

# 扁平绕带式低温高压容器绝热性能分析和计算

刘宝庆 蒋家羚 骆晓玲

(浙江大学化工机械研究所, 杭州, 310027)

摘要: 扁平绕带式低温高压容器是一种新型低温液体贮存设备, 由内外两层容器组成, 内筒体的外壁焊有液氮预冷夹套。平均蒸发率是衡量扁平绕带式低温高压容器绝热性能的重要指标。文中在分析其传热过程和壁厚温差影响因素的基础上, 提出了一种计算其蒸发率的工程方法, 并结合  $10\text{m}^3$  液氢储罐设计实例进行了计算。结果表明扁平绕带式低温高压容器具有良好的绝热性能, 适用于重要介质的低温贮运。

关键词: 低温 扁平绕带容器 传热

## 1 前言

低温高压容器用于液氢、液氧、液氮等低温液体贮存时, 它的绝热性能用平均蒸发率表示, 一般蒸发率小于 10% 为合格。文献 [1] 提出了一种新型的扁平绕带式低温高压容器, 该容器在结构设计与制造成本上均具有明显优势。为在理论上验证其低温适应性, 本文对绕带式低温高压容器的传热过程进行了分析, 同时结合  $10\text{m}^3$  液氢储罐, 对其蒸发率进行了计算。

## 2 传热过程分析<sup>[2]</sup>

新型扁平绕带式低温高压容器的具体结构如图 1 所示, 内容器由扁平绕带式筒体和多层球形封头组成, 外容器由单层筒体和椭圆型封头组成, 同时内容器外壁焊有液氮预冷夹套, 内外容器之间充填绝热材料。该种结构容器的安全性和经济性均较好。

扁平绕带式低温高压容器工作条件下的传热可分别从筒体和封头两部分进行分析计算。其中筒体的传热过程如图 2 所示, 包括: ①外容器与环境空气的对流传热; ②外容器本身的导热; ③多层绝热层的热辐射和热传导; ④夹套低真空传热(包括辐射传热及残余气体导热); ⑤绕带层热传导; ⑥绕带容器内壁与低温介质的传热。封头的传热过程与筒体相似, 只是由于封头部位没有夹套, 不存在低真空传热(详见图 3)。

## 3 传热计算

扁平绕带式低温高压容器的传热计算比较复杂, 其筒壁温差除受壁厚影响外, 还要受内部介质特性、绕带层数、层间接触性状(包括层间间隙和钢带表面质量)等因素的影响, 精确计算容器的传热存在困难。为简化问题, 对传热过程作以下假设: ①容器在稳定热流状态下

