

钻井利器故事之“保真取样钻具”

李小洋, 李 宽, 王志刚, 张永勤, 尹 浩, 施山山

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:天然气水合物作为一种高效清洁能源,广泛分布于海洋和冻土带中。经过近几年的勘探,在我国南海发现了储量非常丰富的天然气水合物资源,并成功进行了试开采,取得了可喜的成绩,也使我国在该领域处于国际领先地位。随着水合物勘探开发程度的进一步加快,作为水合物调查钻探取样的重要利器——保真取样钻具的保真效果已经被越来越多的研究者所关注。本文从科普的角度介绍了天然气水合物保真取样的必要性、国外发展历程及国内近年来的研究成果,以此达到相互交流、相互促进的目的,最终推动保真取样技术的国产化应用。

关键词:天然气水合物;保真取样钻具;钻探船;保压转移

中图分类号:P634 **文献标识码:**C **文章编号:**1672-7428(2020)07-0062-04

The story of a drilling weapon-pressure core sampler

LI Xiaoyang, LI Kuan, WANG Zhigang, ZHANG Yongqin, YIN Hao, SHI Shanshan

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: As an efficient and clean energy resource, natural gas hydrate is widely distributed in ocean and permafrost. After exploration and development in recent years, abundant natural gas hydrate resources have been discovered in the South China Sea, and trial production has been carried out successfully. With the further acceleration of gas hydrate exploration and development, more and more researchers have paid attention to fidelity of the core sampler as an important tool for gas hydrate sampling. From the perspective of science popularization, this paper introduces the necessity of fidelity sampling of natural gas hydrate, the development process of foreign countries and the research achievements of China in recent years, so as to achieve the purpose of mutual exchange and mutual promotion, and finally promote the localized application of fidelity sampling technology.

Key words: natural gas hydrate; fidelity sampling; drilling ship; pressure holding transfer

1 天然气水合物保真取样技术的必要性

天然气水合物(Natural gas hydrate)俗称“可燃冰”、“固体瓦斯”等,其特点是分布范围广、储量丰富、能量密度大和清洁高效^[1]。科学家研究估算表明,世界海洋及陆域永久冻土区中天然气水合物的总量换算成甲烷气体高达 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$,其含碳量相对值是迄今为止世界上所有已知石油、天然气、煤炭矿产总和的 2 倍(含碳量对比见图 1)^[2-3]。经过近几年的勘探,在我国南海发现了储量巨大的天然气水合物资源,并分别于 2017 年和 2020 年进行了两次试开采,取得了巨大的成功,第二次试采连续 30

天的产气量达到了 86.14 万 m^3 ^[4]。

对于海底天然气水合物的调查研究,目前大多数是通过钻探船取样采集海底沉积物岩心的方式来分析判断是否有天然气水合物的存在,但是天然气水合物只能稳定存在于低温(一般 $\leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$)、高压(一般 $\geq 3.8 \text{ MPa}$)环境中(见图 2a),一旦分解,1 单位的天然气水合物可以释放出 0.81 单位的水和 164 单位的天然气(见图 2b)^[5]。当岩心赋存环境的温度或压力改变超过水合物赋存的临界温压条件时,其中含有的天然气水合物组分会全部或大部分分解,导致岩心结构和组分发生重大改变,不能反映海

收稿日期:2020-05-09;修回日期:2020-06-13 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.07.010

基金项目:中国地质科学院勘探技术研究所科技项目“海洋天然气水合物保压取样钻具研发”(编号:YB202005);国家重点研发计划国际合作项目“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号:SQ2018YFE020424)

作者简介:李小洋,男,汉族,1988 年生,工程师,硕士,从事天然气水合物钻采技术研发工作,河北省廊坊市金光道 77 号, Lixy_cniet@qq.com。

引用格式:李小洋,李宽,王志刚,等.钻井利器故事之“保真取样钻具”[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(7):62—65,72.

LI Xiaoyang, LI Kuan, WANG Zhigang, et al. The story of a drilling weapon-pressure core sampler[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(7):62—65,72.

