

# 天然气水合物岩心保压转移与测试系统 研发现状分析

刘协鲁<sup>1,2</sup>, 阮海龙<sup>\*1,2</sup>, 赵义<sup>1</sup>, 蔡家品<sup>1</sup>, 陈云龙<sup>1</sup>,  
梁涛<sup>1</sup>, 邓都都<sup>1</sup>, 刘智健<sup>1</sup>, 刘广治<sup>1</sup>, 郭强<sup>1</sup>

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.天然气水合物勘查开发国家工程研究中心,广东 广州 511458)

**摘要:**通过钻探取心获取原位天然气水合物储层岩心,并进行保压转移与测试,获取岩心物理、化学及力学性质等方面的参数,是开展海域天然气水合物勘查工作的关键技术方法之一。本文对国内外天然气水合物岩心保压转移系统的相关资料进行了汇总,从工作原理、结构特点和试验应用等方面进行了全面总结,系统梳理了天然气水合物保压转移与测试系统的研发现状,从兼容性、关键参数等多个方面对比了国内外典型岩心保压转移与测试系统,并针对国内天然气水合物保压转移系统的研发提出了建议。

**关键词:**天然气水合物;保压取心;保压转移;保压测试

**中图分类号:**P634;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0026-06

## Analysis on research and development of gas hydrate core pressure transfer and testing system

LIU Xielu<sup>1,2</sup>, RUAN Hailong<sup>\*1,2</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, CAI Jiabin<sup>1</sup>, CHEN Yunlong<sup>1</sup>,  
LIANG Tao<sup>1</sup>, DENG Dudu<sup>1</sup>, LIU Zhijian<sup>1</sup>, LIU Guangzhi<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>

(1.*Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China*;  
2.*National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou Guangdong 511458, China*)

**Abstract:** Obtaining in-situ natural gas hydrate reservoir cores through drilling and coring, and conducting pressure transfer and testing to obtain parameters of core physical, chemical, and mechanical properties, is one of the key technical methods for conducting marine natural gas hydrate exploration work. This paper summarizes the relevant data of natural gas hydrate core pressure retaining transfer system at home and abroad, and makes a comprehensive summary from the aspects of working principle, structural characteristics and test application, systematically reviews the research and development status of natural gas hydrate pressure retaining transfer and test system, and compares the typical core pressure retaining transfer and test system at home and abroad from the aspects of compatibility and key parameters. Some suggestions for the research and development of pressure retaining transfer system of natural gas hydrate in China are put forward

**Key words:** gas hydrate; pressure preserving coring; pressure preserving transfer; pressure retaining test

收稿日期:2023-05-31; 修回日期:2023-08-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.004

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20221722)

第一作者:刘协鲁,男,汉族,1985年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事海洋钻探取心工具研制工作,北京市房山区良乡工业开发区二期,liuxielu@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:阮海龙,男,汉族,1984年生,正高级工程师,地质工程专业,从事海洋钻探取心钻具与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,rhailong@mail.cgs.gov.cn。

引用格式:刘协鲁,阮海龙,赵义,等.天然气水合物岩心保压转移与测试系统研发现状分析[J].钻探工程,2023,50(S1):26-31.

LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Analysis on research and development of gas hydrate core pressure transfer and testing system[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):26-31.

## 0 引言

天然气水合物是由天然气和水在高压、低温条件下形成的笼形化合物,因其具有储量巨大、高效清洁、燃烧值高等特点,被认为是未来重要的战略接替能源<sup>[1-2]</sup>。为此,美国、日本、韩国、欧盟以及我国均开展了多年的研发工作,获取了大量的研究成果,以期早日实现商业开采<sup>[3-6]</sup>。

