

天然气水合物冷源外置式孔底冷冻绳索取样器 冷冻效率优化研究

曲莉莉^{1,2}, 王 元^{1,2}, 贾 瑞^{1,2}, 陈光华³, 张鹏宇^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 中建三局第一建设工程有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要:为解决天然气水合物冷冻取样钻具冷源难以在孔底长时间存储及冷冻岩心效率低的问题,本文提出了采用冷源外置式冷冻岩心样品的方法,即将冷源存放在打捞器中减少冷源在孔内的存储时间,提高冷源的存储效率,并在冷冻过程中向冷冻腔内通入氮气增强低温酒精与岩心的对流换热以提高岩心的冷冻效率。采用液氮与酒精混合形成的低温酒精(-130℃)作为冷源进行冷源存储及岩心冷冻试验,模拟孔内环境存储 30 min 后,冷冻能量保存率为 73.1%。通过注入氮气提高冷源与岩心的换热效率,可将岩心平均温度降至-14.92℃,与传统方式相比冷冻效率提高 24.3%。试验结果表明,通过冷源外置式的结构和通过注气增强对流换热的方法能够解决冷源不能长时间存储及岩心冷冻效率低的问题,为天然气水合物钻探获取原始样品提供了一种可行的方法。

关键词:天然气水合物;孔底冷冻;绳索取心;冷冻效率优化

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)07-0014-07

Optimization of freezing efficiency of hole-bottom freezing wire-line sampler with off-board cooling-source

QU Lili^{1,2}, WANG Yuan^{1,2}, JIA Rui^{1,2}, CHEN Guanghua³, ZHANG Pengyu^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China;
3. China Construction Third Bureau Frist Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430040, China)

Abstract: In order to solve the problem that the cooling source of the conventional gas hydrate hole-bottom freezing sampler is difficult to be stored for a long time and the core freezing efficiency is low, an off board cooling source freezing sampling method is proposed. The cooling source is stored in the fishing device, which reduces the storage time in the hole and improves the storage efficiency. During the freezing process, nitrogen is injected into the freezing chamber to enhance the convection of heat transfer between cooling alcohol and core, and to improve the core freezing efficiency. Low temperature alcohol(-130℃), a mixture of liquid nitrogen and alcohol, is used as a cooling source. Cooling source storage tests and core frozen experiments were carried out. During the procedure, after having stored the cooling source for 30 - minute, the left frozen energy was 73.1%. With the nitrogen injected into the cooling source, the thermal efficiency between the cold source and core was improved, with the average temperature of the core lowered to 14.92℃, the freezing efficiency increased by 24.3% compared with the traditional way. The problem that the cooling source cannot be stored downhole for a long time can be solved by adopting the off-board cooling source sampler. The problem of low core freezing efficiency can be solved by adding nitrogen into the cooling source to increase the convection of heat transfer. This paper provides a feasible method for gas hydrate sampling.

Key words: gas hydrate; hole-bottom freezing; wire-line sampling; freezing efficiency optimization

收稿日期:2018-10-29; **修回日期:**2019-04-26 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.07.003

基金项目:自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室(吉林大学)开放课题(编号:201712)

作者简介:曲莉莉,女,汉族,1978年生,实验员,工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质工程技术及天然气水合物钻采技术相关研究,吉林省长春市西民主大街 938 号, qulili@jlu.edu.cn.

引用格式:曲莉莉,王元,贾瑞,等.天然气水合物冷源外置式孔底冷冻绳索取样器冷冻效率优化研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):14-20.

QU Lili, WANG Yuan, JIA Rui, et al. Optimization of freezing efficiency of hole-bottom freezing wire-line sampler with off-board cooling-source[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):14-20.

