

# 冻土区天然气水合物钻井泥浆冷却系统设计及关键参数计算

李 宽, 张永勤, 王汉宝, 梁 健, 李鑫森, 吴纪修, 李小洋

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘 要:** 泥浆冷却技术是天然气水合物钻探的关键技术之一, 低温泥浆可以抑制天然气水合物在钻进和提钻过程中分解, 有利于钻获水合物实物样品。新型天然气水合物钻井泥浆冷却系统主要包括载冷剂制冷器、翅片管式换热器、温度监测与记录和防冻装置 4 部分。制冷机组采用变频启动, 减小了野外施工中配套发电机的功率, 大幅度降低油料消耗; 翅片管式换热器中泥浆与载冷剂对流换热, 换热面积大, 换热效率高; 温度监测与记录装置对 4 个关键节点的温度进行监测和记录, 同时防冻装置可防止泥浆在换热器中结冰堵塞, 影响正常使用。运用传热学和流体力学理论对泥浆与载冷剂对流换热过程进行计算, 在满足制冷要求的前提下, 换热器换热面积是  $10.58 \text{ m}^2$ , 管路压力损失为  $0.34 \text{ MPa}$ 。

**关键词:** 天然气水合物; 钻探; 取心; 低温泥浆; 泥浆冷却; 换热面积; 压力损失

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2014)07-0045-04

**Design of Cooling System for Gas Hydrate Drilling Mud in Frozen Soil Region and the Calculation of Important Factors/LI Kuan, ZHANG Yong-qin, WANG Han-bao, LIANG Jian, LI Xin-miao, WU Ji-xiu, LI Xiao-yang** (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Mud cooling technology is one of the key technologies in gas hydrate drilling, the low-temperature mud will restrain the decomposition of gas hydrate in the process of drilling and drill lifting, which is favorable for discovering hydrate samples. The new gas hydrate mud cooling system consists of the ethylene glycol cooler, finned tube heat exchanger, temperature monitoring & recording and anti-frost device. Frequency conversion starting mode is used for the cooler, which can reduce the generator power and the cost of fuel consumption is significantly cut down. Convection heat transfer mode is applied for mud and ethylene glycol in the finned heat exchanger with large heat-exchange area and high efficiency. The temperature of these 4 key parts can be monitored and recorded by the temperature monitoring and recording device and the mud freezing and icing clogging in the heat exchanger can be prevented by the antifreeze device. By using the heat transfer theory and fluid mechanics, the theoretical calculation for heat convection process of mud and coolant is made, the results show that with heat-exchange area of  $10.58 \text{ m}^2$  and pipe pressure loss of  $0.34 \text{ MPa}$ , the cooling requirements can be satisfied.

**Key words:** gas hydrate; drilling; coring drilling; low-temperature mud; mud cooling; heat-exchange area; pressure loss

## 0 前言

天然气水合物是碳氢分子和水分子在低温、中高压条件下形成的笼状结构结晶化合物<sup>[1~3]</sup>, 具有埋藏浅、能量密度大、分布范围广、储量巨大等突出优点<sup>[4~6]</sup>。钻探取心是鉴别天然水合物、探明水合物储量最直接、最准确的手段, 为今后大规模开采提供依据<sup>[7]</sup>。

在冻土区天然气水合物钻探取心过程中, 钻头克取岩石、钻杆与孔壁之间的摩擦、地表热辐射、泥浆泵摩擦等都会产生热量, 泥浆温度在循环过程中不断升高, 破坏了天然气水合物赋存的温压条件而

分解, 而低温泥浆可以将岩心在钻进和提钻过程中保持在低温状态 ( $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 而不发生分解, 提高了钻探取样的保真度, 有利于钻获水合物实物样品<sup>[8]</sup>。所以, 泥浆冷却技术是天然气水合物钻探的关键技术之一。

## 1 泥浆冷却技术研究现状

国外泥浆冷却技术主要应用于地热勘探与石油勘探领域, 专门用于冻土区天然气水合物钻探的泥浆冷却装置主要集中在加拿大和美国开展的水合物研究专项中。在加拿大马更些地区 Mallik2L-38 井

收稿日期: 2013-12-25

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目“天然气水合物勘查与试采专项”(GZHL20110321)

作者简介: 李宽(1987-), 男(汉族), 山东兖州人, 中国地质科学院勘探技术研究所助理工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事天然气水合物钻采技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, likuan0611@163.com。