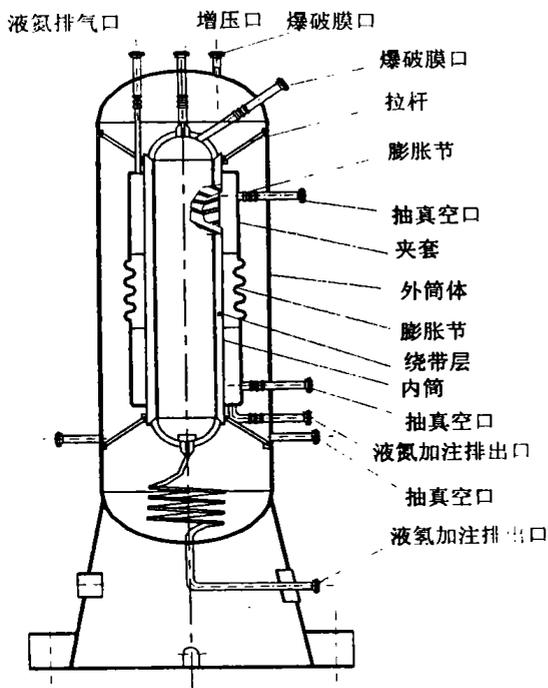


图 1 扁平绕带式低温高压容器示意图

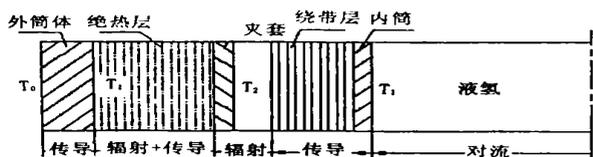


图 2 筒体传热过程示意图

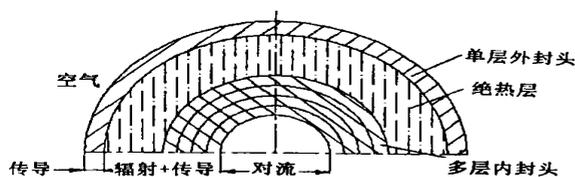


图 3 封头传热过程示意图

工作; ②所有材料均各向同性; ③圆柱筒体很长, 传热为一维径向热传导, 不考虑轴向温度梯度; ④对封头而言为球对称问题, 亦作一维径向热传导; ⑤内容器内壁与外容器外壁的温度等于相接触介质温度, 不计入自然对流换热。借助以上假设, 扁平绕带低温高压容器的传热可以只计算外容器、绝热层和绕带内容器三部分。

### 3.1 筒体传热

由于液氮预冷夹套低真空且其传热层厚度远小于绝热层厚度, 扁平绕带低温容器筒体传热可按内冷方式计算。

#### 3.1.1 外容器单位长度导热热量

外容器单位长度导热热量为

$$q_1 = \frac{T_0 - T_1}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{D_0}{D_{0i}}} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为材料导热率,  $W/m \cdot K$ ;  $T_1$  为外容器内壁温度,  $K$ ;  $D_0$ 、 $D_{0i}$  分别为外容器的外径和内径,  $mm$ 。

文献[ 1 ]设计实例中,  $\lambda = 14.8 W/m \cdot K$ ,  $D_0 = 2428mm$ ,  $D_{0i} = 2400mm$ ,  $T_0 = 293K$ , 代入式(1)得

$$q_1 = 8013 \times (293 - T_1) \quad (2)$$

#### 3.1.2 多层绝热体单位长度综合导热热量

在真空多层绝热中, 热量通过绝热体是以辐射、固体传导、气体传导等多种方式进行的, 要精确计算这部分热量十分困难。为此工程上采用总的表现导热系数  $K$ , 依下面公式

$$q_2 = \frac{K}{\delta L} A_m (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$A_m = \pi D_m L \quad (4)$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
 式中:  $K$  为绝热材料总的表现导热系数,  $W/m \cdot K$  (由文献[ 3 ]可查);  $T_2$  为内容器外壁

进行计算。

温度, K;  $L$  为筒体长度, m;  $\delta$  为绝热层厚度, m;  $D_m$  为绝热层当量直径, m;  $A_m$  为绝热层平均传热面积,  $m^2$ 。本例中  $L = 5.15m$ ,  $\delta = 0.03m$ ,  $A_m = 34.54m^2$ ,  $K = 2.512 \times 10^{-4}W/m \cdot K$ , 代入上面式子得:

$$q_2 = 0.056(T_1 - T_2) \tag{5}$$

### 3.1.3 扁平绕带内容器单位长度导热量

扁平绕带式内容器由于钢带表面质量及贴合质量的影响, 在层间热量传递时会出现附加热阻——层间热阻。一些学者对层间热阻的测定进行了深入研究, 其中文献[4]通过对实型容器传热系数的测定, 发现层间热阻与多层钢带的贴紧程度有关, 在绕带式容器经自增强处理, 同时间隙有铝粉弥和情况, 可以只考虑接触热阻, 忽略空气隙热阻。于是, 内容器总热阻可按式计算。

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_1}{r_i} + \sum_{j=1}^m \frac{R_c}{2\pi r_j} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda\beta} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} \tag{6}$$

上式右端第一项为薄内筒热阻, 第二项为层间接触热阻, 第三项为绕带热阻。参数  $R_c$  为不锈钢绕带的层间平均热阻,  $m^2 \cdot K/W$ ;  $\beta$  为绕带轴向间隙系数, 一般为  $0.92 \sim 0.98$ 。文献[1]设计实例中, 内容器因低温条件选用 0Cr19Ni9 材料, 它在 20K 下的导热率  $\lambda = 2.3W/m \cdot K$ ; 层间平均接触热阻按预压应力的估算, 参照文献[5]的推荐值, 取为  $R_c = 1.5 \times 10^{-4} m^2 \cdot K/W$ ; 钢带轴向间隙系数  $\beta = 0.95$ ; 绕带层数  $n = 26$ , 同时考虑到薄内筒和外保护壳, 间隙数  $m = 28$ ;  $r_j$  的系列值由表 1 给出。