0 引言

天然气水合物因其储量大、能量密度高、清洁和分布广泛等优点而被认为是最有希望接替传统能源的新能源^[1-3]。钻探取样是评价水合物储量和开采的前提,但天然气水合物常温常压下会分解,常规钻探取样技术无法获得评价水化物储量及开采方法所需的水合物原始样品。水合物保温保压取样方法的思路就是利用保温保压钻具获得原始的水合物岩心样品,为此所研制的相关钻具就是当水合物岩心进入岩心管后,通过球阀或翻板阀关闭岩心管底部,使岩心管形成一个密闭保压的腔体保持岩心初始压力,同时利用压力补偿装置,来维持岩心压力在提钻的过程中保持不变。岩心被提到地表后将其冷冻保存^[4-7]。保温功能主要通过岩心衬管和内管之间增加保温材料或注入液态氮,并在钻进过程中配合钻井液冷却装置和低温钻井液来实现。保温保压取样方法是目前水合物钻探取样工程中应用最多的方法,目前常用的保压取样器型号包括 PCB、PCS、FPC、PTCS 等^[8-11]。上述钻具的结构原理都是可行的,但在使用过程中由于保温保压取样器的结构复杂,对密封性的要求较高,很难将保压岩心无压降地转移到储藏装置中进行分析,需要配备专用的转储装置,没有实现真正意义上的保温,实际保压取心的成功率较低^[12-14]。

冷冻取样技术是在分析了天然气水合物的温压特性和自保护效应^[15-16]的基础上,采用外部“冷源(相变流体)”将进入取样管的水合物岩样在孔底进行冷冻,以主动降温的方式将已钻获得的水合物样品冷却到被打捞到地表标准大气压下取样时都不发生分解的温度,以保证获得的水合物岩样^[17-21]所含甲烷饱和度与原位一致。这就要求在取心过程中需要将冷源在钻具被下放到孔底之前已被存储在孔底的钻具内,但由于取样器尺寸限制冷源存储腔体外部的保温层厚度较薄,无法实现冷源的高效率存储。另外,由于冷源在注入狭长冷冻腔体后,冷量分布不均匀,导致岩心的冷冻效率低、且温度分布不均匀。

为解决上述技术问题,本文提出了冷源外置式孔底冷冻绳索取样器的设计思路,即采用绳索取心的方法,在钻进结束后,利用打捞器运送冷源至孔底并实施岩心冷冻,绳索取心方法可以实现快速提取岩心,冷源外置的方法可以解决冷源井下储冷时间长的问題。然后通过钻具内设置高压气罐,在冷

冻过程中向冷冻腔体内注入气体来提高岩心的冷冻效率。

1 冷源外置式孔底冷冻绳索取样器原理

冷源外置式孔底冷冻绳索取心方法,就是将绳索取心工艺与孔底冷冻技术结合,实现不提钻快速取心,并将水合物岩心在孔底进行冷冻。冷源外置取样器工作原理如图 1 所示,共分为以下 4 个工作过程:

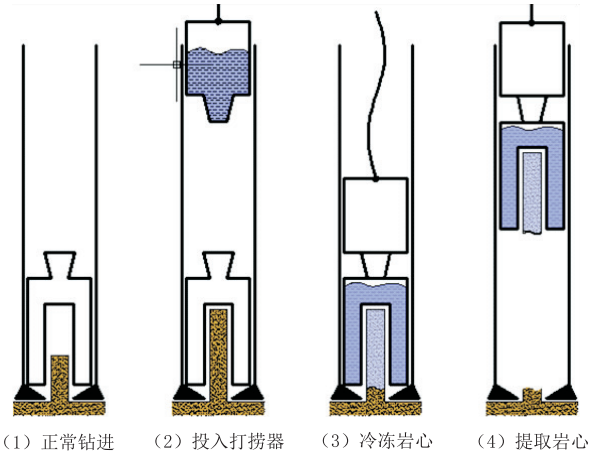


图 1 冷源外置式取样器工作原理示意

Fig.1 Off board cold source sampler

(1)正常钻进。采用冷源外置式绳索取心钻具进行正常的水合物储层钻进,岩心逐渐进入岩心管,此时打捞器不投入孔内。

(2)投入打捞器。回次结束后,将装有低温冷源的打捞器投入孔底,打捞器上部的连接机构与钻具的冷冻机构连接,控制低温的冷源由打捞器的储冷机构内流出,注入岩心冷冻机构。

