

## 真空多层绝热 LHe 输送管设计计算与传热分析

陈长琦<sup>1</sup>, 乐瑞文<sup>1</sup>, 欧阳峥嵘<sup>2</sup>, 孙 铭<sup>1</sup>, 胡纯栋<sup>2</sup>

1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**文章根据系统对输送管的性能要求,进行了 LHe 输送管结构设计和绝热材料的选型,计算真空多层绝热管的真空性能及传热性能的主要参数,求出其真空夹层的最大允许漏率及单位管长的热损失。经 NBI 实验,表明该管在 100 L LHe 输送中热损小,满足设计需要。

**关键词:**真空多层绝热; Lhe 输送管; 传热分析

**中图分类号:** V434.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5060(2006)08-0937-04

### Design, calculation and heat transfer analysis of an LHe transfer line with vacuum multilayer insulation

CHEN Chang-qi<sup>1</sup>, LE Rui-wen<sup>1</sup>, OUYANG Zheng-rong<sup>2</sup>, SUN Ming<sup>1</sup>, HU Chun-dong<sup>2</sup>

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A liquid helium(LHe) transfer line with vacuum multilayer thermal insulation(VMLI) has been designed for a neutral beam injection(NBI) system. The structure of the VMLI LHe transfer line is designed and the thermal insulation material is selected in view of the requirements of the NBI system. The vacuum and heat transfer characteristics of the transfer line are designed and calculated. The maximum permitted leak rate of the vacuum jacket is limited within  $1.8 \times 10^{-6}$  Pa · L/s, and the thermal loss of this line is 0.886 W/m. The designed LHe transfer line has been fabricated and used in the preliminary experiment of the NBI system. In the 100 L LHe transfer process, the thermal loss met the requirement of the NBI system.

**Key words:** vacuum multilayer insulation; LHe transfer line; analysis of heat transfer

NBI(neutral beam injection)系统是 Tokamak 的重要加热装置<sup>[1,2]</sup>。现配置的 LHe 低温冷凝泵为贮槽式,其中一台体积流量为 20 000 L/s,另一台为 400 000 L/s。投入运行需定期输入 Lhe,真空多层绝热 LHe 输送管的设计对降低 LHe 消耗及提高低温冷凝泵的运行经济性起关键的作用。

为满足低温冷凝泵 LHe 由移动储罐向泵内 LHe 杜瓦加注的需要,设计制造了一根真空多层

绝热 LHe 输送管。NBI 系统要求挠性管长度为 2.8 m, 通径为  $\varnothing 10$  mm, 使用寿命 5 a, 其漏率必须保证管路夹层真空优于  $1.33 \times 10^{-2}$  Pa, 单位管长的热损失低于 1 W/m。

#### 1 LHe 输送管设计

##### 1.1 绝热型式选择

低温输液管的绝热型式包括非真空绝热和真空绝热两大类型。非真空绝热也称普通堆积绝

收稿日期:2005-01-12;修改日期:2006-03-17

基金项目:中国科学院“十五”装备择优资助项目(SYKXD04)

作者简介:陈长琦(1947—),男,安徽怀宁人,合肥工业大学教授,硕士生导师。

热,即在需要绝热的表面上包裹一定厚度的绝热材料,以达到绝热的目的。真空绝热即在绝热空间保持一定的真空度以提高绝热性能。绝热型式分成真空多孔绝热、高真空绝热和真空多层绝热等几种。真空多层绝热是一种在真空绝热空间安置多层平行于冷壁的辐射屏,从而大幅度减少辐射而达到高效绝热目的的一种绝热结构。

对多层绝热模型,当达到热平衡时,有

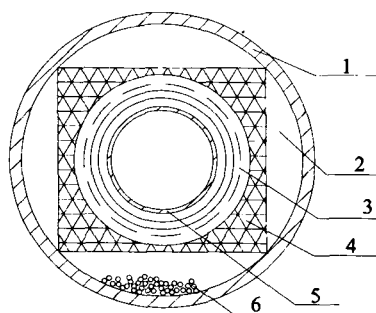
$$q = 1/(n+1)\sigma S(\epsilon/2 - \epsilon)(T_{n+2}^4 - T_1^4) \quad (1)$$

其中, $q$  为比热流,  $W/m^2$ ;  $n$  为辐射屏层数;  $\sigma$  为黑体辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $S$  为发射表面积,  $m^2$ ;  $\epsilon$  为发射率;  $T_1$ 、 $T_{n+2}$  为 2 壁温度,  $K$ 。

