# 高温超导磁悬浮环形杜瓦的漏热分析

黄涵洋<sup>123</sup> ,王国民<sup>12</sup>

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,南京 210042;

2. 中国科学院天文光学技术重点实验室,南京 210042; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:对高温超导磁悬浮环形杜瓦进行了漏热分析。在杜瓦内部采用真空多层绝热结构,并在整个外表面包 裹了玻璃微纤维深冷绝热纸,工艺简单,绝热效果良好。通过传热学理论分析和计算,得到杜瓦的漏热量及液氮的 损耗量。结果表明,固体传导漏热为主要的漏热来源,液氮维持的时间能达到技术要求的10小时,整个杜瓦装置 的绝热性能良好。

关键词: 天文望远镜; 高温超导磁悬浮; 环形杜瓦; 漏热分析

Heat leakage analysis of annular dewar for HTSC test system

Huang Hanyang<sup>1 2 3</sup>, Wang Guomin<sup>1 2</sup>

(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology , Chinese Academy of Sciences , Nanjing 210042 , China;

2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology , Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology ,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract**: Heat leakage analysis of annular dewar for HTSC test system was discussed in this paper. The dewar adopted the structure of vacuum adiabatic multilayer inside , and totally wrapped up with micro glass fiber cryogenic insulation paper in outer surface , which had simple technology and good adiabatic effect . This text calculated the heat leakage of dewar and the liquid nitrogen wastage theoretically from the heat transfer theory. The results show that solid conducting heat leakage is the main source of heat leakage and the liquid nitrogen can remain more than ten hours as the technique requirements. The thermal insulation performance of the annular dewar proposed in this paper can meet the technical requirement.

Keywords: Astronomical telescope, HTSC, Annular Dewar, Heat leakage analysis

1 引言

利用高温超导磁悬浮的自稳定特性,在高温 超导磁悬浮轴承、飞轮储能、轨道交通工具等方面 的研究均展现出很好的应用前景<sup>[1]</sup>。由于地球 上人造光的污染和大气层湍流的影响,让天文学 家把目光转向了空间、南极和月球,目前这些地方 已是国际上公认的架设望远镜进行天文观测的最 佳地点。但这些地方的环境非常恶劣,能源供应 又非常紧张。如南极低温达到 – 89℃,月球表面 是一层厚厚的月尘,在月球超高真空的环境下,无 孔不入。传统的机械轴承在这些地方无法实现天 文望远镜的高精度天体跟踪。为此,在国家自然 科学基金的支持下,试探把高温超导磁悬浮支承 引进这些特殊地方的天文望远镜的轴系支承,以 期解决机械轴承在这些地方使用的难题。高温超 导磁悬浮系统中,首先要解决的就是低温的绝热 系统,并且要求绝热系统的保温性能要好。国内 有部分科研院所在这方面做过研究,如西南交通 大学研发的小型薄底杜瓦装置<sup>[2]</sup>,这种杜瓦可以 保证在永磁轨道上有足够的悬浮高度,并且持续 工作的时间大于16个小时。本文将根据天文望 远镜方位转台结构的支承特点,研制了一种环形 杜瓦装置。本文先对环形杜瓦的结构进行了介 绍,然后对漏热情况进行了分析计算。计算表明, 固体的传导是漏热的主要原因,采用改进措施后,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10973024)。

作者简介:黄涵洋(1990-),男,硕士研究生,研究方向:精密跟踪与控制技术。

收稿日期:2013-01-04

液氮维持的时间能达到技术要求的 10 小时 表明 整个杜瓦装置的绝热性能良好。

# 2 结构及传热分析

杜瓦罐的简化结构和热传导如图 1 所示。杜 瓦内腔液氮区里面设有支撑结构,作用是放置超 导块,因为不影响传热,这里没有表示出来。杜瓦 罐的材料选用 0Cr18Ni9,在内壳的外表面,外壳 的内表面,外壳的底面分别缠上 10mm 厚的铝箔 玻璃纤维多层绝热材料,真空室抽真空至 0. 01Pa。图 2 为其实物照片。



1. 端盖; 2. 外圈法兰; 3. 杜瓦外壳; 4. 内腔液氮区; 5. 内壳; 6. 内圈法兰

#### 图1 环形杜瓦的结构和热传导示意图

Fig. 1 Heat conducting schematic of annular dewar



图 2 环形杜瓦实物图 Fig. 2 Picture of annular dewar

经过传热分析 环形杜瓦有沿着法兰、内壳和端 盖从外部环境到内腔低温区的固体导热 Q,; 从外壳 内表面辐射到内壳外表面的辐射传热 Q,; 外壳和内 壳组成的真空室内的残余气体的气体导热 Q,。

3 漏热计算

### 3.1 固体传热 Q

因为法兰、端盖直接与外部环境接触,固体传 热简化为沿着内壳轴向和端盖从 300K 到 77K 的 传热。内壳由内外 2 个管道组成,因此,固体导热 分为三部分 Q<sub>s1</sub>、Q<sub>s2</sub>和 Q<sub>s3</sub>。前两者的形状一致, 故计算方法一致。