(3)冷冻岩心。低温冷源进入冷冻腔体后与岩心管内的含水合物岩心样品进行换热,水合物岩心温度逐渐降低。

(4)提取岩心。冷冻结束后,通过孔口的绞车将打捞器和钻具自孔内提至地表,完成冷冻取心。

2 冷源孔内存储试验

在冷冻取样过程中,低温冷源是通过将载冷剂的温度降低,在冷源存储和岩心冷冻过程中起到携带并传递冷冻能量的作用。结合孔底冷冻的过程可知载冷剂需要具有较好的流动性及携带大量冷量的能力。乙醇由于具有较高的比热容(2400 J/kg·℃),凝固温度低,能较好地存储冷量,且易于获得

等特点,适合作为载冷剂,制作冷源。在制备冷源过程中,通过液氮气化吸热来快速制备低温酒精(将其温度降至 -130°C),形成超低温酒精作为冷源。

2.1 试验装置及流程

图2为储冷机构试验原理图。试验装置包括3个部分:钻井液循环装置、测温装置和储冷机构。钻井液循环装置的作用是模拟储冷过程或冷冻过程中模拟钻井液流动,主要由外管、同轴连通器、法兰盘和支架组成。试验测试装置主要包括温度传感器和无纸记录仪。温度传感器有3枚,沿轴向均匀设置在中部;径向上分别设置在中轴,紧贴管壁,以及中轴和管壁之间;温度传感器与无纸记录仪通过导线连接。测试装置可以测量储冷过程中冷源温度变化情况。储冷机构包括储冷腔外管、保温层和储冷腔内管。试验过程中冷源存储在储冷腔内衬管内。储冷机构的关键材料及结构参数如表1所示。

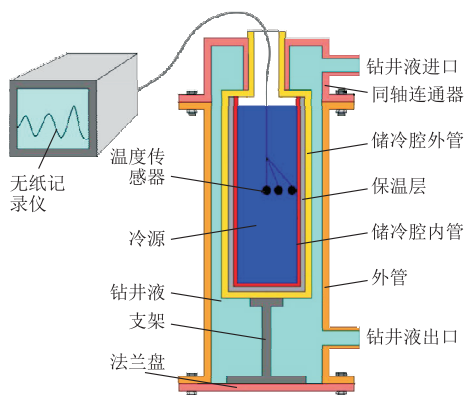


图2 储冷机构实验系统原理示意

Fig.2 Experimental system for cold storage mechanism

表1 储冷机构关键材料及结构参数

Table 1 Key materials and structural parameters of cold storage mechanism

项	目	参	数
储冷腔外管	材料	钢管(45号钢)	
	外径/mm	94	
	内径/mm	84	
储冷腔内管	材料	聚四氟乙烯	
	外径/mm	60	
	内径/mm	66	
保温层	材料	圆筒状纳米气凝胶毡	
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	13	
	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1	

