



天然气水合物泥浆制冷传热效率优化实验的设计与实践

曲莉莉^{1,2}, 贾瑞^{1,2}, 王元^{1,2*}, 刘卫卫³, 赵帅^{1,2}

(1. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 长春 130026;
3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 冻土天然气水合物在钻探取心过程中极易因为温度升高而发生分解, 因此需采用泥浆制冷系统将钻井泥浆的温度控制在 0 °C 以下, 抑制水合物的分解。换热器是泥浆制冷系统的核心设备, 选择合适的换热器结构是获得低温泥浆的关键。该文通过室内实验研究 3 种换热器结构的换热效果, 以泥浆出口最低温度、进出口温差以及换热功率 3 个关键参数作为指标, 评价 3 种换热器的换热效果。结果显示螺旋折流板换热器能够获得最低的泥浆出口温度为 -2.1 °C, 进出口温差达到 4.1 °C, 具有良好的换热效果。最后针对换热器关键工艺参数及泥浆制冷系统关键设备的选型提出了指导性意见。

关键词: 天然气水合物; 泥浆制冷; 换热器; 室内实验

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230495

Design and Practice of Experimental Teaching Exploration Based on Mud Refrigeration for Gas Hydrate

QU Lili^{1,2}, JIA Rui^{1,2}, WANG Yuan^{1,2*}, LIU Weiwei³, ZHAO Shuai^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Land and Resources on Complicated Conditions Drilling Technology, Changchun 130026, China;
3. CCTEG Xi'an Research Institute (Group), Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: Natural gas hydrates are easily decomposed in the process of drilling cores because of an increase in temperature, so it is necessary to control the temperature of drilling mud in the mud refrigeration system below 0 °C to inhibit the decomposition of hydrate. Heat exchanger is the core equipment of the mud refrigeration system, and selecting a suitable heat exchanger structure is the key to obtain low temperature mud. The three key parameters of the minimum mud outlet temperature, temperature difference between the inlet and outlet and heat transfer power were taken as indicators to evaluate the effect of the three heat exchangers. The results showed that the minimum mud outlet temperature of spiral baffle heat exchanger could be -2.1 °C, and the inlet and outlet temperature difference reached 4.1 °C, which showed a satisfied heat transfer result. Finally, the key process parameters of heat exchanger and the selection of key equipment of mud refrigeration system were proposed.

Key words: gas hydrate; mud cooling; heat exchanger; laboratory experiment

天然气水合物是一种由水和天然气在低温高压下形成的笼型化合物, 作为公认的清洁能源被越来越多国家所关注^[1-3]。但是天然气水合物极易在钻探取样过程中因温度和压力发生变化而分解^[4-5]。钻取原位的水合物实物样品对其资源量进

行精确评估是实现水合物的勘探开发的前提。

钻探取样过程中, 水合物样品被从原始储层取出, 由于泥浆换热导致样品温度升高, 使冻土水合物发生分解^[6-8]。此外, 由于钻井过程中钻头与地层摩擦生热, 会使井壁周围的水合物发生分

收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(42102347); 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(201712)。

作者简介: 曲莉莉(1978-), 女, 硕士, 工程师, 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。

* 通信作者: 王元(1988-), 男, 博士, 副教授, 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。E-mail: 460731412@qq.com

解，最终导致井壁失稳，影响工程安全。为了避免钻井过程中由于钻井泥浆温度过高导致的岩心分解和井壁失稳问题，必须采用泥浆制冷技术确保泥浆在冻土水合物钻探过程中保持低温状态^[9-11]。因此，需采用天然气水合物泥浆制冷系统对冻土水合物钻探过程中的泥浆进行制冷。本论文旨在通过将天然气水合物泥浆制冷系统的原理引入本科生实验课程，锻炼学生的工程思维。

1 泥浆制冷实验

1.1 实验设备

天然气水合物泥浆制冷室内实验系统实物图如图 1 所示，结构图如图 2 所示，该实验系统主要实现以下两大功能：

- 1) 能够在钻井过程中将钻井泥浆快速冷却到要求的温度；
- 2) 能够在快速制冷钻井泥浆的基础上确保钻井泥浆的温度动态保持在要求的低温范围。

为了实现以上两个功能，设计室内实验系统

由载冷剂制冷子系统、泥浆制冷子系统和参数检测子系统 3 部分组成。实验过程中首先由载冷剂制冷子系统将载冷剂制冷到一定温度，将制冷后的载冷剂注入泥浆制冷子系统；然后在泥浆制冷子系统内通过低温载冷剂与常温泥浆进行换热，将常温泥浆的温度降低形成低温钻井泥浆；最后将低温泥浆注入钻孔内循环冷却钻头和孔内环境。泥浆在钻孔内循环回流到泥浆池内，然后由泥浆输送泵送至换热器内，经过冷却后返回泥浆池，最后经由泥浆泵送至钻孔内，通过低温泥浆减少与水合物的换热，抑制其分解^[12-17]。