以内管为例,设管壁厚为 $\delta$ ,内管横截面积为 A,外部环境温度即室温 $T_2 = 300$ K,内管总长度即 液氮面位置高为 *l* 则外界沿管道经 *l* 长度传向液 氮的固体导热 *Q* 为<sup>[3]</sup>:

$$Q_s = \frac{A}{l} \int_{T_1}^{\mathbb{Z}} \lambda(T) \, \mathrm{d}T \quad (\mathrm{J/s})$$
(1)

式中  $A = 2\pi (r_1 - \delta/2) \delta$  , $r_1$  是内管外径 , $\lambda$ (*T*) 是材料的导热系数(是温度 *T* 的函数)。我们 采用的是不锈钢材料 ,查表<sup>[3]</sup> 求出:

 $\int_{77K}^{300K} \lambda(T) \, \mathrm{d}T = 30.21 \quad (W/cm)$ 

实际上,在实验的过程中,液氮是不停地挥发的,所以液氮面在不断下降,/不停减小,Q,也在不停减小。/是与液氮的挥发速率有关的,所以我们无法准确的计算出Q,。但由于实验需要,为了保证超导块始终接触液氮,我们会按时往里面注入液氮,所以/可近似恒值。

对于端盖的漏热是平壁导热 ,壁厚为 d ,端盖 横截面积为  $A^{2}$  , $T_{1} = 77$ K , $T_{2} = 300$ K ,则通过端盖 的固体导热  $Q_{3}$ 为<sup>[4]</sup>:

$$Q_{s3} = \frac{A'}{d} \int_{T_1}^{\overline{v}} \lambda(T) \, \mathrm{d}T \quad (\mathrm{J/s})$$
(2)

3.2 辐射传热 Q<sub>r</sub>

环形杜瓦罐的辐射传热主要发生在真空夹层 的外壳内表面到内壳外表面之间和内外壳底面之 间。辐射传热计算公式为<sup>[3]</sup>:

$$Q_{r} = \sigma \varepsilon_{s} A_{1} (T_{2}^{4} - T_{1}^{4})$$
(3)

式中
$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1)}$$
为系统发射率 其中

 $\varepsilon_1 \varepsilon_2$  为真空夹层内、外表面  $A_1 A_2$  的辐射系数;  $\sigma$  = 5.67 × 10<sup>-8</sup> J/(m<sup>2</sup>.s. K<sup>4</sup>) 为黑体辐射系数。

从公式可以看出,影响辐射传热的因素与夹 层表面的辐射系数有关,有效减小夹层间辐射系 数,可以很好的减小辐射传热。所以我们采取真 空多层绝热结构,在外壳内表面和内壳外表面、上 下表面分别缠上10mm 厚铝箔玻璃纤维材料,可 以起到很好的防辐射效果。

当有 n 层铝箔时 辐射传热量为<sup>[3]</sup>:

$$Q_r = \frac{\sigma \varepsilon_s A_1 (T_2^4 - T_1^4)}{n+1}$$
(4)

最佳层数<sup>[5]</sup>: 当层数增加时,辐射传热减小, 固体导热却增加,因此在层密度的最佳值时,表观 热导率达到最小值,与辐射传热相比可以忽略不 计。一般最佳层数为20—40层/cm。本实验采

Cryogenics

• 7 •

取 40 层 ,所以忽略了绝热材料的固体导热。缠绕 后内部的绝热层如图 3 所示。



图 3 缠绕绝热层实物图 Fig. 3 Picture of insulation structure 计算用到的热辐射系数如表1所示。

#### 表1 热辐射系数<sup>[6]</sup>

Tab. 1 Thermal radiation coefficient				
表面材料	77K	300K		
不锈钢	0.048	0.08		
铝箔	0.018	0.03		

[6]

3.3 气体传热 Q

气体的热传导通常以单独分子状态来研究。 设气体分子的自由程为 l ,则当温度为 T、压强为 P 时 ,有  $l = 3.45 \times 10^{-3} T/P$  ,单位 cm。对于夹层 (杜瓦特征尺寸为 L)中的残余气体导热 l/L 是一 个重要的准数 ,称克努森准数  $K_n^{[5]}$ 。根据  $K_n$  的 大小 ,将气体分为四个状态:  $K_n < 0.01$  ,连续介质 状态(低真空);  $0.01 < K_n < 0.1$  ,温度跃变或滑流 状态;  $0.1 < K_n < 10$  ,过渡转变状态(中压强);  $K_n$ >10 ,自由分子状态(高真空)。

本例中真空压强为 0.01Pa, *T* 在 77K—300K 之间, 取温度上下限积的方根 155K, 代入求出分 子的自由程 l = 53.475 cm,柱面夹层  $L_1 = 12 \text{ mm}$ , 底面夹层  $L_2 = 10 \text{ mm}$ , 有  $K_n = 44.56$  和 53.48,为 自由分子状态。在自由分子状态下,分子间互相 碰撞几率低于分子与壁碰撞几率,气体导热不再 决定于气体分子间互相交换能量。此时,气体导热

