

# 天然气水合物孔底冷冻取样器储冷腔 的设计与试验研究

陈光华<sup>1,2</sup>, 郭威<sup>1,2</sup>, 贾瑞<sup>1,2</sup>, 王元<sup>1,2</sup>, 孙中瑾<sup>1,2</sup>, 张鹏宇<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:**孔底冷冻取样是一种有效的钻取天然气水合物岩心的方法, 绳索取心式孔底冷冻取样器的制冷能力由可存储冷源干冰和制冷酒精的储冷腔决定。本文就不同内部结构的储冷腔进行了储冷能力和制冷效果的设计与试验研究, 计算了储冷腔的保冷层厚度, 并设计了分层式、螺旋阶梯式和带孔管式3种储冷腔内部结构; 通过对储冷腔保冷能力的试验研究, 干冰存储1 h后平均损失率为31.3%, 能满足后续制冷酒精的要求; 并对不同结构的储冷腔开展试验研究, 试验结果表明, 带孔管式储冷腔可在短时间内完成对酒精的冷冻, 酒精降温幅度达36.3℃, 可满足水合物冷冻取样的能量要求。

**关键词:**天然气水合物; 冷冻取样; 储冷腔

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0182-06

**Design and Experimental Research on Cold Storage Chamber of the Freezing Sampler for Gas Hydrates at Hole Bottom/CHEN Guang-hua<sup>1,2</sup>, GUO Wei<sup>1,2</sup>, JIA Rui<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>1,2</sup>, SUN Zhong-jin<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng-yu<sup>1,2</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Condition, Ministry of Land and Resource, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Hole bottom sampling freezing technology is an effective method to get gas hydrate cores, the cooling capacity of wire-line coring hole bottom freezing sampler is determined by the cold storage chamber which can store dry ice and cool down alcohol. In this paper, cold storage chambers with different internal structures were designed, the experimental studies were made on their cold storage capacity and cooling effect. The thickness of the insulation layer was calculated, and 3 types of internal structure for the cold storage chamber were designed. The tests of cold-keeping ability show that the average loss rate of dry ice is 31.3% after being stored for 1h, which can meet the requirements of subsequent alcohol cooling. The tests also show that the storage cold chamber with perforated-pipe can cool alcohol in a short time, and the cooling rate is up to 36.3℃, which can meet the requirements for gas hydrate freezing sampling.

**Key words:** gas hydrate; hole bottom freezing sampling; cold storage chamber

## 0 引言

天然气水合物是碳氢分子和水分子在一定温度和压力(0℃以下、10 MPa以上)下形成的具有笼状结构的结晶化合物, 因为遇火可以燃烧, 故又称“可燃冰”<sup>[1]</sup>。它具有能量密度高、清洁、分布广泛、储量大的优点, 被认为是最有希望接替传统能源的新能源, 其开发利用技术成为国内外研究的热点<sup>[2-4]</sup>。

目前, 钻探取样是获得天然气水合物原位样品、准确测定储层厚度的唯一手段, 可以为天然气水合物实验研究提供原材料, 为天然气水合物储量估算

提供数据支持。然而, 天然气水合物在低温高压条件下才能稳定存在, 常规的取样装置不适用于天然气水合物钻探。为此, 国内外研制了多种保压取样器, 但实际应用效果并不理想<sup>[5-7]</sup>。

在此背景下, 吉林大学提出了孔底冷冻取样的方法: 在孔底将水合物样品冷冻至低温, 使其在常压下也能稳定存在, 实现保真取样。并设计了不提钻孔底冷冻取样钻具。图1为冷源内置式孔底冷冻取样器, 该钻具采用绳索取心的方法提取岩心, 其内管总成设有储冷机构和岩心冷冻机构, 打捞器上设有

收稿日期: 2016-07-20; 修回日期: 2016-09-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“东北冻土区天然气水合物资源勘查(钻探试验井工程)”(编号: GZHL20110320)、“东北冻土区天然气水合物资源勘查”(编号: GZH201400303)

