

海域天然气水合物保温保压取样钻具 研究与应用进展

刘协鲁, 阮海龙*, 赵 义, 蔡家品, 陈云龙, 梁 涛, 李 春, 刘海龙, 邓都都
(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 保温保压取样, 作为开展海域天然气水合物勘查工作的关键技术方法, 是获取水合物原位样品的核心技术手段。本文对国内外海域天然气水合物保温保压取样钻具的相关资料进行了汇总梳理, 并从工作原理、结构特点和试验应用等方面对国内保温保压取样钻具的研究与应用进展进行了分析与总结。通过采用不同的工作原理, 国内保温保压取样钻具已能够在软—中硬—硬地层中进行取样, 在工程应用中的保压成功率、岩心收获率等性能指标能够满足取样需求, 有效推进了天然气水合物勘查评价自主化实施进程。

关键词: 海域天然气水合物; 保温保压; 取样钻具; 深海钻探

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)07-0033-07

Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate

LIU Xielu, RUAN Hailong*, ZHAO Yi, CAI Jiapin, CHEN Yunlong,
LIANG Tao, LI Chun, LIU Hailong, DENG Dudu
(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: As a key technical method for the exploration of marine natural gas hydrates, pressure-temperature sampling is a core technical method for obtaining in-situ samples of hydrates. This article reviews the relevant data of pressure-temperature core samplers at home and abroad, and analyzes domestic marine natural gas hydrate pressure-temperature core samplers in terms of the working principle, structural characteristics, and experimental applications. The domestic pressure-temperature core sampler has been able to sample in soft to medium-hard to hard formations by adopting different working principles. The performance indicators of domestic pressure-temperature core samplers in field applications, such as pressure retention success rate, core recovery, can also meet the sampling needs; thus effectively facilitating the process of independent natural gas hydrate exploration and evaluation by China.

Key words: marine natural gas hydrate; pressure-temperature core sample; coring tool; deep sea drilling

0 引言

天然气水合物, 因资源量丰富、能量高度压缩、
清洁环保等特点, 成为未来理想的战略接替能源之

—^[1-7], 引起了世界各国尤其是发达国家的高度重
视, 并争相开展勘查试采工作^[8-11]。获取高保真的
实物样品, 开展饱和度、开采特性等分析, 是准确评

收稿日期: 2020-08-23; 修回日期: 2021-06-25 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.07.006

基金项目: 国家重点研发计划“战略性国际科技创新合作”重点专项“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号: 2018YFE0208200)

作者简介: 刘协鲁, 男, 汉族, 1985年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事海洋钻探取心工具研制工作, 北京市海淀区学院路29号, liuxielu@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 阮海龙, 男, 汉族, 1984年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 从事金刚石钻头、钻具、钻进工艺的优化设计工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期(102446), rhailong@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 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.

价水合物资源储量的基础工作。确定天然气水合物中赋予的天然气原位浓度的唯一方法是通过保温保压取样钻具获取地层原状岩心。原状天然气水合物取样难度大、工艺复杂,不仅需要保温保压状态下采获,而且要保证不同地层条件下原位样品的采取率,同时还要保证样品在取样过程中原位状态的保持,对取样技术提出了较高的要求。国内外相关机构对保温保压取样技术开展了大量研究,并逐渐投入水合物资源勘查钻探应用中。

1 国内外研究应用现状

美国、日本、欧盟等国家对天然气水合物保温保压取样工具的研究起步较早,已发展出多种类型的天然气水合物保温保压取样工具,比如日本研制的PTCS和Hybrid PCS,欧盟研制的FPC和HRC以及大洋钻探计划中的PCS和PCB。这些钻具借助于ODP、DSDP等国际大洋钻探计划以及诸多以天然气水合物为目的的商业钻探航次的实施,通过在实际应用中不断完善,已成功应用于世界各地的天然气水合物钻探取样工作中(见表1)。