图 1 钻井泥浆制冷系统实物图

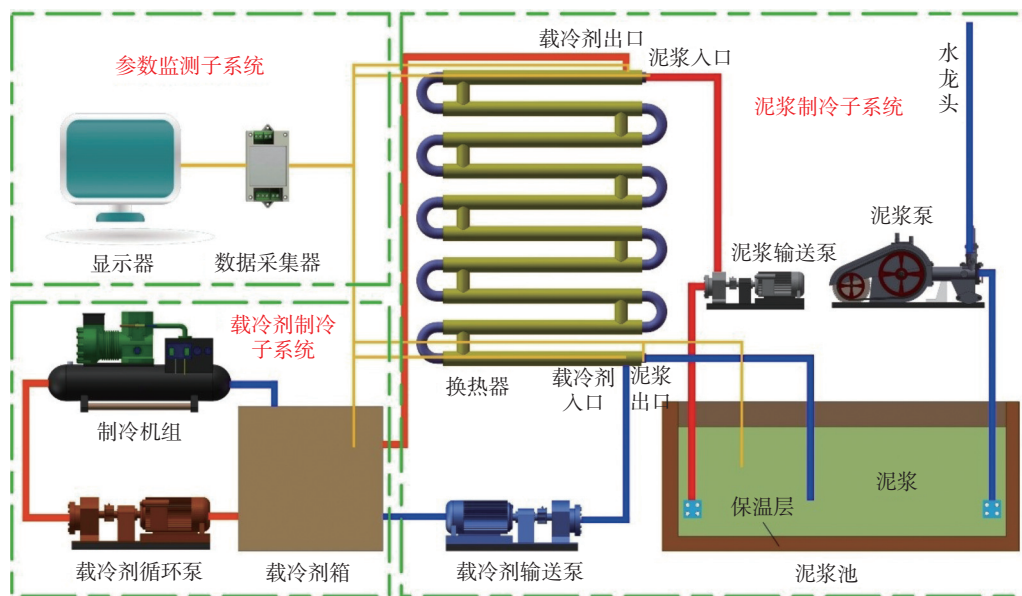


图 2 钻井泥浆制冷系统结构图

1.2 实验内容

泥浆制冷过程首先需要将作为载冷剂的乙二醇进行制冷，获得低温乙二醇与泥浆在换热器中换热，将泥浆制冷到要求的温度(0℃左右)。制冷过程中对系统内的各关键点的温度和流量进行监测，实时调整制冷机的功率、载冷剂和泥浆的流量以便获得最佳的换热效率。实验过程中引导

学生思考制冷机功率、载冷剂和泥浆流量及换热效率间内在联系，使学生更直观地了解泥浆制冷的原理。

1.2.1 载冷剂制冷

载冷剂制冷过程主要由制冷机组、载冷剂循环泵、载冷剂箱以及循环回路组成的载冷剂制冷子系统实现，其功能是将载冷剂箱中的乙

二醇水溶液维持在低温状态, 如图3所示。制冷机组采用的冷却介质一般为空气或水, 本实验装置为了模拟野外施工中实际情况, 根据泥浆制冷系统在祁连山高海拔缺水地区的施工经验, 选择空气作为制冷机组的冷却介质; 制冷机组通过氟利昂相变吸热效应降低载冷剂的温

度。采用乙二醇作为载冷剂存储在载冷剂箱中; 载冷剂循环泵将载冷剂箱内的乙二醇送入制冷机组内部对其进行制冷。载冷剂箱是载冷剂的容器, 在系统中吸收热量后的高温载冷剂与经过制冷的低温载冷剂在其内部混合, 最终获得低温载冷剂。