表 1 筒体  $r_j$  系列值

间隙序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_j (\times 10^{-3}m)$	842	850	858	866	874	882	890	898	906	914
间隙序号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$r_j (\times 10^{-3}m)$	922	930	938	946	954	962	970	978	986	994
间隙序号	21	22	23	24	25	26	27	28		
$r_j (\times 10^{-3}m)$	1002	1010	1018	1026	1034	1042	1050	1058		

将上面参数代入式(6)中各项得

薄内筒热阻  $\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_1}{r_i} = \frac{1}{2\pi \times 2.3} \ln \frac{842}{800} = 3.54 \times 10^{-3} m \cdot K/W$

层间接触热阻  $\sum_{j=1}^m \frac{R_c}{2\pi r_j} = \frac{R_c}{2\pi} \sum_{j=1}^{28} \frac{1}{r_j} = 7.07 \times 10^{-4} m \cdot K/W$

绕带热阻  $\sum_{j=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda\beta} \ln \frac{r_{j+1}}{r_j} = \frac{1}{2\pi\lambda\beta} \left( \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_3}{r_2} \dots \ln \frac{r_{27}}{r_{26}} \right)$   
 $= \frac{1}{2\pi\lambda\beta} \ln \frac{r_{27}}{r_1} = 1.6 \times 10^{-2} m \cdot K/W$

扁平绕带内容器的总热阻  $R = 3.54 \times 10^{-3} + 7.07 \times 10^{-4} + 1.6 \times 10^{-2}$   
 $= 0.02 m \cdot K/W$

于是单位长度导热量  $q_3 = \frac{T_2 - T_i}{R} = \frac{T_2 - 20}{0.020} = 50(T_2 - 20)$  (7)

### 3.1.4 筒体部分传热热量

根据传热学理论, 筒体各层单位长度的传热热量在数值上是相等的, 即  $q_1 = q_2 = q_3$  (8)

将方程(2)、(5)及方程(7)、(8)联立求解得

$$T_1 = 292.998\text{K}, T_2 = 20.32\text{K}, q_1 = q_2 = q_3 = 16.05 \text{ W/m}$$

$$\text{所以筒体部分传热量 } Q = qL = 82.66\text{W}$$

上述计算结果表明,扁平绕带式内容器和外容器的壁厚温差都很小,可以完全忽略。因此稳定工作状况下,绕带层间贴合不存在低温松脱的问题,容器在结构上是安全的。

### 3.2 封头传热

外容器封头为单层椭圆形,内容器封头为多层球形,由四层不锈钢板一次冲压成型。根据前面的筒体传热计算知,外容器内外壁面温度近似相等。在这种情况下,封头的传热计算可以不计外容器传热,而只考虑绝热层与多层封头的传热。

#### 3.2.1 绝热层传热量

内容器封头的外表面包围着多层绝缘材料,以辐射、传导方式向外传递的热量为

$$Q_1 = (k/\delta)A_m(T_0 - T) \quad (9)$$

式中  $k = 2.512 \times 10^{-4} \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $\delta = 0.03\text{m}$ ,  $T_0 = 293\text{K}$ ,  $A_m = 5.49\text{m}^2$ , 代入式(9)得

$$Q_1 = 0.046(293 - T) \quad (10)$$

#### 3.2.2 多层封头传热量

当考虑层间热阻时,多层封头的传热量可用下面方程确定  $Q_2 = \frac{T - T_i}{R}$  (11)

$$R = \sum_{j=1}^m \frac{r_{j+1} - r_j}{4\pi\lambda_j r_{j+1}} + \sum_{j=1}^n \frac{R_c}{4\pi r_j^2} \quad (12)$$

其中式(12)右端第一项为层板热阻,第二项为层间接触热阻。设计实例中,  $T_i = 20\text{K}$ ,  $m = 4$ ,  $n = 3$ ,  $R_c = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,  $\lambda = 2.3\text{W/m} \cdot \text{K}$ ,  $r_j$  的系列值由表 2 给出。

表 2 封头  $r_j$  系列值

间隙序号	0	1	2	3	4
$r_j (\times 10^{-3} \text{ m})$	800	830	860	890	920

将上述已知量分别代入式(11)、(12)得  $R = 5.69 \times 10^{-3} \text{ K/W}$ ,  $Q_2 = 175.75(T - 20)$  (13)

#### 3.2.3 封头部分传热量

与筒体相似,通过多层封头和绝热层的热量相等,即  $Q_1 = Q_2$  (14)