采收高保真的实物样品开展储层物理、化学及力学等方面性质的基础研究,对于天然气水合物开发、环境评价与灾害防控是至关重要的。得益于深海钻探计划的实施,美国、日本、欧盟等国家对天然气水合物取样工具、转移与测试工具的研究起步较早,通过在实际应用中不断完善,已形成了成熟的工具与设备<sup>[7-9]</sup>。国内在保压取心工具方面也取得了较大进展,已研发了多种保压取心工具,并开展了工程应用<sup>[10-13]</sup>。本文重在介绍对国内外保压转移、测试系统进行介绍与总结,梳理我国的研发工作遇到的挑战,为我国海域天然气水合物岩心保压转移与测试系统的研发提出建议。

## 1 国外天然气水合物岩心保压转移与测试系统研发现状

岩心保压转移与测试系统的主要功能是在一定的压力、温度条件下将保压取心钻具内的岩心转移到测试装置或切割后保存在储存筒中,也可以用来将储存筒内的岩心样品转移至测试装置中,进而对岩心样品进行测试。随着世界各国对天然气水合物调查研究的逐渐深入,保压岩心转移与测试系统的研发取得了较大进展。目前,世界上已发展出了3套较为成熟的保压转移与测试系统,分别是英国Geotek公司研发的Pressure Core Analysis and Transfer System(以下简称为PCATS)、美国的Pressure Core Characterization Tools(以下简称为PCCTs)以及日本的Pressure-core Nondestructive Analysis Tools(以下简称为PNATs)。此外,美国地质调查局还曾在阿拉斯加永久冻土带的天然气水合物开发项目中研发了移动岩心实验室,并开展了保温条件下的天然气水合物岩心综合分析<sup>[14]</sup>。

### 1.1 PCATS

PCATS自研发成功以来,被大量应用于国际大洋钻探计划中的天然气水合物钻探航次,从2005年美国的墨西哥湾天然气水合物钻探项目开始,参加了

全球所有天然气水合物钻探项目,积累了大量的现场应用经验,其结构与功能也不断得到改进与完善。

PCATS主要用于在天然气水合物钻探现场开展转移与测试工作,能够保证在岩心移动、分析岩心性质、切割成子样品以及转移至子样品存储器的过程中维持样品压力和温度的稳定<sup>[15]</sup>。进行作业时,PCATS安装于3个集装箱中,分别是操作控制箱、测试箱和存储箱,其中操作控制箱用于控制温度、压力以及样品位移的精度;测试箱可以通过X射线、CT扫描、P波以及伽马射线测试样品性质,并将样品切割成小段;存储箱可以低温储存子样品存储器,以便于切割储存操作。