施工中,泥浆冷却装置采用的是板式换热器,可以将泥浆温度冷却至 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;在美国阿拉斯加北坡天然气水合物钻探施工中,泥浆冷却装置采用的是螺旋式换热器,泥浆温度动态稳定在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,满足低温要求<sup>[9,10]</sup>。

国内研究方面,在中国地质调查局项目中,2008~2012年在青海木里盆地、西藏羌塘盆地和黑龙江漠河盆地共进行了13口天然气水合物科学钻探井施工,采用的是吉林大学研制的泥浆冷却系统,载冷剂与钻井泥浆在同轴套管式换热器中全程逆流换热,进出口温差达 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可将泥浆动态稳定在 $0\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温范围内,在我国冻土区发现天然气水合物的过程中发挥了应有的作用<sup>[11]</sup>。

## 2 系统组成与工作原理

在调研国内外泥浆冷却技术的基础上,针对以往泥浆冷却装置在天然气水合物科学钻探中应用存在的问题,设计了新型的、专用于冻土区水合物钻探取样施工的泥浆冷却系统,已应用于2013年在青海木里盆地开展的水合物资源调查评价钻探工程中。

### 2.1 系统组成

新型天然气水合物钻井泥浆冷却系统主要包括载冷剂制冷、泥浆换热器、温度监测与记录和泥浆防冻4个部分。

#### 2.1.1 载冷剂制冷部分

载冷剂制冷部分包括制冷机组和载冷剂循环泵。制冷机组选择30%的乙二醇水溶液(冰点约为 $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ )为载冷剂,机组最低制冷温度为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、制冷功率为 $40\text{ kW}$ ,载冷剂循环泵流量是 $25\text{ m}^3/\text{h}$ 。

制冷机组采用变频启动,机组工作的峰值电流为 $58\text{ A}$ ,加上配套的载冷剂循环泵、泥浆泵等,考虑高原动力衰减,在野外施工中配套的柴油发电机组的功率为 $50\text{ kW}$ 即可满足制冷系统动力要求。与以往制冷机组启动电流 $270\sim 300\text{ A}$ 、配备 $150\text{ kW}$ 发电机组相比,可大幅度降低燃油消耗,从根本上提高了制冷系统的能量利用率,降低了施工成本。

#### 2.1.2 泥浆换热器

换热器是制冷系统的核心部件,选用的换热元件为全铝翅片管。翅片管外侧流动的是低温乙二醇,翅片管基管中流动的是常温泥浆,泥浆与乙二醇通过对流换热实现热量传递,将泥浆温度控制在所期望的低温范围内。

翅片管式换热器主要有以下优点:(1)全铝翅片管质量轻,降低了设备的总质量,易于野外搬迁;

(2)相比于光管换热器,翅片管可大大提高换热面积,增加换热量;(3)全铝翅片管中不会因为泥浆的腐蚀降低传热效率。

#### 2.1.3 温度监测与记录部分

温度监测与记录部分是对泥浆冷却系统和泥浆循环过程的4个关键节点的温度进行监测和记录,包括泥浆进换热器温度、泥浆出换热器温度、泥浆池温度和泥浆出井温度。钻探过程中可根据4个节点的温度调节冷却系统相应的技术参数,达到最佳的动态平衡状态。

#### 2.1.4 泥浆防冻监控部分

在正常钻进过程中,泥浆在钻孔内循环所产生的热量与泥浆制冷系统强制冷却泥浆的热量会形成动态平衡。在过去钻探施工过程中,遇到诸如取心时间过长、提大钻等特殊情况下,泥浆在钻孔内不循环,但是泥浆与换热器中的载冷剂持续进行热交换,换热器中心通道中的泥浆温度过低出现在翅片管内结冰堵塞的情况,影响冷却系统正常使用。

新型泥浆冷却系统在泥浆出换热器处增加温度报警触点,可根据需要设置温度报警上下限为 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,根据现场使用情况而定。当泥浆温度降低至报警下限时,温度报警器报警,同时PLC控制器根据采集的温度信号关闭载冷剂循环泵。载冷剂在换热器内停止循环,泥浆与载冷剂之间没有形成对流换热,换热效率大大降低,泥浆温度下降缓慢,从而避免了泥浆在通道内结冰堵塞的现象。当泥浆温度升高至报警上限时,载冷剂循环泵重新开始工作,泥浆与载冷剂对流换热,如此,将泥浆温度控制在低温范围内,且不影响正常工作。