联立方程(10)、(13)、(14)解得  $T = 20.07\text{K}$ ,  $Q_1 = Q_2 = 12.478\text{W}$

### 3.3 机械构件漏热计算

机械构件的漏热包括接管和支承件两部分,计算公式为  $Q = \frac{\lambda A_0}{l}(T_b - T_a)$  (15)

式中:  $\lambda$  为接管或支承件在  $T_a \sim T_b$  温区的平均导热率,  $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ;  $l$  为接管或支承件长度,  $\text{m}$ ;  $A_0$  为接管或支承件的截面面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_a$ 、 $T_b$  分别为冷热端温度,  $\text{K}$ 。设计实例中,机械构件的漏热量由表 3 给出。

表 3 接管和拉杆漏热量

项 目	液氢加注排泄管	液氢排气管	增压管	拉 杆
漏热量(W)	12.08	42.21	9.50	133.92
总的机械漏热量(W)	197.71			

### 3.4 平均蒸发率 $\eta$ 的计算

平均蒸发率是 24 小时内扁平绕带低温容器吸入热量使介质蒸发的量与介质总量之比。其中低温容器吸热包括传热和漏热两部分,相应计算公式为:

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{筒体}} + Q_{\text{封头}} + Q_{\text{漏热}} \quad (16) \quad V = \frac{Q_{\text{总}}}{r\rho} \quad (17) \quad \eta = \frac{V}{V_0} \quad (18)$$

式中:  $\gamma$  为汽化潜热,  $\text{kJ/kg}$ ;  $\rho$  为介质密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $V_0$  为介质总容积,  $\text{m}^3$ ;  $\eta$  为蒸发率。对于  $10\text{m}^3$  绕带式液氢储罐而言,  $V_0 = 10\text{m}^3$ ,  $\gamma = 445.9\text{kJ/kg}$ ,  $\rho = 70.9\text{kg/m}^3$ ,<sup>[6]</sup>

$$Q_{\text{总}} = (82.66 + 12.478 + 197.71) \times 24 \times 3600 = 2.53 \times 10^4 \text{kJ}$$

代入上式计算得  $\eta = 8\%$ , 满足低温容器的绝热要求。

## 4 结束语

本文就新型扁平绕带式低温高压容器的传热过程进行了分析, 提出一种计算其蒸发率的工程方法, 同时结合  $10\text{m}^3$  液氢储罐进行试算。结果表明, 扁平绕带式低温高压容器具有良好的绝热性能, 适用于重要介质的低温贮运。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋家玲, 黄海军, 骆晓玲. 新型扁平绕带式低温高压容器设计研究. 低温工程, 2001, (3)
- [2] 骆晓玲. 大型高压液氢容器设计研究: [博士论文]. 杭州: 浙江大学, 2000
- [3] 达道安等. 真空设计手册(修正版). 北京: 国防工业出版社, 1995
- [4] Armstrong W P, Jaward M H, Evaluation of Thermal Conductivity in Layered Vessels Journal of Pressure Vessel Technology, 1981, (4)
- [5] 丸山武志, 千河宏. 多层圆筒的热传导. 化工与通用机械, 1977, (7)
- [6] 萧成基等. 化学工程手册(第 13 篇), 汽液传质设备. 北京: 化学工业出版社, 1979

### Adiabatic Performance Analysis of Cryogenic High Pressure Vessel wound by Flat Metal Strip

Liu Baoqing, Jiang Jialing, Luo Xiaoling

(Research Institute of Chemical Mechanic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

**Abstract:** Cryogenic high-pressure vessel wound by flat metal strip with a liquid nitrogen precooling jacket is a new fashion adiabatic equipment, which consists of inter vessel and outer vessel. The average evaporating ratio is an the important parameter to scale its adiabatic performance. Based on the analysis of its heat transfer process and the effecting factors of temperature difference, this paper provided an engineering method to calculate the evaporating ratio, and had a calculation combined with the example of  $10\text{m}^3$  liquid hydrogen storage. The result showed that the cryogenic vessel wound by flat metal strip has the preferable adiabatic performance and is suitable for cryogenic storage of important medium.

**Keywords:** Cryogenic, Vessel wound by flat metal strip, Heat transfer

作者简介: 刘宝庆, 男, 1978 年生. 浙江大学博士生, 主要从事节能环保型承压单元设备等的研究。