试验时,首先按照图2连接钻井液循环装置,并将温度传感器放置在储冷腔内;然后预冷储冷腔,将制备的冷源注入储冷腔;最后连接水泵及水箱,开始

循环钻井液。储冷过程中通过温度传感器来采集数据。

2.2 冷源存储试验结果与分析

储冷试验中冷源温度变化曲线如图3所示。

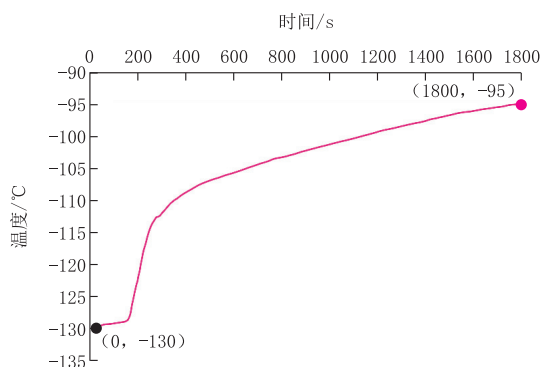


图3 冷源温度变化曲线

Fig.3 Temperature curve of the cold source

在冷源的存储过程中,温度在180s的时间内缓慢上升,然后升高速度加快,到400s左右温度上升速度开始减慢,最终温度为 -95°C 。这是由于冷源的初始温度低于储冷腔管壁的温度,冷源注入过程中与管壁换热,造成了冷源快速升温阶段的产生;但是由于温度传感器位于储冷腔的轴线上,而冷源的温度是自外向内逐渐升高的,所以在快速升温之前,存在一段平缓升温的过程(即0~180s的时间段)。当储冷腔管壁逐渐降低到与冷源温度一致时,冷源与外界钻井液的换热由于保温层的隔热作用而逐渐减慢。储冷试验证明初始温度为 -130°C 的低温酒精存储1800s,冷源温度降至 -95°C ,冷冻能量的保存效率为73.1%,能量保存率能满足冷冻岩心的要求。该温度将作为岩心冷冻试验中冷源的初始温度。

3 岩心强化制冷试验

3.1 试验装置及流程

为了验证高压气体推动冷源在冷冻腔内循环流动,实现强制对流换热,进而实现强化制冷,提高冷冻岩心的效率,进行了岩心强化制冷试验。岩心冷冻机构试验系统原理如图4所示,共包括6个部分:钻井液循环装置(与储冷试验相同)、测温装置、气动冷源注入装置、储冷机构样机、岩心冷冻机构和密封阀门机构。气动冷源注入装置通过氮气和输气管实现气体注入功能,增强低温酒精与岩心间的对流换热效率。测温装置主要包括温度传感器和无纸

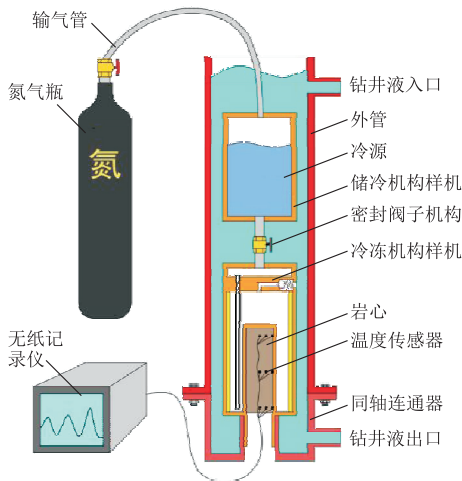


图 4 岩心冷冻机构实验系统原理示意

Fig.4 Experimental system for core freezing mechanism

记录仪,温度传感器有 9 枚,径向上分别位于岩心中轴线、岩心半径的一半处、岩心紧贴岩心管处;轴向上分别位于岩心的上、中及下部。岩心冷冻过程如图 5 所示,图 5(a)为常规的冷源注入方式,冷源在常压下由于重力自由流入冷冻腔内;图 5(b)为改进

的注入方式,冷源在气体压力的作用下将冷源通过引流管压入冷冻腔底部,并逐渐上升。连接阀门机构位于储冷机构底部和冷冻机构之间,在试验前起着密封储冷腔和冷冻腔的功能,试验开始时起连通储冷机构和连接机构的功能。试验初始条件如表 2 所示。

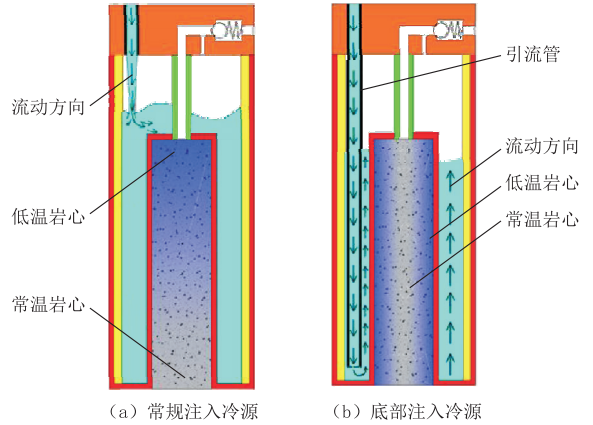


图 5 岩心冷冻过程示意

Fig.5 Core freezing process

表 2 试验初始条件

Table 2 Initial conditions for the test

组别	冷源注入压力/MPa	冷源初始温度/℃	冷源用量/L	冷源注入方式	其他
对照组	0.10	-93.74	3	从上向下注入	岩心长度 500 mm;岩心直径 50 mm;环境温度 23 ℃;钻井液为清水;钻井液温度 13 ℃
实验组	0.50	-95.64	3	从下向上注入	

