

深海取样岩心填充率自动监测系统研制及应用

邵帅¹, 苏波², 王荣璟^{2*}, 张涛², 卢春华²

(1. 中海油田服务股份有限公司物探事业部, 天津 300459; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 岩心填充率自动监测系统的研制是用以填补取心过程中缺少取心状态监测的不足。岩心填充率自动监测系统由主控制器、预留温度压力监测模块、霍尔传感器模块、数据储存模块、串口调试模块组成, 其中实现取心状态监测的原理是基于霍尔效应。该系统可监测的取心速度范围为: 0~30 mm/s, 监测精度约为1%, 系统选用STM32系列单片机、大容量存储器、高速USB接口等器件或模块, 具备在线调试、编程、升级功能。采用研制的样机进行了海上试验, 结果表明该系统可在水深3000 m的环境下(0~35 MPa的孔底压力)自动监测岩心贯入岩心管的过程, 可为深海取样现场取样器类型的选择和取样器工作参数优化提供理论指导, 具有广阔的应用前景。

关键词: 岩心填充率; 自动监测; 霍尔效应; 深海取样

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 2096-9686(2024)06-0106-05

Development and application of automatic monitoring system for core filling rate in deep-sea coring

SHAO Shuai¹, SU Bo², WANG Rongjing^{2*}, ZHANG Tao², LU Chunhua²

(1. Geophysical Exploration Division of China Oilfield Services Limited, Tianjin 300459, China;

2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: The development of automatic monitoring system for core filling rate is to fill the shortage of core condition monitoring in the coring process. The automatic monitoring system is composed of main controller, reserved temperature and pressure monitoring module, Hall sensor module, data storage module and serial debugging module. Among which, the principle of core status monitoring is based on Hall effect. The coring speed range of the system can be monitored in 0~30 mm/s, and the monitoring accuracy is about 1%. The system uses STM32 single-chip microcomputer, large-capacity memory, high-speed USB interface and so on, which has the functions of online debugging, programming and upgrading. The sea tests were made, and the results show that the system can automatically monitor the process of core penetration into the core tube at a water depth of 3000m (a hole bottom pressure of 0~35MPa), which can provide theoretical guidance for the selection of field sampler type and the optimization of working parameters of the sampler, and has a broad application prospect.

Key words: core filling rate; automatic monitoring; Hall effect; deep-sea coring

0 引言

海洋深水区是世界油气资源和多金属矿产资源的重要战略接替区。例如, 南海深水中富藏大量

天然气水合物, 其分布范围广泛、储量丰富、能量密度大、清洁高效, 被认为是极有可能成为未来最有远景的新型能源, 引起了世界各国的广泛关注^[1-3]。

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-07-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.013

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司攻关项目“深水钻孔取样贯入装置动态监测系统研究”(编号: G2117B-0712G112)

第一作者: 邵帅, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 硕士, 主要从事海洋工程勘察调查作业及装备研究工作, 天津市滨海新区塘沽海洋高新技术开发区海川路1581号, shaoshuai3@cosl.com.cn。

通信作者: 王荣璟, 男, 汉族, 1976年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 主要从事地质钻探技术、地质钻探工具、非常规能源勘探与开发等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, rjwang@cug.edu.cn。

引用格式: 邵帅, 苏波, 王荣璟, 等. 深海取样岩心填充率自动监测系统研制及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 106-110.

SHAO Shuai, SU Bo, WANG Rongjing, et al. Development and application of automatic monitoring system for core filling rate in deep-sea coring[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 106-110.

深海沉积物作为深海地质及生命过程、环境变化的重要记录载体^[4],是海底地形地貌^[5]、古海洋与古气候^[5-7]、海洋沉积作用^[8-9]、深海极端环境演化^[10]等海洋科学研究的基础资料。如何进行可控、超长、连续、低扰动的沉积物取样一直是国内外沉积物取样技术领域的研究热点,也是我国深海科学研究面临的主要技术瓶颈^[11-17]。为保障深水沉积物贯入取样顺利实施,急需对贯入装置的工作状态进行监测,判断取样情况,进而优化设计钻孔贯入取样装置及其工艺流程。

“岩心填充率”反映贯入器的工作状态,用以检验贯入器是否按预设指标完成任务或实际完成的情况。取样器内部岩心填充率监测难度很大,国内外都没有相关的研究经验可供借鉴。取样器内部岩心填充率监测系统的难度主要集中在直线大位移参数上,受 3 方面的影响:

- (1) 传感器自身尺寸和使用环境的影响;
- (2) 传感器安装的空间受限,主要是径向尺寸的严格制约,轴向尺寸也受限;
- (3) 高压、腐蚀、振动、高载荷的工作环境。

1 岩心填充率自动监测系统的方案设计

针对冲击器式保压取样器、旋转式保压取样器两种贯入装置,采用特制霍尔位移传感器监测岩心贯入岩心管内部的进程。上述数据以连续或分段的数值存入监测仪的存储器中,贯入装置提出井筒后,通过读卡器将存储数据导入计算机。

1.1 系统的结构设计

岩心填充率自动监测系统由保护筒和监测装置组成,监测装置置于保护筒内。其中保护筒(如图 1)是一根外径 50 mm、壁厚 3 mm 的钛合金空心管,其两端有用 O 形圈密封的端盖,端盖上有 2 颗限制其向外移动的螺丝。该保护管可耐 35 MPa 围压,可适应 0~3000 m 水深环境。

监测装置由主板、霍尔电路、温度传感器和电池组成。该装置由容量 12580 mWh、额定电压 3.7

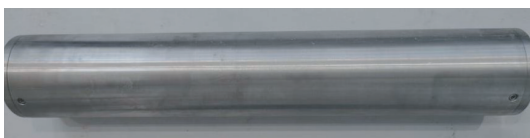


图 1 保护筒实物

Fig.1 Picture of protective cylinder

V 的电池供电,可在正常工况下工作 48 h。使用时将该装置置于带有磁钢的衬管内,当有磁场经过霍尔元件时便会产生电信号,电信号通过霍尔电路传递给主板,并经主板处理后形成进尺数据储存在主板上的 SD 卡中,电路原理如图 2。

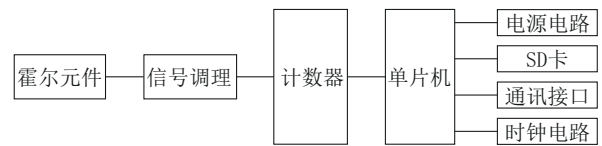


图 2 电路原理

Fig.2 Circuit schematic diagram

采用一体式监测方案,将永磁体以垂直距离 50 mm 间隔,螺旋均布在 $\varnothing 59$ mm、 $\varnothing 53$ mm 的特定规格无磁衬管上,装载有霍尔组件的保护筒规格为 $\varnothing 50$ mm、L290 mm,保护筒与无磁衬管之间形成轴向滑动配合既可保证贯入过程中的流体可以顺利通过无磁衬管又可平衡深海环境下的压差。通过径向相互约束来固定霍尔接近开关和永磁体的相对位置从而满足霍尔位移传感器的要求。监测系统样机内部见图 3。

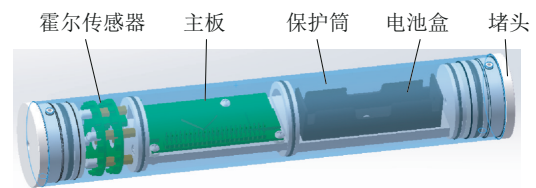


图 3 监测系统样机模型

Fig.3 Prototype of the monitoring system

1.2 系统的硬件电路设计

岩心填充率监测电路方案设计要综合考虑环境和所需的测量精确度,本着安全性、可靠性、先进性的原则选择,其中包括 MCU 的确定、传感器的选型、检测方法的选择。方案设计完成后,要能实现监测数据的获取和存储,以及最终的可视化要求。

该系统主要由主控制器、预留温度压力监测模块、霍尔传感器模块、数据储存模块、串口调试模块组成。其具体功能实现方案见图 4。可监测 0~30 mm/s 取心速度的岩心进程情况,监测精度约为 1%,系统选用 STM32f4xx 系列的单片机、大容量存储器、高速 USB 接口等模块,具备在线调试、编程、升级功能。