作者简介: 陈光华, 男, 汉族, 1991年生, 研究生在读, 地质工程专业, 主要从事天然气水合物取样技术方面的研究, 吉林省长春市西民主大街938号, chengh14@mails.jlu.edu.cn。

酒精腔;钻进过程中,干冰存储于储冷腔,酒精存储于酒精腔;回次钻进结束后投入打捞器,酒精流入储冷腔并与干冰混合,干冰汽化吸热冷冻酒精,低温酒精流入冷冻腔并冷冻天然气水合物岩矿心。其中,储冷腔是存储干冰、制冷酒精的重要场所,其工作效率直接决定了储冷腔冷冻岩心的能力,是孔底冷冻取样器中的重要部件<sup>[8-14]</sup>。

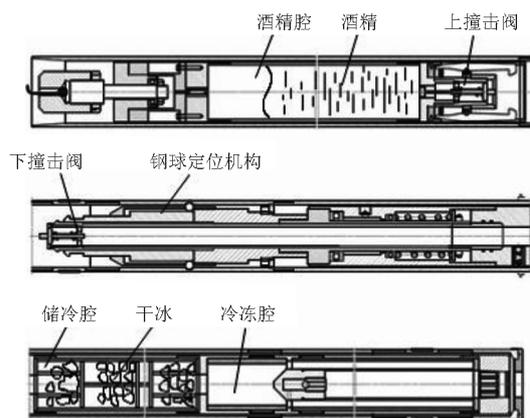


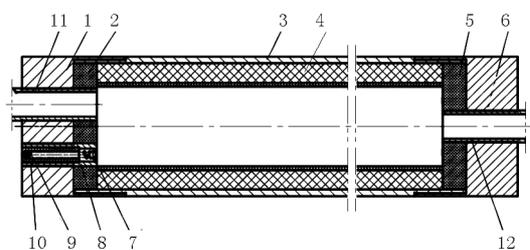
图1 冷源内置式孔底冷冻取样器

本文以储冷腔为研究对象,对其保冷层和内部储冷结构进行了设计,并进行了试验研究,旨在得出一种合理有效的储冷腔设计方案。

## 1 储冷腔结构与工作原理

### 1.1 储冷腔结构

储冷腔由外管,上、下端盖,排气阀,进、出液口以及保冷层组成,为了适应现有试验条件,本文对其端盖的结构进行了调整,设计了图2所示的储冷腔。



1—储冷腔上端盖;2—上保温垫片;3—储冷腔外管;4—保温套管;5—下保温垫片;6—储冷腔下端盖;7—排气阀球;8—排气阀体;9—弹簧;10—排气阀座;11—进液口;12—出液口

图2 储冷腔结构图

### 1.2 工作原理

储冷腔是绳索取心钻具内管总成的一部分,随钻下放到孔中,腔体内存储干冰;钻进回次结束后投入打捞器,酒精由进液口流入储冷腔与干冰混合,干

冰迅速汽化吸热,制冷酒精;低温酒精由出液口流出至冷冻腔。

## 2 设计与计算

### 2.1 保冷层设计

#### 2.1.1 技术参数

选用聚氨酯泡沫塑料制作保冷层,相关技术参数如下:硬质聚氨酯泡沫塑料传热系数  $K = 0.025 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;保温套管外径  $D = 98 \text{ mm}$ ;保温套管内表面与干冰接触,温度为  $T_1 = -78.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;保温套管外表面温度与低温钻井液温度相同,温度为  $T_2 = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;钻井液循环的流速  $V = 0.6 \text{ m/s}$ 。

#### 2.1.2 计算

引用《工业设备及管道绝热工程设计规范》(GB 50264—2013)中相关规定对保冷层厚度进行计算。

保温套管的表面换热系数为  $\alpha$ :

$$\alpha = 1.1163(10 + 6\sqrt{V}) \quad (1)$$

最大允许冷损失量  $[Q]$ :

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

保温套管内径  $D_0$ :

$$D \ln \frac{D}{D_0} = 2\lambda \left( \frac{T_1 - T_2}{[Q]} - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (3)$$

