

基于热管强化传热的天然气水合物 孔底冷冻取样器优化研究

口宜航^{1,2,3}, 曲莉莉^{1,2,3}, 赵研^{1,2,3}, 冯壕辛^{1,2,3}, 孙思远^{1,2,3}, 贾瑞^{1,2,3*}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学深部探测与成像全国重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要:针对天然气水合物孔底冷冻取样器冷源利用率低的问题,本文提出基于热管强化传热的优化方案。搭建取样装置试验台,开展岩心冷冻室内试验,初步研究热管对储冷机构与冷冻机构间传热效果的优化作用。结合传热数值模拟,进一步分析热管在取样器中的作用,探讨在海洋水合物取心工况下,不同冷源初始温度和取心长度对冷冻机构冷冻效果的影响。结果表明,热管优化结构使岩心温度分布更均匀,冷源利用率提升31.59%,岩心冷冻速率提升42.21%。使用热管强化传热,增强了天然气水合物孔底冷冻取样器的冷冻效果,对推动孔底冷冻取样器的工程应用、打破国外对水合物取样技术的垄断具有积极的意义。

关键词:天然气水合物;孔底冷冻取样器;传热;热管;冷源利用率

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)06-0067-10

Optimization research on natural gas hydrate hole-bottom freezing sampler based on the heat pipe enhanced heat transfer

KOU Yihang^{1,2,3}, QU Lili^{1,2,3}, ZHAO Yan^{1,2,3}, FENG Haoxin^{1,2,3}, SUN Siyuan^{1,2,3}, JIA Rui^{1,2,3*}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Aiming at the key technical bottleneck of low cold source utilization rate in natural gas hydrate hole-bottom freezing sampler, an optimization scheme using heat pipes to enhance heat transfer was proposed. A sampling device test bench was built to conduct indoor experiments on gas hydrate core freezing, and study the effect of heat pipes optimized heat transfer between the cold storage mechanism and the freezing mechanism. Combined with the numerical simulation of heat transfer, the role of heat pipes in the sampler was further analyzed to explore the effects of different initial temperatures of cold sources and core lengths on the freezing effect of the freezing mechanism under the working condition of marine hydrate coring. The research results show that optimizing the structure with the heat pipe makes the temperature distribution of the core more uniform, increases the cold source utilization rate by 31.59%, and the core freezing rate by 42.21%. The use of heat pipes to strengthen heat transfer enhances the freezing effect of the natural gas hydrate hole-bottom freezing sampler, which is of positive significance for promoting the engineering application of the hole-bottom freezing sampler and breaking the monopoly of foreign countries on hydrate sampling technology.

Key words: natural gas hydrates; bottom-hole freezing sampler; heat transfer; heat pipes; cold source utilization rate

收稿日期:2025-05-21; 修回日期:2025-07-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.06.008

基金项目:国家重点研发计划课题“低扰动多功能井下电动取心技术与装备”(编号:2024YFC2814903)

第一作者:口宜航,男,汉族,2000年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为非常规能源钻采技术,吉林省长春市西民主大街938号,2509715654@qq.com。

通信作者:贾瑞,男,汉族,1985年生,系副主任,副教授,地质工程专业,博士,从事非常规能源钻采技术与教学工作,吉林省长春市西民主大街938号,jiarui@jlu.edu.cn。

引用格式:口宜航,曲莉莉,赵研,等.基于热管强化传热的天然气水合物孔底冷冻取样器优化研究[J].钻探工程,2025,52(6):67-76.

KOU Yihang, QU Lili, ZHAO Yan, et al. Optimization research on natural gas hydrate hole-bottom freezing sampler based on the heat pipe enhanced heat transfer[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 67-76.

0 引言

天然气水合物储量巨大、能量密度高,是一种极具潜力的新型清洁能源^[1-3]。多国开展了天然气水合物勘探与开发的研究^[4-6],钻探取心是勘探水合物地层的核心手段。由于水合物具有低温高压的赋存特性,需要用特殊方法来获取原位样品^[7-8]。

目前,国际上主要采用保压法进行天然气水合物原位取样^[9-10],即通过保压钻具保持水合物样品的原位压力,使其在常温下不分解^[11-13]。国外代表性保压取样工具包括美国的PCB和PCS,日本的PTCS和HYBRID PCS,欧盟的FPC和HRC^[14-16]。国内有中国地质调查局研制的TKP-1型保压取样器^[17]。然而,保压取样器存在密封要求高、受环境压力温度变化影响大、操作复杂、取样率低等问题^[18-19]。

吉林大学基于冷冻法研制了天然气水合物孔

底冷冻取样器^[20],将样品在孔底冷冻至水合物相平衡温度以下,使其在常压下不分解^[21]。但由于孔底冷冻取样器的结构限制,冷源只能通过热传导的方式对样品进行冷冻,存在导热系数低、冷冻速度慢、冷冻效率低的问题^[22-24]。为解决这一问题,本研究引入高导热系数的热管对孔底冷冻取样器进行传热优化,以达到提高样品冷冻速率的目的。

1 热管强化的孔底冷冻取样器冷冻机构设计

1.1 孔底冷冻取样器结构与原理

孔底冷冻取样器由3个主要部分组成:控制机构、储冷机构和冷冻机构。控制机构负责取心工具的定位、解卡、扭矩传递和储冷机构的启动;储冷机构控制冷源的存储和释放;冷冻机构负责岩心的采集和冷冻。其工作流程如图1所示。

