

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2020045

# 南海天然气水合物取样技术现状及发展建议

任 红

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257000)

**摘要:**为了进一步完善南海天然气水合物钻探取样技术,在前期取样工具研发和现场试验的基础上,分析了南海取样环境和天然气水合物特性对天然气水合物钻探取样技术的需求,总结了天然气水合物取样技术的现状,分析了取样工具研发过程中工具尺寸、低温保温、密封阀和取样作业方式等方面遇到的技术难点,提出了满足实际需求采取的技术措施,研制了适用于南海天然气水合物取样的绳索保温保压取样工具,并探讨了天然气水合物取样技术今后的研究方向。研究结果为南海天然气水合物取样技术的进一步发展和完善提供了技术参考。

**关键词:**天然气水合物; 取样; 取样工具; 技术现状; 发展建议

**中图分类号:**P634.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-0890(2020)04-0089-05

## Current Status and Development Recommendations for Gas Hydrate Sampling Technology in the South China Sea

REN Hong

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China)

**Abstract:** In order to further improve gas hydrate drilling and sampling technology in the South China Sea, the requirements of the South China Sea sampling environment and gas hydrate characteristics of gas hydrate drilling and sampling technology were analyzed based on pre-development and field testing, which provided a detailed introduction to the sampling technology. Through an analysis of the difficulties encountered in developing sampling tools in key aspects such as tool size, low temperature insulation, sealing valve, sampling operation mode, etc., the countermeasures were studied according to the actual needs, by which a rope pressure-temperature-preserving sampling tool that suitable for gas hydrate sampling in the South China Sea was developed, along with recommendations having to do with the future research direction of gas hydrate drilling sampling technology. The result is a technical reference and a best practices guide for the further development and improvement of gas hydrate sampling technology in the South China Sea.

**Key words:** gas hydrate; sampling; sampling tool; technical status; development suggestion

天然气水合物(即可燃冰)是资源量丰富的高效清洁能源,是未来理想的战略接替能源之一<sup>[1-7]</sup>,多个国家制定了天然气水合物的国家研究与开发计划,并列入了国家未来能源战略规划。天然气水合物勘探开发中,钻探取样是评估天然气水合物的分布、产状、赋存形态和饱和度等的重要手段,对于后续开发方案的制定有重要意义。

天然气水合物是类冰状物质,对温度压力的变化很敏感,受到扰动易挥发。2007年和2013年,国内采用国外公司的冲击式保压取样工具FPC和旋转式保压取样工具FRPC进行了天然气水合物勘探取样,证实了我国蕴藏有丰富的天然气水合物资

源。中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院利用在井下工具和钻探取心技术方面的优势,于2007年开始进行天然气水合物钻探取样工具研制和取样技术研究,与国内多家天然气水合物领域的科研机构合作,突破了密封阀保压、低温保温关键技术;2017年,依托海洋石油708深水工程勘察船

收稿日期:2020-01-24; 改回日期:2020-04-17。

**作者简介:**任红(1980—),女,辽宁铁岭人,2003年毕业于吉林大学勘察工程专业,2008年获吉林大学地质工程专业博士学位,高级工程师,主要从事钻井工具方面的研究工作。E-mail: renhongzjy@163.com。

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“天然气水合物钻探取芯工程样机及配套技术”(编号:2013AA092602)资助。

在天然气水合物赋存区成功取得保压样品,为我国海底天然气水合物自主勘探取样提供了技术支撑<sup>[8]</sup>。目前,国内虽然在天然气水合物钻探取样方面取得了一些技术进步,也针对研究过程中遇到的各种技术难点提出了解决措施,但这些措施不是唯一的解决方案。为此,笔者分析了取样工艺、取样工具尺寸确定、低温保温、密封阀和取样作业方式方面的技术难点,以2017年南海北部成功实施的保压取样方案为基础,提出了相应的技术措施;并分析总结了研发天然气水合物钻探取样技术遇到的技术难点,为今后取样技术的进一步发展和完善提供了技术参考。