## 2.2 工作原理

新型泥浆冷却系统的工作原理如图1所示。首先,制冷机组可将载冷剂(30%乙二醇水溶液)制冷至设定的低温状态,通过载冷剂循环泵连续循环,换热器箱体内载冷剂动态稳定在低温范围内。同时,泥浆循环泵将泥浆池内的泥浆输送至换热器翅片管的中心通道中,泥浆与载冷剂在换热器内通过对流换热实现热交换,将泥浆冷却,实现泥浆的动态制冷,冷却后的低温泥浆重新回到泥浆池内,从而能够在钻进过程中泥浆进井温度始终保持在低温状态。

在钻进过程中,可根据监测的4个节点的温度对冷却系统的技术参数进行调整,同时,泥浆防冻监控根据设定的温度上下限控制泥浆与载冷剂换热的启停,保证泥浆冷却系统的正常运行。

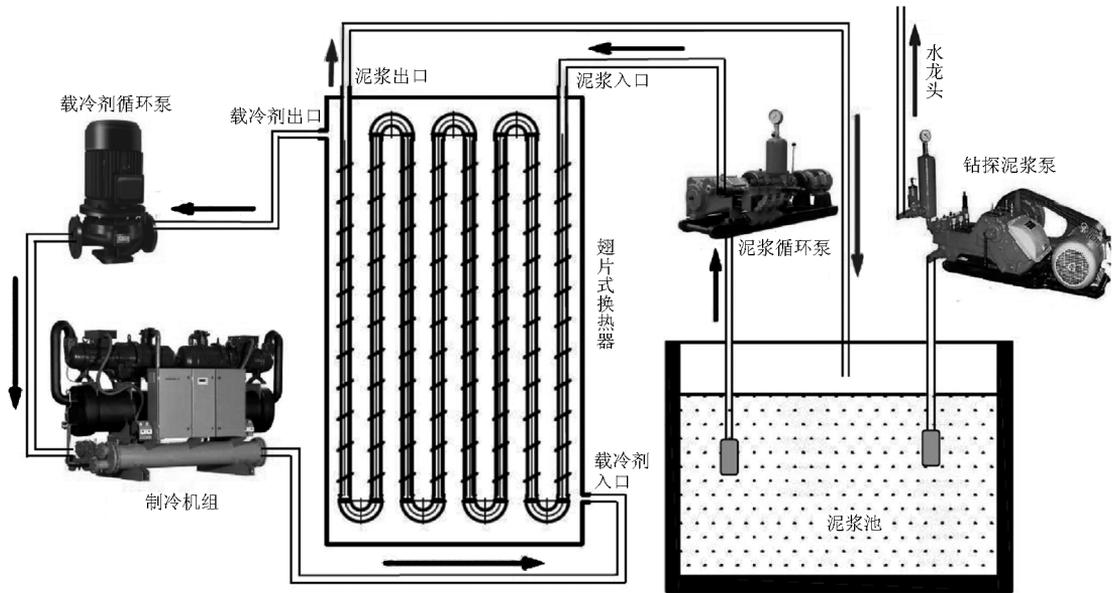


图 1 新型泥浆冷却系统工作原理图

### 3 关键参数计算

#### 3.1 换热面积计算

##### 3.1.1 换热元件选型

综合考虑成本、加工、维修等因素,优先选择市场已有的全铝翅片管,经市场调研,选择的全铝翅片管的结构类型见图 2,其技术参数为:Ø48 mm × 4.5 mm, 通径 39 mm, 翅片外径 56 ± 1 mm, 基管外径 42 mm, 基管壁厚 1.5 mm, 翅片距 3 mm, 翅片厚度 0.4 ± 0.1 mm, 单根长度 1800 mm。