则保温套管总厚度  $d$ :

$$d = \frac{D - D_0}{2} \quad (4)$$

经计算,保温套管内径  $D_0 = 61.9 \text{ mm}$ ,保温套管总厚度  $d = 18.05 \text{ mm}$ <sup>[15]</sup>。

### 2.2 储冷腔内部结构设计

在图1所示储冷腔的基础上,为改变酒精流经储冷腔时的流动状态,提高制冷酒精的能力,设计了螺旋阶梯式、分层式、带孔管式3种储冷结构。

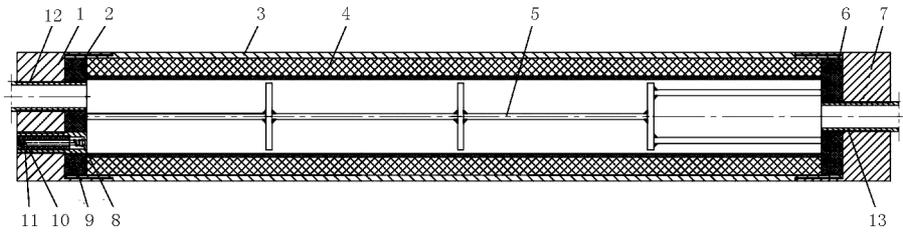
#### 2.2.1 分层式储冷腔(见图3)

其内部放有分层式干冰架,干冰逐层置于层板。该型储冷腔结构简单,便于填装干冰;各层板起到限流作用,可延长酒精在层板间与干冰混合换热的的时间。

#### 2.2.2 螺旋阶梯式储冷腔(见图4)

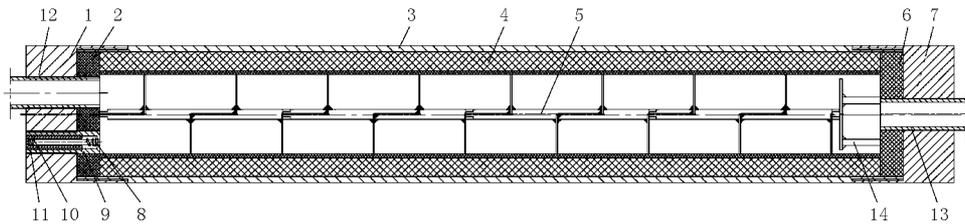
其内部放有螺旋台阶式干冰架,干冰逐层置于台阶上。该型储冷腔将酒精流动方式由直接下行转变为螺旋下行,延长了酒精流动通道的长度,可延长干冰与酒精换热时间。

#### 2.2.3 带孔管式储冷腔(见图5)



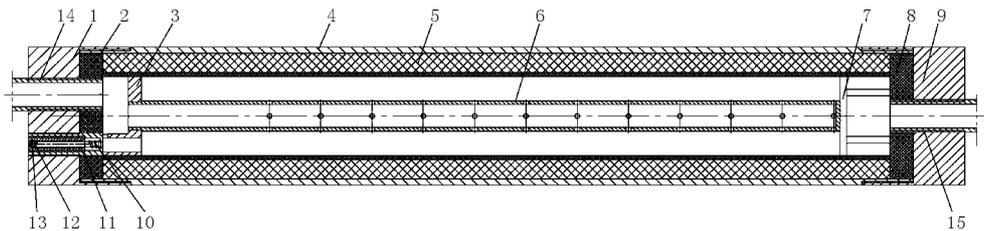
1—储冷腔上端盖;2—上保温垫片;3—储冷腔外管;4—保温套管;5—干冰存放架;6—下保温垫片;7—储冷腔下端盖;8—排气阀球;9—排气阀体;10—弹簧;11—排气阀座;12—进液管;13—出液管

图3 分层式储冷机构结构图



1—储冷腔上端盖;2—上保温垫片;3—储冷腔外管;4—保温套管;5—螺旋台阶式干冰架;6—下保温垫片;7—储冷腔下端盖;8—排气阀球;9—排气阀体;10—弹簧;11—排气阀座;12—进液管;13—出液管;14—限位支架