## 1 取样技术需求

### 1.1 南海环境的需求

南海属热带海洋季风气候,台风活动频繁、强度大、活动时间长,每月都有可能出现台风。南海大部分海区处于热带,加之受海洋影响,全年温度高、湿度大。南海大部分地区的全年相对湿度较大,年平均日最大相对湿度在80%以上;海流活动较强,有季风海流、黑潮暖流、上升流和潮流等。南海海域水深、域广、风大,既有交替的季风,又有猛烈的台风,海浪之大为中国陆缘海之冠。

受季风和台风等的影响,在南海能进行平稳作业的时间窗口较小,并且作业时间也有限。2017年海底水合物取样的时间为4月上旬至5月上旬,处于季风过渡期,期间风向多变,海洋石油708深水工程勘察船的抗风力不低于12级,保证了在9级风海况下的安全航行,采用动力定位不断调整船头方向,保证了作业安全;配备的主动和被动深度补偿装置弥补了海流活动的影响。取样工具出井口后迅速采取水域低温冷却措施,避免了高温造成天然气水合物迅速分解;取样设备采用不锈钢材料,并及时进行保养,防止了海洋高温潮湿环境对取样设备造成锈蚀。

### 1.2 天然气水合物性质的需求

天然气水合物是由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状结晶物质<sup>[9]</sup>。其生成的温度条件为0~10℃,超过20℃便会分解;在0℃条件下,压力达到3.0 MPa就可生成。海底温度一般在2~4℃,水深300 m处的压力可以达到3.0 MPa,并且压力越高,天然气水合物越不容易分解,因此深海环境适合天然气水合物的生成和保存。

天然气水合物依赖巨厚海水层的压力来维持其

固体状态,其分布范围为海底到海底之下1000 m以浅;深度继续增大后,由于地层温度升高,其固体状态遭到破坏而难以存在。南海北部海域海底沉积层的主要成分为黏土,夹杂少量细砂、粉砂,表层沉积物为淤泥质黏土,类冰状天然气水合物赋存在沉积层中,在海底水压作用下与未成岩的沉积层结合在一起呈固体状态;但一旦被扰动,取出到海面,因为压力降低会迅速分解,所以采用常规取样方式获取天然气水合物样品十分困难,需要在保温保压条件下才能取到。2017年进行天然气水合物取样时海水深度1310 m,取样层位在泥线以下100~123 m,取得的保压样品为泥质粉砂。

## 2 取样工艺现状

由于天然气水合物赋存于深海,采用钻井平台取样,作业成本太高,因此一般采用钻探船取样。虽然钻探船的作业成本较低,运动比较灵活,但受海洋环境影响很大,而且不能像钻井平台一样下入隔水管和固定井口,钻井液无法形成循环体系,只能采用钻杆在海底浅层进行裸眼作业。这也导致不能采用常规起钻方式进行取样作业,因为一旦起钻,在深海要再找到井口将非常困难,只能将钻杆做为取样通道进行快速取样。

2017年,天然气水合物取样采用的海洋石油708深水工程勘察船,除了具有动力定位、主动和被动深度补偿装置外,为保障取样作业顺利完成,还在海底下放了海底基座,取样过程中能够抱住钻杆,尽量减少对地层的扰动。由于受勘察船尺寸和井架高度的限制,钻进时只能进行接单根作业,采用了φ127.0 mm钻杆,钻具组合内径不小于φ104.7 mm,井架有效高度36.00 m,井架前大门高度12.50 m,大钩最大工作载荷2250 kN。

## 3 取样工具现状

由于天然气水合物的特殊性和不起钻的作业方式,只能采用绳索保温保压取样方式,即取样工具从钻杆内部下入到井底,完成取样后,利用与绞车绳索连接的特殊打捞工具将取样工具提出井口,获得保温保压样品,然后快速循环该作业过程,实现连续取样。

### 3.1 工具尺寸

为适应海洋石油708深水工程勘察船的钻具尺

寸, 取样工具外径最大只能设计为 101.0 mm; 受密封阀门通径限制, 为满足后期分析样品的要求, 目前取心直径最大能够达到 52.0 mm。

### 3.2 低温保温方式

低温保温方式有很多种, 主要目的是阻断对流、传导和辐射这 3 种形式的传热。取样工具研发过程中, 重点研究了真空被动保温、半导体制冷主动保温和填充隔热材料被动保温等 3 种方案, 3 种保温方案各有利弊。