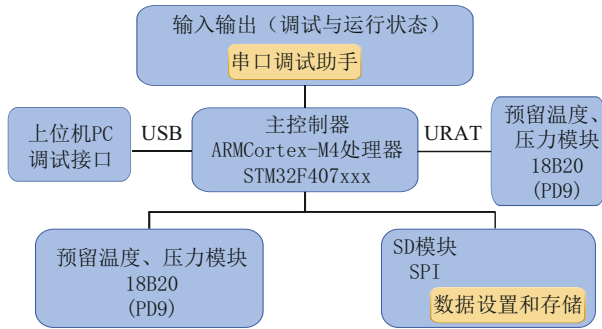


图4 系统功能和结构组成设计

Fig.4 System function and structure composition design

1.2.1 霍尔传感器模块

位移检测功能的实现主要依靠于霍尔元器件DH627,它是根据霍尔效应所制作的一种半导体薄片传感器,结构简单、体积小,对磁场变化敏感,有较宽的频率响应,输出电压变化大,且使用寿命长。物理结构类似于普通的三极管,拥有3个管脚。霍尔效应是指当半导体薄片两端通过恒定的电流,并使其垂直方向处施加均匀的磁场,则在垂直于电流和磁场方向上会产生霍尔电压。

霍尔元器件为开关型霍尔传感器DH627,在通过管道内部均匀排列的磁铁时,产生磁场变化进而进行计数。在具体设计时为减小误差,将霍尔传感器电路分为上下两层,根据信号的获取和分析,以及对状态位的设置来获取具体的位移。

1.2.2 温度传感器模块

DS18B20是由DALLAS半导体公司推出的一种“一线总线”接口的温度传感器。与传统的热敏电阻等测温元件相比,它是一种新型的体积小、适用电压宽、与微处理器接口简单的数字化温度传感器。一线总线结构具有简洁且经济的特点,可使用户轻松地组建传感器网络,从而为测量系统的构建引入全新概念,测量温度范围为-55~+125℃,精度为±0.5℃。现场温度直接以“一线总线”的数字方式传输,大大提高了系统的抗干扰性。它能直接读出被测温度,并且可根据实际要求通过简单的编程实现9~12位的数字值读数方式。工作电压3~5.5V,采用多种封装形式,从而使系统设计灵活、方便,设定分辨率及用户设定的报警温度存储在EEPROM中,掉电后依然保存。

DS18B20的典型温度读取过程为:复位→发SKIP ROM命令(0XCC)→发开始转换命令(0X44)→延时→复位→发送SKIP ROM命令(0XCC)→发

读存储器命令(0XB E)→连续读出两个字节数据(即温度)→结束。

1.2.3 数据SD卡及存储器模块

由于应用场景的限制和数据传输方式的要求,选用SD存储和读卡器读取的方式(见图5、图6)。

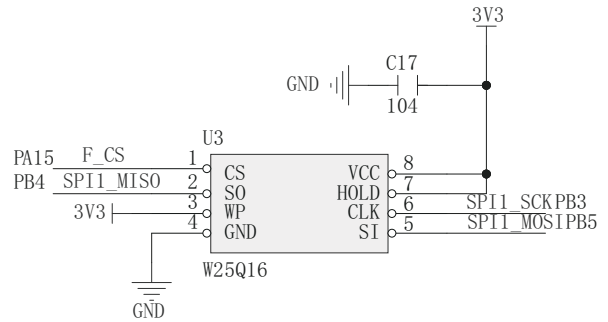


图5 储存电路

Fig.5 Circuit storage

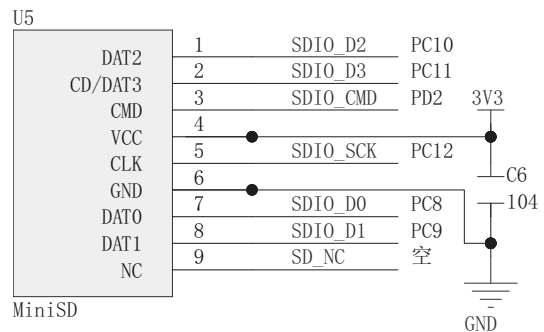


图6 SD卡接口电路

Fig.6 SD card interface circuit diagram

设计的开发板集成标准的SD卡接口,使用STM32F4的SDIO接口驱动,4位模式,最高通信速度可达48MHz(分频器旁路时),最高传输速度可达24Mb/s。使用FATFS管理SD卡,实现SD卡文件的读写等基本功能。将FATFS的协议集成到系统开发中,实现文件的创建、存储、查看和修改。通过SD卡设置开机时间等控制运行时间和实时时间的获取和存储。

2 海上试验

岩心填充率自动监测系统样机加工完成后,共计3次搭乘中海油“708”船在南海海域进行了8回次海上试验,如图7。海上试验旨在验证不同规格样机在海上实际工况环境下系统的监测精度,在海试中所出现的问题可以指导之后对样机的系统、结构及软件的优化与改进。