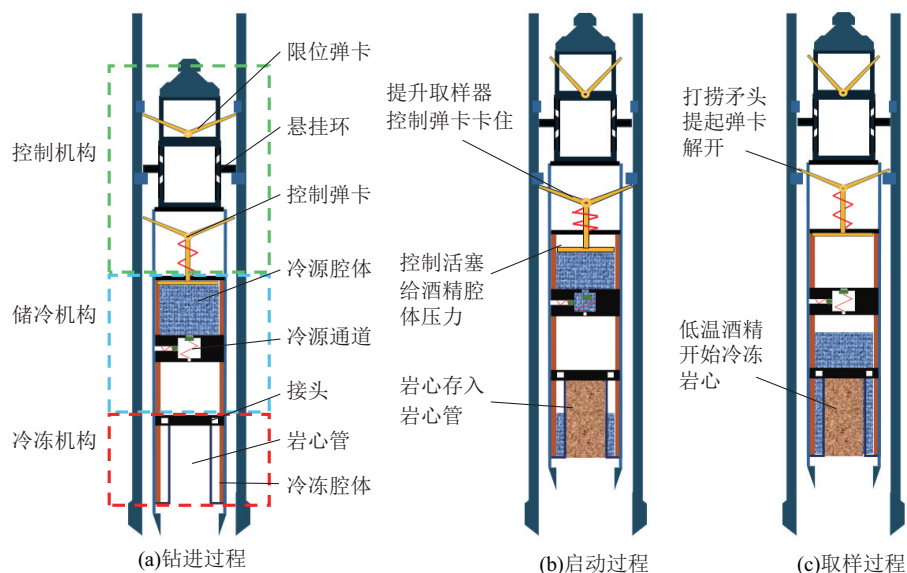


图1 孔底冷冻取样器工作流程

Fig.1 Working process of bottom-hole freezing sampler

(1)下放取样器,利用限位弹卡和悬挂环固定在钻杆上,岩心管随钻具同步钻进,冷源腔体外的保温材料可降低冷量损失。

(2)钻进结束样品进入岩心腔后,使用打捞器将取样器从孔底提起一定距离,此时控制弹卡被钻杆内壁限位装置卡住,连接的控制活塞向下推动,压缩冷源腔体,将其中的低温酒精推入环状冷冻腔体。

(3)冷冻腔体内的低温酒精对岩心管内的岩心进行冷冻,同时储冷腔体中的冷源为冷冻腔体补充

冷量,使岩心温度降至水合物相平衡温度之下,实现保真取样。

对岩心进行冷冻时,由于冷冻腔体较小、酒精静态导热慢,存在冷冻速度慢、效率低的问题。通过加强储冷机构与冷冻机构间的传热,提高冷源的利用率,增强对样品的冷冻效果,是目前要解决的问题。

1.2 热管强化传热的冷冻机构

热管是一种高效的传热元件,利用相变原理实

现热量快速传递,在多个领域被广泛应用。热管结构分为蒸发段和冷凝段(图2),内部有传热介质,蒸发段受热时,传热介质吸收热量汽化,蒸汽在压差作用下迅速流向另一端,在冷凝段端蒸汽遇冷放热凝结成液体,液体在吸液芯毛细力作用下回流至蒸发端,如此循环往复,将热量高效传递,其等效导热系数一般在 $2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ^[25-26],是一般金属传热材料的上百倍。

本研究选用 $\varnothing 8 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 低温热管(壳体铜质,传热介质为乙醇),导热系数为 $5 \times 10^3 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。根据冷冻取心工艺的需要,设定岩心样品最大冷冻速率为 $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 时^[23],冷冻机构需要每分钟向储冷机构传输 13.1 kJ 热量,所选热管的传热功率约为 40 W ,则需要在试验过程中安装6根热管。接头原始设计包含12个周向均匀分布的轴向孔,由于岩心腔体排气阀占用1个孔的空间,对接头孔位

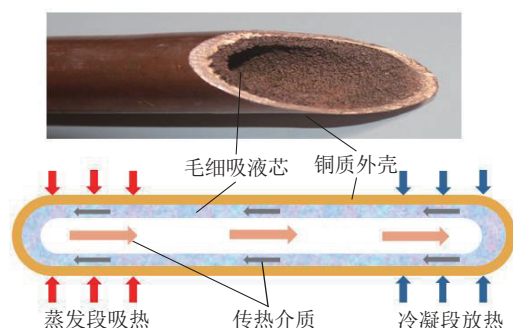


图2 热管工作原理

Fig.2 Working principle of the heat pipe

进行如下配置:6个孔位用于热管安装以实现传热强化,5个孔位作为低温介质流通通道(图3)。热管将冷源腔体中低温酒精的冷量快速传递给环状间隙中的酒精,提高储冷机构和冷冻机构间能量传输效率,增强孔底冷冻取样器对岩心的冷却效果。

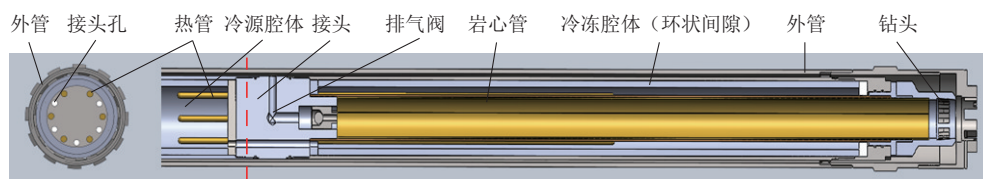


图3 冷冻机构模型

Fig.3 Freezing mechanism model

2 室内试验

2.1 试验装置与方案

建立取样装置试验台,由冷冻机构、储冷机构和温度测量系统3部分组成(见图4a)。其中:冷冻机构由冷冻腔体、接头和岩心管组成,能够对模拟样品进行冷冻;储冷机构中装有作为冷源的低温酒精;温度测量系统由贴片式温度传感器、微型温度传感器和无纸记录仪组成,用于实时测量和记录冷冻机构各部位的温度。温度传感器编号为1~15,其中1~6号测量岩心温度,7~14号测量冷冻试验装置温度,15号测量环境温度(图4b)。在冷冻机构的接头上安装热管,进行热管对冷冻速率优化效果的对照试验,热管的上段 540 mm 在储冷机构的冷源腔体中,下段有 435 mm 在冷冻机构的环状间隙中,中段有 25 mm 安装在接头中(图4c)。试验所使用的冷冻机构各部位的尺寸见表1。