为便于在陆地实验室内使用,Geotek公司又研发了Mini PCATS。该系统能够对运输到实验室的天然气水合物岩心进行保压转移与切割,以满足实验室内测试的需求。

### 1.2 PCCTs

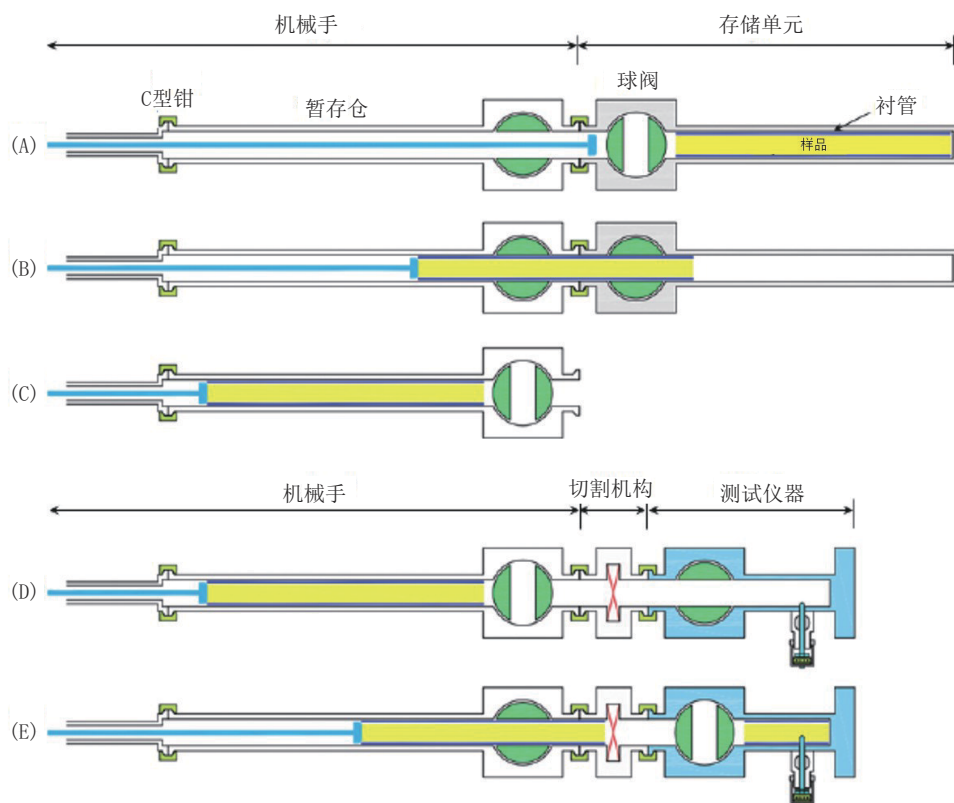
PCCTs是美国在原有的样品检测系统Instrumented Pressure Testing Chamber(简称IPTC)的基础上又增加了4个测试装置<sup>[16]</sup>。PCCTs的操作与PCATS基本一致,都是通过将取样器或子样品转移筒与本体对接,两端压力相同后再打开球阀进行操作,具体流程见图1,不同之处在于PCCTs的切割机构设置两个球阀之间,而PCATS设置于球阀与抓取机构之间。

PCCTs主要由有效应力恢复单元、可控降压单元、保压剪切单元、切割单元和微生物反应单元组成,可全面测量天然气水合物岩心的性质。有效应力恢复单元能够在保持样品原位条件下还原岩心的原位应力条件。可控降压单元能够控制降压速率,收集降压过程中分解气和分解水。保压剪切单元以“双面”直接剪切的方式避免了切割形状不规则导致的应力集中问题。切割单元能够在低扰动条件下切割岩心。微生物反应单元主要用于评价沉积物中未受降压干扰的生物活性。

PCCTs采用了便携式模块化设计的理念,使得其结构简约,方便现场应用,且适用性较强<sup>[17]</sup>。

### 1.3 PNATs

PNATs主要由高压反应釜、切割工具、存储反应釜、保压转移模块、TACTT(Transparent Acrylic Cell Triaxial Testing)系统组成。TACTT是该装置的核心部分,由日本国家AIST(Advanced Industri-



(A)存储单元与转移装置对接;(B)利用机械手将样品移动至转移装置中;(C)样品转移至转移装置中;(D)将转移装置与切割机构、测试仪器连接;(E)利用切割机构切割样品

图1 PCCTs操作示意

al Science and Technology)研究所研发,是日本国家天然气水合物项目的一部分<sup>[18-19]</sup>。

PNATs使用的高压反应釜由英国Geotck公司生产,采用透明材质,更有利于观察储层岩心剪切破坏后的形态。同时,PNATs还配备有多台高清摄像机,能够更加直观地记录剪切过程中岩心形态的变化。储层岩心的微观图像可以通过设置的微型X-CT扫描模块获得。

## 2 国内天然气水合物岩心保压转移与测试系统发现状

我国在岩心保压转移与测试技术研发方面要落后于国外。经过10余年的努力,国内多家机构开展了此方面的研发,并从转移装置的压力特性、转移卡爪等方面开展了研究,取得了一些成果。