图4 旋梯式储冷机构结构图



1—储冷腔上端盖;2—上保温垫片;3—固定端盖;4—储冷腔外管;5—保温套管;6—带孔铜管;7—支架;8—下保温垫片;9—储冷腔下端盖;10—排气阀球;11—排气阀体;12—弹簧;13—排气阀座;14—进液管;15—出液管

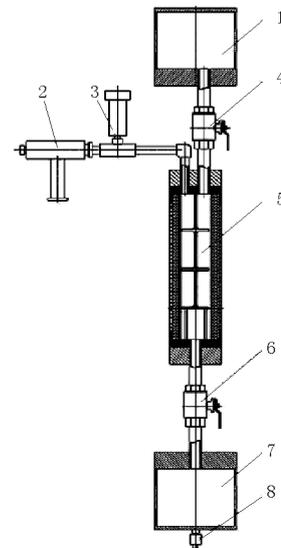
图5 带孔管储冷机构结构图

中心管的底端封死、管壁均布有小孔,干冰置于中心管与保冷套管之间。该型储冷腔的中心管贯穿了储冷腔,可增大干冰与酒精接触面,有利于提高干冰酒精混合程度;中心管的小孔可对酒精进行限流,延长冷冻时间。

### 3 冷冻模拟试验

#### 3.1 试验设备

为模拟储冷腔实际工作情况,设计了如图6所示的试验设备:上部为酒精存储腔,中部为被测试的存储腔,下部为低温酒精腔,在酒精存储腔与干冰存储腔之间,设置压力变送器监测预警反应过程中的腔内压力变化,设置排气安全阀调节排气压力,设置球阀调节酒精的流量;在干冰存储腔与低温酒精腔之间,设置球阀调节混合后酒精流出的流量;在低温酒精腔下部设置温度传感器测量混合后的低温酒精的温度值,所有传感器与无纸记录仪连接。图7为实验设备实物图。



1—酒精存储腔;2—排气安全阀;3—压力变送器;4—球阀a;5—干冰存储腔;6—球阀b;7—低温酒精腔;8—温度传感器

图6 试验设备总装图



图7 试验设备实物图

### 3.2 试验内容与方法

#### 3.2.1 保冷效果试验

考虑到各储冷腔的保冷措施相同,储冷腔内部结构对保冷效果没有影响,试验只对分层式储冷腔的保冷效果进行测试,测试的目的在于计算存储干冰期间干冰的损失率,可为孔底冷冻取样器样机的储冷腔容量、冷冻腔容量设计提供数据支持。为简化试验,试验在室温(19℃)条件下进行;根据实际|钻探施工时下钻和钻进耗时,存储时间定为1h。

试验中,称量1.5kg干冰(雪状),填装在储冷腔内,连接设备,关闭球阀4和6;存储1h,称量剩余干冰量。

#### 3.2.2 酒精制冷效果试验

试验对所设计的3种储冷腔制冷酒精的能力进行测试,并设置了无内部结构的空管式储冷腔作为对照组。为简化试验,试验在室温(19℃)条件下进行。

试验中,需设置好排气安全阀的排气压力(0.1 atm),连接各传感器,调试无纸记录仪;然后为储冷腔填装1kg干冰,酒精腔灌装1L酒精;依次打开球阀4和球阀6,使酒精经球阀4流入干冰腔5与干冰混合,混合后的低温酒精直接经过球阀6流入低温酒精腔7。待干冰腔体内部不再有气泡声且温度传感器的示数开始回升,则判定试验结束,记录试验开始、结束的时间。

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 保冷效果试验

根据多组试验的结果,得到的保冷效果试验数据如表1所示。

表1 保冷效果试验数据

组号	干冰填装量/kg	干冰剩余量/kg	存储时间/h	环境温度/℃	干冰损失率/%	平均损失率/%
1	1.5	1.07	1	19	28.7	
2	1.5	1.04	1	19	30.7	31.3
3	1.5	0.98	1	19	34.7	