1) 真空被动保温是把保温保压筒做成双层, 两层之间抽真空, 切断热传导; 保温保压筒外采用等离子喷涂隔热涂层(如图 1 所示)。保温保压筒为密封状态, 可以避免热对流; 太阳光隔热涂料将保温保压筒外部辐射的热能反射回去, 以防止外面的热能辐射到筒内。检测结果表明, 隔热涂层对太阳光热量的反射、阻隔效果非常明显, 能反射太阳光线一半以上的红外线, 一般情况下, 喷涂隔热涂层的物体表面温度与未喷涂隔热涂层相比低 10~20 ℃。试制的保温保压筒真空夹层厚 2.0 mm, 真空度达 0.08 MPa, 涂层厚 0.5 mm, 能保持温度尽量不变。真空被动保温的低温保温效果较好, 但工艺复杂, 加工难度大, 且保温筒两端接头无法隔热, 不可避免地会影响保温效果<sup>[10]</sup>。

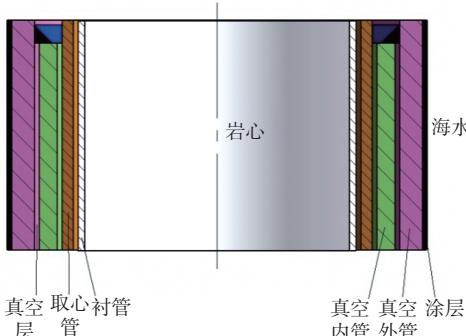


图 1 真空被动保温示意

Fig.1 Schematic diagram of vacuum passive heat preservation

2) 半半导体制冷主动保温是利用半导体材料的 Peltier 效应, 在直流电通过 2 种不同半导体材料串联成的电偶时, 电偶的两端可分别吸收热量和放出热量, 可以通过改变电流大小和半导体材料 N、P 的元件对数控制吸热量和放热量, 实现制冷的目的。制冷片内部是由上百对电偶组成的热电堆, 以达到增强制冷的效果。低温保温筒就是将多组制冷片的制冷端固定在筒壁上, 用蓄电池供电, 使保温筒内保持低温。虽然主动制冷可以使保温筒内保持低温, 且

不受两端接头的影响, 但制冷片的放热端要及时散热, 需要增大制冷片两端温差; 另外, 制冷片和电池组占用了取样工具的很大空间, 设计难度很大<sup>[10]</sup>。

3) 填充隔热复合材料被动保温是在双层筒内填充二氧化硅气凝胶, 该凝胶是一种防热隔热性能非常优秀的轻质纳米多孔非晶固体材料, 孔隙率达 80.0%~99.8%, 孔洞的典型直径 1~100 nm, 比表面积 200~1000 m<sup>2</sup>/g, 密度可低至 3.0 kg/m<sup>3</sup>。二氧化硅气凝胶的导热系数极低, 比相应的无机绝缘材料低 2~3 个数量级, 达到 0.013~0.016 W/(m·K), 低于静态空气的导热系数(0.024 W/(m·K))。采用该低温保温方式, 保温材料和工具的结构都简单, 其与外管喷涂隔热涂层配合。室内试验表明, 在采用该低温保温方式的保温筒内装入模拟冰块, 在室温(20 ℃)下, 放置 2.5 h 后保温筒内仍有大量冰块, 完全满足取样后样品从海底到甲板再进入带压转移仓所需的时间。因此, 2017 年天然气水合物取样使用的工具都采用该低温保温方式<sup>[10]</sup>。

### 3.3 密封阀

密封阀是取样工具的关键部件, 关系着天然气水合物取样的成败。保温保压取样工具采用绳索取样方式, 取样工具外径受钻柱内径的限制, 因此增大取样直径主要就是增大密封阀的通径。目前, 能够用于取样工具的密封阀主要有球阀和板阀。球阀由于有预紧力, 密封性较好, 但需要能使密封球旋转 90° 的联动结构, 不论是齿轮齿条结构, 还是能够与密封球产生力矩的结构, 都需要较大的径向空间。板阀的活动零件只有一个密封板, 结构简单相对, 占用的空间也小, 但没有预紧力, 初始密封性较差。为增大密封保压成功率, 并使取样岩心的直径尽可能较大, 设计了不同结构的球阀和板阀, 通过改变结构增大密封阀的通径。

