

# 天然气水合物钻井泥浆冷却系统的设计及现场应用

李国圣, 孙友宏, 郭威

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**从天然气水合物赋存的温压条件入手,说明了制冷泥浆的重要性。介绍了天然气水合物钻井泥浆冷却系统的结构组成、工作原理及设计过程。进而阐述了该套系统在中国冻土区天然气水合物科学钻探施工中的应用情况。试验证明,该套系统完全达到了设计要求,并首次成功地在青藏高原木里盆地永冻区钻获天然气水合物样品。

**关键词:**天然气水合物;钻井泥浆冷却系统;冻土区;设计过程;野外试验

**中图分类号:**TD87;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)02-0008-04

**Design and Field Application of Gas Hydrate Drilling Mud Cooling System/LI Guo-sheng, SUN You-hong, GUO Wei**  
(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** The importance of drilling mud cooling is explained in terms of the storage temperature and pressure of gas hydrate. The structure, operational principle and design process of the mud cooling system for gas hydrate drilling are introduced with the field experiment. Of the system in the Chinese permafrost zone gas hydrate drilling. The experiment has proved that this system completely met the design requirements and for the first time successfully recovered the gas hydrate sample in the permafrost zone of the Qinghai-Tibetan plateau.

**Key words:** gas hydrate; drilling mud cooling system; permafrost zone; design process; field experiment

## 1 概述

天然气水合物是在一定条件下由气体或挥发性液体与水相互作用过程中形成的白色固态结晶物质(可燃冰),单位体积的水合物可含164倍同单位的气体,分子量小,成分不稳定,除以甲烷气体为主外,还含有乙、丙、丁烷多种气体<sup>[1]</sup>。天然气水合物存在需要一定的温度、压力条件,图1是天然气水合物温度压力临界平衡示意图。从图1中可以看出,当水合物温度和压力在临界稳定曲线上部时,水合物处于稳定状态,不会分解;当位于临界稳定曲线下部时,为非稳定状态,水合物就会分解。如果在一定的温度条件下,当压力低于在该温度下临界稳定曲线上对应的临界点压力值时,水合物则会分解,释放出气体;而在某一压力条件下,当温度高于在该压力条件下临界稳定曲线上对应的临界点温度值时,水合物亦会分解<sup>[2-5]</sup>。在钻取天然气水合物岩心的过程中,由于钻头与赋含天然气水合物的岩石摩擦会产生大量的热,以致孔底岩石温度升高,这些热量相应地会使钻井泥浆温度升高。如果没有泥浆制冷设备,由图1可知,天然气水合物很有可能在没取到地表之前就完全或部分分解,影响钻探的效果,甚至使

钻探计划失败<sup>[6]</sup>。

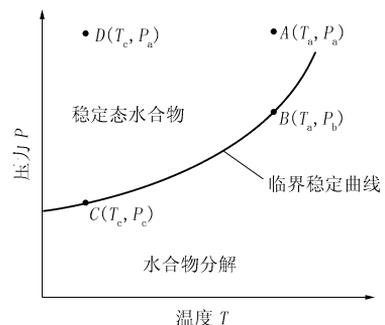


图1 天然气水合物温度压力临界平衡示意图

我院2009年应中国地质调查局“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”调查项目的要求,设计了一套天然气水合物钻井泥浆冷却系统,并在青海木里盆地进行钻探施工。成功地在DK-2和DK-3钻孔中钻获天然气水合物实物样品(图2),本套系统为中国首次在陆地永冻区钻获天然气水合物样品起到了至关重要的作用。