试验方案为:

(1)安装试验台。将岩心放入岩心管,以三脚

架支撑冷冻机构实验装置并使其垂直于地面,安装温度测量系统,并在冷冻机构外包裹保温层。

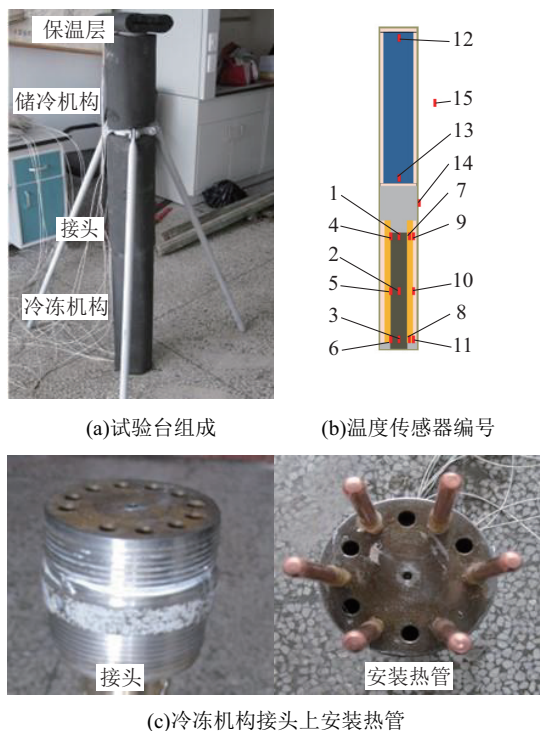
(2)无热管的原始组试验。岩心与冷冻机构各部件在试验开始前的温度保持与室温相同(约 15°C),将酒精冷冻至 -18°C 。实验启动,将酒精注入冷源腔体中,记录冷冻机构各部位温度随时间的变化。

(3)热管强化传热试验。在冷冻机构的接头部位安装热管,其余条件与原始组相同,进行试验并记录冷冻机构各部位温度随时间的变化。

2.2 试验结果与分析

采集温度数据,绘制第 1300 s 冷冻机构的温度云图(图5)。结果显示,与原始组相比,安装热管后岩心腔体内部整体温度更低,环状间隙的温度显著下降,表明热管可加速储冷机构冷量向冷冻机构环状间隙传输,降低酒精温度并导致岩心温度下降。

对比原始组和热管组岩心冷冻 1300 s 的温度变化曲线(图6)。第 1300 s 原始组岩心上、中、下部温



(c) 冷冻机构接头上安装热管

图4 取样装置试验台

Fig.4 Sampling device test bench

表1 冷冻机构各组成部分尺寸

Table 1 Dimensions of each component of the freezing mechanism

机 构	内径/mm	外径/mm	长度/mm
岩心		50	535
岩心管	50	60	535
保温层	108	118	1360
冷冻腔壁	95	108	560
接头		108	25
冷源腔壁	95	108	800
热管		8	1000

度分别为 -0.2 、 0 、 1.5 $^{\circ}\text{C}$,热管组对应温度为 -1.7 、 -1.1 、 0 $^{\circ}\text{C}$,其岩心平均温度比原始组低约 1.4 $^{\circ}\text{C}$ 。岩心管内壁及岩心中心温度均呈现自上而下逐渐升高的分布,表明冷量由上部向岩心下部逐渐传递。两组试验中岩心上、中、下部温度均呈逐渐下降趋势并趋于稳定,且热管组温度下降更快,稳定温度更低。

通过计算低温酒精在冷冻试验过程中体积平均温度的升高值,得出冷源释放的冷量;计算岩心体积平均温度的降低值,得出岩心吸收的冷量,并以此来计算冷源利用率。

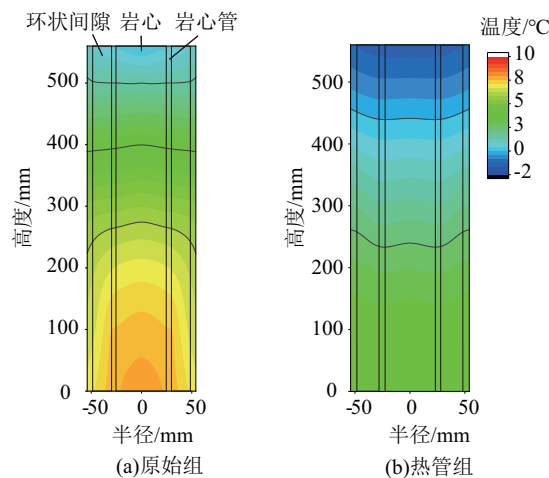
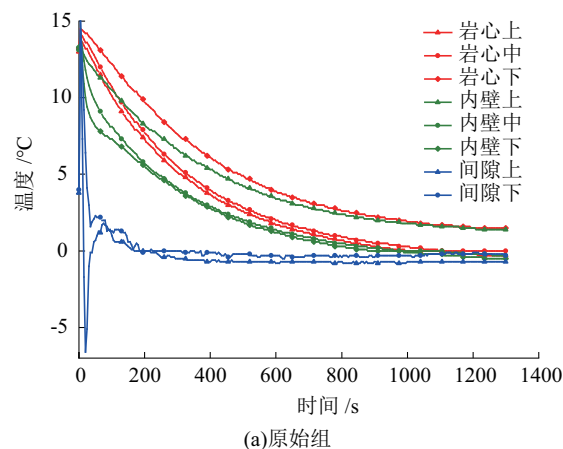
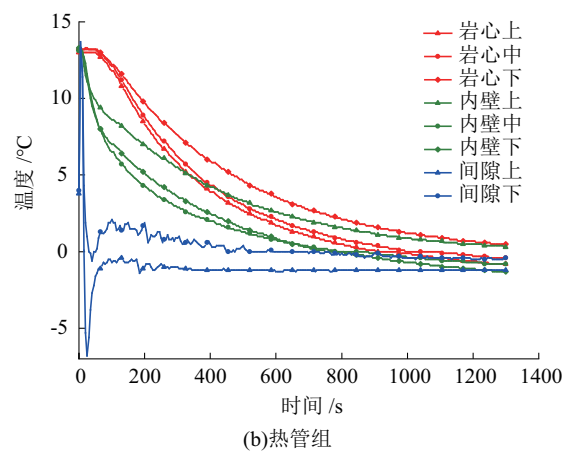