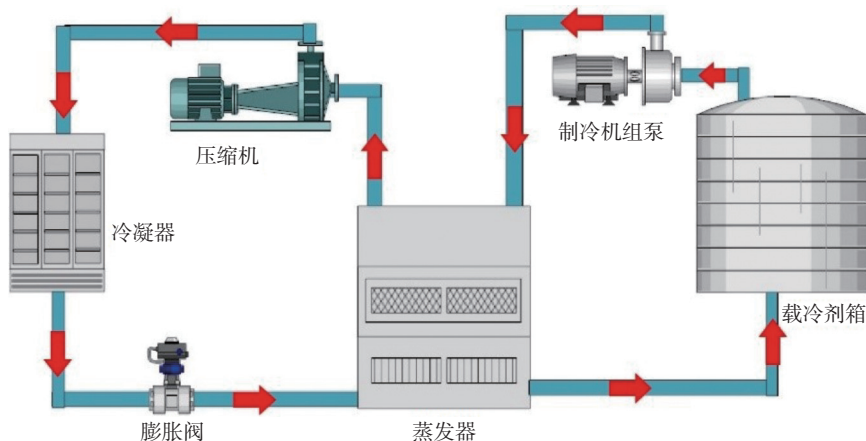


图3 载冷剂制冷子系统原理

1.2.2 泥浆制冷

泥浆制冷主要由载冷剂输送泵、换热器、泥浆泵和泥浆池组成的泥浆制冷子系统实现, 其功能使泥浆和低温乙二醇在换热器中换热, 获得低温泥浆, 如图4所示。泥浆制冷子系统的关键设备是换热器, 在换热器内部将低温载冷剂和泥浆进行对流换热, 降低泥浆温度。本实验系统设计了3种换热器结构, 分别为光滑同轴管换热器、螺旋管换热器及螺旋折流板换热器。载冷剂输送泵负责将载冷剂箱中的低温乙二醇输送到换热器内进行循环, 循环结束后的乙二醇溶液返回载冷剂箱内。泥浆泵将泥浆从泥浆池内泵送至泥浆制冷换热器, 常温泥浆在换热器内与低温乙二醇换热形成低温泥浆后返回泥浆池内。

1.2.3 参数监测

参数监测主要由温度监测部分和流量监测部分组成的参数监测子系统负责, 如图5所示。在实验过程中, 需要实时监测系统内各关键点的温度和流量变化, 并对相关参数进行调整。