### 2.1 广州海洋地质调查局

中国地质调查局广州海洋地质调查局肖波等<sup>[20]</sup>提出了天然气水合物沉积物样品保压转移及处理技术的设计思路及系统各组成单元。保压转移

系统包括保压取样器对接子系统、样品保压转移系统内外压自适应平衡子系统、样品抓取子系统、样品切割分段分装子系统和底气底水采集系统等。保压样品在线探测及岩心分析系统主要包括声波探测系统和X射线CT可视化分析测试系统。温明明等<sup>[21]</sup>对保压转移装置的重要关键部件样品转移卡爪进行研究,提出了一种结构精巧的样品管抓取的卡爪机械结构,结果表明能够有效抓取及脱离样品管。耿雪樵等<sup>[22]</sup>定量分析了保压转移装置在抓取、切割、转移样品的过程中可能存在的压力冲击及脉冲,其结果表明在转移样品时,球阀的开关对样品压力的影响超过允许压力波动的范围,压力维持系统是必要的。余明刚等<sup>[23]</sup>利用AMESim软件对天然气水合物压力维持系统进行建模和仿真,研究了液压泵、蓄能器等关键部件对压力维持的影响分析,对实现最佳的保压效果具有重要意义。

近年来,由广州海洋地质调查局牵头,浙江大学和大连理工大学等单位共同参与研发,通过“十二

五”国家863计划课题“天然气水合物样品保压转移及处理技术”以及国家重点研发计划课题“钻探岩心保压转移技术与装置”支持,研制了船载可燃冰保压岩心转移切割装置。该系统已经于2016年和2021年在我国南海开展了海试应用。该系统具有样品推送、切割、分装、内压自适应平衡调节等功能,并且配备多种接口以及多种保压分装子系统。保压转移装置主要由卡爪、推送单元、切割卡紧单元、球阀连接单元、内压平衡单元和声波检测单元等几部分组成。

## 2.2 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院

依托国家高技术研究发展计划项目,裴学良等<sup>[24]</sup>研制了与该单位自主研发的伸缩插入式、活塞射入式等保温保压取样工具配套的带压转移装置。该装置主要由岩心管、保温保压筒、保温保压筒上的密封阀、法兰、转移仓、平移油缸和压力平衡系统等组成。该型带压转移装置的工作介质为纯净水,工作压力为25 MPa,最高不超过35 MPa。

## 2.3 北京探矿工程研究所

北京探矿工程研究所根据自主研发的压入式板阀保温保压取样钻具(TKP-1)和回转式球阀保温保压取样钻具(TKP-2),配套研发了保压岩心分析及转移系统(图2)。该系统主要由恒压补液单元、岩心转移单元、岩心切割单元和测试单元组成。恒压补液单元能够将海水充入系统内,通过压力传感器、控制模块等维持整个保压岩心转移过程压力稳定,减少转移过程中由于压力的变化给岩心带来的扰动。岩心转移单元主要由推杆、快速连接夹、球阀、岩心爪组成,通过利用推杆驱动岩心爪将保压钻具内的岩心取出,运输进岩心转移单元中。岩心切割单元能够根据需要将保压岩心切割成多个小段,

分别存储在岩心存储室内,以便对岩心开展分析测试<sup>[25]</sup>。



图2 北京探矿工程研究所研发的保压岩心分析及转移系统

## 3 国内外典型保压转移与测试系统对比

### 3.1 关键参数与工程应用

由表1可知,在目前国内外典型保压转移与测试系统中,PCATS不仅参加了国际大洋钻探计划的不同航次,还参与了美国、中国、日本等不同国家的天然气水合物钻探项目,其设备的结构和功能得以不断改进与优化,成为了目前世界上应用最为广泛的保压转移与测试系统。相比之下,国内保压转移与测试系统的应用较少,目前仅进行了海试应用,尚未真正应用到天然气水合物钻探项目中。在关键参数方面,PCATS、PCCTs和国内中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院研发的保压转移测试系统的最大工作压力均是35 MPa,但PCATS能够处理的最大岩心长度最长,达3.5 m。