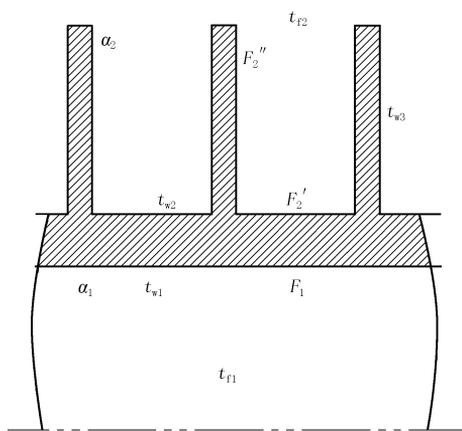


图 2 全铝翅片管结构

##### 3.1.2 换热面积计算

依据前期天然气水合物科学钻探施工经验,在正常钻进过程中,在达到动态稳定状态时,泥浆泵流量是 9 m<sup>3</sup>/h (150 L/min), 进出井温差约为 2 °C。考虑到管路热量散失、泥浆池辐射散热等因素,保证泥浆始终维持在低温范围内,冷却系统设计时按照

泥浆进出换热器流量 9 m<sup>3</sup>/h、进出口温差 3 °C 来计算。

根据热传导学原理,泥浆冷却系统的换热量用下面公式表示:

$$Q' = \rho q c \Delta t \quad (1)$$

载冷剂与泥浆通过翅片换热器的传热可视为稳态传热,通过翅片的传热过程如下:泥浆与翅片管内壁对流换热→翅片管壁面导热→乙二醇与翅片对流换热;根据传热学原理,载冷剂与泥浆的传热过程依据以下公式计算。

(1) 翅片管中心通道泥浆与基管内壁的对流换热公式:

$$Q_1 = \alpha_1 F_1 (t_{f1} - t_{w1}) \quad (2)$$

(2) 通过翅片管基管壁的导热公式:

$$Q_2 = (\lambda/\delta) F_1 (t_{f2} - t_{w2}) \quad (3)$$

(3) 载冷剂与翅壁面的对流换热公式:

$$Q_3 = \alpha_2 (F_2' + F_2'' \eta_f) (t_{w2} - t_{f2}) = \alpha_2 F_2 \eta (t_{w2} - t_{f2}) \quad (4)$$

式中:  $Q$ ——换热量, kW;  $\rho$ ——泥浆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $q$ ——泥浆流量, m<sup>3</sup>/h;  $c$ ——泥浆比热容, kJ/(kg · °C);  $\Delta t$ ——泥浆进出口温差, °C;  $t_{f1}$ ——泥浆温度, °C;  $t_{f2}$ ——乙二醇温度, °C;  $t_{w1}$ ——基管内壁面温度, °C;  $t_{w2}$ ——翅根壁面温度, °C;  $t_{w3}$ ——翅壁平均温度, °C;  $F_1$ ——基管内壁面积, m<sup>2</sup>;  $F_2$ ——翅壁表面积, 包括翅片间壁表面积  $F_2'$  和翅片表面积  $F_2''$ , m<sup>2</sup>;  $\alpha_1$ ——泥浆与基管内壁对流换热系数, W/(m<sup>2</sup> · °C);  $\alpha_2$ ——翅壁侧乙二醇对流换热系数, W/(m<sup>2</sup> · °C);  $\lambda$ ——导热系数, W/(m<sup>2</sup> · °C);  $\delta$ ——翅片管

基管壁厚,  $m$ ;  $\eta$ ——翅片总效率,  $\eta = (F_2' + F_2''\eta_f) / F_2$ , 其中  $\eta_f = (t_{w3} - t_{f2}) / (t_{w2} - t_{f3})$ 。

综合上述公式可得到换热量的计算公式为:

$$Q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \frac{\delta}{\lambda F_1} + \frac{1}{\alpha_2 F_2 \eta}} \quad (5)$$

设计按照载冷剂进换热器温度  $-8\text{ }^\circ\text{C}$ 、泥浆进换热器温度  $3\text{ }^\circ\text{C}$  进行计算, 在该温度条件下泥浆与

载冷剂的热物理参数如表 1 和表 2 所示, 将相应参数代入式(5)可求得换热长度为  $83.74\text{ m}$ 。考虑换热器弯头热量损失与换热器加工, 取全铝翅片管单根长度为  $1.8\text{ m}$ , 按照  $8 \times 6$  方式排列, 翅片管长度为  $86.40\text{ m}$ , 此时换热面积为  $10.58\text{ m}^2$ , 换热量满足设计要求。