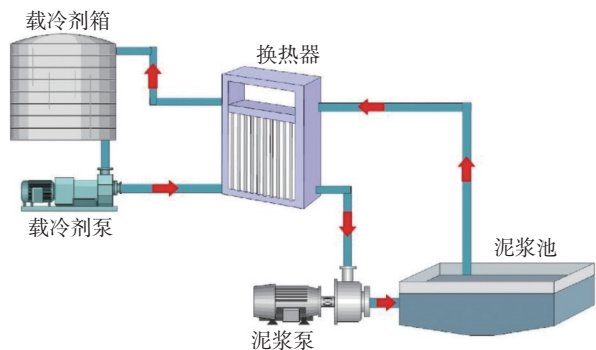


图4 泥浆制冷子系统原理

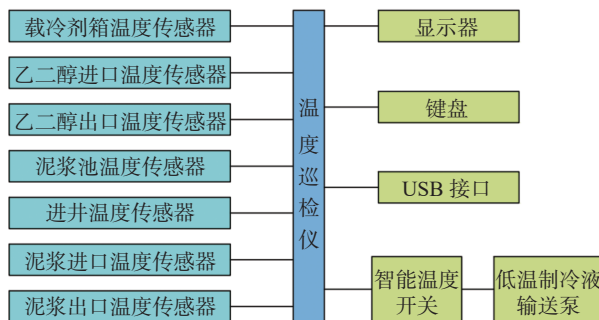


图5 泥浆制冷温度监测系统图

针对不同参数组合下实验系统关键换热组件的换热性能进行评价, 测量的温度和流量关键点为以下5点。

1) 制冷机组进出口温度

主要监测在对载冷剂制冷过程中, 乙二醇进出制冷机组的温度变化, 对制冷机组制冷乙二醇效率进行评估。

2) 换热器载冷剂进出口和钻井泥浆进出口温度

监测载冷剂和钻井泥浆在换热器内的温度变化,对二者在换热器内的对流换热效率进行评估。

3) 泥浆箱温度

泥浆箱的温度直接反映了经过换热器的钻井泥浆的温度是否满足钻探需求。

4) 载冷剂泵出口流量

载冷剂的流量直接影响其在换热器内的冷量输出,通过载冷剂的流量和温度变化能准确地计算出换热器的换热效率。

5) 泥浆泵出口流量

泥浆的流量大小对于载冷剂的制冷效果影响较大,需要在实验过程中不断调整泥浆泵的流量以确保获得最高的制冷效率。

在实验过程中各温度、流量传感器连接至无纸记录仪,实时记录所测数据。

1.3 实验步骤

1) 实验前准备工作

为获得实验系统中各关键点的温度及流量,首先要对实验系统中的温度传感器和流量传感器进行校正,保证监测数据的准确性;然后连接各装置间管路,连接外部电源,向制冷机组内注入制冷剂氟利昂,向载冷剂箱内注入 30% 乙二醇溶液,向泥浆箱内注入占箱体总体积 60% 钻井泥浆;最后对各部件和管路进行检漏,确保载冷剂或钻井泥浆不会泄露,对实验装置的各部分进行管路及电路连接,运行调试设备,检查实验装置各部件。

2) 制冷载冷剂

在进行制冷泥浆的操作之前,首先需要对载冷剂进行制冷。依次开启制冷机组、载冷剂循环泵,将乙二醇溶液自载冷剂箱抽出注入制冷机组,制冷乙二醇至 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 制冷泥浆

载冷剂制冷结束后,进行泥浆制冷过程。设定泥浆泵的流量,开启泥浆泵使泥浆在换热器内正常循环;然后开启载冷剂输送泵,并设定流量,将低温乙二醇注入换热器,对泥浆进行制冷。

实验过程中,可研究载冷剂和泥浆流量对换热效率的影响,或针对不同类型的换热器,研究换热器结构对于换热性能的影响。

4) 实验结束

实验结束后先关闭载冷剂泵,再依次关掉制冷机组、制冷机组泵、泥浆泵,最后切断总电

源,保证实验安全。

1.4 换热效率计算

天然气水合物泥浆制冷系统的核心部件是换热器,为了获得换热效率最高的换热器结构,分别针对以下 3 种换热器进行对比实验,实验中除换热器结构外,其他参数均保持不变。3 种换热器分别为:光滑同轴管换热器、螺旋管换热器和螺旋折流板换热器,其结构如图 6 所示,实物如图 7 所示。

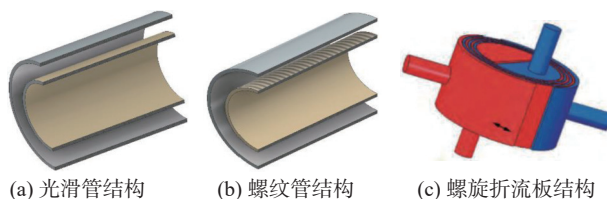


图 6 3 种换热器结构示意图



图 7 3 种换热器实物图

指导学生进行不同泵量下 3 种换热器的换热效率对比实验。采用不同的换热器,以泵量差值为恒定量,乙二醇溶液的泵量为变量,依次增大乙二醇的泵量。采用精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PT100A 级温度传感器,监测在不同泵量下泥浆的进出口温差的变化,并通过计算对比 3 种换热器在不同泵量下的换热效率。

通过实验过程中测量的参数,不同换热器的换热功率可由下式得到:

$$Q = c\rho G(t_1 - t_2) \quad (1)$$

式中: Q 为换热功率,单位 kW; c 为泥浆比热,单位 kJ/(kg·K); ρ 为泥浆密度,单位 kg/m³; t_1 为泥浆在换热器进口温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; t_2 为泥浆在换热器出口温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; G 为泥浆流量,单位 m³/h。

由式(1)计算得出的换热功率可分析影响换热器换热功率的主要因素,并对泥浆制冷系统的关键设备及参数的优选提出指导性建议。

2 结果与讨论

陆域天然气水合物钻探的泥浆制冷系统主要应用地理位置为藏北高原。藏北高原为高原亚寒带半干旱季风型气候区, 气候干燥、寒冷, 施工过程中泥浆制冷系统应用的环境温度约为 2~8 °C 之间。为了便于对比本实验, 选择系统工作的环境温度为 2 °C, 泥浆的密度为 1.04 g/cm³, 比热为 3.643 J/(g·K), 泥浆组成为聚乙烯醇(80 mL)+部分水解聚丙烯酰胺(25 mL)+乙二醇(100 mL)+钠羧甲基纤维素(30 mL)+氯化钠(400 mL), 泥浆的泵量分别为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 m³/h 共 5 个流量, 分别针对 5 个流量开展 3 种不同换热器的泥浆进口和出口温度、温差及换热功率进行监测和计算, 优选出最佳的换热器结构及参数。