表1 国外保温保压取样钻具的应用情况

Table 1 Applications of foreign pressure-temperature core samplers

保温保压取样钻具类型	研发国家或项目	技术指标	应用情况
PCS	ODP	(1)用于 $\varnothing 127$ mm或 $\varnothing 139.7$ mm钻杆; (2)岩心长度0.86 m,直径86 mm; (3)保持压力70 MPa ^[12]	在ODP Leg124、139、141、146、164、196航次中使用
PCB	DSDP	(1)岩心长度6 m,直径57.8 mm; (2)保持压力35 MPa; (3)使用频率受球阀限制(调整需2~5 h) ^[13]	在DSDP Leg42、62、76等航次使用
PTCS	日本	(1)用于 $\varnothing 168.3$ mm钻杆; (2)岩心长度3 m,直径66.7 mm; (3)最大工作压力24 MPa ^[14-15]	在加拿大马更些三角洲、石油公团柏崎试验场、“南海海槽”海洋探井
Hybrid PCS	日本	(1)适用于 $\varnothing 127$ mm或 $\varnothing 139.7$ mm钻杆; (2)岩心长度3.5 m,直径51 mm; (3)最大工作压力35 MPa ^[14-15]	Chikyu expedition 802
HRC	欧盟	(1)适用于 $\varnothing 127$ mm或 $\varnothing 139.7$ mm钻杆; (2)岩心长度1 m,直径51 mm; (3)保持压力21 MPa ^[12]	2005年墨西哥湾
FPC	欧盟	(1)适用于 $\varnothing 127$ mm或 $\varnothing 139.7$ mm钻杆; (2)岩心长度1 m,直径54 mm; (3)保持压力25 MPa ^[12]	ODP 204

注:HRC和FPC自研制出后,又经过辉固公司的发展应用,目前已成为国际大洋钻探计划中天然气水合物航次中应用最广泛的保压取心设备,并能够与Geotek公司研制的PCATS系统对接,实现保温保压转移。

相比之下,我国对海域天然气水合物保温保压取样工具的研究起步较晚,目前国内已经形成了多种类型的取样钻具(见表2),并对相应的天然气水合物取样技术规程^[16]、取样工艺^[17]等进行了研究,但仅有部分进行了海上取样试验,能够实现工程应用的钻具更是少见。

尽管近年来国家对天然气水合物资源的重视与投入逐渐加大,但在保温保压取样技术的发展与应

用上,仍与国外存在不小的差距。为此,北京探矿工程研究所在地质调查项目的支持下,对保温保压取样技术开展了深入研究,先后研发出压入式板阀保温保压取样钻具和回转式球阀保温保压取样钻具。本文将从工作原理、特点、试验与应用等方面对这2种钻具进行重点介绍。

表2 国内保温保压取样钻具的应用情况

Table 2 Applications of domestic pressure-temperature core samplers

钻具类型	项目研发单位	实验(实际)应用
绳索打捞式保真取样钻具和投球提钻式保压取样钻具	中国地质科学院勘探技术研究所	2005年在地热开发井中进行了保压钻进生产试验,未进行水合物地层保压取心试验
TKP-1型压入式板阀保温保压取样钻具	北京探矿工程研究所	2015年4月、7月在南海进行海试,9月进行工程应用
WEPC、WRPC、DRPC	中石化胜利石油管理局钻井工艺研究院	2017年4—5月,在南海进行了海上试验 ^[18-20]
TKP-2型回转式球阀保温保压取样钻具	北京探矿工程研究所	2018年9月在南海进行海试,2019年10月南海水合物区工程应用

2 TKP-1型压入式板阀保温保压取样钻具

2.1 取样钻具工作原理与特点

TKP-1型钻具的工作原理是压入取样,即当钻具落入井底的外管总成中后,启动泥浆泵,利用钻具上的密封,使得钻杆内泵压不断升高,当达到液动锤工作压力后,液动锤开始工作并锤断销钉,同时不断推动钻具内管压入地层,完成取样工作^[21]。