由(1)式知,在温度分别为  $T_1$ 、 $T_{n+2}$  的 2 壁面之间安置  $n$  层辐射屏后,其辐射传热减小到原来的  $1/(n+1)$ ,效果十分显著。由于真空多层绝热真空度高,残余气体的导热和对流也降低到最小。目前普通堆积绝热的有效热导率一般劣于  $10^{-2} W/(m \cdot K)$ ,真空多孔绝热为  $10^{-2} \sim 10^{-3} W/(m \cdot K)$ ,高真空绝热为  $10^{-3} W/(m \cdot K)$ ,真空多层绝热可以达到  $10^{-5} \sim 10^{-6} W/(m \cdot K)$  的水平<sup>[3]</sup>。由于真空多层绝热结构是目前绝热效果最好的一种绝热型式,目前广泛应用于低温工程领域<sup>[4,5]</sup>,故本设计选用该绝热型式。

## 1.2 结构设计

真空多层绝热 LHe 输送管结构,如图 1 所示。真空多层绝热 LHe 输送管的内管为通径  $\varnothing 10$  mm 波纹管,长度为 2 800 mm,壁厚为 0.1 mm;外管为通径  $\varnothing 32$  mm 波纹管,长度为 2 800 mm,壁厚为 0.2 mm。波纹管均采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料。



1. 外壳 2. 真空夹层 3. 多层绝热材料  
4. 绝热支撑 5. 内管 6. 活性炭

图 1 真空多层绝热 LHe 输送管结构示意图

该管道在 LHe 输送中,从室温降到 LHe 温度会产生收缩效应,每米管长约收缩 3 mm,采用波纹管即满足温度补偿要求。内管的外表面用多层绝热材料绕制,为防止多层绝热材料与外管内壁表面直接接触而使热传导增加,在输液管内管外侧多层绝热材料与外管内壁之间,全长 2.8 m 等距设置 3 个材料为聚四氟乙烯的正方形支撑,内外管之间形成一环形真空夹层。

## 1.3 多层绝热屏设计与材料选择

单位厚度内多层绝热辐射屏的数目称层密度  $N$ ,层密度增加时,辐射传热将减小,而接触热阻减小,固体导热将增加,因此存在最佳层密度。综合考虑辐射与导热的影响,现按层密度  $N$  为 24 层/cm 进行双面喷铝涤纶薄膜和植物纤维纸的组合包扎,共包扎 20 层。

本输液管的多层绝热材料,选用辐射屏为 0.002 mm 厚预先均匀开圆形孔的双面喷铝涤纶薄膜和间隔材料为 0.05 mm 厚的植物纤维纸的组合,该绝热材料在内管外表面缠绕。双面喷铝涤纶薄膜因其两表面的发射率都低于 0.1,对辐射的绝热效果明显好于单面喷铝涤纶薄膜。

受多层绝热材料放气及其抽气阻力的影响,材料层间的真空度往往比表观真空度低 50~100 倍<sup>[4]</sup>。为提高多层绝热真空度,尤其是提高材料层间的真空度,选用预先开圆形孔的绝热屏,以利于改善真空度而提高绝热性能。本输液管选用的双面喷铝涤纶薄膜预先均匀开  $\varnothing 5$  mm 圆形孔,孔间距为 50 mm。

## 1.4 真空夹层设计与计算

夹层真空度的优劣以及其所能保持时间的长短,对整个管道的绝热性能会产生直接影响,优良的真空环境对夹层内由残余气体分子带来的热传导及对流的热损降至最小。

如图 2 所示<sup>[4]</sup>,真空度降低会导致有效热导率急剧上升,当真空度高于  $10^{-2}$  Pa 时有效热导率变化很小,因而设定  $1.33 \times 10^{-2}$  Pa 为夹层内必须保证的真空度。

由于真空夹层的漏气以及材料自身的放气,为保证夹层内真空优于  $1.33 \times 10^{-2}$  Pa,真空夹层内放置活性炭吸附剂吸气以维持其真空,其用量按负荷率  $5 \times 10^{-2}$  L/g 和真空夹层空间容积计算。根据结构设计,真空夹层空间容积为 1.8 L,

则所需活性炭吸附剂用量为 36 g,其体积约为 0.019 4 L。

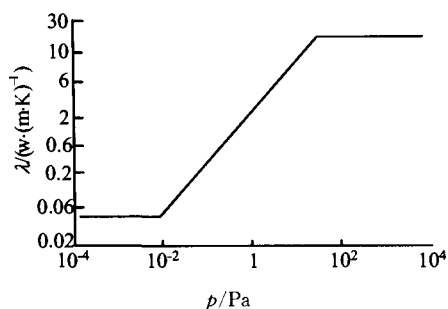


图 2 表现真空度与有效热导率之间的关系

现按使用寿命 5 a 的要求,计算真空夹层的允许漏气率。在使用寿命内空气会通过焊缝密封元件等漏入真空夹层,其中  $N_2$ 、 $O_2$ 、Ar 等主要成分均可被夹层中的吸附剂吸附,不影响夹层在低温工作条件下的真空度,而 He、Ne 则不太容易被吸附,因此必须计算 He、Ne 的总漏率作为该管真空夹层的最大允许漏气率。在标准状态下,漏入夹层的单位绝热体积的空气量为