图5 冷冻机构第1300 s温度云图

Fig.5 Temperature cloud map of freezing mechanism at 1300s



(a) 原始组



(b) 热管组

图6 冷冻机构1300 s温度变化曲线

Fig.6 Temperature changes in freezing mechanism for 1300s

$$Q_{\max} = C_a m_a \Delta t_a \quad (1)$$

$$Q_{\text{in}} = C_b m_b \Delta t_b \quad (2)$$

$$\epsilon = Q_{in}/Q_{max} \quad (3)$$

式中: Q_{max} ——冷源释放的冷量,J; C_a ——酒精的平均比热容,J/kg·°C; m_a ——酒精的质量,kg; Δt_a ——酒精平均温度升幅,°C; Q_{in} ——岩心吸收的冷量,J; C_b ——岩心的平均比热容,J/kg·°C; m_b ——岩心的质量,kg; Δt_b ——岩心平均温度降幅,°C; ϵ ——冷源利用率。

计算得到冷源利用率原始组试验为12.31%,热管强化传热试验为15.26%。试验表明,热管能够使岩心得到更好的冷冻效果,提升冷源利用率。

3 数值模拟和分析

3.1 模型建立

基于试验结果,使用Comsol软件的传热和流体模块,对岩心室内冷冻试验开展瞬态仿真模拟,分析冷冻1300 s冷冻机构的温度变化情况。根据表1中冷冻机构的参数构建模型(图7)。模型中热管被简化为具有高热导率的固体,各部位材料参数见表2。其中,岩心的物理性能参考含水合物沉积物的实验室样品,其导热系数一般在0.3~5.1 W/(m·°C)^[27],本研究取3.77 W/(m·°C)^[28]。热管的密度是由构成热管的铜、介质等材料密度计算得到的体积平均密度,为了在简化后的模型中反映热管工作时的快速温度响应和相变缓冲效应,热管的比热设置为0.32 J/(kg·°C),而不是热管的真实比热。设定样品初始温度和环境温度为15 °C,冷源初始温度为-18 °C,冷冻机构与环境存在换热。

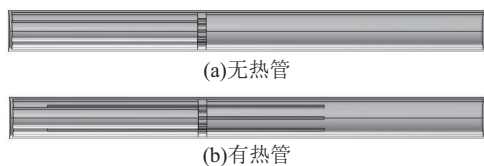


图7 冷冻机构模型(对比)

Fig.7 Freezing mechanism model (contrast)

3.2 模型验证

通过对数值模拟所得的第1300 s温度分布云图(图8)以及模拟与试验条件下冷冻机构中部温度变化曲线(图9)的对比分析,可以发现模拟结果与试验数据在温度分布趋势上具有一致性。在模拟过程中,无热管冷冻机构的冷源利用率为10.66%,经过热管强化传热后提升至14.33%。

表2 模型使用材料的物理性能

Table 2 The physical properties of the materials used in the model

机 构	材 料	密度/ (kg·m ⁻³)	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热/(J· kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
岩心	岩石	1560	3.77	1007
岩心管	铜	8930	401	390
冷源腔壁、冷冻 腔壁、接头	钢	7860	80	460
保温材料	硬质聚氨酯	55	0.027	1.6
冷源	无水乙醇	822	0.1772	2059
热管	热管	3700	5000	0.32
外管	合金钢	7920	35	380

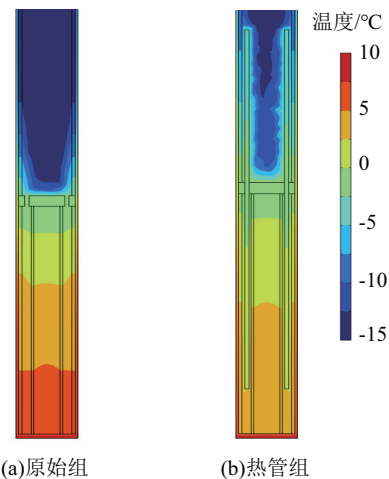


图8 数值模拟第1300 s冷冻机构的温度云图
Fig.8 Temperature cloud map of the freezing mechanism at 1300s

与试验结果相比较,试验中热管组与原始组岩心的平均温度分别降低了15.9 °C和14.6 °C,模拟结果中热管组与原始组岩心的温度分别降低了12.8、11.8 °C。试验测得原始组和热管组酒精温度分别升高了12.3、13.2 °C,模拟计算得到的结果分别为10.5、11.6 °C。在模拟过程中,由于对热管传热机理进行了必要的物理简化,所构建的模型与实际热管的相变工作机制存在一定差异,导致实验测量结果与模拟计算值之间存在偏差。模拟与试验结果之间的偏差在20%以内,且模拟与试验数据的分布趋势相似,该模型具有参考价值。