在结构方面(见图1),压入式板阀保温保压取样钻具采用模块化设计,主要由打捞矛头、限位环、

驱动段、蓄能器、阀组段、保压岩心管和保压阀组成。保温功能的实现是依靠真空管结构,即使用双层管结构,管中间进行抽真空处理,从而减缓样品与外界的热交换。保压功能的实现则是通过主动保压和被动保压。主动保压是利用活塞式蓄能器,将压力转换为压缩能进行存储,当取样过程中出现压力泄漏时,能够释放压缩能对岩心筒的压力进行补充。而被动保压是利用安装在钻具下部的板阀密封机构,在取样结束后,板阀翻转,对岩心筒形成密封^[21-22]。



图1 TKP-1型压入式板阀保温保压取样钻具结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the press-in plate valve pressure-temperature core sampler (TKP-1)

该型取样钻具的特点如下:

(1)采用模块化设计,能够与常规取样钻具共用外管总成。

(2)钻具总长度3.5 m,岩心筒长度1 m,样品直径为52 mm。

(3)保压性能 ≤ 20 MPa。

(4)在取心过程中,失温速率 < 5 °C/h。

(5)适用于软—中硬地层,组装拆卸方便,安全可靠。

2.2 试验与应用

2015年4月,该型取样钻具在中国南海100 m水深海域进行钻探取心试验,打捞成功率100%,保压成功率达到33%。随后对取样器保压机构等进行了优化升级。同年7月在中国南海804 m及1392 m水深海域再次进行了海试,共计进行了6个回次

的保压取样,5个回次连续保压成功,压力损失均在10%以下,且4个回次取到满管样品。

基于2次海试的成功和取样经验,同年9月利用该型钻具在南海水深1309 m海域进行了天然气水合物取样作业,在天然气水合物富集层位累计进行了18回次取样作业,钻探进尺18 m,总计获得岩心长度 > 9.85 m,岩心采取率 $> 54.7\%$;有14回次样品管压力 > 10 MPa,保压成功率达到了77.7%,具体性能指标见表3。作业中,共计收集了22 L分解气,并成功点火(见图2)^[23]。

在该次天然气水合物取样作业中,压入式板阀保温保压取样钻具在保压成功率方面,略高于国外钻具,但在样品直径、长度、最大工作压力以及岩心收获率方面仍有差距(见表4)。由于该型取样钻具的驱动方式为压入式,仅适用于软—中硬地层,在硬

表3 TKP-1型钻具在水合物取样作业中的应用数据

Table 3 Field data of the press-in plate valve pressure-temperature core sampler in hydrate sampling

统计指标	指标值	百分比/%
样品管压力>1 MPa	15回次	83.3
样品管压力>10 MPa	14回次	77.7
样品长度/m	9.85	>54.7
样品长度(>10 MPa)/m	7.95	>44.1

地层中并不适用。

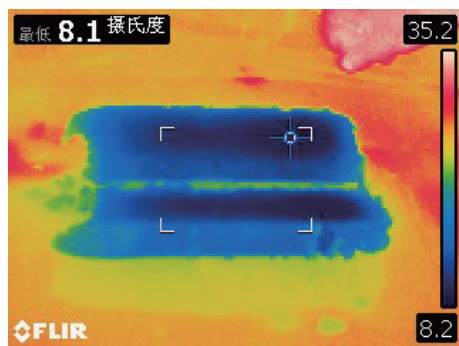
3 TKP-2型回转式球阀保温保压取样钻具

3.1 取样钻具工作原理与结构

TKP-2型钻具是在TKP-1型钻具的基础上研

发的,能够采获赋存在中硬—硬地层中的天然气水合物样品。该型取样钻具的工作原理是随钻取样,即当钻具落入井底的外管总成中后,启动顶驱与泥浆泵,开始旋转钻进。在钻进时,外管带动取样钻具旋转,岩心逐渐进入岩心管中,取样结束后打捞取样工具时,通过差动实现球阀翻转关闭,保持岩心管内部压力。

在结构方面(见图3),回转式球阀保温保压取样钻具同样采用模块化设计,主要由打捞矛头、联动卡、蓄能器、阀组段、保压岩心管和球阀总成组成。保温机构和主动保压机构与TKP-1型钻具一致,而被动保压机构则采用特殊设计研究的球阀,在取样结束后球阀翻转对岩心筒进行整体密封。