试验时首先按照图 5 所示将冷冻机构样机组装好,并在岩心管内填装含水量 10% 的砂样模拟水合物岩心;含水 10% 砂样的导热系数小于含水合物沉积物岩心样品,说明冷量在水合物沉积物内的传递速度要小于含水砂样,即制冷水合物沉积物的速度要高于含水砂样;比热容大于含水合物沉积物岩心样品,说明降低同样的温度的情况下,含水砂样要吸收更多的冷能。可见,制冷含水砂样的难度更大,如果冷源能够满足冷冻含水砂样,则也能够将水合物沉积层冷冻^[22]。

然后按照图 2 所示连接储冷机构,采用液氮预冷,然后注入冷源。将经过预冷的储冷机构固定在钻井液循环装置上部,然后用输气管将氮气瓶与储冷机构相连接,打开输气阀门并调整到预定压力。将钻井液循环装置与水泵、水箱连接好,启动水泵,开始循环钻井液。实验过程中,对岩心温度进行监测,温度监测点位置如图 6 所示。

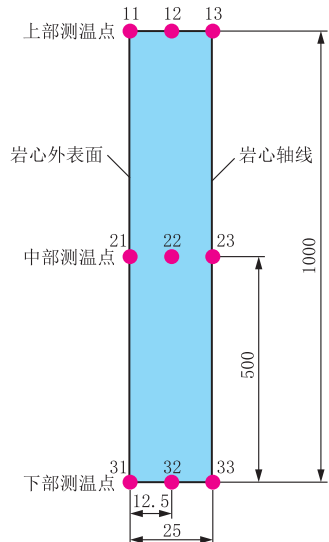


图 6 岩心温度监测点位置示意

Fig.6 Location of core temperature monitoring points

最后使储冷机构样机在钻井液循环装置中坠落并与冷冻机构样机连接,剪断钢丝绳开始计时,30

min后停止试验。

3.2 岩心强化冷冻试验结果与分析

(1)采用传统的冷源注入方式(自上而下注入)的岩心温度变化曲线如图7所示。岩心上部平均降温速度为 $9.39\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;岩心中部平均降温速度为 $4.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;岩心下部的平均降温速度为 $1.89\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。这是由于冷源是从冷冻腔上部注入的,注入过程中冷源首先与上部岩心进行换热,然后与中部岩心换热,最后流入冷冻腔底部,而后流入的冷源留在冷冻腔上部;此时冷冻腔底部冷源所携带的冷

量远小于上部冷源,冷冻腔内的冷量分布不均匀;冷冻腔上部冷源携带冷量多,与岩心之间的温差相对较大,所以上部岩心降温速度相对较快。在岩心温度到达最低点后,上、中、下部岩心温度最低值分别为 -24 、 -12 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于与外界换热岩心温度逐渐上升,试验结束时上、中、下部岩心温度分别为 -6 、 -2.5 、 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见岩心轴线方向上的温度分布极不均匀,这对抑制岩心内水合物的分解来说是十分不利的。

