

天然气水合物泥浆制冷系统的野外试验研究

杨林, 赵大军, 郭威, 贾瑞, 刘卫卫, 韩凌宇

(吉林大学建设工程学院, 长春 吉林 130026)

摘要:天然气水合物钻探过程中, 泥浆制冷系统具有十分重要的作用。介绍了吉林大学研制的天然气水合物泥浆制冷系统的结构及工作原理。通过在西藏羌塘盆地、祁连山木里盆地和东北漠河盆地大兴安岭地区的野外应用试验, 表明该套系统应用范围广, 工作性能稳定可靠, 可用于高海拔、高纬度的冻土带等特殊地区的水合物钻探。

关键词:天然气水合物; 泥浆制冷; 冻土区; 高海拔; 高纬度

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2013)12-0025-03

Field Test Study on Gas Hydrate Mud Refrigeration System/YANG Lin, ZHAO Da-jun, GUO Wei, JIA Rui, LIU Wei-wei, HAN Ling-yu (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: Mud refrigeration system is very important in the drilling process of gas hydrate sampling. This article describes the structure and working principle of the gas hydrate mud refrigeration system developed by Jilin University. The field application tests were made in Qiangtang basin, Muli basin and Mohe basin, the test results show that the application scope of this refrigeration system is wide with stable and reliable performance, and can be used in gas hydrate drilling in high altitude and high latitude permafrost regions and some other special areas.

Key words: gas hydrate; mud refrigeration; permafrost region; high altitude; high latitude

1 概述

天然气水合物是在低温高压条件下由水和天然气形成的结晶物, 世界天然气水合物的储量为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 相当于全球已探明常规燃料总碳量的 2 倍, 被认为是未来能源的理想替代物。由于水合物特殊的赋存状态, 钻遇天然气水合物地层时必须严格控制钻井液温度。钻井液温度过高会引起水合物分解, 不仅无法获取水合物样品, 还有可能导致井喷及井塌事故。因此, 陆地天然气水合物钻探过程中, 必须要使用泥浆制冷系统冷却泥浆, 保证钻井泥浆温度始终保持在低温状态^[1-3]。

1998 年, 在加拿大马更些三角洲永冻层 Mallik 2L-38 天然气水合物钻井中, 泥浆制冷装置为平板式换热器, 将泥浆冷却至 $2 \text{ }^\circ\text{C}$; 2002 年, 主井 Mallik 5L-38 钻井中, 将泥浆冷却至 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$; 2003 年, 在美国阿拉斯加北坡的热冰 1 井中, 泥浆被冷却保持在 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$; 2007 年采用的是美国 DrillCool 公司研制的泥浆冷却装置, 泥浆被冷却至 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[4-7]。

吉林大学成功研制出天然气水合物泥浆制冷系统, 并成功应用于西藏羌塘盆地、祁连山木里盆地和东北漠河盆地的天然气水合物钻探工程, 满足天然气水合物钻探取样技术要求。本文将介绍该泥浆制

冷系统的野外试验及应用情况。

2 天然气水合物泥浆制冷系统的结构及工作原理

2.1 泥浆制冷系统结构

泥浆制冷系统主要由载冷剂制冷部分、泥浆制冷部分、温度监测部分组成。其中, 载冷剂制冷部分包括制冷机组和载冷剂箱, 泥浆制冷部分主要由光管式换热器构成。温度电子监测部分包括温度传感器、无纸记录仪和防冻装置, 分别测制冷机组进出口、换热器乙二醇溶液进出口、换热器泥浆进出口、泥浆池和进出井温度, 防冻装置温度传感器放置于换热器泥浆出口处, 防止泥浆冻结。主要技术参数如表 1。泥浆制冷系统的结构示意图如图 1。

表 1 泥浆制冷系统主要组件的参数

泥浆制冷系统组件	技术参数
制冷机组	42 kW
载冷剂箱	3
载冷剂乙二醇	浓度 47.8%, 冰点 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$
光管换热器	有效长度 40 m
防冻装置	温度设定 $1 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$
制冷机组泵	功率 4 kW, 流量 $16.4 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 30 m
载冷剂箱泵	功率 4 kW, 流量 $6.3 \text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 50 m
泥浆泵	流量 150 L/min

收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2013-10-12

基金项目: 中国地质调查局项目 (GZHL20110320, GZHL20110326)

作者简介: 杨林 (1987-), 男 (汉族), 广西桂林人, 吉林大学硕士研究生在读, 地质工程专业, 从事岩土钻凿工艺及机具的研究工作, 吉林省长春市西民主大街 938 号, yanglin12@mails.jlu.edu.cn。