3.3 海洋水合物孔底冷冻取样数值模拟

3.3.1 参数设置

目前,主要对海洋天然气水合物进行钻探取

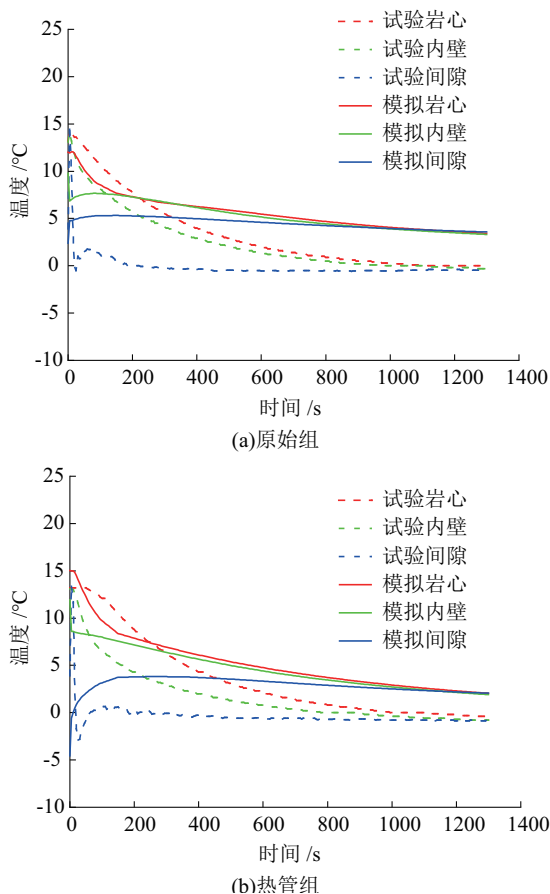


图9 试验与模拟冷冻机构温度变化曲线
Fig.9 Temperature changes in Experiment and simulation freezing mechanisms

样,因此,针对海洋水合物取样的工况开展取样器的数值模拟研究。模拟工况设置如下:取样深度为1500 m,取样器的提升速度为50 m/min,提升时间为30 min。海水深度为1350 m,海面温度为20℃,海底温度为2℃,水合物地层深度为150 m,地温梯度为2℃/100 m^[29-30]。在模拟中,环境温度变化采用插值函数进行计算。初始环境温度为5℃,在前3 min内温度线性下降至2℃,随后在27 min内线性上升至20℃。低温酒精的初始温度设置为-60℃,岩心和冷冻机构部件的初始温度设置为5℃。

根据海底水合物取样器的尺寸对模型进行更改,模型参数见表3,各部位使用材料参数参见表2。

3.3.2 模拟与分析

3.3.2.1 接头隔热优化

基于前期试验与模拟的结果,接头部位存在冷量散失问题,导致冷源利用率降低。为改善这一现

表3 冷冻机构各组成部分尺寸
Table 3 Dimensions of each component of freezing mechanism

机 构	内径/mm	外径/mm	长度/mm
岩心		50	535
岩心管	50	64	535
岩心保温层	82	100	535
冷冻腔壁	100	108	535
接头		108	25
冷源保温层	88	100	800
冷源腔壁	100	108	800
热管		8	800
外管	108	128	1390

象,对接头部位进行优化。在数值模型的接头部位引入0.2 mm的薄层结构,以模拟隔热涂层(如环氧隔热涂层)的作用,其导热系数为0.05 W/(m·℃)。在此基础上,建立涂层组(接头带隔热涂层)和对照组(接头无隔热涂层)两组对比模型进行模拟分析。

模拟得到第30 min的温度对比云图(图10),表明,对照组冷冻机构及岩心的温度分布沿轴向呈现阶梯状分布,其接头部位的温度最高,沿轴向由接头向下温度递减,30 min时轴向温度差异显著;涂层组在接头涂覆隔热涂层后,机构各部位温度梯度明显减小,轴向无显著温度落差。对比冷冻机构各部位30 min温度变化曲线(图11),涂层组冷冻机构上部、中部和下部的平均温度相较于对照组分别从10.8、2.2、-1.6℃降至-2.2、-4.3、-5.1℃。接头添加隔热涂层使冷源利用率从4.33%提升至8.98%,岩心的冷冻速率从0.24℃/min提高至0.48℃/min。

结果表明,接头采用隔热涂层优化可有效抑制冷量散失,显著提高冷冻机构的冷冻效果,提升冷源利用率和冷冻速率,有利于维持岩心的热环境稳定。

3.3.2.2 热管强化传热分析

基于接头隔热优化后的模型,开展30 min热管优化传热的模拟研究,得到第30 min冷冻机构的侧剖温度云图(图12a),可以看出,热管组冷冻机构各部位温度显著低于原始组。分析第30 min热管组冷冻机构中段的水平剖面温度云图(图12b),热管周围酒精的温度低于环状间隙中其他位置酒精的温度,且6根热管形成的低温区域完全覆盖了岩心