底地层的原貌,无法对水合物储层进行准确评价^[6]。

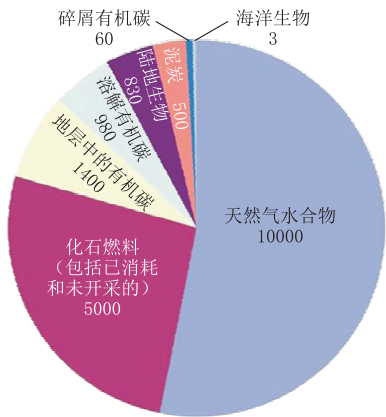
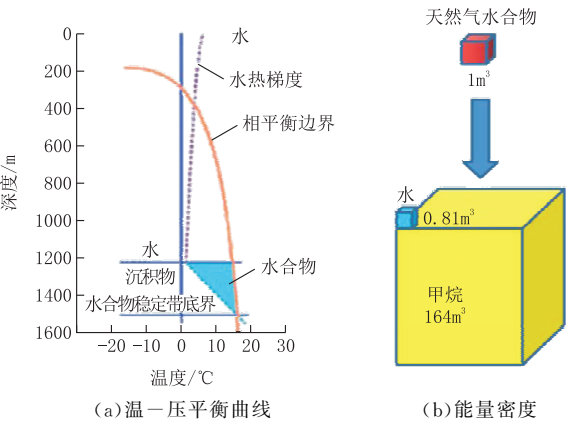


图 1 天然气水合物含碳量与其他资源对比
Fig.1 Comparison of carbon content between natural gas hydrate and other resources



(a) 温-压平衡曲线 (b) 能量密度
图 2 天然气水合物温-压平衡曲线及能量密度
Fig.2 Natural gas hydrate temperature-pressure equilibrium curve (a) and energy density (b)

为了获取海底原始状态下的水合物岩心样品,许多科学家都致力于研制一种天然气水合物保真取样器,也就是能够保持水合物原始状态下的温度和压力的取样器^[7],通过这种新型的取样器,可以将岩心在不改变温度和压力的条件下从海底获取到钻探船上,从而避免岩心中的水合物分解。形象地说,保真取样器就像是一个保鲜柜,将海底的岩心放入后在一定时间内保持岩心的新鲜,不会发生变质。

2 保真取样技术从哪儿来

为了获得天然气水合物原位实物样品,国际深海钻探计划(DSDP)和国际大洋钻探计划(ODP)先后开始研制天然气水合物保真取样器,前后经历了十余年的时间。1979 年,Hunt 首先提出天然气水合物保真取样器具的研制思路。1983 年,Kven-

volden 等研制出的一款保真取样器,由于球阀无法正常关闭而研制失败。1995 年,Jerald Dickinson 等研制成功了保真取心器,并应用于在美国东南部大西洋海域“布莱克海脊”ODP164 航次的钻探取样工作,取得了天然气水合物样品,首次实现了天然气水合物稳定带与深海岩心样品的一体化验证,实现了静态描述布莱克海脊天然气水合物储层的目的。由于其取样成果解决了重大地质难题,该型取心器的相关成果于 1997 年被《Nature》登载,这就是现在被广泛认可的天然气水合物保压取心器(PCS)及其后来改进的保压保温取心器(PTCS)的最初型号^[8-9]。1995 年日本石油公司委托美国 Auman & Associates 开始研制保温保压取样钻具(PTCS),在 2004 年又进行了技术升级。1997 年欧盟科学和技术计划研制了保真取样系统 HYACE——冲击式取样器(FPC)和旋转取样器(HRC),并与保压转移系统对接。目前,国外使用的主要有国际深海钻探计划(DSDP)采用的 PCB 取样器^[10],国际大洋钻探计划(ODP)采用的 PCS 取样器^[11],荷兰辉固公司的保真取样器(FPC、HRC)^[12]以及日本联合美国 Aumann & Associates 研制的保温保压钻具(PTCS)^[13]。