$$V = q_v t / p_0 \quad (2)$$

其中,  $q_v$  为真空夹层的允许漏气率,  $(Pa \cdot L)/s$ ;  $t$  为寿命期, s;  $p_0$  为标准大气压,  $1.013 \times 10^5 Pa$ 。使用终期的 He、Ne 分压和为

$$p_{He+Ne} = V w_{He+Ne} p_0 \quad (3)$$

其中,  $w_{He+Ne}$  为大气中的 He 和 Ne 的质量分数,约为  $2.32 \times 10^{-5}$ , 则

$$p_{He+Ne} = 3.658 q_v \quad (4)$$

因为要求寿命期内保证夹层内真空优于  $1.33 \times 10^{-2} Pa$ ,  $p_{He+Ne}$  必须满足为

$$p_{He+Ne} \leq 0.5 \times 1.33 \times 10^{-2} \quad (5)$$

由(4)、(5)式得

$$q_v \leq 1.82 \times 10^{-6} \quad (6)$$

LHe 输送管经氮质谱检漏仪检测真空夹层的漏气速率为  $5 \times 10^{-7} Pa \cdot L/s$ , 满足设计要求。

## 2 LHe 输送管传热参数计算与性能分析

### 2.1 传热性能参数计算

LHe 输送管辐射单位管长热损失为

$$Q_F = \epsilon_s X_{in-at} \sigma_0 S_{in} (T_{at}^4 - T_{in}^4) \quad (7)$$

其中,  $\epsilon_s$  为系统发射率;  $X_{in-at}$  为冷表面对热表面的辐射角系数, 因内管被外管所包容,  $X_{in-at} = 1$ ;

$\sigma$  为黑体辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $S_{in}$  为单位管长内管外表面积,  $0.037 68 m^2/m$ ;  $T_{in}$  为内管温度,  $4.2 K$ ;  $T_{out}$  为外管温度,  $293 K$ 。系统发射率为

$$1/\epsilon_s = (1/\epsilon_{in} + (1/\epsilon) - 1) + (n-1)(2/\epsilon - 1) + (1/\epsilon_{out} + 1/\epsilon - 1) \quad (8)$$

其中,  $\epsilon_{in}$  为内管外表面发射率, 取  $\epsilon_{in} = 0.80$ ;  $\epsilon_{out}$  为外管内表面发射率, 取  $\epsilon_{out} = 0.80$ ;  $\epsilon$  为双面喷铝涤纶薄膜发射率, 查文献[6],  $\epsilon = 0.06$ , 考虑到材料的实际情况, 实取  $\epsilon = 0.1$ ;  $n$  为辐射屏层数;  $n = 20$  层。经计算,  $\epsilon_s = 2.62 \times 10^{-3}$ 。

由(1)式, LHe 输送管单位管长辐射热损失  $Q_F = 0.035 W/m$ 。LHe 输送管单位管长缠绕层固体导热计算[7]为

$$Q_c = [8.953 \times 10^{-8} N^{256} S_{in} (T_{out}^2 - T_{in}^2)] / 2n \quad (9)$$

其中,  $N$  为缠绕层层密度, 24 层/cm。计算得  $Q_c = 0.824 W/m$ 。LHe 输送管单位管长残余气体分子热传导计算[7]为

$$Q_q = [4.886 \times 10^4 p S_{in} (T_{out}^{0.26} - T_{in}^{0.26})] / 133n \quad (10)$$

其中,  $p$  为夹层真空度,  $p = 1.33 \times 10^{-2} Pa$ , 则  $Q_q = 0.022 4 W/m$ 。

由上述计算可得该真空多层绝热 LHe 输送管的单位管长总的热损失  $Q = 0.886 W/m$ , 优于 1 W/m 的 NBI 系统要求。

### 2.2 传热性能分析

在真空多层绝热 LHe 输送管中, 既有辐射屏与辐射屏之间、辐射屏与间隔材料之间的辐射传热, 又有多层材料之间的固体热传导及残余气体导热等多种传热途径。同时, 多层材料的种类及其结合方式、夹层的真空度、绝热材料的层密度、多层厚度、温度及机械负荷等许多因素都对真空多层绝热的绝热性能产生影响[8~10]。

该管的输液管热损失中, 辐射热和真空夹层中的残余气体分子热传导占的比例较低, 大部分为缠绕层固体导热损失。由此可见, 多层双面喷铝涤纶薄膜对辐射热的降低以及夹层真空对残余气体分子热传导的降低都达到了显著效果。