保冷效果试验中,干冰损失率随试验先后顺序递增,平均干冰损失率为31.3%。因3组试验依次进行,所以3组试验所用干冰在空气中存放的时间依次递增,而存放越久,干冰升华量越大,干冰颗粒越小、表面的孔洞越多,即相对表面积越大。故分析认为干冰损失率受干冰颗粒相对表面积影响:干冰颗粒相对表面积越大,越不利于保冷。

总体来说,3组试验干冰损失率相差不大,试验所得干冰平均损失率可作为取样器储冷腔设计的参考数据。

#### 3.3.2 冷冻酒精效果试验

根据试验获得的数据,绘制了4种储冷腔在冷冻酒精效果试验中所得冷冻酒精的温度随时间的变化曲线,图8~11为各储冷腔在冷冻酒精试验中的酒精温度变化曲线。

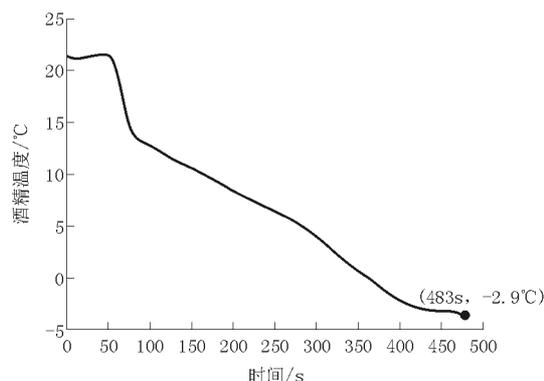


图8 空管式储冷腔酒精温度曲线图

由于先后流出储冷腔的酒精温度不同,传感器位于下酒精腔底部,可对图8~11中的曲线做如下解释:后流出酒精的温度低于下酒精腔内原有酒精的温度时,温度曲线表现出下降趋势,下降速率正比于流入酒精的流量、温差;后流出酒精的温度高于酒精腔内原有酒精的温度时,温度曲线表现出上升趋势,上升速率正比于酒精的流量、温差;考虑到环境温度的影响,在没有酒精流入(或流量极小)的情况下,