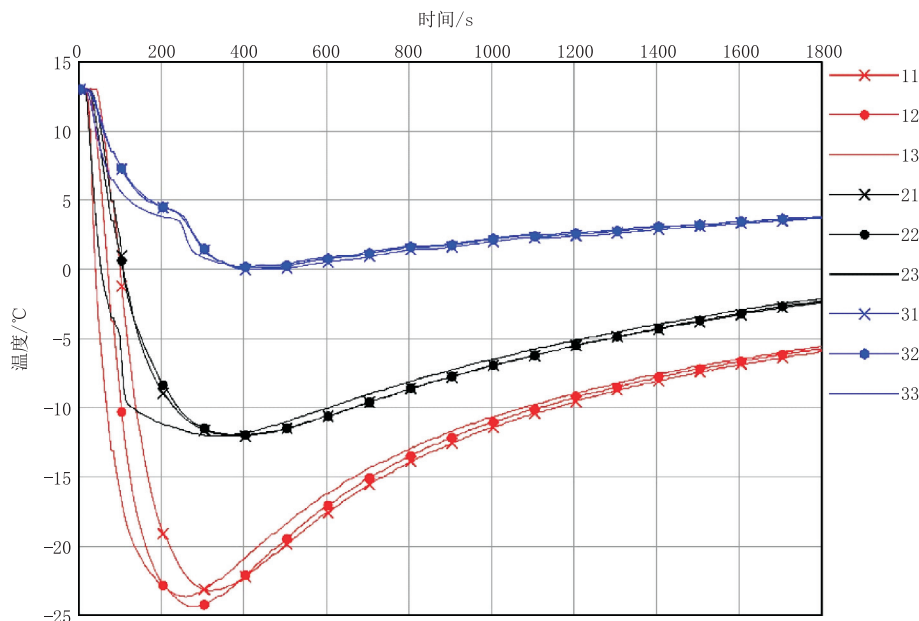


图7 传统冷源注入方式的岩心温度变化曲线

Fig.7 Core temperature curve with the traditional cold source injection method

(2)采用改进的冷源注入方式(自下而上注入)的岩心温度变化曲线如图8所示。降温首先发生在岩心下部,然后是岩心中部,最后是岩心上部。岩心上部的平均降温速度为 $10.82\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,岩心中部的平均降温速度为 $6.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,岩心下部降温速度为 $5.86\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。上部岩心的温度下降速度较快,中部与下部岩心测温点的降温速度相似。在冷冻过程初期,岩心下部的温度最先开始下降,随后岩心中部和上部开始下降。这是由于冷源从冷冻腔底部注入后,首先制冷岩心的下部,然后向上流动,逐渐进入岩心管顶部宽阔的冷冻腔空间,岩心上部与冷源最晚接触,所以上部温度下降最晚;另外,由于冷源在气体压力的作用下流经岩心管外部的冷冻腔体,增强了与岩心管间的对流换热效率,进而提高了岩心的冷冻效率。由于冷源从底部注入冷冻腔,首先

与岩心下部进行换热,增加了岩心下部吸收的冷量,使其温度下降加快;因此,对比图7可以看出,图8中岩心上、中、下部的温度差异明显减小,岩心的温度分布更均匀。在岩心冷冻过程中,上部岩心的最低温度为 $-27.71\text{ }^{\circ}\text{C}$,中部岩心的最低温度为 $-19.18\text{ }^{\circ}\text{C}$,下部岩心的最低温度为 $-16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;由于冷源和岩心与外界发生换热,所以此时岩心温度逐渐上升。在 1800 s 时,上、中、下部岩心温度基本相同,各部分岩心平均升温速度约为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,试验末各部分岩心的温差在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。可见岩心轴线方向上的温度分布较均匀。提钻取心过程中只有当静水压力(环境压力)小于水合物临界分解压力时水合物才会分解;降低水合物岩心温度可降低其临界分解压力,相应的“临界稳定水深”变浅,即水合物不稳定存在的孔段变短。并且实验时的环境温度为

23 °C 大于深层海水温度,因此实际水合物钻探取心过程中,岩心温度上升速度相对较慢。实验过程中在半小时内岩心的温度保持在 0 °C 以下,说明在实际钻探过程中在半小时内岩心温度会更低,保持在

0 °C 以下的时间会更长。现有研究表明,当水合物温度在 0 °C 以下时会产生自保护效应抑制水合物分解^[23-24],因此通过冷冻取样方法获得水合物岩心是可行的。