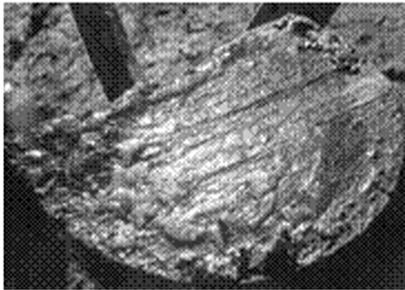
## 2 天然气水合物泥浆冷却系统的设计

该套天然气水合物钻井泥浆冷却系统(如图3

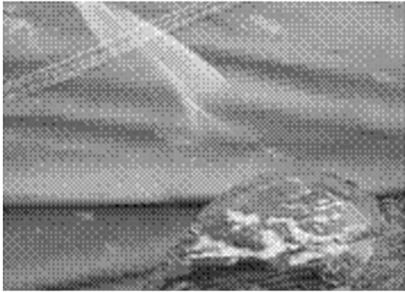
收稿日期:2011-01-05

**基金项目:**中国地质调查局地质调查项目“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”(1212010818055);科技部国际合作与交流专项“天然气水合物孔底冷冻取样方法及取样器的研究”(2007DFR60100)

**作者简介:**李国圣(1985-),男(汉族),河南安阳人,吉林大学硕士研究生,地质工程专业,研究方向为天然气水合物勘探技术及钻采工艺,吉林省长春市西民主大街6号,ligs\_2046@163.com。



(a) 白色晶体为天然气水合物



(b) 天然气水合物燃烧

图 2 在青海木里盆地钻取的天然气水合物

所示)主要用于制冷从钻孔中返出并且经过地表循环而升温的泥浆,使泥浆冷却到一定温度从而保证天然气水合物样品能够顺利并且保真地取出。钻进过程中泥浆采用能耐 -15℃ 的低温聚合物泥浆。要求泥浆的流速为 160 L/min,且进井温度为 -2℃。综合考虑了多种冷却系统方案,并考虑海拔 4000 多米施工的青藏高原现场的复杂地质气候因素,我们设计了此种泥浆冷却方案,其系统结构如图 3 所示。本系统工作原理大致可以分为 2 个回路和电子检测系统。

### 2.1 制冷机组制冷液循环回路①

用一台风冷乙二醇制冷机组连续地对载冷剂(乙二醇溶液)进行制冷,将冷量不断地输送到载冷剂箱中,使载冷剂箱中的温度基本保持在 -15℃ 左右,该回路通过低温制冷液输送泵不断地进行循环。

### 2.2 同轴式套管换热器循环回路②

同轴式套管换热器是将不同直径的两种管子套在一起,形成同心套管,一种流体在管内流动,另一种流体在内管与外管的环状间隙流过,通常成逆流流动,这样可以提高热量的传递效率<sup>[7]</sup>。当需要较多的传热面积时,换热器可以用多根套管组合而成,其内管与内管间用 U 形管连接,外管与外管间用短管连接。泥浆池中的泥浆通过低温泥浆泵经过泥浆入口进入套管式换热器的内管中,然后经过泥浆出口再返回泥浆池中,中间经过一次降温过程。同时从载冷剂箱中出来的 -15℃ 的乙二醇载冷剂经过制冷液输送泵送入套管式换热器的环状间隙中,与内管中的泥浆形成逆流,同时制冷泥浆,然后返回载冷剂箱中经过制冷机组重新降温形成反复循环。套管式换热器的长度可以随着系统参数和泥浆参数的不同而调整。制冷液输送泵采用能耐 -15℃ 的低温泵。泥浆泵将泥浆池中经过制冷的泥浆抽入井中进行不断循环。

### 2.3 电子检测系统

该电子检测系统通过检测制冷后的载冷剂箱中载冷剂的温度、载冷剂入口温度、载冷剂出口温度、泥浆入口温度、泥浆出口温度、泥浆池温度、进入水龙头时泥浆温度。本套电子检测系统可以随时地显示各个测点的温度,可以随时观察整套系统的工作情况,进而可以通过电脑控制模块控制制冷机组的开关,或调整载冷剂的流量等措施来控制泥浆的制冷过程。通过记录泥浆冷却系统的各个参数,对以后整套系统的改进提供宝贵的数据。

### 2.4 天然气水合物泥浆冷却系统的基本设计思路

#### 2.4.1 制冷机组所需的有效功率 Q 的计算

$$Q = \rho_1 G_1 c_1 (t_1' - t_1'') \quad (1)$$

式中:  $\rho_1$ ——泥浆的密度;  $G_1$ ——泥浆的流量;  $c_1$ ——泥浆的比热;  $t_1'$ ——泥浆制冷前的温度;  $t_1''$ ——泥浆制冷后(钻井所需)的温度。