3 保真取样钻具如何工作

保真取样是将岩心保持其原始状态下回收至地表或海面的一种特殊的方法,对岩心的扰动降低到了最低程度,从而有利于进行全面的定性或定量分析。那么保真取样钻具又是怎么工作的呢?首先在工作之前将氮气蓄能器的压力设定为取心处预期井底压力的 75%~80%,在取样过程中用于补偿岩心管内压力变化。接着通过取心钢丝绳将取样钻具投放到钻杆内孔中,钻具到位后可自动锁定,然后利用冲压、活塞或旋转的方式获得岩心。在取得沉积物岩心后,由钻杆内孔下入打捞器以抓住岩心筒。通过上提或投球等一系列操作,促使岩心筒向上回收,并使保压阀关闭,实现保压密封,最后通过绞车将保真取样钻具回收至钻探船上,见图 3。

4 我国保真取样技术现状及未来

我国开展天然气水合物的研究起步比较晚,开始于 20 世纪 80 年代,相关的研究也落后于美、日等发达国家。近些年来,随着全球能源问题的日趋紧

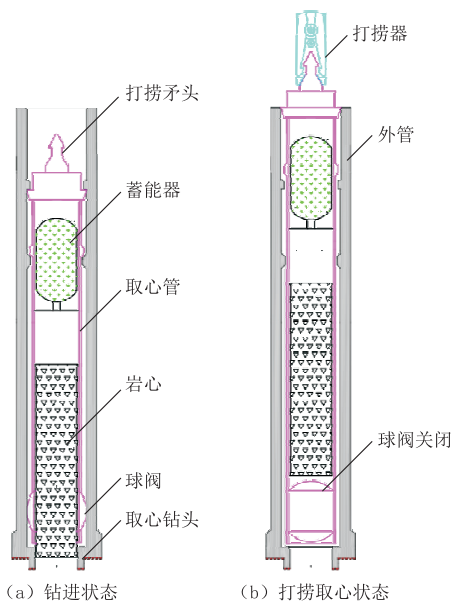


图 3 保真取样钻具取样过程示意

Fig.3 The fidelity sampling process

张和对海洋资源开发的高度重视,我国也不断加大对海底天然气水合物勘探开发的力度,在海底天然气水合物保真取样器的研究方面也取得了很大的进展。2000 年我国正式启动“863”计划海洋技术领域重大项目研究,其中就包括天然气水合物重力活塞式保真取样器和天然气水合物钻探取心技术研制。目前国内已研制出的天然气水合物保真取样器中,比较具有代表性的有浙江大学研制的重力式活

塞取样器^[14],中国地质科学院勘探技术研究所研制的绳索打捞保温保压取心钻具^[15]以及北京探矿工程研究所的保温保压取样钻具^[16]。

中国地质科学院勘探技术研究所作为最早研究保真取样钻具的单位之一,在“十五”期间,承担了国家“863”计划“天然气水合物探测技术”项目的子课题“天然气水合物保真取心钻具的研制”,开发出了一种新型的保温保压取心钻具,在钻具的电子主动电子制冷保温及隔热层被动保温、球阀关闭保压和蓄能器补偿保压等方面都进行了研究和探索,试制出了钻具样机,并进行了室内及陆地取心钻进试验,在井深 700 m 成功取出了岩心。室内及陆地下井试验证明,钻具在球阀关闭保压及保温方面都能够实现,最大压力可保持 21 MPa。之后在地质调查项目“祁连山冻土区天然气水合物资源勘查”、“陆域冻土区天然气水合物钻采技术方法集成”以及“海域天然气水合物保压取心钻具研发”等项目的相继支持下,开展了多轮的保真取样钻具研制(结构示意图见图 4),利用钻探船采用无隔水管的钻井方式获取岩心,在保压阀关闭可靠性、取心质量方面取得了突破性进展^[17-18],并于 2020 年 1 月 12—16 日在渤海某海域进行了取样试验(见图 5),通过超前取样获得了高品质的低扰动岩心,保压成功达到了 100%,最大保压能力为 30 MPa,岩心直径为 50 mm。

