parameter statistics table of C0002G、C0010A and C0006G

安装孔位	井内压力监 测点 P1/m	井内压力监 测点 P2/m	井内压力监 测点 P3/m	封隔器安装 深度/m	固井段深 度/m	热敏电阻 数量/个	热敏电阻串安 装位置/m	仪器包安装 位置/m
C0002G	937	917	757	750.79	780~935	5	761.5~899.5	901~916
C0010A	610	581	405	374.6	453.4~602	5	395.87~562.72	565~579
C0006G	455.8	425.4	无	67.2	164~446.2	5	237.4~407.4	410~425

Plug 和 F-net 的 HJO 站点监测到的萨摩亚群岛附近的 M8.1 级地震和苏门答腊附近的 M7.6 级地震引起的压力振荡,其中萨摩亚 M8.1 地震引起的海啸波在地震后大约 12 h 到达 C0010 站点,F-net 的 HJO 站点由于是陆地监测站,因此无海啸波信号。

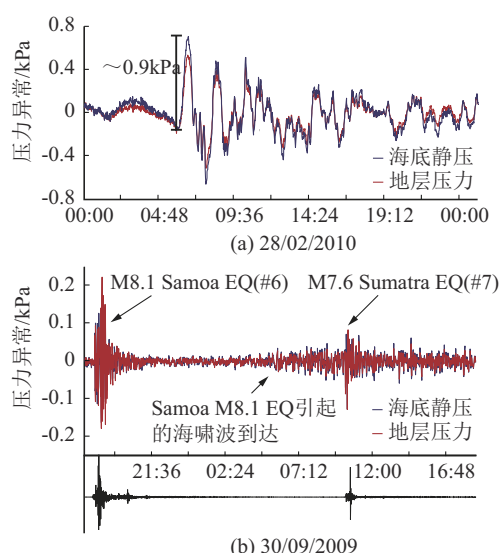


图8 Smart Plug 监测到的地震引起的地层压力异常(据文献[29]修改)

Fig.8 Abnormal formation pressure caused by earthquakes monitored by Smart Plug

3.2 自身和横向对比数据相结合,可为是否发生地壳变形提供直接证据

地层孔隙压力的变化可作为地震或其他瞬态变形事件中体积应变的敏感测量指标。例如,2009年,距 Smart Plug 观测站 720 km 处发生的一次 6.2 级相对浅源地震,观测到的海底静水压力信号振幅较地层压力信号振幅更大,且面波到达 20 min 后,地层压力阶跃式下降了 0.2 kPa,但海底静水压力没有变化,且距震中 200 km 的另外 2 个观测站也未观测到同期信号。综合分析这一特殊情况,认为 Smart Plug 观测到的阶跃式压力下降这一体积应变事件非地壳变形引起,可能是由断层渗透性瞬时增强导致^[29]。2016 年,日本西南部纪伊半岛在离岸约 50 km 处发生了 6.0 级海上地震,C0002 站点的孔隙压力同震期间增加了 2.1 kPa,距离主震更远的 C0010 站点孔隙压力增加了 0.7 kPa,2 个站点的孔隙压力同时增加,且距离主震站点较近的压力增加更大,证明是地震导致的地壳收缩变形^[30]。

3.3 时空尺度上的观测数据,为探索地震孕育机制和地震预警提供助力

DONET 海底观测网用于实时监测海啸传播、地震波和地震活动,2020 年连接到 DONET 观测网的 3 个观测站(C0002G、C0010A 和 C0006G)实时监测到一次慢滑事件,并通过分析孔隙压力变化和宽频带地震仪记录的浅部极低频事件分析出了慢滑的迁移和传播过程。本次慢滑事件发生期间,C0002G 孔显著膨胀,孔隙压力降低,C0006G 孔隙压力没有明显变化,C0010A 由于更换传感器出现了不稳定的压力信号,结合 2018 年 C0002G 和 C0010A 同时观测到一个慢滑事件,而 C0006G 孔未观测到的情况,说明慢滑的迁移路径是由下倾区向上倾区迁移,而孔内的宽频带地震仪在慢滑开始后的 2 天内记录到的 5 个浅部极低频事件也反映了从下倾区向上倾区迁移的路径,证明浅部极低频事件是在慢滑迁移过程中触发的^[31]。孔内长期观测系统同步观测到具有时空关联性的慢滑事件与浅部极低频事件,有助于理解板块耦合动态,更好地理解地震孕育机制,为未来大地震的预测提供重要参考。

4 总结

(1) 本文简要回顾了孔内长期观测系统的发展,并对大洋钻探布放的多种类型孔内长期观测系统进行了功能梳理和特点总结。重点分析了日本“地球号”用于进行断裂带地震监测而布放的 Smart Plug、Genius Plug 和 LTBMS 3 类孔内长期观测系统,并对其观测结果对地壳变形和地震监测起到的作用进行了分析。