2.1 不同换热器泥浆进出口温度

通过监测光滑同轴管换热器泥浆进出口温度可知当换热器内泥浆温度达到平衡时, 在不同的泵量下泥浆的出口温度均保持在-1 °C 以下, 均能够满足泥浆制冷的要求, 如图 8 所示。确保泥浆温度维持在零度以下, 泥浆不会与井壁冻土间发生换热造成井壁冻土坍塌, 形成井内事故。根据泥浆出口温度曲线可以看出, 泥浆出口的温度随着泵量的增加出现先降低再上升的趋势, 泥浆出口的最高温度为-1.08 °C, 此时的泵量为 3.5 m³/h。

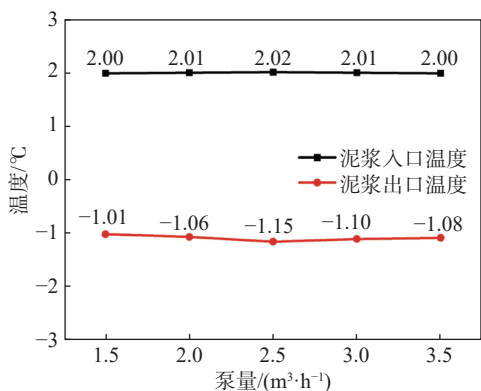


图 8 光滑同轴管换热器泥浆进出口温度变化曲线

对比图 8 和图 9 可以看出, 螺纹管换热器的泥浆出口温度要低于光滑同轴管换热器, 相对于光滑同轴管换热器最低温度降低了 0.41 °C。螺纹管换热器的泥浆出口温度呈现出相同的变化趋势, 但是总体上螺纹管换热器的泥浆出口温度低于光滑同轴管, 可见螺纹管换热器拥有更高的换

热效率。螺纹管换热器的泥浆出口最低温度为-1.56 °C, 泵量同样为 2.5 m³/h。

如图 10 所示, 螺旋折流板换热器的泥浆出口温度要远低于前两种换热器, 相对于光滑同轴管换热器最低温度降低了 0.95 °C, 相对于螺纹管换热器最低温度降低了 0.54 °C。最低泥浆出口温度达到了-2.1 °C, 此时的泵量为 2.5 m³/h, 接近同轴光滑管换热器最低温度的 2 倍, 可见相对于前两种换热器来说, 螺旋折流板换热器具有更高的换热效率。

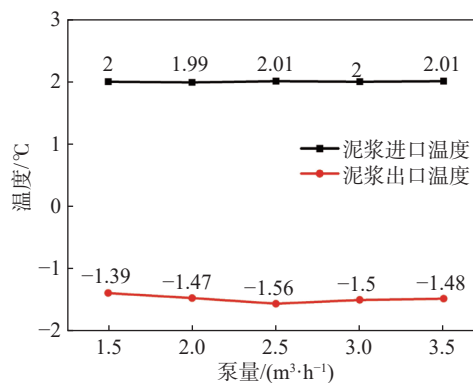


图 9 螺纹管换热器泥浆进出口温度变化曲线

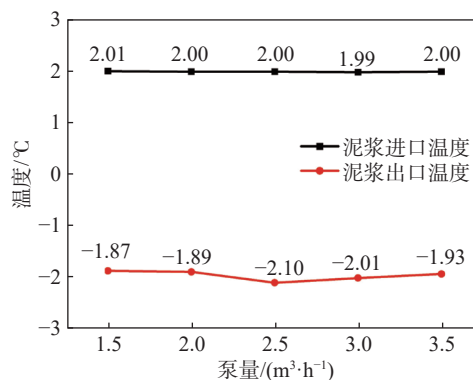


图 10 螺旋折流板换热器泥浆进出口温度变化曲线

由图 8~图 10 可知, 3 种换热器的泥浆出口温度达到最低时的泵量均为 2.5 m³/h, 说明当以泥浆出口温度为评价指标时, 2.5 m³/h 是 3 种换热器最优的泵量。当泵量低于 2.5 m³/h 时, 随着泵量的增加, 对流换热系数增大, 换热器的换热效率增加, 泥浆出口的温度逐渐下降, 并在泵量为 2.5 m³/h 时达到最低值。随着流量的进一步增大, 泥浆在换热器内的流速增大, 导致泥浆在换热器内部通过的速度过快, 停留时间减少, 热交换不充分; 高流速使泥浆的温度梯度减小, 热量传递

