

# 干冰升华式孔底冷冻取样器冷源保冷方法的试验研究

郭威, 孙友宏, 陈晨, 赵江鹏, 赵建国

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**针对已研制的天然气水合物孔底冷冻取样器,为进一步提高取样器干冰冷源的保冷效果,提出干冰冷源双层保冷方法。通过试验研究,证明干冰冷源双层保冷方法可大幅度提高干冰在井内的保存时间,可以将此方法应用于取样器的设计。

**关键词:**天然气水合物;孔底冷冻取样器;干冰;保冷方法

**中图分类号:**P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)09-0005-02

**Experimental Study on Cold Source Insulation Method for Gas Hydrates with Dry Ice Sublimation Hole Bottom Freezing Sampler/GUO Wei, SUN You-hong, CHEN Chen, ZHAO Jiang-peng, ZHAO Jian-guo (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)**

**Abstract:** In order to improve the cold insulation effect of dry ice cold source of sampler, double-layer cold insulation method for dry ice cold source was put forward. It was proved by experiment that double layer cold insulation method for dry ice cold source could greatly prolong preservation time of dry ice in the hole bottom, and this method can be applied in the sampler design.

**Key words:** gas hydrates; hole bottom freezing sampler; dry ice; cold insulation method

## 0 引言

天然气水合物孔底冷冻取样方法是利用外部冷源在孔底降低水合物岩心温度,采用主动式降温的方法降低水合物的临界分解压力,达到被动式降压来抑制水合物分解,以此来获得保真程度较高的水合物岩心样品的方法。根据上述原理,并通过相关的室内冷冻实验研究,研制 FCS 型(Freezing Core Sample)天然气水合物孔底冷冻取样器,取样器是以干冰为冷冻剂,酒精作为助冷催化剂和载冷剂这一冷冻方式为根本原则进行设计。通过对取样器进行土层钻进取样试验,并获得冷冻状土样,证明孔底冷冻取样方法是可行的,能够实现孔底冷冻岩样。

干冰是取样器实现孔底冷冻功能的冷源。因此,干冰在井内的保存时间就成为取样器能否实现孔底冷冻岩心的关键。为进一步提高冷源在井下的保存时间,必须对冷源的保冷材料和结构进行研究,并应用于取样器,以保证实现取样器孔底冷冻岩心。

## 1 冷源保冷材料与结构的研究

干冰升华式孔底冷冻取样器是以干冰作为冷

源,因此如何选择干冰冷源的保冷材料,设计保冷结构就十分重要。根据干冰的低温特性,并结合现有保冷材料的性质,提出干冰冷源双层保冷方法。

### 1.1 冷源保冷材料的选择

导热系数 $\leq 0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的材料称为保温材料。适用温度在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的保温材料称为保冷材料<sup>[1]</sup>。

工程上对保冷材料的主要要求有以下3点:

- (1) 保冷材料在平均温度 $< 300 \text{ K}(27\text{ }^{\circ}\text{C})$ 的情况下,其导热系数 $\geq 0.064 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;
- (2) 保冷材料密度 $\geq 220 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;
- (3) 保冷硬质绝热制品抗压强度 $\leq 0.15 \text{ MPa}$ 。

根据上述要求,结合干冰的低温特性( $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),并考虑到取样器的结构和工艺要求,选择现有性能最佳的保冷绝热材料硬质聚氨酯泡沫塑料和聚氨酯泡沫塑料作为保冷材料。硬质聚氨酯泡沫塑料和聚氨酯泡沫塑料的性能见表1。这两种材料在导热系数、密度、抗压强度和使用温度上均满足干冰冷源对保冷材料的性能要求。

### 1.2 冷源保冷结构的设计

收稿日期:2009-04-16; 改回日期:2009-06-03

**基金项目:**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”(编号:2007DFR60100);中国地质调查局项目“青藏高原冻土带天然气水合物调查评价”(编号:1212010818055);中国地质大学(北京)科学钻探国家专业实验室开放课题“GHFS-110型天然气水合物孔底冷冻取样器的研制”(编号:NLS200803)

**作者简介:**郭威(1979-),男(汉族),吉林公主岭人,吉林大学建设工程学院讲师,地质工程专业,博士,研究方向为天然气水合物勘探技术,吉林省长春市西民主大街6号,guowei6981@jlu.edu.cn。

表1 硬质聚氨酯泡沫塑料和聚氨酯泡沫塑料性能

材料	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	使用温度/℃
硬质聚氨酯泡沫塑料	0.0275	30~60	0.196	-180~+100
聚氨酯泡沫塑料	0.0233	50	0.196	-110~+130