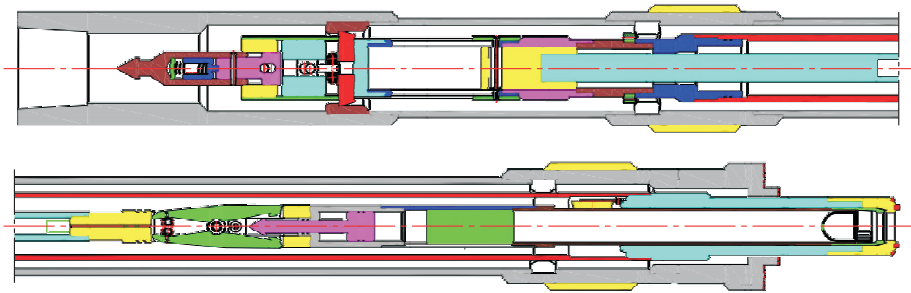


图 4 勘探技术所研制的绳索保压取样钻具结构示意图

Fig.4 The wire-line pressure core sampler developed by Institute of Exploration Techniques

目前国内已经研发了多种型号的保真取样钻具,并且在工程样机试验中取得了满意的效果,其基本技术参数也能够满足国内水合物勘查取样需求,但由于海域天然气水合物钻井是一个链条化的作业体系,不仅需要保真取样钻具进行原位保真取样,还需要在获取岩心后对其进行保压转移、切割,然后在实验室开展相关的物化参数与工程力学性能试验、测试,而国内目前在这方面还不是很成熟,这就导致

保压保真取样钻具在获取岩心后无法开展更深入的研究,严重妨碍了其工程化应用^[19-20]。因此,在优化完善保真取样钻具技术性能的同时,还应积极推动保压转移装置和配套实验设备的研发和推广应用,形成保真取样—保压测试一体化的作业链条,力争早日实现海域天然气水合物勘查取样的国产化操作。

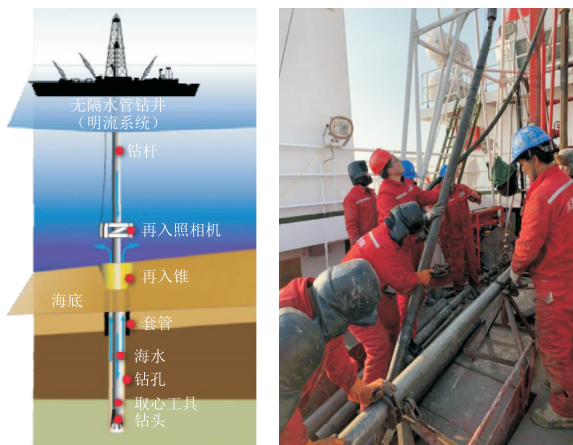


图 5 保压取样钻具作业方式及海试

Fig.5 Pressure core sampler operation mode and test at sea

此外,随着页岩气、煤层气等非常规油气勘探及原位地应力地学研究领域的不断深入,地质学家对获取地下深层次原位保真岩心的要求也越来越高。保真取样器具不仅在天然气水合物资源调查评价过程中能够获得地质学家所要求的原始状态的水合物岩心样品,而且也可对其他能源勘探、地质调查及地球科学探测提供精准的资料。

参考文献 (References):

- [1] 叶建良,殷琨,蒋国盛,等.天然气水合物勘探技术综述[J].探矿工程,2003(4):43-46.
YE Jianliang, YIN Kun, JIANG Guosheng, et al. Summarizing on gas hydrate exploration techniques[J]. Exploration Engineering, 2003(4):43-46.
- [2] 朱黄超,陈家旺,刘芳兰,等.海底天然气水合物取样器冷却技术研究现状[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):59-65.
ZHU Huangchao, CHEN Jiawang, LIU Fanglan, et al. Research status of cooling technology for submarine natural gas hydrate sampler[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(12):59-65.
- [3] 吴时国,王秀娟,陈端新,等.天然气水合物地质概论[M].北京:科学出版社,2016:1-15.
WU Shiguo, WANG Xiujuan, CHEN Duanxin, et al. Introduction to gas hydrate geology[M]. Beijing: Science Press, 2016:1-15.
- [4] 操秀英.试采创纪录 我国率先实现水平井钻采深海“可燃冰”[N].科技日报,2020-03-27(2).
CAO Xiuying. A world trial production record: China takes the lead in realizing production of deep sea “combustible ice” by horizontal wells[N]. Science and Technology Daily, 2020-03-27(2).
- [5] 蒋国盛,王达,汤凤林,等.天然气水合物的勘探与开发[M].武汉:中国地质大学出版社,2002:1-19,65-96.
JIANG Guosheng, WANG Da, TANG Fenglin, et al. Exploration and development of gas hydrate[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002:1-19,65-96.
- [6] 赵建国.天然气水合物孔底冷冻绳索索取芯钻具的设计与室内冷

冻试验的研究[D].长春:吉林大学,2010:9-10.