(a) 岩心红外扫描图片,显示最低温度为8.1℃



(b) 利用收集到的分解气进行点火

图2 保压样品红外扫描及现场集气点火

Fig.2 Infrared scanning image of pressure holding sample and field gas gathering and ignition

表4 TKP-1型压入式球阀保温保压取样钻具与国外同类钻具取样技术指标对比

Table 4 Comparison of sampling technical indicators between the press-in plate valve pressure-temperature core sampler (TKP-1) and the foreign sampling drilling tool

取样钻具	样品直径/mm	样品长度/m	最大工作压力/MPa	保压取心成功率/%	岩心采取率/%
Hybrid PCS ^[12]	51	3.5	35	44.4	69
HRC ^[24]	51	1	21	50	20
FPC ^[24]	54	1	25	33.3	38
ODP PCS ^[24-25]	42	0.86	70	76.4	76/95
TKP-1 ^[21-22]	52	1	20	77.7	52.2

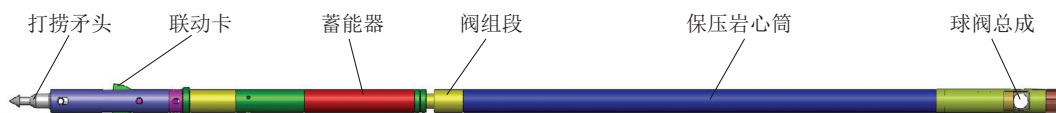


图3 TKP-2型回转式球阀保温保压取样钻具结构示意图

Fig.3 Structural diagram of the rotary ball valve pressure-temperature core sampler (TKP-2)

- 该型取样钻具的特点如下:
- (1)与常规取样钻具共用外管总成,组装拆卸方便,安全可靠。
 - (2)钻具总长度4.9 m,岩心筒长度3 m,样品直径为51 mm。
 - (3)保压性能最大为30 MPa。
 - (4)在取心过程中,失温速率 $<5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。
 - (5)适用于中硬—硬地层。

3.2 试验与应用

2018年9月,在南海水深630 m海域对该型钻具进行了海上试验。试验共钻进18 m,累计取样试验18个回次,累计取心长度17.1 m,钻具的取样率、

保压成功率等性能均达到设计要求。同时,针对试验中发现的退样操作复杂等问题,重新进行了改进,并进行了室内实验。

2019年9月,在地质调查项目中,再次检验了该型保温保压取样钻具在水合物区域的作业性能指标(见图4)。该航次依托“海洋地质十号”调查船,在南海水深786 m处实施,共计进行了7个回次保压取样,样品直径为51 mm,球阀关闭率100%,采样过程失压率 $<10\%$,保压成功率100%,岩心采取率77%(见表5)。对试验中3个回次采集到的样品进行了气体采集,均点火成功(见图5),证实了水合物赋存,达到了预期的试验效果。

表5 回转式球阀保温保压取样钻具海试情况统计

Table 5 Summary of marine trials of the rotary ball valve pressure-temperature core sampler

回次	回次进尺/m	压力主动补偿			球阀 开(关)	样 品		
		初始/MPa	结束/MPa	失压率/%		长度/m	直径/mm	描 述
1	2.8	8.0	7.8	2.5	关	2.5	51	粘土
2	2.8	8.5	7.96	6.3	关	2.5	51	粘土质粉砂
3	3.0	8.27	7.97	3.6	关	2.2	51	粘土质粉砂
4	3.0	8.3	10.44	未失压	关	2.3	51	粘土质粉砂
5	3.0	8.2	7.87	4	关	1.8	51	粘土质粉砂
6	3.0	8.0	12.9	未失压	关	2.3	51	粘土质粉砂
7	3.0	8.5	10.8	未失压	关	2.3	51	粘土质粉砂
合计	20.6					15.9		

岩心采取率:77.18%; 保压成功率:100%



图4 回转式球阀保温保压取样钻具现场调试

Fig. 4 On-site commissioning of the rotary ball valve pressure-temperature core sampler