### 3.2 测试功能

由表2可知,PCATS、PCCTs和PNATs三套系统的可测试内容最为丰富,测试内容均包括了岩

表1 国内外保压转移与测试系统关键参数

保压转移与测试系统	最大工作压力/MPa	最大岩心长度/m	岩心直径/mm	工程应用
PCATS	35	3.5	63	国际大洋钻探计划航次(ODP204、IODP311等)以及美国、中国、日本、印度等国家的天然气水合物钻探项目
PCCTs	35	2.6		韩国郁陵盆地天然气水合物钻探项目
PNATs	16		50	2012年日本、2015年印度天然气水合物钻探项目
广州海洋地质调查局	30	3	≥45	2016年、2021年开展海试应用
中石化胜利石油工程有限公司 钻井工艺研究院	35			2017年开展海试应用
北京探矿工程研究所	25	3	54	2021年开展海试应用



心密度、声波速度、渗透率参数和力学性质。在力学性质测试时,PCATS和PNATs采用三轴剪切的方式,而PCCTs采用直接剪切的方式。同时,PCATS与PNATs还可获得岩心的X-CT图像,而PCCTs可测量岩心生物活性、电导率和热导率。相比之下,国内保压转移与测试的结合仍处于起步阶段,测试内容较少,广州海洋地质调查局与北京探矿工程研究所初步集成了P波声波速度与X射线成像。

### 3.3 兼容性

表2中列举了国内外典型带压转移与测试系统

能够兼容的保压储存仓。PCATS用于保存切割后的样品的保压储存仓能够与PCCTs和PNATs相匹配。在与保压取心工具的兼容方面,PCATS的兼容性最好,能够与Fugro的FPC和HRC、日本的Hybrid PCS和PTCS以及国际大洋钻探计划使用的PCB等国外主要使用的保温保压取样钻具配套使用。PCCTs也能够与美国、日本的保压取心钻具相匹配。相比之下,我国的带压转移、测试系统分别与各自的保温保压取心工具连接,不同单位研发的系

表2 国内外保压转移与测试系统测试项目

项目	PCATS	PCCTs	PNATs	广州海洋地质调查局	北京探矿工程研究所
密度	✓	✓	✓	—	—
声波速度	✓	✓	✓	✓	✓
渗透率参数	✓	✓	✓	—	—
力学性质	✓	✓	✓	—	—
X-CT图像	✓		✓	✓	初步集成X射线成像
岩心生物活性	—	✓	—	—	—
电导率、热导率	—	✓	—	—	—
共振柱试验	✓	—	—	—	—
匹配的保压钻具	Fugro的FPC和HRC;日本的Hybrid PCS和PTCS;国际大洋钻探计划使用的PCB			美国、日本的保压取心钻具	TKP-1和TKP-2
PCATS保压储存仓	✓	✓	✓	—	—

## 4 中国天然气水合物岩心保压转移与测试系统研发建议

### 4.1 测试功能拓展

目前国内研发的保压转移与测试系统,已经实现了在保压保温条件下,将岩心从钻具中转移至保压转移与测试系统中,最后存储在储存筒中。在保压转移测试过程中,对岩心的分析较为简单,主要集成了P波与X射线扫描。测试系统,是天然气水合物岩心保压处理的最后环节,能够在保压条件下获取大量具有真实意义的工程参数。因此,大力发展保压测试系统,拓展保压转移系统的测试内容,实现对岩心渗透率、剪切强度等多个参数的原位测试,对于我国继续高质量开展海域天然气水合物试采开发

具有重要意义。

### 4.2 保压取心、转移与测试全技术链联合攻关

实现天然气水合物岩心取样、转移与测试过程中温度、压力的控制,是开展天然气水合物岩心分析的关键。目前国内已研发了多种保温保压取样钻具,并实现了工程应用,关键技术指标已达到国外同类钻具水平,但后续的保压转移与测试系统的研发与国外存在一定差距,特别是与国内天然气水合物储层、保压转移系统相适用的测试系统的研发,仍较为滞后,目前尚未见到相关测试装置的研发与工程应用报道。作为一个完整的采获、处理天然气水合物储层岩心的技术链条,保压取心、转移与测试技术的研发应该从整体出发,开展全方位、多专业的合