根据选择的保冷材料的性能,并结合取样器的尺寸要求,设计干冰冷源双层保冷结构,如图1所示。干冰置于双层保冷结构心部,内层保冷材料为硬质聚氨酯泡沫塑料,外层保冷材料为聚氨酯泡沫塑料。双层保冷结构外侧为钢制衬管。为使干冰冷源在井下的保存时间能够满足钻探取样的要求,同时还要保证干冰总量能够满足孔底冷冻岩样的要求,必须对保冷层的厚度进行传热学分析计算,确定最合理的保冷层厚度。

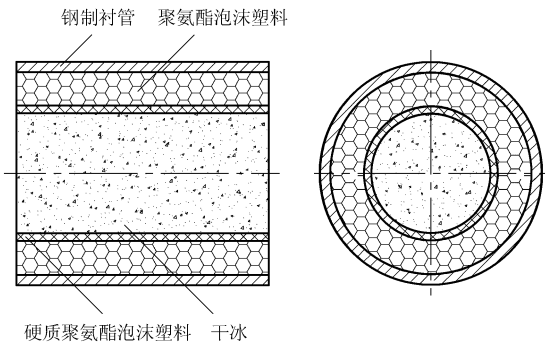


图1 干冰冷源双层保冷结构

已知条件:保冷层内表面温度  $T_0 = -78.5\text{ }^\circ\text{C}$ ; 环境温度  $T_2 = 0\text{ }^\circ\text{C}$  (冲洗液温度);保冷层外径  $D_2 = 81\text{ mm}$ 。

保冷层的厚度按最大允许冷损失量原则设计。

首先需要确定保冷结构表面换热系数  $\alpha$ ,  $\alpha$  的取值按下式计算:

$$\alpha = 1.163(10 + 6\sqrt{V}) \quad (1)$$

式中:  $V$ ——保冷结构表面流体流速,对于金刚石钻进,取最大上返流速  $0.6\text{ m/s}$  [2]。

又,最大允许冷损失量:

$$[Q] = -4.5\alpha \quad (2)$$

则按圆筒型双层保冷层规范计算保冷层总厚度  $\delta$ 。先计算双层保冷层内径  $D_0$ ,进而得到保冷层厚度。

$$D_2 \ln \frac{D_2}{D_0} = 2 \left[ \frac{\lambda_1(T_0 - T_1) + \lambda_2(T_1 - T_2)}{[Q]} - \frac{\lambda_2}{\alpha} \right] \quad (3)$$

式中:  $T_1$ ——内外保冷层界面温度,  $T_1$  的绝对值应小于外层保冷材料聚氨酯泡沫塑料允许使用温度的

0.9倍,取  $T_1 = -60\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_1$ ——内层保冷层材料导热系数,内层保冷材料为硬质聚氨酯泡沫塑料,取  $0.0275\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda_2$ ——外层保冷层材料导热系数,外层保冷材料为聚氨酯泡沫塑料,取  $0.0233\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ;经式(3)得到双层保冷层内径  $D_0$ ,进而由下式,可得到保冷层总厚度  $\delta$ :

$$\delta = (D_2 - D_0)/2 \quad (4)$$

还需要对两层保冷层的厚度进行分别计算:

内层保冷层外径  $D_1$  可由下式求得:

$$\ln \frac{D_1}{D_0} = \frac{2\lambda_1}{D_2} \cdot \frac{T_0 - T_1}{[Q]} \quad (5)$$

通过式(6)求得内层保冷层厚度  $\delta_1$ :

$$\delta_1 = (D_1 - D_0)/2 \quad (6)$$

进而通过式(7)确定外层保冷层厚度  $\delta_2$ :

$$\delta_2 = (D_2 - D_1)/2 \quad (7)$$

经设计计算,可得双层保冷层总厚度  $\delta = 18\text{ mm}$ 。其中内层保冷层厚度  $\delta_1 = 3\text{ mm}$ ,外层保冷层厚度  $\delta_2 = 15\text{ mm}$ 。

## 2 冷源保冷方法的试验研究

为了检测干冰冷源双层保冷方法的保冷性能能否满足钻探取样要求,设计干冰冷源双层保冷试验装置,如图2所示,并通过模拟钻探取样井下条件进行试验。试验装置按双层保冷材料和结构尺寸设计,为提高干冰的保冷效果,分别在上下两端增加硬质聚氨酯泡沫塑料材料的上、下保冷盖。干冰升华产生的气体经单向排气阀排出。将干冰装入保冷装置内,然后两端进行气密封处理,使干冰升华产生的气体仅由单向排气阀排出。