4 结论

随着我国对天然气水合物这一未来能源的投入逐渐加大,国内已涌现出多种类型的保温保压取样

钻具,其中压入式板阀保温保压取样钻具和回转式球阀保温保压取样钻具,经过多次海上试验,已能够在软—中硬—硬地层中采获满足工程应用需求的原位天然气水合物样品。但在工程应用中展现出的岩心直径、样品长度、最大工作压力等性能指标以及钻具与后续带压转移处理装置的对接等方面,与国外成熟钻具仍存在一定差距,这需要在以后的工作中不断进行改进与升级。

尽管目前利用国内保温保压取样钻具开展工程应用的案例较少,但初步摸索了海域天然气水合物保温保压取样作业流程,有效推进了海域天然气水合物资源勘查自主化进程。国内保温保压取样钻具经过不断的研发与改进后,能够逐步替代国外产品,在天然气水合物勘查评价工作中得到推广应用。

海域天然气水合物保温保压取样钻具的研发与



(a) 对样品管中收集的气体点火成功



(b) 样品管泄压后点火成功

图5 现场集气、点火

Fig.5 On-site gas gathering and ignition

应用,不仅能够促进水合物资源开发的科技进步,同时对我国维护海洋权益、海洋产业经济的发展都具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 石思思,陈星州,马健,等.南海北部神狐海域W19井天然气水合物储层类型与特征[J].特种油气藏,2019,26(3):24-29.
SHI Sisi, CHEN Xingzhou, MA Jian, et al. Natural gas hydrate reservoir classification and characterization in the Well W19 of Shenhu Sea Area, northern South China Sea[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 24-29.
- [2] 光新军,王敏生.海洋天然气水合物试采关键技术[J].石油钻探技术,2014,44(5):45-51.
GUANG Xinjun, WANG Minsheng. Key production test technologies for offshore natural gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(5): 45-51.
- [3] 张炜,邵明娟,田黔宁.日本海域天然气水合物开发技术进展[J].石油钻探技术,2017,45(5):98-102.
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, TIAN Qianing. Technical progress of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 98-102.
- [4] 王星,孙子刚,张自印,等.海域天然气水合物试采实践与技术分析[J].石油钻采工艺,2017,39(6):744-750.
WANG Xing, SUN Zigang, ZHANG Ziyin, et al. Practical production test of natural gas hydrate in sea areas and its technological analysis[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(6): 744-750.
- [5] 付亚荣.可燃冰研究现状及商业化开采瓶颈[J].石油钻采工艺.2018,40(1):68-80.

- FU Yarong. Research status of combustible ice and the bottleneck of its commercial exploitation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 68-80.
- [6] 孙林,杨万有,李旭光,等.天然气水合物酸化-自生热气开采技术研究[J].特种油气藏,2018,25(3):149-153.
SUN Lin, YANG Wanyou, LI Xuguang, et al. Natural gas hydrate acidizing-self-generated hot-gas recovery[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(3): 149-153.
- [7] 李小洋,王汉宝,张永勤,等.海洋天然气水合物探测及取样钻具研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):47-51.
LI Xiaoyang, WANG Hanbao, ZHANG Yongqin, et al. Development of marine gas-hydrate detection and drilling sample[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 47-51.
- [8] 何家雄,钟灿鸣,姚永坚,等.南海北部天然气水合物勘查试采及研究进展与勘探前景[J].海洋地质前沿,2020,36(12):1-14.
HE Jiaxiong, ZHONG Canming, YAO Yongjian, et al. The exploration and production test of gas hydrate and its research progress and exploration prospect in the northern South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(12): 1-14.
- [9] 张炜,邵明娟,姜重昕,等.世界天然气水合物钻探历程与试采进展[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(5):1-13.
ZHANG Wei, SHAO Mingjuan, JIANG Chongxin, et al. World progress of drilling and production of natural gas hydrate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(5): 1-13.
- [10] 王力峰,付少英,梁金强,等.全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J].中国地质,2017,44(3):439-448.
WANG Lifeng, FU Shaoying, LIANG Jinqiang, et al. A review on gas hydrate development propped by worldwide national project[J]. Geology in China, 2017, 44(3): 439-448.
- [11] 宁伏龙,梁金强,吴能友,等.中国天然气水合物赋存特征[J].