速率减慢；同时高流速会使泥浆主要在管道中间区域流动，与管壁接触不充分，热交换效率低。综合以上原因导致泵量大于 2.5 m³/h 时换热效率逐渐降低。因此针对所设计的 3 种换热器的结构参数，泵量为 2.5 m³/h 时获得的泥浆温度最低。

2.2 不同换热器泥浆进出口温差

通过泥浆进出口温度计算得出不同换热器的泥浆进出口温差，如图 11 所示，可见 3 种换热器的泥浆进出口温差总体上出现先升高后降低的变化趋势。由于实验设置了相同的进口温度，因此泥浆进出口的温差与泥浆出口温度也呈现相同的变化趋势。最大温差出现在流量为 2.5 m³/h 的螺旋折流板换热器，即为该换热器的泥浆出口最低温度时的实验条件，进一步证明了螺旋折流板换热器具有更高的换热效率。通过对比 3 种换热器的不同结构可以得出结论：在相同的实验条件下，换热器的换热面积是决定换热器泥浆出口最低温度和进出口最大温差的决定性因素，螺旋折流板换热器与其他两种换热器相比，在有限的空间内拥有更大的换热面积，因此对泥浆的制冷效率更高。

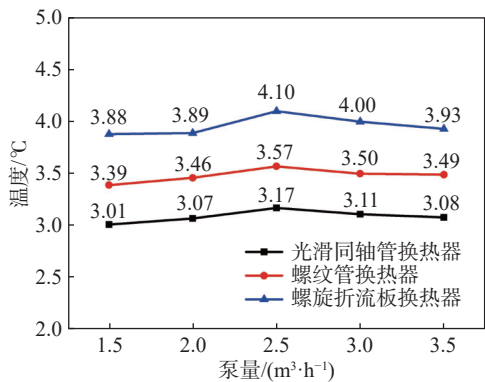


图 11 3 种换热器的泥浆进出口温差变化曲线

2.3 不同换热器换热功率计算

根据式(1)计算得出 3 种换热器在不同泵量下的换热功率，如图 12~图 14 所示。换热功率随着泵量的增大呈现单调上升趋势，说明泵量是影响换热功率的主要因素。当以换热功率为主要评价指标时，应尽量挑选大的泵量，但仍需根据现场的实际情况适当选择泵量。当泵量过大时对于泥浆制冷系统的制冷机组、载冷剂循环泵、泥浆泵及换热器本身都提出更高的要求，需要提高各关键设备的工作能力进而导致设备尺寸过大，增加