#### 2.4.2 套管式换热器的结构设计

##### 2.4.2.1 冷却介质出口温度的计算

根据热平衡方程:

$$Q_1 = Q_2$$

式中:  $Q_1$ ——泥浆冷却所释放的热量;  $Q_2$ ——载冷

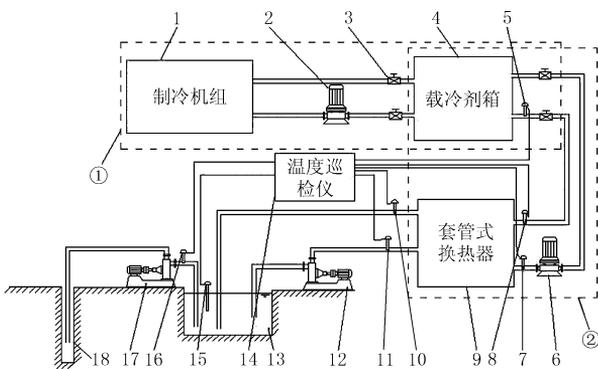


图 3 天然气水合物钻井泥浆冷却系统示意图

- 1—制冷机组;2—低温制冷液输送泵;3—阀门;4—载冷剂箱;5—载冷剂箱温度传感器;6—低温制冷液输送泵;7—乙二醇进口温度传感器;8—乙二醇出口温度传感器;9—套管式换热器;10—泥浆出口温度传感器;11—泥浆进口温度传感器;12—低温泥浆泵;13—泥浆池;14—温度巡检仪;15—泥浆池温度传感器;16—进井温度传感器;17—钻机用泥浆泵;18—钻井;①制冷机组制冷液循环回路;②同轴式套管换热器循环回路

剂乙二醇溶液制冷泥浆所需的冷量。

$$Q_1 = M_1 c_1 (t_1' - t_1'') = \rho_1 G_1 c_1 (t_1' - t_1'') = Q_2 \\ = M_2 c_2 (t_2'' - t_2') = \rho_2 G_2 c_2 (t_2'' - t_2') \quad (2)$$

式中:  $G_2$ ——载冷剂乙二醇溶液的流量;  $c_2$ ——载冷剂乙二醇溶液的比热;  $\rho_2$ ——载冷剂乙二醇溶液的密度;  $t_2'$ ——载冷剂乙二醇溶液的进口温度;  $t_2''$ ——载冷剂乙二醇溶液的出口温度。

#### 2.4.2.2 传热面积的计算

(1) 由于采用全程逆流换热, 因此可直接采用逆流换热对数平均温差公式进行传热温差  $\Delta t_m$  的计算:

$$\Delta t_m = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{(t_1' - t_2'')}{(t_1'' - t_2')}} \quad (3)$$

(2) 根据流量确定管内与管外流体流速, 并进行管径及管长的选取。根据经验, 选取管内流速在 1~2 m/s 范围。考虑到管内为非洁净流体, 尽量提高流速可减缓结垢现象。通过流速与泥浆和载冷剂的流量求出流速。

总热阻:

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{2\pi L} \left( \frac{1}{r_i h_1} + \frac{r_{F1}}{r_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{\lambda} + \frac{r_{F2}}{r_o} + \frac{1}{r_o h_2} \right) \quad (4)$$

式中:  $r_i, r_o$ ——分别为内管内外半径;  $r_{F1}, r_{F2}$ ——分别为内管内外污垢系数;  $\lambda$ ——管壁的导热系数;  $L$ ——管长;  $A$ ——管路总的换热面积;  $k$ ——换热系数;  $h_1$ ——管内对流换热系数;  $h_2$ ——管间对流换热系数。

考虑到施工现场条件增加一定的裕量, 然后求出最后天然气水合物冷却系统换热器的管长<sup>[8]</sup> (注: 已将设计计算过程编制成 matlab 程序, 以方便高效地进行以后的设计)。