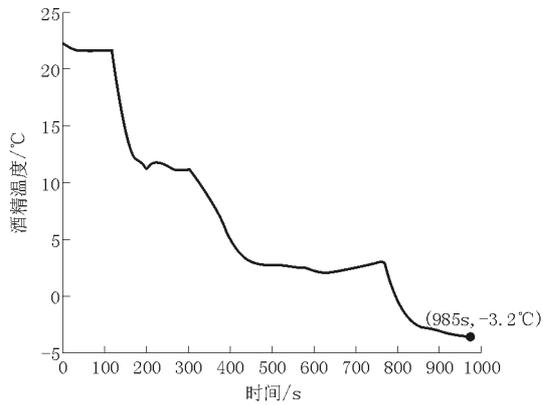


图9 分层式储冷腔酒精温度曲线图

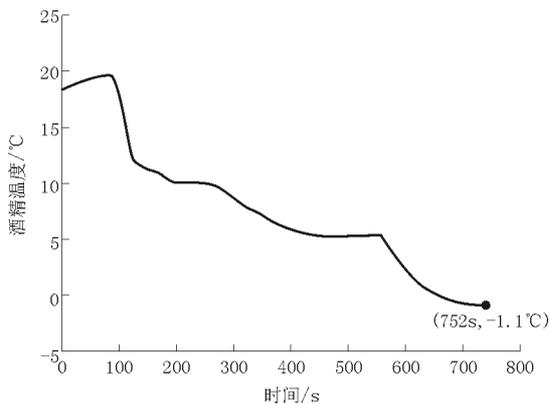


图10 螺旋阶梯式储冷腔酒精温度曲线图

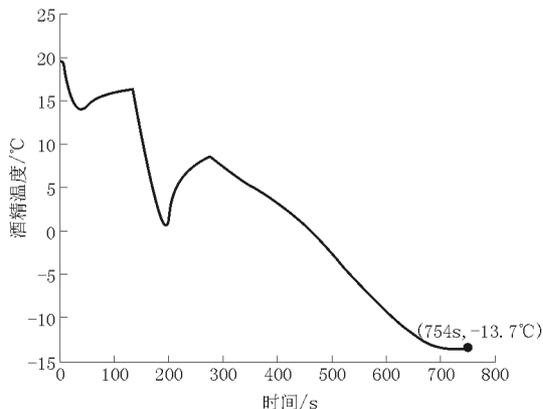


图11 带孔管式储冷腔酒精温度曲线图

酒精温度表现为缓慢回升。

下面结合各储冷腔的结构及干冰填装方式对试验数据进行探讨。

### 3.3.2.1 空管式储冷腔

如图8所示,53 s时温度开始下降,表明53 s时干冰酒精已较充分的混合,酒精穿过储冷腔开始流入下酒精腔;53~82 s下降速度快,之后温度下降速度缓慢,最终483 s时温度为 $-2.9^{\circ}\text{C}$ 。

由于酒精和干冰混合时间越长时酒精温度越

低,说明前期酒精未被充分冷冻时已大量流入储冷腔,后期流入酒精的温度虽更低,但酒精量少所以后期整体温度下降缓慢。

### 3.3.2.2 分层式储冷腔

如图9所示,131 s时温度开始下降;温度曲线形态呈三级阶梯状,每次温度下降后均形成一段恒温平台,最终985 s时温度为 $-3.2^{\circ}\text{C}$ 。

三级阶梯状的温度曲线,表明酒精流入酒精腔的过程是断续交替的,分析认为酒精在储冷腔中的流动过程如下。

(1)3个限流层板将储冷腔分隔为上、中、下3个腔,酒精流入上腔与干冰混合,持续产生二氧化碳,上腔与下酒精腔之间产生压差,气体推动酒精下行,经131 s开始流入下酒精腔,引发第一次温度下降;在此期间,少量酒精在中、下腔聚集。

(2)下腔干冰与流入的少量酒精混合,产生的二氧化碳气体上行,阻塞了酒精下行通道,中止了第一次温度下降并形成了第二个恒温平台;在此期间,大量酒精在中腔内聚集。

(3)中腔内干冰与酒精混合换热,持续产生二氧化碳气体并形成高压,阻碍上腔酒精下行,同时推动中腔酒精下行,引发第二次温度下降。

(4)中腔干冰消耗完后,上腔酒精在重力作用下缓慢流经中腔和下腔,最终流入下酒精腔,形成了第三个恒温平台和第三次温度下降。

### 3.3.2.3 螺旋阶梯式储冷腔

如图10所示,100 s后酒精腔温度开始下降;温度曲线整体呈下降趋势,试验中无明显规律,最终752 s时温度为 $-1.1^{\circ}\text{C}$ 。

该型储冷腔没有有效的限流措施,但因为流道最长,所以酒精滞留在储冷腔的时间较长;酒精在重力作用和上行气体的气体压力的共同作用下,形成了图中所示的温度曲线。

### 3.3.2.4 带孔管式储冷腔

如图11所示,2 s后酒精腔温度开始下降;2~36 s温度迅速下降,36~148 s温度缓慢回升,148~185 s温度再次迅速下降,185~179 s温度由急到缓的回升,之后有个长期而稳定的温度下降区间,最终754 s时温度为 $-13.7^{\circ}\text{C}$ 。

结合该型储冷腔的结构,分析认为酒精在储冷腔中流动、制冷过程如下。

(1)试验开始后,酒精在2 s内流入中心管,通

过管壁小孔渗入干冰腔中与干冰混合,开始产生二氧化碳气体;同时通过下部小孔流入下酒精腔引发了最开始的温度下降。

(2)随着干冰与酒精混合换热,二氧化碳气体在储冷腔聚集并产生高压,酒精滞留在中心管中;在环境温度作用下,下酒精腔内酒精缓慢升温,形成了迅速下降后的缓慢回升。

(3)二氧化碳经中心管流入上酒精腔,上酒精腔与储冷腔间压差逐渐减小,最终中心管内经过充分冷冻的酒精开始流入下酒精腔,形成第二次温度迅速下降。

(4)中心管内经充分冷冻的酒精全部流入下酒精腔后,上酒精腔中未经充分冷冻的酒精开始流入酒精腔,此时流入的酒精温度高于酒精腔内原有酒精,形成了图上温度先上升又下降的曲线形状。