(2) Smart Plug 和 Genius Plug 均属于模块化微型观测系统,其中 Smart Plug 主要对单一断层孔隙流体压力和温度进行监测;Genius Plug 除具备 Smart Plug 的功能外,还能采集带有地球化学时间序列的原位流体和进行原位微生物定殖培养。LTBMS 是大型工程化系统,需要根据现场钻井情况进行设计和部署,更加专注于地层深处的地震监测,可在隔离孔段内进行不同地层的孔隙流体温压监测,LTBMS 管柱上布置的体积应变仪、宽带地震仪和倾斜组合被固结到孔内,可精确监测细微的地壳变形和地震活动,与海底观测网联网后,能够实时获得监测到的温压、地震等信息。

(3) Smart Plug 部署 15 个月后成功回收, Genius Plug 部署 5 年后成功回收, 3 个 LTBMS 已连接到 DONET 海底观测网进行长期观测。对 3 类孔内长期观测系统已获取的数据进行分析, 证明深海深孔原位长期观测对地震监测意义重大, 表现在: 分析孔内长期观测系统孔隙和海底静水压力瞬变数据, 获得瞬变压力与地震、海啸的关系, 为地震、海啸预警提供依据; 综合分析孔内长期观测系统孔内压力、静水压力和其他观测站压力数据, 可为是否发生地壳变形提供直接证据; 系统分析多个联网孔内长期观测系统的孔隙压力数据和宽频带地震仪数据在时空尺度上的关系, 有助于探索地震孕育机制并提供大地震预警。

综上所述, 在大洋钻探孔布放孔内长期观测系统, 并将其接入海底观测网, 一方面可以实时掌握地震活动和地壳变形情况, 另一方面, 通过长期观测和数据积累, 有助于掌握地壳板块运动和地震活动之间的相互关联, 更全面地认识地球的构造演化和地震活动规律。

5 建议

随着我国“梦想”号大洋钻探船正式入列和美国“乔迪斯·决心号”的退役, 国际大洋钻探的局势势必发生转变, 我们应该抓住时机, 加快推进大洋钻探配套技术的研发。在孔内长期观测系统方面:

(1) 依托国家重大装备项目, 进行多学科、多领域、多行业沟通融合, 加强顶层设计, 同步推进多模块并行研发。典型的大洋钻探孔内长期观测系统是一个大型的工程化系统, 集钻孔重入、管柱布放、封隔密封、温压监测、原位流体采集、数据存储传输、微生物定植培养和地震监测等多种技术于一体, 涉及钻探施工、工程机械、仪器仪表、地球物理、地球化学、地球生物等多领域, 需要联合研究所、高校和企业等多行业结合科研和观测需求共同研发, 形成具备海上模块化组装、快速布放功能的国产深海孔内长期观测系统。

(2) 分析美国和日本现有孔内长期观测系统的优势和不足, 扬长避短, 组建专业全面的科研队伍, 力争局部或全面提升观测取样技术。例如, 在数据采集方面, 针对单机孔内观测系统, 数据采集一般通过 ROV 采用高压水密接插件实现, 还未开展非接触式无线数据采集技术研究应用; 在流体采样方

面, 目前还仅局限于原位流体采集, 取样线圈内的流体需转移到船上进行分析, 尚未开展原位流体化学成分判定识别技术研究, 同时流体采样管还不具备保温、保压、保光等功能。我国相关科研人员可针对以上需求开展技术升级研究, 在填补国内技术空白的同时, 实现局部赶超。

(3) 借鉴日本大洋钻探的模式, 针对国情需要在南海开展更多航次的钻探任务, 在重点孔位布放孔内长期观测系统, 前期可采用单机运行的模式, 待系统正常运行后, 择机连接到我国的海底观测网, 进一步提升我国海底地壳运动观测的能力, 并为地球科学和生命科学研究提供更高分辨率的地壳原位数据信息和流体样本。

参考文献 (References):

- [1] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125-130.
WANG Pinxian. Seafloor observatories: the third platform for Earth system observation[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130.
- [2] 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.
YangLYU, 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.
- [3] Becker K, Davis E E. A review of Cork designs and operations during the Ocean Drilling Program[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, 301. College Station TX: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2005.DOI:10.2204/iodp.proc.301.2005.
- [4] 李建如, 许惠平. 加拿大“海王星”海底观测网[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6): 656-661.
LI Jianru, XU Huiping. NEPTUNE-Canada[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 656-661.
- [5] 申中寅. 日本海洋实时监测系统 DONET 简介[J]. 国际地震动态, 2018(7): 34-40.
SHEN Zhongyin. A brief introduction to DONET in Japan[J]. Recent Developments in World Seismology, 2018(7): 34-40.
- [6] Becker K, Kinoshita M, Toczko S, et al. NanTroSEIZE stage 3: frontal thrust Long-Term Borehole Monitoring System (LT-BMS) [C]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program. College Station, TX: International Ocean Discovery Program.DOI:10.14379/iodp.proc.380.2018.
- [7] 刘新月, 王清, 周祖翼. 日本的综合大洋钻探计划 (IODP) [J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 552-557.
LIU Xinyue, WANG Qing, ZHOU Zuyi. IODP in Japan[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 552-557.
- [8] Inagaki F, Hinrichs K U, Kubo Y, et al. Deep coalbed biosphere off Shimokita: microbial processes and hydrocarbon sys-