了施工的难度。当实际施工时应该综合考虑所需的泥浆最低温度及施工现场的实际情况，以换热功率最优原则选择合适的参数组合，进而选择泥浆制冷系统的设备型号。

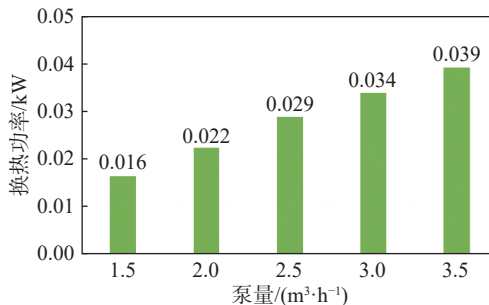


图 12 不同泵量下光滑同轴管换热器换热功率

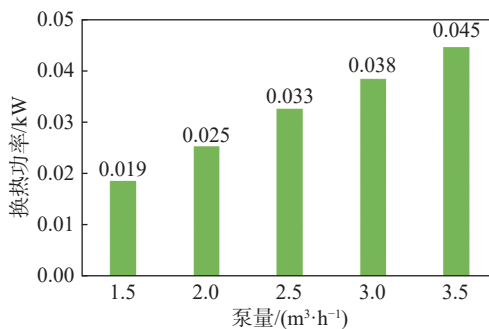


图 13 不同泵量下螺旋管换热器换热功率

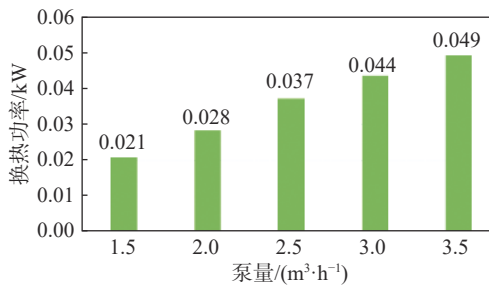


图 14 不同泵量下螺旋折流板换热器换热功率

3 结束语

本文介绍了采用低温钻井液进行天然气水合物钻井施工的基本原理，引导学生进行泥浆制冷系统的室内实验，熟悉实验步骤及数据的采集与分析方法，泥浆制冷过程中涉及的换热原理，使学生更为直观地认识钻探工艺中涉及的实际问题。通过室内实验验证了 3 种不同换热器的换热能力，分析了不同换热器在不同泵量下的泥浆最低温度，计算得到了泥浆进出口温差及换热功率的变化趋势，分析明确了影响泥浆制冷系统实际

应用的关键因素, 优选出了螺旋折流板换热器作为泥浆制冷系统的换热设备, 并提出了优选泥浆制冷系统其他设备及参数的基本原则。依据该实验系统, 学生在对实验基本原理和技术可行性进行验证的同时, 还可以结合强化传热的基本原理对泥浆制冷系统的换热器结构进行重新设计, 通过自己动手设计实验系统的关键装置, 进行相关分析、计算及系统联合调试, 实现对现有技术的改进和创新, 实现对解决复杂工程问题能力的培养和锻炼。实验操作与数据分析能够提高学生对于实际工程问题和其中所涉及的前沿科学问题的理解和学习能力, 改善了以往教学中过于偏重于理论、与实践结合不紧密等问题, 较大程度地提高了教学质量。

参考文献

- [1] LIU C L, MENG Q G, HE X L, et al. Characterization of natural gas hydrate recovered from Pearl River Mouth Basin in South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 61: 14–21.
- [2] HUANG L, SU Z, WU N Y. Evaluation on the gas production potential of different lithological hydrate accumulations in marine environment[J]. *Energy*, 2015, 91: 782–798.
- [3] ROSE K K, JOHNSON J E, TORRES M E, et al. Anomalous porosity preservation and preferential accumulation of gas hydrate in the Andaman accretionary wedge, NGHP-01 site 17A[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 99–116.
- [4] 李常茂, 耿瑞伦. 关于天然气水合物钻探的思考[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2000, 27(3): 5–8.
- [5] 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.
- [6] MEREY Ş. Drilling of gas hydrate reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 35: 1167–1179.
- [7] YAMAMOTO K. Overview and introduction: Pressure core-sampling and analyses in the 2012–2013 MH21 offshore test of gas production from methane hydrates in the eastern Nankai Trough[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 296–309.
- [8] 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: 323–345.
- [9] 刘卫卫, 孙友宏, 郭威, 等. 光管式与螺纹管式泥浆制冷换热器的对比分析研究[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2013, 40(2): 7–11.
- [10] 刘玉民, 赵大军, 郭威, 等. 水合物钻探低温泥浆制冷系统实验及理论[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2012, 42(S3): 301–308.
- [11] 赵帅, 孙友宏, 郭威, 等. 天然气水合物泥浆制冷换热器的分析[J]. *制冷学报*, 2017, 38(1): 80–87.
- [12] ROSE K, BOSWELL R, COLLETT T. Mount elbert gas hydrate stratigraphic test well, alaska north slope: Coring operations, core sedimentology, and lithostratigraphy[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 311–331.
- [13] HUNTER R B, DIGERT S A, BOSWELL R, et al. Alaska gas hydrate research and stratigraphic test preliminary results[EB/OL]. [2007-01-10]. <https://www.researchgatenet/publication/23874115>.
- [14] 杨林, 赵大军, 郭威, 等. 天然气水合物泥浆制冷系统的野外试验研究[J]. *探矿工程 (岩土钻掘工程)*, 2013, 40(12): 25–27.
- [15] 李宽, 张永勤, 孙友宏, 等. 天然气水合物钻井泥浆冷却系统研究及优化[J]. *钻采工艺*, 2013, 36(4): 34–36.
- [16] 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.
- [17] 刘卫卫. 螺纹管式泥浆制冷换热器研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

编辑 王燕