- 天然气工业, 2020, 40(8): 1-24, 203.
- NING Fulong, LIANG Jinqiang, WU Nengyou, et al. Reservoir characteristics of natural gas hydrates in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(8): 1-24, 203.
- [12] Y Kubo, Y Mizuguchi, F Inagaki, et al. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyu[J]. Scientific Drilling, 2014, 17(17): 37-43.
- [13] 许红, 吴河勇, 徐禄俊, 等. 区别于DSDP-ODP的深海保压保温天然气水合物钻探取心技术[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(6): 24-27.
- XU Hong, WU Heyong, XU Lujun, et al. Natural gas hydrate: A drilling and coring technique different from the deep-sea pressure-and temperature-preservation method of DSDP-ODP[J]. Marine Geology Letters, 2003, 19(6): 24-27.
- [14] Norihito Inada, Koji Yamamoto. Data report: Hybrid pressure coring system tool review and summary of recovery result from gas-hydrate related coring in the Nankai Project[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66: 323-345.
- [15] 左汝强, 李艺. 日本南海海槽天然气水合物取样调查与成功试采[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(12): 1-20.
- ZUO Ruqiang, LI Yi. Japan's sampling study and successful production test for NGH in Nankai Trough[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(12): 1-20.
- [16] 刘协鲁, 阮海龙, 陈云龙, 等. 海域天然气水合物取样技术规程编制要点[J]. 地质装备, 2021, 22(1): 45-48.
- LIU Xielu, RUAN Hailong, CHEN Yunlong, et al. Essential of compiling technical specification for sampling of marine natural gas hydrate[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021, 22(1): 45-48.
- [17] 任红. 南海天然气水合物取样技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(4): 89-93.
- REN Hong. Current status and development recommendations for gas hydrate sampling technology in the South China Sea[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(4): 89-93.
- [18] 任红, 裴学良, 吴仲华, 等. 天然气水合物保温保压取心工具研制及现场实验[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 44-48.
- REN Hong, PEI Xueliang, WU Zhonghua, et al. Development and field tests of pressure-temperature preservation coring tools for gas hydrate[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 44-48.
- [19] 许俊良, 任红. 天然气水合物钻探取样技术现状与研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(11): 4-9.
- XU Junliang, REN Hong. Status of gas hydrate sampling technology and the research[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 4-9.
- [20] 马清明, 任红, 许俊良. 天然气水合物钻探取样——WEPC工具研制[J]. 非常规油气, 2014, 1(3): 47-51.
- MA Qingming, REN Hong, XU Junliang. Gas hydrate drill coring sample—WEPC system development[J]. Unconventional Oil & Gas, 2014, 1(3): 47-51.
- [21] 蔡家品, 赵义, 阮海龙, 等. 海洋保温保压取样钻具的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(2): 60-63.
- CAI Jiapin, ZHAO Yi, RUAN Hailong, et al. Research on the pressure-temperature core sampler for ocean exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(2): 60-63.
- [22] 阮海龙. 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, 2016: 193-196.
- RUAN Hailong. Sea area gas hydrate drilling and pressure-temperature coring technology[C]//China Geological Survey. 100 techniques of geological survey in China. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 193-196.
- [23] 刘协鲁, 赵义, 阮海龙, 等. 海洋天然气水合物保温保压取样工具对比研究[J]. 地质装备, 2018, 19(1): 11-15.
- LIU Xielu, ZHAO Yi, LIU Hailong, et al. Contrastive study on the pressure-temperature core sampler for ocean gas hydrate[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018, 19(1): 11-15.
- [24] Abegg F, Hohnberg H J, Pape T, et al. Development and application of pressure-core-sampling systems for the investigation of gas-and gas-hydrate-bearing sediments[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2008, 55(11): 1590-1599.
- [25] Shipboard Scientific Party Leg 204. Leg 204 preliminary report, ODP preliminary report[R/OL]. 2009-12-20.

(编辑 荐华)