#### 2.4.3 冷却系统管路压力损失的计算

压力损失分为沿程压力损失和局部压力损失, 分别计算换热器内管和管外的压力损失。

沿程压力损失  $H_1$  的计算公式为:

$$H_1 = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式中:  $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$  ( $Re$  为雷诺数);  $l$ ——有效管长;  $d$ ——管的有效半径;  $v$ ——流体的粘度。

局部压力损失  $H_2$  的计算公式为:

$$H_2 = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

式中:  $\zeta$ ——局部压力损失系数。

最后通过计算天然气水合物换热器内外管和整套系统连接所需的高压胶管总的压力损失, 按照一

定的裕量来选择各个泵的扬程<sup>[9]</sup>。

### 3 天然气水合物钻井泥浆冷却系统的野外试验

经过一番室内试验后, 该套天然气水合物泥浆冷却系统完全符合设计的要求, 然后从长春发送到施工现场。2009年5月30日, 中国地质调查局调查项目“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”在青海木里盆地正式开钻。天然气水合物钻井泥浆冷却系统于6月19日安装调试完毕, 开始正常运行。本次钻探任务中的 DK-2、DK-3 和 DK-4 钻孔都使用了本系统, 共完成钻探量约 794 m, 表 1 是本套泥浆冷却系统在各钻孔中使用情况及发现天然气水合物的日期及孔深。

表 1 天然气水合物钻井泥浆冷却系统在野外试验的使用情况

钻孔	试验时间段 /(月.日)	试验孔段 /m	发现水合物 样品孔深/m	发现水合 物日期
DK-2	6.19~7.25	210~630	235	6月20日夜晚
DK-3	8.25~9.5	112~210	139	8月26日下午
DK-4	9.14~9.29	140~415	无	

注: 表中所列孔深为发现水合物的最好样品的孔深, 钻孔中其它部分层位也陆续发现了天然气水合物。

#### 3.1 6月19日钻井泥浆冷却系统的现场试验状况及数据分析

由于高原现场的光照强烈, 白天温度也较高, 为了避免泥浆冷却系统和泥浆循环系统不必要的热损失, 所以搭建了泥浆棚, 图 4 为该冷却系统在 DK-2 孔时的具体布置图。



图 4 天然气水合物泥浆冷却系统现场布置图

6月19日上午启动制冷机组和制冷机组水泵先将载冷剂乙二醇(冰点为  $-30^\circ\text{C}$ ) 温度降到  $-15^\circ\text{C}$ 。下午启动整个天然气水合物钻井泥浆冷却系统, 开始冷却泥浆, 每 10 min 记录一次数据。图 5 是根据当天数据绘制的曲线图。

由图 5 可知, 泥浆温度在 150 min 以前时温度持续降低, 泥浆池泥浆温度在 150 min 时达到最低点  $1^\circ\text{C}$ , 之后泥浆温度持续升高。运行了 440 min 左右时, 就将泥浆冷却系统停止, 然后分析原因。经

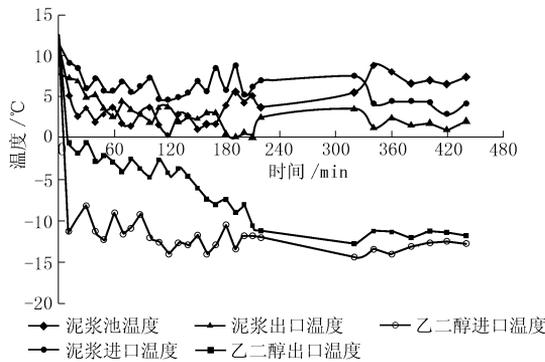


图5 2009年6月19日天然气水合物钻井泥浆冷却系统检测点温度曲线图

(注:6月19日进出井温度传感器还未安装。)

通过对冷却系统的拆卸检查发现,事故根本原因在于钻井所用的泥浆凝固点温度不太低。由于载冷剂乙二醇的温度设置过低,使得进入换热器的泥浆从管壁到中心逐渐的凝固结冰,以致最后基本堵塞了泥浆的循环管路,使得换热无法正常进行。非但如此,制冷过程中低温泥浆泵还在运行,产生大量的热还会令泥浆温度不降反升,就产生了上述现象。