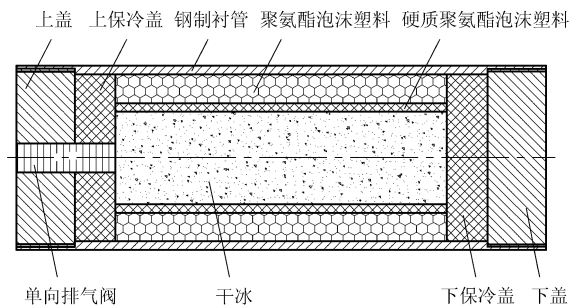


图2 干冰冷源双层保冷试验装置

把干冰填装在双层保冷试验装置内,将组装后的装置放入水温为  $13.4\text{ }^\circ\text{C}$  的水槽中,并保证水槽中的水始终处于流动状态,放置  $2\text{ h}$ ,装置取出后经测量干冰剩余  $67\%$ 。由于装置外部水温为  $13.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,此温度远高于设计温度  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,因此在设计温度条件下干冰的剩余量还会增加。(下转第10页)

塞气流上返通道,导致埋钻。

#### 4 成果分析

空气潜孔锤钻探工艺需要专门配备空气压缩机,配备一辆越野能力比较强的卡车,前期投入比较大,但钻探效率比岩心钻机取样高4~5倍,平均小

时效率在10 m以上。通过示范成本核算,总的取样费用可降低1/3,而且随着工作量的增加和取样工艺的完善,取样费用节约的比例会更大。表1列出了车载钻机与岩心钻机效率、成本、质量的对比情况。

表1 车载钻机与岩心钻机施工效率、成本、质量的对比

类型	钻探效率 /(m·h <sup>-1</sup> )	用水量 /(L·h <sup>-1</sup> )	前期准备时间 /h	破碎地层 取样效率	化探分析 质量要求	成本核算
岩心钻机	1.8	800	2	50%左右	岩心满足	较高
车载钻机潜孔锤钻进	10	无需	0.5	90%以上	小颗粒满足	节省1/3

2007年与2008年,分别在内蒙古扣河子镇、新疆哈密地区及内蒙古西乌旗进行了野外化探取样,累计完成进尺1737 m,取样3000多个。通过对比分析样品,取样工艺得到了化探专家的认可,取样质量满足化探取样的要求

一个发展方向。特别是在幅员辽阔的西北部地区,矿产资源丰富,交通便利,目前我国化探1:5万在西北部还有相当大的工作量,车载空气潜孔锤钻探工艺特别适合大面积的化探普查工作,这必然是一个发展方向。这一点在几次的示范取样过程中已经得到证实。无论地质勘探人员还是化探分析人员,都对此表示出极大的兴趣。当前取粉样对于化探研究基本能满足工作要求,但是还不能满足地质取样要求,这需要地质取样有关标准的出台,同时也需要钻探机具及钻探取样工艺的改进完善,最终满足地质取样的要求。

#### 5 存在的问题与建议

需要针对各典型地层配备系列的钻具,这就需要增大钻机的使用范围,既能满足潜孔锤钻进,也能满足金刚石钻进。为此,我单位已同吉林大学建设工程学院进行合作,借助他们在贯通式潜孔锤方面的研究成果,在满足化探取样要求的同时,也能满足地质取样要求。实际应用的过程中钻机的各种性能达到了很好的验证,但动力尚需要加大,在钻探行业,偏大的动力匹配在野外施工中是最佳的选择。

#### 参考文献:

- [1] 刘广志. 金刚石钻探手册[M]. 北京:地质出版社,1991.
- [2] 武毅. 遥感、物探、钻探技术在西部严重缺水地区地下水勘查中的集成化研究[DB/OL]. <http://old.cgs.gov.cn/NEWS/Geology%20News/2006/20060911/01.pdf>.

#### 6 结语

针对干旱、半干旱地区,以气代水,空气钻进是

(上接第6页)

而把干冰填装在上下密封的普通钢管内,放在上述环境中,放置10 min干冰基本全部升华。

通过对比试验,可知干冰冷源双层保冷方法可大幅度提高干冰在井内的保存时间。

干冰必定会有所损耗。在取样器设计时,可适当增加干冰的总量,使剩余的干冰量满足孔底冷冻岩样的需要。

#### 参考文献:

- [1] GB 50264-97,工业设备及管道绝热工程设计规范[S]. 6-13,17-18.
- [2] 李世忠. 钻探工艺学(上册)[M]. 北京:地质出版社,1992. 166.
- [3] 郭威. 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).

#### 3 结论

(1)干冰冷源双层保冷方法可大幅度提高干冰在井下的保存时间,可以将此方法应用于天然气水合物孔底冷冻取样器的设计。

(2)采用最大允许冷损失量设计保冷层厚度,