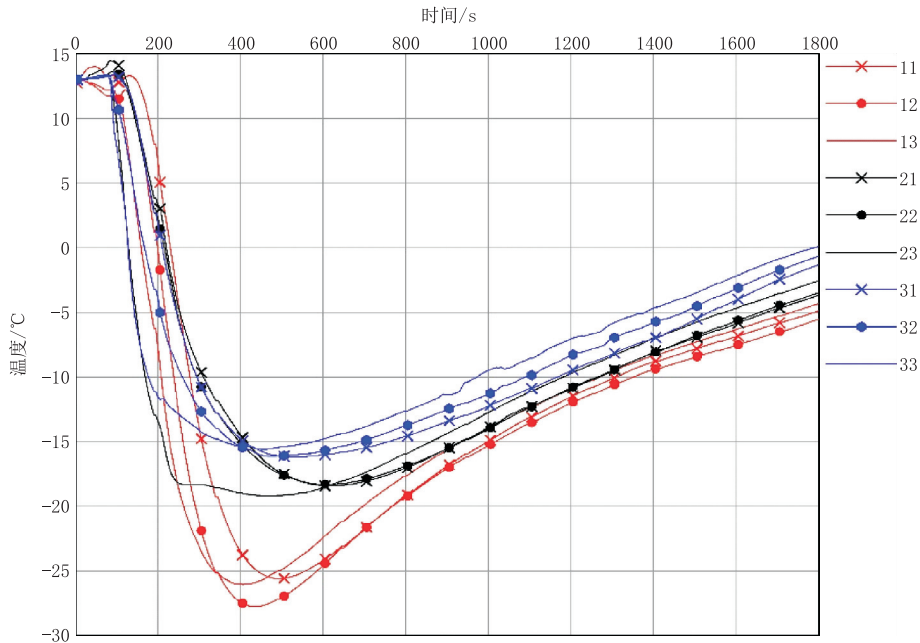


图 8 改进冷源注入方式的岩心温度变化曲线

Fig.8 Core temperature curve with the improved cold source injection method

4 结语

为了解决在取心过程中冷源的存储效率低,岩心的冷冻效率低、且温度分布不均匀的问题,本文提出了采用冷源外置式的取样器结构,利用液氮和 95% 工业酒精快速制备低温酒精的冷源制备方案,实验采用 -130 °C 的低温酒精作为冷源,通过样机实验证明, -130 °C 的低温酒精经 30 min 储冷后温度升高至 -95 °C,冷源存储效率为 73.1%,可以满足冷冻岩心对冷源温度的要求。

为了提高岩心冷冻效果,提出了“底部注冷—气动循环”的冷源注入方案。实验证明采用 0.5 MPa 的注入压力,及“底部注冷—气动循环”的冷源注入方案可将岩心平均温度冷冻到 -14.92 °C,比传统注入方式(冷冻至平均温度 -12 °C)的冷冻效率提高了 24.3%,并且岩心最低温度之间的温差为 7.75 °C,远小于传统注入方式的 24 °C。说明采用“底部注冷—气动循环”的冷源注入方案能够有效地提高岩心冷冻效率,并且大幅消除岩心冷冻过程中温度分布不均匀的问题。并可在 30 min 内将岩心温度

保持在 0 °C 以下,激发水合物自保护效应,抑制水合物分解。

参考文献 (References):

- [1] Li X S, Xu C G, Zhang Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review[J]. Applied Energy, 2016, 172: 286–322.
- [2] Boswell R, Collett T S. Current perspectives on gas hydrate resources[J]. Energy & environmental science, 2011, 4(4): 1206–1215.
- [3] Chong Z R, Yang S H B, Babu P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1633–1652.
- [4] 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.
- [5] 吴纪修, 李宽, 薛倩冰, 等. 羌塘盆地天然气水合物钻探试验并取样技术与施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(6): 6–10.
WU Jixiu, LI Kuan, XUE Qianbing, et al. Sampling technique in gas hydrate drilling test well in Qiangtang Basin and