#### 3.3.1 球阀

设计了 2 种结构的球阀。第 1 种结构的球阀在上提取样管到位后, 触发电控机构释放带压液体, 推动齿条带动密封球轴线上的齿轮旋转 90°, 形成密封(见图 2)。在胜利六号钻井平台泥线下 38.60 m 处进行了密封试验, 初始压力为 4.248 MPa, 16.5 h 后压力为 4.217 MPa, 仅降低了 0.031 MPa, 表明其密封性很好, 但取样直径仅为 30.0 mm<sup>[10]</sup>。

第 2 种结构的球阀为了增大密封球的密封通径, 将推动密封球旋转的机构放在轴心线侧面, 机械结构触发后, 靠二者间的力矩使密封球旋转 90° 形成密封。该结构的球阀还处于试验阶段。

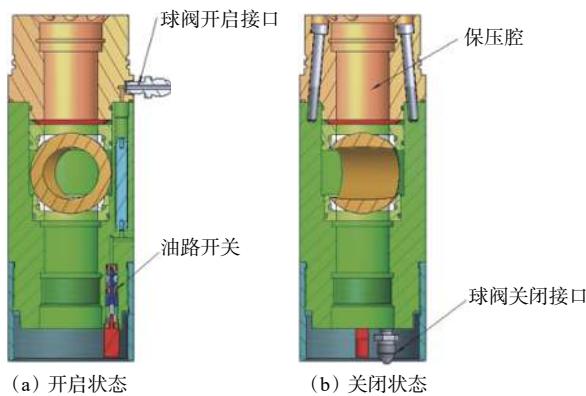


图 2 电控球阀

Fig.2 Electronically controlled ball valve

### 3.3.2 板阀

板阀按照结构可分为直板式密封板阀、弯月式密封板阀和相贯线式密封板阀。直板式密封板阀的板是平面板，密封面也是平面，这种板阀易加工，但通径受空间限制难以增大。弯月式密封板阀的板与工具同轴，密封面是空间锥面，虽然增大了通径，但密封圈槽难以加工，试制了几种样品，密封效果都不佳。相贯线式密封板阀的板也与工具同轴，密封面是空间曲面，虽然加工难度大，但密封圈槽能够加工（见图3）。设计的相贯线式密封板阀外径为95.0 mm，通径为60.0 mm。



图 3 相贯线式密封板阀

Fig.3 Cross-line sealing plate valve

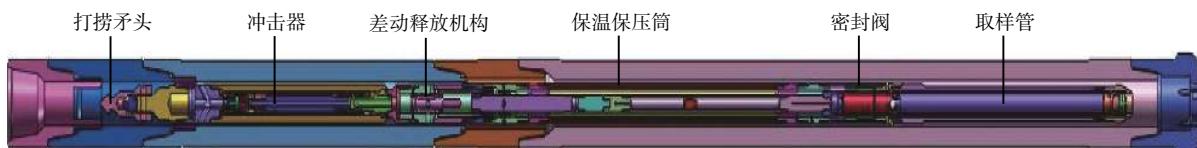


图 4 冲击器式保压取样工具

Fig.4 Impactor-type pressure holding sampling tool

相贯线式密封板阀室内密封性能试验表明，其密封效果较好，低压0.5 MPa就可以密封，压力最高测试到30.0 MPa，保持30 min后压力未降低<sup>[8]</sup>。