## 3 结束语

NBI 系统真空多层绝热 LHe 输送管的设计计算和传热分析结果表明, 真空多层绝热的结构

满足了系统的要求。加工制造成的 LHe 输送管经检测,其夹层真空为  $6.5 \times 10^{-4}$  Pa,漏率为  $5 \times 10^{-7}$  (Pa·L)/s,达到了设计指标。该输液管用于 NBI 系统的初步试验,在 100 L LHe 输送中热损小,满足实验需要,其传热性能试验及参数测试有待进一步研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 张华顺. 离子源和大功率中性束源 [M]. 北京:原子能出版社,1987. 358.
- [2] Kim J. Vacuum pumping of multimewatt neutral beam injection lines [J]. J Vac Sci Technol, 1984, (2): 1180—1187.
- [3] 徐 烈. 我国低温绝热与贮运技术的发展与应用 [J]. 低温工程, 2001, (2): 1—8.
- [4] 徐 烈,朱卫东,汤晓英. 低温绝热与贮运技术 [M]. 北京:机械工业出版社,1999. 45—53.

- [5] Weisend J G H. Handbook of cryogenic engineering [M]. Hamburg: Taylor & Francis, 1999. 186.
- [6] 达道安. 真空设计手册 (第 3 版) [M]. 北京:国防工业出版社,2004. 435.
- [7] 何家声. 液氢管路绝热设计与效果分析 [J]. 低温工程, 2005, (1): 17—20.
- [8] Ohmori T. Thermal performance of multilayer insulation around a horizontal cylinder [J]. Cryogenics, 2005, 45: 725—732.
- [9] Krishnaprakas C K, Narayana, K B, Dutta P. Heat transfer correlations for multiplaye insulation systems [J]. Cryogenics, 2000, 40: 431—435.
- [10] Jacob S. Investigation into the thermal performance of multilayer insulation (300—77K) [J]. Cryogenics, 1992, 32: 1137—1146.

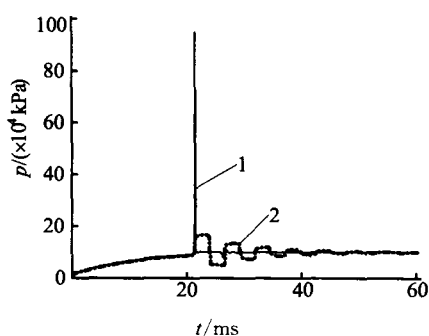
(责任编辑 吕 杰)

### (上接第 936 页)

速率增大,喷油持续时间变短。可见,要保证一定的喷油速率和短的喷油持续时间,喷孔直径应选择大一些。但随着喷孔直径的增大,喷油压力却降低,燃油雾化质量变差。从这个意义上来说,小的喷孔直径更有利,但喷孔直径过小会使喷油持续时间有所延长<sup>[8]</sup>。

### 3.4 油管参数对压力冲击的影响

在系统其他参数一定的情况下,改变油管的长度或管径,相当于改变了油管的容积。从共轨油道到喷油器油管的长度对压力冲击影响很大,如果过短,则产生很大的压力冲击,从而影响高压腔内的压力波动,进而会对喷油量和喷油压力产生影响。图 5 所示为共轨油压 10 MPa,不同油管长度产生的管内压力波动曲线。



1. 管长 1 250 mm 2. 管长 1 500 mm

图 5 管长对压力波动的影响

### 4 结束语

通过对电控共轨蓄压燃油喷油系统输油管道的仿真计算和实验结果对比发现,利用软件新开发的燃油喷射模块建立的电控蓄压式喷油系统模型可以满足要求,并可以灵活方便地改变各种参数,通过分析比较达到参数优化及改进系统性能等目的,有利于缩短喷油系统的开发周期和减少开发工作的盲目性。

### [参 考 文 献]

- [1] 汪 云. 电控柴油机共轨蓄压式喷油系统仿真概述 [J]. 内燃机, 2004, (11): 24—26.
- [2] 蔡遂生,常久鹏. 共轨蓄压式电控泵喷嘴系统的实验研究 [J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2000, 20(6): 672—676.
- [3] 陈 硕. 柴油机燃油喷射系统的数值模拟研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 1998.
- [4] 张红光. 柴油机电控蓄压式喷油系统的开发与应用研究 [D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院, 1998.
- [5] 姜 利. 柴油机共轨蓄压式电控燃油喷射系统仿真研究 [D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院, 2002.
- [6] 顾力强,赵继云. 面向对象的柴油机燃油供给系统计算机仿真程序设计 [J]. 机械, 1998, (5): 32—34.
- [7] Chen S K. 一种先进的电控液燃燃油喷射系统模型 [J]. 现代车用动力, 1996, (1): 27—32.
- [8] 谢 辉,孙 方. PAIRCUI 电控燃油系统共轨压力控制特性 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2001, 34(2): 167—170.

(责任编辑 吕 杰)