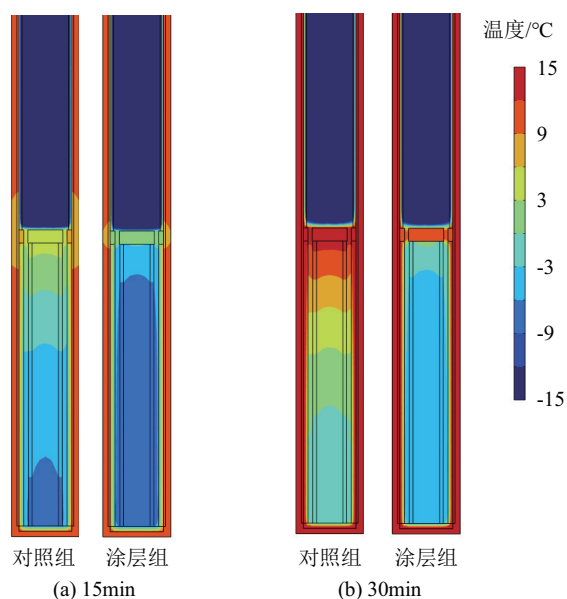


图10 接头隔热优化模拟温度云图

Fig.10 Temperature cloud map of freezing mechanism optimized by joint insulation

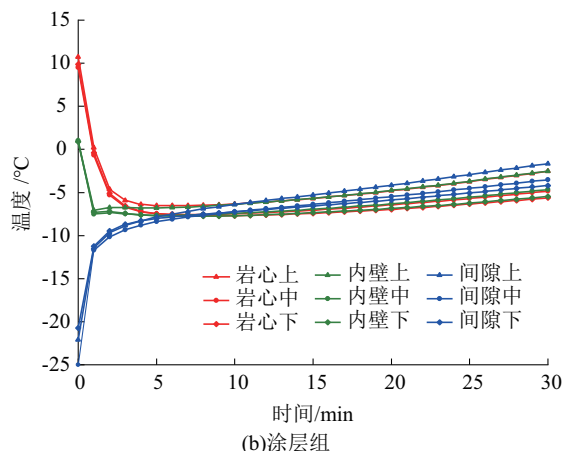
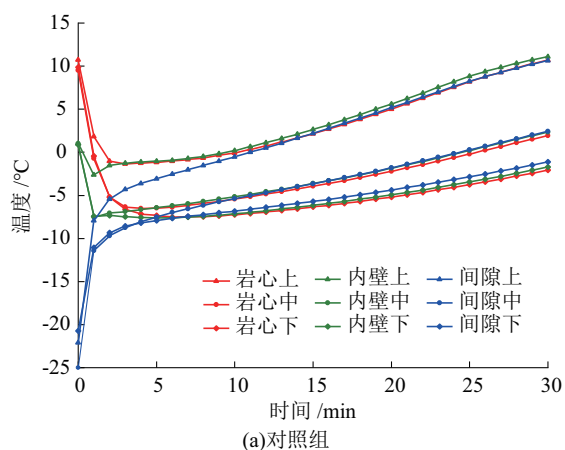


图11 接头隔热优化岩心温度变化曲线

Fig.11 Core temperature changes in freezing mechanism optimized by joint insulation

管。这表明6根热管的降温效果较为理想,能够有效降低岩心管周围的温度,从而提升冷冻机构的整体性能。

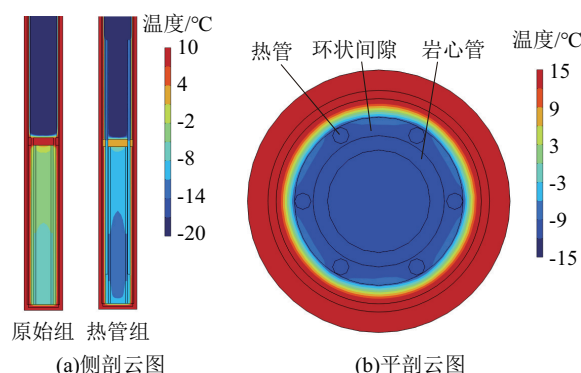


图12 热管优化模型温度云图

Fig.12 Temperature cloud map of the heat pipe optimization model

对比原始组和热管组30 min后岩心温度的变化情况(图13),热管组岩心温度明显低于原始组,且温度变化曲线更集中。原始组岩心中心上、中、下部温度分别冷冻至 -2.2 、 -4.3 、 -5.1 ℃;而热管组岩心对应位置分别冷冻至 -9.4 、 -11.0 、 -11.1 ℃。热管强化传热使岩心的平均温度下降了 6.2 ℃,冷源利用率提高了 31.59% ,岩心冷冻速率提升了 42.21% ,显著增强了孔底冷冻机构的冷冻效果。此外,热管组岩心温度的方差平均值为 0.27 ,而原始组为 0.69 ,表明热管使岩心温度轴向分布更均匀,取样效果更加理想。

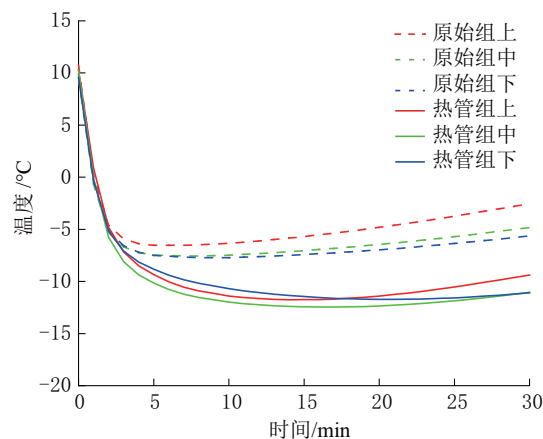


图13 热管优化模型岩心温度变化曲线

Fig.13 Core temperature changes of the heat pipe optimization model

3.3.2.3 冷源温度影响分析

为研究冷源温度对热管强化传热的影响,设置不同低温酒精初始温度进行模拟分析,分别为 -30 、 -60 、 -90 $^{\circ}\text{C}$,获得岩心温度变化曲线(图14)。30 min后,酒精初始温度为 -30 $^{\circ}\text{C}$ 时,岩心中心平均温度为 -1.6 $^{\circ}\text{C}$,温度曲线较为平稳;酒精初始温度为 -60 $^{\circ}\text{C}$ 时,岩心中心平均温度为 -10.5 $^{\circ}\text{C}$;酒精初始温度为 -90 $^{\circ}\text{C}$ 时,岩心中心平均温度为 -19.9 $^{\circ}\text{C}$,温度曲线略有上升趋势。