ZHAO Jianguo. Research on indoor experiment and design of wire-line freezing core tool for natural gas hydrate[D]. Changchun: Jilin University, 2010:9-10.

- [7] 汤凤林,张时忠,蒋国盛,等.天然气水合物钻探取样技术介绍[J].地质科技情报,2002,21(2):97-99,104.
TANG Fenglin, ZHANG Shizhong, JIANG Guosheng, et al. Introduction to coring technology by drilling of gas hydrates[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(2):97-99,104.
- [8] 中国大洋钻探学术委员会.中国加入国际大洋钻探计划的5年总结(1998—2002)[J].地球科学进展,2003,18(5):656-661.
China Ocean Drilling Academic Committee. Chinese participation in ODP: a five-year(1998—2002)summary[J]. Advances in Earth Sciences, 2003,18(5):656-661.
- [9] 郭威.天然气水合物孔底冷冻取样方法的室内试验及传热数值模拟研究[D].长春:吉林大学,2007:9-15.
GUO Wei. Research on simulation of heat transfer and indoor experiment of freeze method for sampling gas hydrate[D]. Changchun: Jilin University, 2007:9-15.
- [10] 许红,吴河勇,徐俊禄,等.区别于DSDP—ODP的深海保压保温天然气水合物钻探核心技术[J].海洋地质动态,2003,19(6):24-27.
XU Hong, WU Heyong, XU Junlu, 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 Development, 2003,19(6):24-27.
- [11] D' Hondt S L, Jorgensen B B, Miller D J, et al. Proceedings of the ocean drilling program[R]. Galveston: Texas A & M University, 2003.
- [12] Schultheiss P J, Holland M E, Humphrey G D. Wire-line coring and analysis under pressure: recent use and future developments of the HYACINTH system[J]. Scientific Drilling, 2009(7):44-50.
- [13] 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.
- [14] 李世伦,程毅,秦华伟,等.重力活塞式天然气水合物保真取样器的研制[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(5):888-892.
LI Shilun, CHENG Yi, QIN Huawei, et al. Development of pressure piston corer for exploring natural gas hydrates[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(5):888-892.
- [15] 张永勤,孙建华,赵海涛.天然气水合物保真取样钻具的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):62-65.
ZHANG Yongqin, SUN Jianhua, ZHAO Haitao, et al. Test research on in-situ sampler for gas hydrate[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(9):62-65.
- [16] 蔡家品,赵义,阮海龙,等.海洋保温保压取样钻具的研制[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.

(下转第 72 页)

China University of Technology (Natural Science), 1997(10): 56—61.

[10] 赵方园,毛炳权,伊卓,等.丙烯酸胺/2-丙烯酸胺基-2-甲基丙磺酸共聚物合成的逐级放大及其性能的研究[J].石油化工,2013,42(1):34—38.
ZHAO Fangyuan, MAO Bingquan, YI Zhuo, et al. Stepwise scaling up of acrylamide/2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid copolymer synthesis and its properties[J]. Petrochemical Technology, 2013,42(1): 34—38.

[11] 马苗苗.CFD 模拟无溶剂酯化合成体系反应器设计与放大[D].北京:北京化工大学,2017.
MA Miaomiao. CFD simulate and design and amplify enzymatic reactor for solvent-free through esterification reaction [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.

[12] 张景远.基于多尺度 CFD 耦合 PBM 的甲醇制烯烃反应器模拟及放大效应研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
ZHANG Jingyuan. Simulation of scale-up effects of methanol-to-olefins fluidized bed reactors by using combination of multiscale CFD and PBM[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[13] 堵祖荫.化工工艺开发放大的方法[J].化工与医药工程,2017,38(3):1—3.
DU Zuyin. Scale-up method used in chemical process development[J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2017, 38(3): 1—3.