### 3.2 6月20日钻井泥浆冷却系统的现场试验状况及数据分析

由于19日载冷剂乙二醇温度设置过低造成了泥浆凝固堵塞管路的现象,所以20日先将被冻住的泥浆解冻,然后将制冷机组电脑控制模块的载冷剂乙二醇的最低温度由 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 改为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然后继续工作并且记录数据(如表2所示)。

表2 2009年6月20日晚天然气水合物钻井泥浆冷却系统记录数据

时间	乙二醇进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	乙二醇出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	泥浆进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	泥浆出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	泥浆池温度/ $^{\circ}\text{C}$
21:00	-2.7	3.6	9.2	2.9	4.4
21:20	-5	1.3	6.7	2.5	3.4
21:40	-4.4	3	5.9	2.3	2.9
22:00	-5.4	1.2	5.6	3.6	2.7
22:30	-4.2	2.7	5.9	3.9	3.1
23:00	-5	2.9	5.3	2.6	2.9
00:00	-5	2.3	4.8	1.3	1.5
01:00	-4	0.9	5.7	1.7	1.6
02:00	-5.7	0	5.4	0.4	0.8
04:00	-6.5	-2.2	4.1	-0.1	0.6

由表2可知,泥浆的温度随着制冷过程的不断进行,最后达到了所需的值。泥浆最后进出口温差甚至达到了 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,圆满地完成了设计的目标。

## 4 结语

(1)本套天然气水合物泥浆冷却系统的设计经过多次论证,最终的方案经过室内试验和野外现场施工,第一次成功地在中国冻土区打出天然气水合物,提升了中国的能源储备能力和对解决现今的能源紧张问题起到了很大作用,可以说本套设备完全达到了本项目的要求。

(2)天然气水合物钻探必须配备泥浆冷却系统,在泥浆冷却系统出故障的时段,没有钻取出水合物。所有好的天然气水合物岩心样品都是在泥浆冷却系统正常工作的情况下取出来的。

(3)由于泥浆的比热和凝固点的实际值与理论值有偏差,现场应该配备相应的测试设备,为系统的正常工作提供准确可靠的数据。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 雷怀彦,王彬彬,房玄,等. 天然气水合物研究现状与未来挑战[J]. 沉积学报,1999,17(3).
- [3] 郭威. 天然气水合物孔底冷冻取样方法的室内试验及传热数值模拟研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2007.
- [4] 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).
- [5] Rodger. The stability of gas hydrates[J]. Phys. Chem,1990,94.
- [6] Hendriks, E. M. B. Edmonds, R. A. S. Moorwood. Gas Hydrate Structure Stability in simple and mixed hydrates[J]. Fluid Phase Equilibrium,1996,(117).
- [7] 张永勤,孙建华,贾志耀,等. 中国陆地永久冻土带天然气水合物钻探技术研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1).
- [8] 章熙民,任泽需,梅飞鸣. 传热学(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [9] 朱聘冠. 换热器原理及计算[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [10] 张也影. 流体力学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,1999.

## 阿特拉斯·科普柯新的研发中心将在中国成立

**本刊讯** 为了保持阿特拉斯·科普柯集团在中国市场的持久竞争力,公司决定将投资6000万人民币(6000万瑞典克朗)在中国南京成立新的研发中心,并计划在研发中心成立后的3年内招募约250名雇员。

新的研发中心将为阿特拉斯·科普柯建筑与矿山技术部(中国)提供专业的工程设计服务、实验室和试验设备。该中心将以设计为

重点,特别是在为满足中国采矿与建筑行业客户的需求方面。

“中国是我们的四大本土市场之一”,阿特拉斯·科普柯建筑与矿山技术部总裁 Björn Rosengren 说道,“我们作此投资是为了加强我们的设计与研发能力,并将为满足中国客户特殊需要而设计的产品提供更短的上市周期。”

新的研发中心预计将于2011年10月开业。