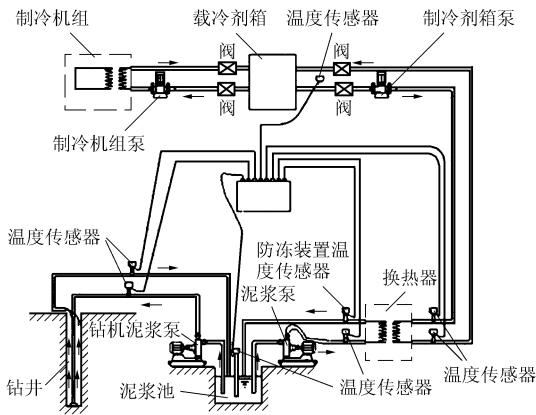


图1 泥浆制冷系统结构示意图



图3 祁连山木里盆地野外应用

施工期间,工作区白天最高气温可达 19.5℃,早晚温差为 10℃,年平均气温 -4℃,多冰雨雪雹,空气稀薄。稀薄的空气会导致制冷机组的压缩机和风扇功率衰减,降低泥浆制冷效率。

2009年,该套泥浆制冷系统成功应用于海拔 4000 多米的祁连山木里地区的 DK-2、DK-3 和 DK-4 孔中,并于 2010 年和 2011 年连续 3 年应用于该地区水合物钻探工程中,使用累计工作量 > 5000 m。DK-2 孔于 2009 年 6 月 19 日开始钻进,至 9 月 29 日 DK-4 孔终孔,共完成钻探工作量 794 m,钻机台月效率为 360 m。

在泥浆制冷系统运行期间,换热器载冷剂进口平均温度在 -4.96 ~ -0.75℃,载冷剂出口平均温度在 -0.23 ~ 4.75℃;换热器泥浆进口平均温度在 3.89 ~ 8.35℃,泥浆出口平均温度在 0.85 ~ 3.89℃,换热器泥浆进出口平均温差为 3.10℃。

在 DK-2 孔的 235 m 处和 DK-3 孔的 139 m 处均获取了天然气水合物样品,证明泥浆制冷系统在高海拔冻土带工作稳定、高效,满足天然气水合物钻探要求。

4 泥浆制冷系统在东北漠河盆地的野外应用情况 (见图 4)



图4 东北漠河盆地野外应用

2010 至 2011 年,该套泥浆制冷系统应用于漠

2.2 泥浆制冷系统工作原理

工作原理如图 2。

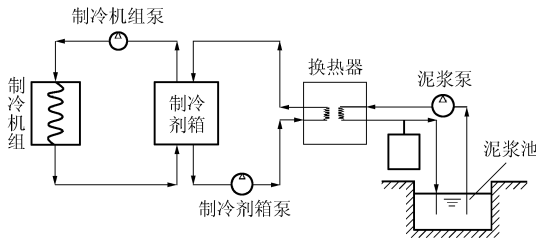


图2 制冷机组工作原理图

2.2.1 载冷剂制冷部分

首先开启制冷机组泵,在制冷机组与载冷剂箱的连接管路中循环乙二醇溶液,再开启制冷机组,设定制冷机组工作的温度范围,如 -5 ~ -7℃,当出制冷机组的乙二醇溶液温度低于 -7℃时,制冷机组停止工作,乙二醇溶液继续循环,当其温度升高至 -5℃时,制冷机组重新开启,对乙二醇溶液制冷。

2.2.2 泥浆制冷部分

当乙二醇溶液温度降至 -7℃时,开启载冷剂箱泵,使低温乙二醇溶液在换热器环状间隙中循环,之后开启泥浆泵,低温乙二醇溶液与内管泥浆逆向流动,对泥浆进行制冷,被制冷后的低温泥浆流回泥浆池,使泥浆池温度降低。

载冷剂箱是乙二醇溶液的载体,提供了一个被制冷机组冷却的低温乙二醇溶液和从换热器回流的高温乙二醇溶液进行热交换的场所,同时还是一个临时冷源,保护了制冷机组,避免机组频繁启动。

3 泥浆制冷系统在祁连山木里盆地的野外应用情况 (见图 3)^[8-9]

木里地区多年永久性冻土发育,是祁连山冻土区的核心,冻土层厚度 60 ~ 95 m,并常见厚层地下冰。

河盆地天然气水合物科学钻探 N53° 的大兴安岭漠河冻土带的 MK-1、MK-2 井孔。MK-1 井于 2010 年 8 月 16 日开始施工,耗时 2 个月完成 500 m 的设计工作量,钻机台月效率为 250 m。施工区年平均气温为 $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,早晚温差大。区域内沼泽遍布、环境潮湿、气候多变,给设备的运输带来了极大的不便^[10]。

与在祁连山木里盆地地区的泥浆制冷系统相比,应用于东北漠河盆地大兴安岭地区的制冷系统进行了一些改进。为了便于泥浆制冷系统在草甸地形的搬迁,增强野外工作的灵活性,制冷机组、载冷剂箱以及换热器底座都改为爬犁结构^[11]。