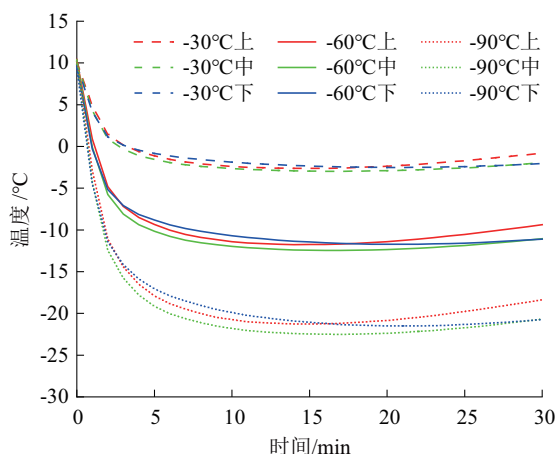


图14 不同温度冷源的岩心温度变化曲线

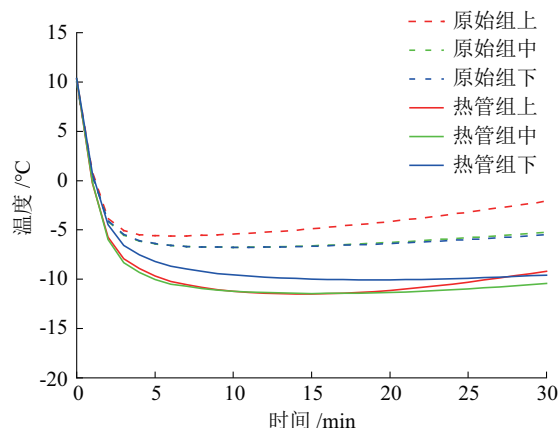
Fig.14 Core temperature changes in freezing mechanisms with different starting temperature cold sources

计算得到,酒精初始温度分别为 -30 、 -60 、 -90 $^{\circ}\text{C}$ 时,冷源利用率分别为11.52%、11.81%和12.08%,表明冷源利用率的差异受酒精初始温度的影响较小;岩心冷冻速率分别为0.39、0.69、1.01 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,表明冷源初始温度越低,冷冻机构对岩心的冷冻速率越高。

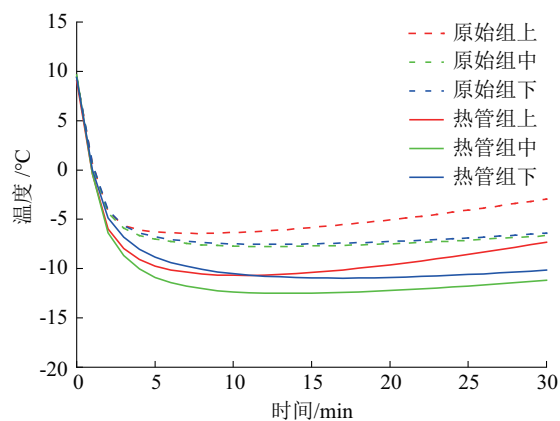
3.3.2.4 岩心长度影响分析

为研究热管在不同取心长度条件下的强化冷冻效果,开展取心长度分别为1、2 m的模拟研究,得到温度变化曲线(图15)。在采用热管的冷冻机构中,1、2 m岩心的平均温度相较于无热管的岩心分别下降了5.4、4.2 $^{\circ}\text{C}$,温度曲线的变化趋势相近。

计算得到,岩心长度1、2 m时,热管强化传热相较于无热管的冷冻机构,冷源利用率分别提升了42.63%和42.32%,冷冻速率分别提升了43.75%和28.09%。表明热管强化传热的冷冻机构在冷冻不同长度岩心时,都能够提升冷源利用率和冷冻速



(a) 1m岩心



(b) 2m岩心

图15 不同长度岩心的温度变化曲线

Fig.15 Core Temperature changes in freezing mechanisms with different core lengths

率;相较于1 m岩心,2 m岩心冷冻时冷源利用率提升率相近,但冷冻速率提升较低,这是由于热管导热效率相同,但冷冻2 m岩心需要的冷量更多。

4 结论

本研究以孔底快速冷冻取样装置为研究对象,通过引入热管技术强化储冷机构与冷冻机构之间的传热性能,采用室内试验与数值模拟的研究方法,得出以下结论:

(1)设计了快速冷冻机构的试验装置,分别对有热管和无热管的冷冻机构进行了室内试验,试验结果表明,使用热管强化传热能够提升冷冻机构的冷源利用率,增强对岩心的冷冻效果。通过试验与模拟结果的对比,证实了孔底冷冻取样器传热数值模拟模型的准确性与可靠性。

(2)进行海洋沉积物取样工况模拟,在接头部

位使用隔热涂层改善冷量散失问题,并使用热管技术强化冷冻机构的传热性能。结果表明,使用热管强化传热后,孔底冷冻取样器的冷源利用率提高了31.59%,岩心冷冻速率提升了42.21%。

(3)针对不同冷源初始温度及取样长度的孔底冷冻取样器开展模拟研究。结果表明,热管冷冻机构的岩心冷冻速率随冷源初始温度降低而提高;在不同长度岩心冷冻过程中,使用热管均能有效提升冷源利用率与冷冻速率,冷冻速率随着岩心长度的增加而降低。

(4)本研究主要开展了岩心冷冻机构的室内试验与数值模拟分析,未来将热管装配于孔底冷冻取样钻具整机,通过工程试验进行验证改进,为天然气水合物孔底冷冻取样器的应用提供支撑。

参考文献(References):