图 7 取样试验

Fig.7 Sampling tests

首先对 PC 衬管、钛合金衬管进行加工,以 5 cm 的间距螺旋布置磁钢。然后在岩心管上接头侧面的通孔处悬挂牵引绳,另一端穿过单向阀与样机相连。将加工好的 PC 衬管放入岩心管中,上端与岩心管上接头相连,下端坐落在岩心管内部的台阶处。完成钻具组装后,开始钻进,记录下投放、下落至井底、解卡、开泵、完成钻进、开始打捞、岩心管出井口的时间点和钻进参数,并形成试验记录表。

在第 1 回次试验,由于加工保护筒时刀具偏心对保护筒的耐压强度产生了较大影响,以至于在投入海底时保护筒被压裂。在第 2 和第 4 回次试验中,由于泥样不成形导致在提钻过程中,岩心掉落。第

3、5、7 回次试验分别准确记录了最终的岩心长度以及在取样过程中岩心的进入与掉落情况。综合多次的试验数据及实际情况,证明了监测系统在岩心管内监测岩心填充率的可靠性和数据读取的准确性。试验记录表见表 1,现取其中较为典型的 06 回次试验为例分析取样过程:21:30 系统开始工作装入岩心管(见图 8a),00:30 下放钻具;00:41 开泵;00:44 开始钻进,监测系统检测到霍尔传感器相对位置变化开始记录位移数据;00:48 停钻,系统记录此时进尺(Halladvance)0.88 m(见图 8b);00:49 对钻具进行整体打捞,岩心管中的有 0.2 m 岩心从岩心管中掉落,系统记录退尺(Hallretreat)0.18 m(见图 8c)。最终实际取上 0.7 m 的岩心,与系统监测数据相符。

表 1 试验数据记录

Table 1 Record sheet of the experimental data

回次 编号	钻杆总 长/m	钻进深 度/m	监测系统读数		岩心	
			进尺/ m	退尺/m	编号	长度/m
01	60.2	1.5	0	0	01	0
02	620	1.5	0.45	0.45	001	0
03	620	1.5	0.8	0.4	002	0.4
04	620	1.5	1.2	1.2	003	0
05	620	1.5	1.5	0	004	1.5
06	627	3	0.9	0.2	005	0.7
07	1325	3	1.8	0	0001	1.8

```
Time:21:30:34;;Date:2024-05-08;;Week:3
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: -2 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:21:30:35;;Date:2024-05-08;;Week:3
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: -2 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:21:30:36;;Date:2024-05-08;;Week:3
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: -2 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:21:30:37;;Date:2024-05-08;;Week:3
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: -2 cm
Hallretreat: -2 cm
```

(a) 系统开始工作

```
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:00:48:42;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:0;;up:1
tempL:0;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:00:48:43;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:0;;up:1
tempL:0;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:00:48:44;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:0;;up:1
tempL:0;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: -2 cm
Time:00:48:45;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:0;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: -2 cm
```

(b) 系统记录总进尺

```
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: 18 cm
Time:00:49:13;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: 18 cm
Time:00:49:14;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: 18 cm
Time:00:49:15;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: 18 cm
Time:00:49:16;;Date:2024-05-09;;Week:4
Temperature: NO DEVICE
down:1;;up:1
tempL:1;;tempH:1
Halladvance: 88 cm
Hallretreat: 18 cm
```

(c) 系统记录总退尺

图 8 系统实时位移数据记录

Fig.8 Real-time displacement data record

3 结语

岩心填充率自动监测系统在海上试验中展现

了多项优点和面临的挑战,同时也揭示了未来的改进方向。

首先,该系统的优点主要包括:

(1)其高度的自动化能力,能够连续监测取心速度0~30 mm/s的取心进程,并且具备数据存储、处理与传输的能力。

(2)通过使用霍尔效应和特制的霍尔位移传感器,系统能够精确地测量岩心的位置,监测精度约为1%,从而实时监控岩心填充率。

(3)系统选用STM32单片机,使其能够在深海高压环境下长时间稳定工作。

然而,在海试中也暴露出一些问题。例如泥样不成形问题也在提钻过程中导致了岩心掉落的情况。这些问题的出现提示我们在材料选择、结构设计和取样工艺上还有待优化。

针对以上问题,计划进一步实时收集现场实验数据以优化软件的性能。同时,也将探索无线通信技术的应用,以提高数据传输的及时性和准确性。这些改进措施旨在使岩心填充率自动监测系统更加稳定、准确,为深水钻探提供更有效的技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 卢春华,张涛,徐俊,等.海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2023,50(6):18-26.
LU Chunhua, ZHANG Tao, XU Jun, et al. Development and experiment of pressure core sampler for marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 18-26.
- [2] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.
WANG Nan, PEI Ling, LEI Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [3] 史斗,郑军卫.世界天然气水合物研究开发现状和前景[J].地球科学进展,1999(4):330-339.
SHI Dou, ZHENG Junwei. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world[J]. Advance in Earth Sciences, 1999(4): 330-339.
- [4] 张鑫,栾振东,阎军,等.深海沉积物超长取样系统研究进展[J].海洋地质前沿,2012,28(12):40-45.
ZHANG Xin, LUAN Zhendong, YAN Jun, et al. A review of development in deep-sea long coring system[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(12): 40-45.
- [5] 程芳晋,俞志明,宋秀贤.东海近岸泥质区柱状沉积物的百年内沉积粒度变化及其影响因素[J].海洋科学,2013,37(10):58-64.
CHENG Fangjin, YU Zhiming, SONG Xiuxian. Variations of sediment grain size of the coastal mud area of the East China Sea and the influence factors during recent hundred years[J]. Marine Sciences, 2013, 37(10): 58-64.
- [6] Cheshire H, Thuro J, Nederbragt A J. Late Quaternary climate change record from two long sediment cores from Guaymas Basin, Gulf of California[J]. Journal of Quaternary Science,

- 2005, 20(5): 457-469.
- [7] 周宇,蒋富清,徐兆凯,等.近2 Ma帕里西-维拉海盆沉积物中碎屑组分粒度特征及其物源和古气候意义[J].海洋科学,2015,39(9):86-93.
ZHOU Yu, JIANG Fuqing, XU Zhaokai, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the Parece Vela Basin and its implication of provenance and palaeoclimate over the last 2 Ma[J]. Marine Sciences, 2015, 39(9): 86-93.
- [8] Toomey M R, Curry W B, Donnelly J, et al. Reconstructing 7000 years of North Atlantic hurricane variability using deep-sea sediment cores from the western Great Bahama Bank[J]. Paleooceanography, 2013, 28(1): 31-41.
- [9] 邓智瑞,何青,邢超锋,等.长江口北槽柱状沉积物粒度分布特征及沉积环境指示意义[J].海洋科学,2016,40(1):112-122.
DENG Zhirui, HE Qing, XING Chaofeng, et al. Sediment depositional characteristics of North Passage in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Sciences, 2016, 40(1): 112-122.
- [10] Konno Y, Oyama H, Nagao J, et al. Numerical analysis of the dissociation experiment of naturally occurring gas hydrate in sediment cores obtained at the Eastern Nankai Trough, Japan[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(12): 6353-6358.
- [11] Lunne T, Long M. Review of long seabed samplers and criteria for new sampler design[J]. Marine Geology, 2006, 226(1): 145-165.
- [12] 段新胜,鄢泰宁,陈劲,等.发展我国海底取样技术的几点设想[J].地质与勘探,2003(2):69-73.
DUAN Xinsheng, YAN Taining, CHEN Jin, et al. Some ideas about how to develop seafloor sampling techniques in China[J]. Geology and Prospecting, 2003(2): 69-73.
- [13] 耿雪樵,徐行,刘方兰,等.我国海底取样设备的现状与发展趋势[J].地质装备,2009,10(4):11-16.
GENG Xueqiao, XU Xing, LIU Fanglan, et al. The current status and development trends of marine sampling equipment[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2009, 10(4): 11-16.
- [14] 阮锐.海底重力取样技术的探讨[J].海洋测绘,2009,29(1):66-69.
RUAN Rui. Discussion of technology on seafloor gravity sampling[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(1): 66-69.
- [15] 鄢泰宁,补家武,李邵军.浅析国外海底取样技术的现状及发展趋势——海底取样技术介绍之一[J].地质科技情报,2000(2):67-70.
YAN Taining, BU Jiawu, LI Shaojun. Brief study on the international present condition and developing tendency of the technology of seafloor sample drilling[J]. Geological Science and Technology Information, 2000(2): 67-70.
- [16] 邓都都,阮海龙,赵义,等.保压取样钻具内岩心温压采集器的研制与应用[J].钻探工程,2022,49(6):116-121.
DENG Dudu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Development and application of the temperature and pressure collector in the pressure core sampler[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 116-121.
- [17] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等.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,2021,48(7):33-39.
LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7): 33-39.

(编辑 王文)