表 2 为冷冻酒精试验数据统计表。

表 2 试验数据

储冷腔类型	酒精初始温度/℃	酒精最低温度/℃	降温幅度/℃	试验耗时/s
空管式储冷腔	21.5	-2.9	24.4	483
分层式储冷腔	22.4	-3.2	25.6	985
螺旋阶梯式储冷腔	21.8	-1.1	22.9	752
带孔管式储冷腔	22.6	-13.7	36.3	754

由表 2 可知,各储冷腔制冷酒精能力排序为:带孔管式 > 分层式 > 空管式 > 螺旋阶梯式;试验耗时排序为:分层式 > 带孔管式 > 螺旋阶梯式 > 空管时。带孔管式储冷腔制冷酒精能力最强,其约 12.5 min 试验耗时适用于一般钻探施工,是取样器储冷腔设计的最优方案。

#### 4 结论

(1)为天然气水合物孔底冷冻取样器设计了 3 种具有不同内部结构的储冷腔,分别为内置 3 层隔板的分层式储冷腔、内置螺旋阶梯层板的螺旋阶梯式储冷腔和内置带孔中心管的带孔管式储冷腔。

(2)为了给取样器样机设计提供依据,测试了储冷腔保冷能力。试验条件下,所设计储冷腔在 19℃ 的环境温度中存储 1.5 kg 雪状干冰 1 h,平均干

冰损失率为 31.3%。

(3)以空管式储冷腔为对照组,测试了所设计的 3 种储冷腔冷冻酒精的能力。试验条件下,分层式储冷腔可以在 985 s 内完成对酒精的冷冻,酒精的降温幅度为 25.6℃;螺旋阶梯式储冷腔可以在 752 s 内完成对酒精的冷冻,酒精的降温幅度为 22.9℃;带孔管式储冷腔可以在 754 s 内完成对酒精的冷冻,酒精的降温幅度为 36.3℃;对照组空管式储冷腔可以在 483 s 内完成对酒精的冷冻,酒精的降温幅度为 24.4℃。带孔管式储冷腔试验效果最佳,可作为取样器储冷腔的首选方案。

#### 参考文献:

- [1] 蒋国盛,王达,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,2002:1-19,65-96.
- [2] 徐文世,于兴河,刘妮娜,等.天然气水合物开发前景和环境问题[J].天然气地球科学,2005,(5):680-683.
- [3] 李丽松,苗琦.天然气水合物勘探开发技术发展综述[J].天然气与石油,2014,32(1):67-71+11-12.
- [4] 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.
- [5] 朱海燕,刘清友,王国荣,等.天然气水合物取样装置的研究现状及进展[J].天然气工业,2009,29(6):63-66,141.
- [6] 白玉湖,李清平.天然气水合物取样技术及装置进展[J].石油钻探技术,2010,(6):116-123.
- [7] 许俊良,任红.天然气水合物钻探取样技术现状与研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):4-9.
- [8] 郭威,孙友宏,张祖培,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):147-151.
- [9] 郭威,孙友宏,陈晨,等.干冰升华式孔底冷冻取样器冷源保冷方法的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):5-6,10.
- [10] 郭威,孙友宏,V. K. Chistyakov,等.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):1-6.
- [11] 郭威,孙友宏,陈晨,等.FPCS型天然气水合物孔底冷冻保压取样器的设计[J].机械设计与制造,2011,(1):24-26.
- [12] 郭威,孙友宏,陈晨,等.干冰升华式天然气水合物孔底冷冻取样器的研制[J].机械设计与制造,2011,(2):99-101.
- [13] 郭威,孙友宏,陈晨,等.陆地天然气水合物孔底冷冻取样方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,(4):1116-1120.
- [14] 孙友宏,刘大军,郭威,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术及冷冻方式[J].哈尔滨工程大学学报,2013,(11):1460-1464.
- [15] GB 50264—2013,工业设备及管道绝热工程设计规范[S].