- the construction practice[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015,42(6):6-10.
- [6] 赵尔信,蔡家品,贾美玲,等.海洋深水随钻天然气水合物取样钻探设备关键技术研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2013,40(S1):40-44.
- ZHAO Erxin, CHAI Jiapin, JIA Meilin, et al. Key Technology of offshore deep water gas hydrate sampling-while-drilling equipment[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013,40(S1):40-44.
- [7] 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.
- [8] Kvenvolden K A, Barnard L A, Cameron D H. Pressure core barrel-application to the study of gas hydrates, deep-sea drilling project site - 533, leg - 76[J]. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 1983,76(NOV):367-375.
- [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[J]. *Deep-Sea Research, Part I Oceanographic Research Papers*, 2008,55(11):1590-1599.
- [10] Kubo Y, Mizuguchi Y, Inagaki F, et al. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyū[J]. *Scientific Drilling*, 2014,17(17):37-43.
- [11] Schultheiss P J, Francis T J G, Holland M, et al. Pressure coring, logging and subsampling with the HYACINTH system[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2006,267(1):151-163.
- [12] Priest J A, Druce M, Roberts J, et al. PCATS Triaxial: A new geotechnical apparatus for characterizing pressure cores from the Nankai Trough, Japan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015,66:460-470.
- [13] Suzuki K, Schultheiss P, Nakatsuka Y, et al. Physical properties and sedimentological features of hydrate-bearing samples recovered from the first gas hydrate production test site on Daini-Atsumi Knoll around eastern Nankai Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015,66:346-357.
- [14] Yun T S, Fratta D, Santamarina J C. Hydrate-Bearing Sediments from the Krishna Godavari Basin: Physical Characterization, Pressure Core Testing, and Scaled Production Monitoring[J]. *Energy & Fuels*, 2010,24(11):5972-5983.
- [15] Kurihara M, Sato A, Funatsu K, et al. Analysis of 2007 and 2008 gas hydrate production tests on the Aurora/JOGMEC/NRCan Mallik 2L-38 well through numerical simulation[J]. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 2012,601:217-259.
- [16] Hauge L P, Birkedal K A, Ersland G, et al. Methane Production from Natural Gas Hydrates by CO₂ Replacement-Review of Lab Experiments and Field Trial[C]// *SPE Bergen One Day Seminar*. Society of Petroleum Engineers, 2014.
- [17] 孙友宏,刘大军,郭威,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术及冷冻方式[J].*哈尔滨工程大学学报*,2013(11):1460-1464.
- SUN Youhong, LIU Dajun, GUO Wei, et al. The research on a sampling technology for gas hydrates by borehole bottom freezing and its freezing method[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013(11):1460-1464.
- [18] 王元,郭威,孙友宏,等.液氮冷源外置式天然气水合物孔底冷冻绳索取样器的研制[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2013,40(6):1-3.
- WANG Yuan, DUO Wei, SUN Youhong, et al. The development of wire-line sampling drilling tool for gas hydrates by hole bottom freezing with development of wire-line sampling drilling tool for gas hydrates by hole bottom freezing with liquid Nitrogen as external cold source[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013,40(6):1-3.
- [19] 赵建国,孙友宏,王海亮.天然气水合物孔底冷冻取样器室内冷冻试验能量计算与分析[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2010,37(1):8-12.
- ZHAO Jianguo, SUN Youhong, WANG Hailiang. Energy calculation and analysis on laboratory freezing experiment of freezing sampler for gas hydrate[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010,37(1):8-12.
- [20] 郭威,孙友宏,陈晨,等.干冰升华式孔底冷冻取样器冷源保温方法的试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,36(9):5-6,10.
- GUO Wei, SUN Youhong, CHEN Chen, et al. Experimental study on cold source insulation method for gas hydrates with dry ice sublimation hole bottom freezing sampler[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009,36(9):5-6,10.
- [21] 郭威,孙友宏,张祖培,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2009,36(S1):147-151.
- GUO Wei, SUN Youhong, ZHANG Zupei, et al. The technology of sampling for gas hydrates by hole bottom freezing [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009,36(S1):147-151.
- [22] Sun Y, Wang Y, Guo W, et al. Hole-bottom freezing technique based on phase change heat transfer for gas-hydrates sampling: Efficiency optimization of refrigeration change of phase[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018,130:722-734.
- [23] Gudmundsson J S. Method and equipment for production of gas hydrates[J]. *Norwegian Patent*, 1990,172080:135.
- [24] Gudmundsson J S, Parlaktuna M, Khokhar A A. Storage of natural gas as frozen hydrate[J]. *SPE Production & Facilities*, 1994,9(1):69-73.