施工期间,早晚温差最大可达 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。白天日照强烈、气温高,夜间温度较低,制冷机组在一天内需多次调整控制温度已保持泥浆温度的动态稳定;且施工区气候多变,制冷机组往往需要在短时间内频繁启动,对机组的稳定性和可靠性提出了严峻的考验。

泥浆制冷系统运行期间,机组工作稳定。整个过程中,泥浆入井平均温度为 $3.13\text{ }^{\circ}\text{C}$,泥浆出井平均温度为 $4.28\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器载冷剂进口平均温度为 $-2.33\text{ }^{\circ}\text{C}$,载冷剂出口平均温度为 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器泥浆进口平均温度为 $3.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,泥浆出口平均温度为 $1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器泥浆进出口平均温差为 $1.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。满足天然气水合物钻探对泥浆温度的要求。

5 泥浆制冷系统在西藏羌塘地区的野外试验(见图 5)



图 5 机组野外布置图

2011~2013 年,该套系统用于西藏羌塘盆地天然气水合物科学钻探工程。西藏羌塘盆地 QK-4 井海拔达到 5042 m,这也是首次在海拔高于 5000 m 的地区使用泥浆制冷系统。QK-4 井于 2013 年 6 月 2 日开钻,7 月 19 日终孔,共完成 620 m 工作量,钻机台月效率为 388 m。

5.1 施工区域自然地理条件

QK-4 井位于西藏羌塘盆地北部,该地区冻土

发育较好,年平均气温低于 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$,自然环境恶劣,早晚温差大(最大可达 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$)、寒冷、低压、干燥、缺氧严重,全年大风日大于 250 d,对泥浆制冷系统的使用提出了极大的挑战。

5.2 野外试验情况

通过温度监测部分,监测各关键点温度,并使用无纸记录仪记录温度数据。野外试验温度变化曲线见图 6。

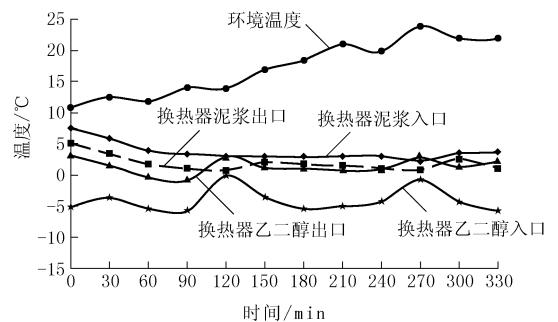


图 6 泥浆温度变化曲线

从图 6 可知,在泥浆制冷系统运行期间,换热器乙二醇溶液入口的平均温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,与制冷机组设定的控制温度 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相符合,证明了制冷机组在高海拔地区工作的可靠性。实验过程中环境温度基本保持在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最高可达 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,泥浆制冷之前,换热器泥浆入口温度为 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,出口也达到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但泥浆经过制冷后,温度下降明显,90 min 以后,低温乙二醇溶液与泥浆换热进入平衡阶段,换热器泥浆出口温度基本稳定在 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。120 min 时,泥浆温度降至 $0.95\text{ }^{\circ}\text{C}$,防冻装置启动,载冷剂箱泵关闭,低温乙二醇溶液停止循环,换热器乙二醇溶液进出口温度升高,泥浆温度上升;150 min 时换热器泥浆出口温度升至 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,防冻装置关闭,载冷剂箱泵开启,循环低温乙二醇溶液制冷泥浆,泥浆温度逐渐下降。270 min 时,换热器泥浆出口温度降至最低的 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,防冻装置再次启动,防止泥浆在换热器内管中冻结。经试验证明,防冻装置满足了设计要求,能有效的防止泥浆冻结。

泥浆制冷系统正常运行期间,泥浆池平均温度为 $5.55\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器载冷剂进口平均温度为 $-3.60\text{ }^{\circ}\text{C}$,载冷剂出口平均温度为 $2.09\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器泥浆进口平均温度为 $3.94\text{ }^{\circ}\text{C}$,泥浆出口平均温度为 $2.09\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热器泥浆进出口平均温差为 $1.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。泥浆温度满足天然气水合物钻探的要求,证明泥浆制冷系统在羌塘地区工作稳定、高效。系统工作满足天然气水合物钻探对泥浆温度的要求。(下转第 31 页)

膨胀,随后在膨胀状态下快速拧到铝合金钻杆杆体上,同时在铝合金杆体内部对铝合金进行冷却,使其温度不能超过其材料允许使用温度的上限^[6],防止因温升导致的铝合金强度降低,组装完成后,在外部对钢接头进行冷却,待冷却后螺纹连接处获得一定的预紧力,达到组装要求。