- [1] 庞维新,李清平,周守为.天然气水合物开发研究现状和发展战略分析[J].国际石油经济,2022,30(12):33-41.
PANG Weixin, LI Qingping, ZHOU Shouwei. Research and development strategy of natural gas hydrate development[J]. International Petroleum Economics, 2022, 30(12): 33-41.
- [2] 刘姝,李文杰,李莉佳,等.天然气水合物开采方法研究现状及展望[J].钻探工程,2024,51(5):12-23.
LIU Shu, LI Wenjie, LI Lijia, et al. Current status and prospects on natural gas hydrate exploitation methods[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 12-23.
- [3] 方圆,张万益,曹佳文,等.我国能源资源现状与发展趋势[J].矿产保护与利用,2018(4):34-42, 47.
FANG Yuan, ZHANG Wanyi, CAO Jiawen, et al. Analysis on the current situation and development trend of energy resources in China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4): 34-42, 47.
- [4] Lall D, Vishal V, Tulsawadekar K, et al. Effect of permeability reduction on the production of a gas hydrate reservoir during horizontal depressurization[J]. Energy & Fuels, 2024, 38(5): 3952-3960.
- [5] 李清平,周守为,赵佳飞,等.天然气水合物开采技术研究现状与展望[J].中国工程科学,2022,24(3):214-224.
LI Qingping, ZHOU Shouwei, ZHAO Jiafei, et al. Research status and prospects of natural gas hydrate exploitation technology[J]. Engineering Science, 2022, 24(3): 214-224.
- [6] 刘喜龙,齐赞,谢鹏飞,等.基于扩展有限元的天然气水合物储层多簇劈裂注浆数值模拟[J].钻探工程,2025,52(4):26-36.
LIU Xilong, QI Yun, XIE Pengfei, et al. Numerical simulation of split-grouting of gas hydrate reservoir based on extended finite element method[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 26-36.
- [7] Wang Y, Xu T F, Zhang P Y, et al. Experimental investigation of coolant selection and energy efficiency analysis during gas hydrate-bearing sediment freeze-sampling[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 120: 221-236.
- [8] 蒋国盛,王荣璟,黎忠文,等.天然气水合物的钻进过程控制和取样技术[J].探矿工程,2001(3):33-35.
JIANG Guosheng, WANG Rong, LI Zhongwen, et al. Drilling procedure control and sampling of gas hydrates[J]. Exploration Engineering, 2001(3): 33-35.
- [9] 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.
- [10] 江怀友,乔卫杰,钟太贤,等.世界天然气水合物资源勘探开发现状与展望[J].中外能源,2008,13(6):19-25.
JIANG Huaiyou, QIAO Weijie, ZHONG Taixian, et al. Status and forecast of world's natural gas hydrate exploration development[J]. Sino-global Energy, 2008, 13(6): 19-25.
- [11] 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.
- [12] 卢春华,张涛,徐俊,等.海域天然气水合物保压取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2023,50(6):18-26.
LU Chunhua, ZHANG Tao, XU Jun, et al. Development and experiment of pressure core sampler for Marine natural gas hydrates[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 18-26.
- [13] 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.
- [14] Pettigrew T L. Design and operation of a wireline pressure core sample (PCS)[R]. Galveston: Texas A&M University, 1992.
- [15] Masayuki K, Umezu S, Yasuda M. Pressure temperature core sampler (PTCS)[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2006, 71(1): 139-147.
- [16] Inada N, Yamamoto K. 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(Part 2): 323-345.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Sun Y H, Wang Y, Lü X S, et al. Hole-bottom freezing method for gas hydrate sampling[J]. Journal of Natural Gas Science

- and Engineering, 2015, 25: 271-283.
- [20] 王元, 孙友宏, 郭威, 等. 天然气水合物孔底冷冻取样方法及双弹卡绳索取样钻具研制[C]//第二届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 西宁: 中国地质学会, 2019: 278-286.
- WANG Yuan, SUN Youhong, GUO Wei, et al. Gas hydrate down hole freeze sampling method and wire-line sampling Tool with double latches[C]//Proceedings of the 20th National Conference on Exploration Engineering (Geotechnical Drilling and Excavation Engineering) Academic Exchange. Xining: Geological Society of China, 2019: 278-286.
- [21] 郭威, 孙友宏, Chistyakov V K, 等. 天然气水合物孔底冷冻取样方法的室内试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(5): 1-6.
- GUO Wei, SUN Youhong, Chistyakov V K, et al. Laboratory experimental study on sampling method for gas hydrates by hole bottom freezing[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(5): 1-6.
- [22] Hachikubo A, Takeya S, Chuvilin E, et al. Preservation phenomena of methane hydrate in pore spaces[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2011, 13(39): 17449-17452.
- [23] 陈光华. 冷源外置式天然气水合物孔底冷冻绳索取样器关键机构的设计及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- CHEN Guanghua. The design and the experimental study on the key mechanisms of the wire-line sampler for gas hydrate by hole bottom freezing with external cold source [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [24] 王元. 天然气水合物孔底冷冻数值模拟及绳索取样钻具的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WANG Yuan. Numerical simulation of hole-bottom freezing for gas hydrate sampling and study on wire-line sampler [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [25] 李雪强, 赵萧涵, 张钟垚, 等. 电机散热中毛细芯热管等效导热系数演变规律实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 847-853.
- LI Xueqiang, ZHAO Xiaohan, ZHANG Zhongyao, et al. Experimental study on effective thermal conductivity of wicked heat pipe applied in motor cooling [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 847-853.
- [26] Chen Z T, Yu Z J, Fu J, et al. Analysis and design of air-heat pipe composite cooling of high power density motor [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236(Part B): 121495.
- [27] 魏汝鹏. 含水合物沉积物导热特性测量与模型预测[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WEI Rupeng. Experimental study and prediction model of thermal conductivity of hydrate-bearing sediment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [28] 赵江鹏. 天然气水合物钻控泥浆制冷系统及孔底冷冻机构传热数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHAO Jiangpeng. Research on mud cooling system and simulation of down-hole freezing mechanism for gas hydrate core drilling [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [29] 张斌, 王富伟, 刘江涛. 浅层水合物钻井井筒温度场特征研究[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(3): 120-124.
- ZHANG Bin, WANG Fuwei, LIU Jiangtao. Study on temperature field characteristics of shallow hydrate drilling wellbore [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2024, 50(3): 120-124.
- [30] 任金锋, 陈雨核, 徐梦婕, 等. 南海北部琼东南盆地砂质天然气水合物储层沉积特征及成藏模式[J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 94-112.
- REN Jinfeng, CHEN Yuhe, XU Mengjie, et al. Sedimentary characteristics and accumulation model of sand-rich gas hydrate reservoir in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(2): 94-112.

(编辑 王跃伟)