[14] 张保.聚丙烯酰胺生产工艺技术探讨[J].化工管理,2018(27):165.
ZHANG Bao. Study on the production technology of polyacrylamide[J]. Chemical Management, 2018(27):165.

[15] Huong K, Azuraini M J, Aziz N A, et al. Pilot scale production of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) biopolymers with high molecular weight and elastomeric properties [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2017,124(1):76—83.

[16] 任夫健,凌永社,王庆志.化工放大技术方法的研究[J].现代化工,2011,31(S1):1—3,5.
REN Fujian, LING Yongshe, WANG Qingzhi. Research on chemical amplification technology[J]. Modern Chemical Industry, 2011,31(S1):1—3,5.

[17] 潘祖仁.高分子化学[M].北京:化学工业出版社,2007:148—169.
PAN Zuren. Polymer chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007:148—169.

[18] 柴诚敬,张国亮.化工流体流动与传热[M].北京:化学工业出版社,2000:283—315.
CHAI Chengjing, ZHANG Guoliang. Fluid flow and heat transfer in chemical industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000:283—315.

[19] 贾文峰,陈作,睦世元,等.实验及模拟研究两性疏水缔合聚合物增黏机理[J].科学技术与工程,2017,17(3):213—217.
JIA Wenfeng, CHEN Zuo, SUI Shiyuan, et al. Thickening mechanism of amphoteric hydrophobically associating polymer by experimental study and simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(3):213—217.

[20] 舒政,王迈,叶仲斌,等.用于测定聚合物溶液性能的多级剪切方法[J].科学技术与工程,2016,16(13):182—185.
SHU Zheng, WANG Mai, YE Zhongbin, et al. Multistage shearing method for measuring properties of polymer solution [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(13):182—185.

[21] 尹虎,赵建国,李黔.环空宾汉流体流量对顶替效率的影响规律研究[J].科学技术与工程,2013,13(26):7785—7787.
YIN Hu, ZHAO Jianguo, LI Qian. The study of influence regular of flow of Bingham Fluid on displacement efficiency [J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(26):7785—7787.

[22] Metzner A B, Otto R E. Agitation of non-Newtonian fluids [J]. AICHE JOURNAL, 1957,3(1):3—10.

[23] LUAN D Y, CHEN Q, ZHOU S j. Numerical simulation and analysis of power consumption and Metzner-Otto constant for Impeller of 6PBT [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014,27(3):635—640.

[24] Jahangiri M, Golkar—Narenji M R, Montazerin N, et al. Investigation of the viscoelastic effect on the metzner and Otto coefficient through LDA velocity measurements[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2001(1):81—87.

[25] Rieger F, Novak V. Power consumption of agitators in highly viscous non-Newtonian liquids[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1973,51:105—111.

[26] 王智勇,秦泰,刘刘,等.搅拌功率计算程序的开发[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017,30(4):17—22.
WANG Zhiyong, QIN Tai, LIU Yi, et al. Programming of the shaft power computing of the stirrer[J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017,30(4):17—22.

(编辑 韩丽丽)

(上接第 65 页)

[17] 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 sampler[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):47—51.

[18] 李小洋,王汉宝,尹浩,等.一种绳索打捞式保压取心钻具:201611157552.9[P]. 2017—05—31.
LI Xiaoyang, WANG Hanbao, YIN Hao, et al. A wire-line pressure coring tool: 201611157552.9[P]. 2017—05—31.

[19] 朱海燕,刘清友,王国荣,等.天然气水合物取样装置的研究现状及进展[J].天然气工业,2009,29(6):63—67.
ZHU Haiyan, LIU Qingyou, WANG Guorong, et al. Current status of natural gas hydrate sampling device[J]. Natural Gas Industry, 2009,29(6):63—67.

[20] 邵明娟,张炜.天然气水合物保压岩心相关技术研发与应用进展(一)[Z].北京:中国地质图书馆·中国地质调查局地质文献中心,2017:62—114.
SHAO Mingjuan, ZHANG Wei. Progress on research & development and application of pressure coring technologies for natural gas hydrate (1)[Z]. Beijing: National Geological Library of China • Geoscience Documentation Center of China Geological Survey, 2017:62—114.

(编辑 王建华)