### 3.2 压力损失计算

表 1 泥浆及 30% 乙二醇水溶液 ( $-8\text{ }^\circ\text{C}$ ) 热物理参数

项 目	密度 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	比热 $c$ / ( $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ )	塑性粘度 / ( $\times 10^{-6}\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	运动粘度 / ( $\times 10^{-6}\text{ mPa} \cdot \text{s}$ )	普朗特常数	导热系数 / ( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )	流量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	管内流速 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
泥浆	1.1577	3.7064	10.73		13.67	0.550	9.0	2.10
30% 乙二醇水溶液 ( $-8\text{ }^\circ\text{C}$ )	1.038	3.6513		6.1105	49.28	0.468		

泥浆在翅片管中心通道中流动过程中的压力损失主要包括沿程压力损失、局部压力损失和高程压差。

#### 3.2.1 沿程压力损失

沿程压力损失:

$$h_f' = \lambda (l/d) (v^2/2g) \quad (6)$$

式中:  $\lambda$ ——摩擦阻力系数,  $\lambda = 0.0056 + (0.500/Re^{0.32}) (3000 < Re < 3 \times 10^6)$ ;  $l$ ——管路长度,  $m$ ;  $d$ ——管路通径,  $m$ ;  $v$ ——流速,  $m/s$ 。

参照表 1 代入相关参数求得:  $h_f' = 18.62\text{ m}$ 。

#### 3.2.2 局部压力损失

换热器管路弯头选择的是不锈钢对焊  $180^\circ$  等径弯头, 通径  $50\text{ mm}$ , 曲率半径  $152\text{ mm}$ , 弯头数量  $48$  个。局部压力损失:

$$h_f'' = \xi (v^2/2g) \quad (7)$$

式中:  $\xi$ ——局部阻力系数,  $\xi = [0.131 + 1.847 (r/R)^{3.5}] (\theta/90)$ ;  $v$ ——流速,  $m/s$ 。

代入相关参数得:  $h_f'' = 15.29\text{ m}$ 。

#### 3.2.3 高程压差

换热器的进出口高差  $> 2\text{ m}$ , 其高度压力损失约  $0.02\text{ MPa}$ , 因此, 计算换热器的压力损失时基本可以忽略不计。

综上, 换热器的全程压力损失为:  $h_f = h_f' + h_f'' = 33.91\text{ m}$ , 即  $0.34\text{ MPa}$ 。

与以往相同性能的泥浆制冷系统相比, 新型泥浆制冷系统具有明显的能耗及换热器管路压力损失低的优点。

(3) 经室内调试和野外应用证明, 泥浆冷却系统制冷量大、工作稳定, 达到了设计要求的目。

### 参考文献:

- [1] 刘广志. 天然气水合物开发的现状和商业化的技术关键[J]. 探矿工程, 2003, (2): 8-10.
- [2] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2002. 65-96.
- [3] T. S. Collett, M. W. Lee, W. F. Agena et al. Permafrost Associated Natural Gas Hydrate Occurrences on the Alaska North Slope [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 28(2): 279-294.
- [4] 金庆焕. 天然气水合物——未来的新能源[J]. 中国工程科学, 2000, 2(11): 29-34.
- [5] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas - hydrates A potential energy source for the 21st Century [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(1-3): 14-31.
- [6] Collett T S. Gas Production from Class 1 Hydrate Accumulations [A]. Taylor C, Qwan J. Recent Advances in the Study of Gas Hydrates [C]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004. 75-88.
- [7] 赵江鹏, 孙友宏. 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.
- [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] T. Ohara, S. R. Dallimore, E. Fercho. JAPEX /JNOC/GSC MALLIK 2L-38 Gas Hydrate Research Well Mackenzie Delta, N. W. T.: Overview of Field Operations [C]. SPE/CERI Gas Technology Symposium. Calgary, Alberta, Canada. 2000.
- [10] Robert B. Hunter, Scott A. Digert, Ray Boswell et al. Alaska Gas Hydrate Research and Stratigraphic Test Preliminary Results [R]. 2008.
- [11] 李国圣. 天然气水合物钻探泥浆冷却系统数值模拟及应用研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2011.

## 4 结论

(1) 新型天然气水合物钻井泥浆冷却系统具有启动电流小、燃油消耗低、换热效率高、设备体积小等突出优点。

(2) 经理论计算, 在满足制冷要求的条件下, 新型冷却系统换热面积为  $10.58\text{ m}^2$ , 管路压力损失为