作,形成完整的具有自主知识产权的技术链条。

### 4.3 规范标准的制定

目前,我国已开展了两次天然气水合物试采,从前期勘查到后期试采,均自主研发了一套实现勘查开采产业化必需的关键技术装备,装备创新实现了重大发展。在天然气水合物保压取心、转移与测试方面也形成了自主研发的装备,但尚未有相关行业规范或标准。北京探矿工程研究所已编制了《海域天然气水合物取样技术规程》,从目的、安全原则和技术要求等多个方面对取样作业的关键环节进行了介绍,但该规程尚未升级转变成行业规范<sup>[31]</sup>。因此,建议尽快组织制定有关标准,对天然气水合物岩心保压处理的整个过程进行规范,形成开放、统一的标准,推动更多单位参与天然气水合物勘查工作中。

## 5 结论

(1)经过几十年的研发,英国、美国和日本均研制成功了保压转移与测试系统,能够对水合物储层岩心从岩心渗透率、力学性质等多个方面开展研究,并在多个国家的天然气水合物钻探项目中进行了应用,积累了丰富的工程应用经验,为天然气水合物试采获取了关键参数。

(2)随着我国海域天然气水合物勘探开发工作的逐步推进,国内多家单位已研发了保压转移系统并开展了海试应用,但其配套测试装置的研发仍然落后于国外,因此还需要大力发展与国内现有成熟的保压取心钻具相匹配的保压转移与测试系统,尽快形成完整的保压取样与样品处理技术链条。

(3)建议进一步推进天然气水合物保压取心、转移与测试系统的工程应用,更好支撑服务我国天然气水合物资源勘探与开采。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 [Z]. Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers, 2008
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Williams T. E., Millheim K., King B. Methane hydrate production from Alaskan permafrost[M]. Citeseer, 2003.
- [15] 王初,张凌,孙慧翠等.海洋天然气水合物岩心处理关键技术进展[J].地质科技情报,2017,36(2):249-257.
- [16] Yun T, Narsilio G, Santamarina J, et al. Instrumented pressure testing chamber for characterizing sediment cores recovered at in situ hydrostatic pressure[J]. Marine Geology, 2006, 229(3):285-293.
- [17] 刘乐乐,刘昌岭,吴能友,等.天然气水合物储层岩心保压转移与测试进展[J].地质通报,2021,40(S1):408-422.
- [18] Yoneda J, Masui A, Konno Y, et al. Mechanical behavior of hydratebearing pressure-core sediments visualized under triaxial compression [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 66 (Part 2):451-459.
- [19] Jin Y, Konno Y, Nagao J. Pressurized subsampling system for pressured gas-hydrate-bearing sediment: Microscale imaging using X-ray computed tomography[J]. Review of Scientific Instruments, 2014,85(9):094502.
- [20] 肖波,盛堰,刘方兰.天然气水合物样品保压转移及处理技术系统设计[J].海洋地质前沿,2013,29(10):65-68.
- [21] 温明明,刘俊波,耿雪樵等.天然气水合物样品转移装置卡爪机构设计[J].江苏船舶,2016,33(1):32-34.
- [22] 耿雪樵,孙瑜霞,张永雷,等.天然气水合物保压转移的压力特性[J].中国资源综合利用,2017,35(4):123-125.
- [23] 余明刚,张永雷,刘俊波.基于AMESim的保压转移系统压力维持特性研究[J].机电信息,2017(9):42-43.
- [24] 裴学良,任红,吴仲华,等.天然气水合物岩心带压转移装置研制与现场试验[J].石油钻探技术,2018,46(3):49-52.
- [25] 赵义,刘协鲁,刘海龙,等.天然气水合物保压岩心分析及转移系统设计[J].地质装备,2018,19(1):22-24.

(编辑 荐华)