而随着温度的降低,铝合金屈服强度和抗拉强度有所增加,并且拉伸强度增加比较明显,塑性和韧性有所提高,疲劳特性得到改善^[9,10],根据铝合金低温下强度增加的特点,可采用冷组装方法来进行杆体和钢接头的组装,具体为:将铝合金钻杆杆体冷却,使其收缩,然后将钢接头快速拧入,目前此方法尚处于研究阶段,进行冷却介质及冷却参数的确定与优选,未进行大规模生产。

4 结论

(1)针对大直径铝合金钻杆杆体与钢接头的组装,对其过盈量进行理论计算,得出可以满足超深井钻探扭矩的钻杆,同时铝合金杆体和钢接头的变形都在弹性范围内,没有引起塑性变形。

(2)通过过盈量的计算,为后续钻杆的设计和组装工艺的研究提供参数,针对 $\varnothing 147\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ 的内加厚铝合金钻杆,可以采用 $0.712 \sim 1.009\text{ mm}$ 之间的过盈量进行测试,结合热组装的温度,选择合适的过盈量。

(上接第27页)

6 结语

(1)通过总结泥浆制冷系统在祁连山木里盆地、东北漠河盆地应用的成功经验,研制出一套更完善的天然气水合物钻探泥浆制冷系统,并应用于西藏羌塘盆地;

(2)通过在西藏羌塘盆地、祁连山木里盆地和东北漠河盆地的应用试验,证明了该套泥浆制冷系统应用范围广,能在高海拔、高纬度恶劣环境下正常工作,达到了设计要求,满足天然气水合物钻探要求。

参考文献:

- [1] 刘广志. 天然气水合物——未来新能源及其勘探开发难度[J]. 自然杂志, 2005, 27(5): 258-263.
- [2] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 1-8.
- [3] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M].

(3)由于采用简化的模型进行计算,没有考虑螺纹的过盈和轴向内支撑端面的过盈,还需在此过盈量上进行多次试验,才能得出最优的过盈量。

(4)对铝合金杆体和钢接头的组装方法,热组装和冷组装进行了简单的介绍,过盈量的选择应和采用的组装工艺相配合,以达到最优的连接效果。

参考文献:

- [1] 刘静安. 铝合金钻探管的特点及其应用与发展[J]. 有色金属加工, 2011, 40(6): 7-10.
- [2] 鄢泰宁, 薛维, 卢春华. 铝合金钻杆的优越性及其在地探深孔中的应用前景[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(2): 27-29.
- [3] 梁健, 彭莉, 孙建华, 等. 地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 304-308.
- [4] 孙建华, 梁健, 张永勤, 等. 地质钻探高强度铝合金钻杆研制及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(7): 5-8.
- [5] C. Santus, L. Bertini, M. Beghini, et al. Baryshnikov. Torsional Strength Comparison Between Two Assembling Techniques for Aluminum Drill Pipe to Steel Tool Joint Connection [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86: 177-186.
- [6] ISO 15546-2011, Petroleum and Natural Gas Industries—Aluminum Alloy Drill Pipe[S].
- [7] 成大先, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 化工工业出版社, 2002.
- [8] GB/T 15755-1995, 圆锥过盈配合的计算和选用[S].
- [9] 陈鼎, 陈振华. 铝合金在低温下的力学性能[J]. 宇航材料工艺, 2000, (4): 1-7.
- [10] 任彦, 孙金菊. 铝合金的低温机械性能评估[J]. 低温工程, 2009, (2): 56-60.

湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2002. 66-67.

- [4] 赵江鹏, 孙友宏, 郭威. 钻井泥浆冷却技术发展现状与新型泥浆冷却系统的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(9): 1-5.
- [5] 陈大勇, 陈晨, 冯雪威. 漠河盆地天然气水合物钻探施工中的泥浆冷却系统及其应用[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 705-709.
- [6] Ali G. Kadaster, Keith K. Millheim, Tommy W. Thompson. The Planning and Drilling of Hot Ice#1 - Gas Hydrate Exploration Well in the Alaskan Arctic [A]. IADC/SPE Drilling Conference [C]. Amsterdam, Netherlands, 2005.
- [7] Robert B. Hunter, Scott A. Digert, Ray Boswel, et al. Alaska Gas Hydrate Research and Stratigraphic Test Preliminary Results [R]. 2008.
- [8] 李国圣, 孙友宏, 郭威. 天然气水合物钻井泥浆冷却系统的设计及现场应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(2): 8-11.
- [9] 赵江鹏. 天然气水合物钻探泥浆制冷系统及孔底冷冻机构传热数值模拟[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2011.
- [10] 于磊, 赵大军, 孙友宏, 等. 漠河冻土地区天然气水合物钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 13-16.
- [11] 张强. 漠河盆地 MK-1 与 MK-2 井天然气水合物钻探施工关键技术[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2012.