### 3.4 取样作业方式

天然气水合物取样属于深水浅层绳索取样，取样层位多为弱胶结地层，所以作业时要尽量减小对样品的扰动。对于海底淤泥质土、黏土和松散—稍密的粉土与砂土，目前主要的取样方式是靠液压匀速压入地层，这种方式对样品扰动最小，取样质量最好，可以获取无干扰的沉积物样品，但由于地层强度逐渐增大，使用范围有限<sup>[11]</sup>。坚硬的黏土、较致密的砂土和弱胶结土也是天然气水合物赋存较多的地层，这些地层可以采用液力驱动的井底冲击器、高频冲击薄壁取样管进入地层的方式（见图4），既能避免旋转取样对天然气水合物样品的扰动，又能提供较大的推动力破碎地层，而且可以用于绳索取心，因此，天然气水合物取样时使用的较多<sup>[12]</sup>。对于非常坚硬的黏土、成岩地层，可以采用旋转取样的方式，旋转取样可以靠钻杆带动取样工具旋转<sup>[13]</sup>，也可以不旋转钻杆，靠井下螺杆钻具带动取样工具旋转，虽然旋转会对样品有扰动，但由于地层坚硬，影响较小。

## 4 技术发展建议

2017年，海洋石油708深水工程勘察船在南海北部采用绳索提取、隔热复合材料被动保温、相贯线式密封板阀保压和液力驱动井底冲击器高频冲击取样技术，成功取得了天然气水合物样品。笔者在分析天然气水合物钻探取样技术研发中遇到的技术难点的基础上，综合考虑现有技术，提出了今后的研究方向，为技术改进和后续技术研究提供参考。

1) 优选适合制造天然气水合物取样工具的材料，进一步改进工具的结构，增大绳索取心工具的取样直径，提高密封阀的初始密封性能，研发取样工具与后处理设备快速对接的配套装置，提高现有工具对地层的适应性，简化操作步骤，实现过程电

动化,降低作业风险。

2)研发新保温保压技术,如注入冷冻剂提高样品的保温效果,降低温度对样品的影响,冰冻底部样品形成冰阀,实现密封保压。

3)进一步研发适用于天然气水合物样品检测的各种声、电和光学测量仪器,以测试水合物样品的组成、密度、孔隙率、渗透率和热传导性等参数,建立现场样品检测综合实验室。

## 5 结束语

天然气水合物钻探取样技术的创新发展,使我国在天然气水合物这一海洋新能源领域实现了自主勘探开发,形成的技术和装备除了用于海底天然气水合物资源勘探外,还可以用于海洋石油地质勘探、海底固体矿产资源勘探、海洋环境及海洋生物科学的研究等。今后,在完善现有天然气水合物钻探取样技术装备的基础上,配套现场样品检测综合实验室,将进一步提高天然气水合物钻探取样技术水平,增强我国海底天然气水合物的勘探能力,满足和支撑国家海洋高科技事业发展的需求。

## 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 Shenhua 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,2016,44(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 Qianning. Technical progress of a pilot project to produce natural gas hydrate in Japanese waters[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 98–102.
- [4] 刘超.可燃冰开发环境风险法律规制制度探究[J].中国地质大学报(社会科学版),2017,17(2):39–48.  
LIU Chao. Study on legal regulation system of environmental risk in the exploitation of methane hydrate[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2017, 17(2): 39–48.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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试验[J].石油钻探技术,2018,46(5):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(5): 44–48.
- [9] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].北京:地质出版社,2013:330–336.  
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 330–336.
- [10] 许俊良,任红,王智峰,等.深水天然气水合物钻探取样关键技术初探[M].北京:石油工业出版社,2014:96–140.  
XU Junliang, REN Hong, WANG Zhifeng, et al. Primary research on key technology for deepwater gas hydrates drilling and sampling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 96–140.
- [11] 任红,许俊良,朱杰然.天然气水合物非干扰绳索式保温保压取样钻具的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):1–4.  
REN Hong, XU Junliang, ZHU Jieran. Development of non-interference wire-line pressure-temperature-preserving sampling drilling tool for gas hydrate[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(6): 1–4.
- [12] 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,2012,1(3):47–51.  
MA Qingming, REN Hong, XU Junliang. Gas hydrate drill coring sample WEPC system development[J]. Unconventional Oil & Gas, 2012, 1(3): 47–51.
- [13] 王智峰,管志川,许俊良.天然气水合物深水深孔钻探取心系统研制[J].*天然气工业*,2012,32(5):46–48.  
WANG Zhifeng, GUAN Zhicuan, XU Junliang. Research and development of a gas hydrate coring system in the deep sea water[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(5): 46–48.

[编辑 腾春鸣]