- tem associated with deeply buried coalbed in the ocean[J]. Scientific Drilling, 2012, 21: 17–28.
- [9] Tobin H J, Kinoshita M. Investigations of seismogenesis at the Nankai Trough, Japan[EB/OL]. (2006–08–21)[2024–11–06]. http://publications.iodp.org/scientific_prospectus/NanTroSEIZE_stage1/.
- [10] Tobin H, Kinoshita M, Ashi J, et al. NanTroSEIZE stage 1 expeditions: introduction and synthesis of key results[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Washington, DC, USA, 2009: 1–20.
- [11] Moore G F, Kanagawa K, Strasser M, et al. NanTroSEIZE stage 3: NanTroSEIZE plate boundary deep riser 2[J]. Scientific Drilling, 2013, 17: 1–12.
- [12] Saffer D, Kopf A, Toczko S, et al. NanTroSEIZE Stage 3: Shallow Megasplay Long-Term Borehole Monitoring System [C]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2017. DOI: 10.14379/iodp.proc.365.2017.
- [13] 林间, 徐敏, 周志远, 等. 全球俯冲带大洋钻探进展与启示[J]. 地球科学进展, 2017, 32(12): 1253–1266.
- LIN Jian, XU Min, ZHOU Zhiyuan, et al. Ocean drilling investigation of the global subduction processes[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(12): 1253–1266.
- [14] Kopf A, Saffer D, Toczko S, et al. NanTroSEIZE stage 3: shallow megasplay Long-term borehole monitoring system (LT-BMS) [EB/OL]. (2016–10–15)[2024–11–06]. http://publications.iodp.org/preliminary_report/365/.
- [15] Kopf A, Araki E, Toczko S, et al. Methods[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2011: 1–47.
- [16] Kinoshita C, Saffer D, Kopf A, et al. Changes in physical properties of the Nankai trough megasplay fault induced by earthquakes, detected by continuous pressure monitoring [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(2): 1072–1088.
- [17] Kopf A, Araki E, Toczko S, et al. The SmartPlug and GeniusPlug: simple retrievable observatory systems for NanTroSEIZE borehole monitoring[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2011. DOI: 10.2204/iodp.proc.332.2011.
- [18] Saffer D, McNeill L, Araki E, et al. NanTroSEIZE stage 2: NanTroSEIZE riser/riserless observatory [J]. Integrated Ocean Drilling Program Preliminary Report, 2009, 319: 1–83.
- [19] Saffer D, McNeill L, Byrne T, et al. Site C0010[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2010: 1–70.
- [20] McNeill L, Saffer D, Byrne T, et al. IODP expedition 319, NanTroSEIZE stage 2: first IODP riser drilling operations and observatory installation towards understanding subduction Zone seismogenesis[J]. Scientific Drilling, 2010, 10: 4–13.
- [21] Saffer D, Kopf A, Toczko S, et al. Site C0010[C]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2017. DOI: 10.14379/iodp.proc.365.103.2017.
- [22] Kopf A, Araki E, Toczko S, et al. NanTroSEIZE Stage 2: Riserless Observatory [C]// Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, 332. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2011. DOI: 10.2204/iodp.proc.332.2011.
- [23] Saffer D, Kopf A, Toczko S, et al. Expedition 365 methods [C]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 365. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2017. DOI: 10.14379/iodp.proc.365.102.2017.
- [24] Kopf A, Araki E, Toczko S, et al. Site C0002[C]//Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, 332. Tokyo: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., 2011. DOI: 10.2204/iodp.proc.104.2011.
- [25] Kinoshita M, Becker K, Toczko S, et al. NanTroSEIZE stage 3: frontal thrust Long-term borehole monitoring system (LT-BMS)[J]. International Ocean Discovery Program Preliminary Report, 2018, 318. DOI: 10.14379/iodp.proc.380.2018.
- [26] Kopf A, Araki E, Toczko S, et al. NanTroSEIZE stage 2: riserless observatory[J]. Integrated Ocean Drilling Program Preliminary Report, 2011, 322. DOI: 10.2204/iodp.pr.332.2011.
- [27] Becker K, Kinoshita M, Toczko S, et al. NanTroSEIZE Stage 3: Frontal thrust long-term borehole monitoring system (LTBMS) [C]//Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 380. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2018. DOI: 10.14379/iodp.proc.380.2018.
- [28] Araki E, Kimura T, Machida Y Y, et al. Deep seafloor borehole observatories for seismogenic zone monitoring[C]//2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean). Kobe, Japan: IEEE, 2016: 656–659.
- [29] Hammerschmidt S, Davis E E, Kopf A. Fluid pressure and temperature transients detected at the Nankai Trough Megasplay Fault: Results from the SmartPlug borehole observatory[J]. Tectonophysics, 2013, 600: 116–133.
- [30] Wallace L M, Araki E, Saffer D, et al. Near-field observations of an offshore Mw 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(11): 8338–8351.
- [31] Ariyoshi K, Iinuma T, Nakano M, et al. Characteristics of slow slip event in March 2020 revealed from borehole and DONET observatories[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 600793.

(编辑 王跃伟)