其中  $\alpha = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\alpha_2} - 1\right)\right]^{-1}$ ,式中  $A_1 \cdot A_2$ : 内、外表面积;  $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha$ : 气体对内外表面热适应系

# 数和综合热适应系数; R: 气体常数; M: 相对分子 质量; $\gamma = C_p / C_r$ 为气体比热容比。

# 表 2 为不同气体热适应系数推荐值。

表2 热适应系数的推荐值<sup>[5]</sup>

Tab. 2 Recommended value of thermal accommodation coefficient<sup>[5]</sup>

温度/K	He	$H_2$	Ne	空气
300	0.29	0.29	0.66	0.8~0.9
77	0.42	0.53	0.83	1.0
20	0.59	0.97	1.0	1.0

为便于计算 采用如下单位  $A_1$ 、 $A_2$  为 m<sup>2</sup>;  $Q_g$ 为 W; p 为 Pa; T 为 K; 有:

$$Q_{g} = A_{1}k\alpha p(T_{2} - T_{1}) \tag{6}$$

式中 
$$k = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}}$$
 (7)

不同气体的k 值列于表3。

表 3 不同气体的 k 值<sup>[5]</sup>

Tab. 3 k value of different gas<sup>[5]</sup>

气体	02	$N_2$	空气
温度范围	≤300	≤400	任意
常数	1.1176	1.1926	1.2001

### 3.4 环形杜瓦的漏热计算

以环形杜瓦罐(图1)为例,其具体尺寸列于 表4。

表4 环形杜瓦罐的主要结构尺寸参数

Tab. 4 Main structural parameters of annular dewar

=		
名称	尺寸	单位
所有壁厚δ	6	mm
内壳外管外径 r <sub>1</sub>	198	mm
内壳内管外径 r <sub>2</sub>	122	mm
外壳内管外径 r <sub>3</sub>	100	mm
外壳外管外径 r <sub>4</sub>	226	mm
端盖面积 A ′	563	$\mathrm{cm}^2$
端盖壁厚 d	8	mm
底板外径 r₅	204	mm
底板内径 r <sub>6</sub>	117	mm
柱面真空尺寸 L1	12	mm
底面真空尺寸 L <sub>2</sub>	10	mm
内壳管道高度1	43	mm
外壳管道高度 L	70	mm
多层绝热层数 n	40	层
内部压强 p	0.01	Pa

Cryogenics

第4期

### 杜瓦罐的漏热计算结果如表 5 所示。 表 5 杜瓦罐漏热计算结果

Гаb. 5	Heat	leakage	calculation	ı of	dewar
1 000.0	110ac	roundgo	ouroundition		aona

计算项目	计算公式	涉及尺寸	计算结果
固体传导漏	(1) + (2)	$\delta dr_1$	22107.8
热 Q_s/(J/s)		$r_2$ , $l$ , $A'$	
辐射传导漏	(4)	$r_2$ , $r_3$ , $r_4$	
热 Q,/(J/s)		$r_5 r_6 n$	0.0435
气体传导漏		$r_1 , r_2 , r_5$	
热 $Q_g$ /(J/s)	(6)	$r_6 , p , L_1$	0.3931
		$L_2 \ l_L$	

## 4 改进

从表 5 中可以看出 ,固体传导漏热很大 ,原因 是在法兰和端盖上没有采取任何隔热措施 ,而且杜 瓦的口径也比较大 ,所以沿着内壳管壁和端盖往外 的漏热特别严重 ,因此需要在外表面缠上隔热材 料。隔热材料我们选取阻燃型玻璃微纤维深冷绝 热纸 ,首先它方便缠绕 ,其次它的导热系数很低 ,只



表6 杜瓦罐漏热计算

Tab. 6Heat leakage calculation of crock

名称	计算结果
固体传导漏热 Q₅/( J/s)	8.161
辐射传导漏热 Q,/(J/s)	0.0435
气体传导漏热 $Q_g$ /( J/s)	0.3931
总的传导漏热 $\Sigma Q/(J/s)$	8.598
液氮的损耗量 M/(L/h)	0.191
杜瓦液氮容积/L	3.083
液氮维持时间/h	16



#### 图 4 外表面隔热材料的缠绕方式

Fig. 4 Winding way of thermal insulation material in outer surface

5 结论

本文介绍了高温超导磁悬浮环形杜瓦装置, 并对其进行了漏热分析。通过计算结果表明,在 真空夹层增加了铝箔和玻璃纤维材料,辐射漏热 大大减少;残余气体传导漏热相对辐射传导漏热 比较大,这跟真空度有关,我们抽至真空压强是 0.01Pa,可以通过继续抽真空和在真空夹层内加 气体吸附剂,减小残余气体量,就能减小气体传导 漏热;对于最严重的固体传导漏热,找出了漏热原 因,并通过在外表面缠绕导热率很低的绝热材料, 有效地起到了隔热作用,充分保证了杜瓦内液氮 的工作时间达到10小时以上。

以上只是通过传热学理论计算出来的结果, 后续工作我们可以通过称重法实际测量液氮的损 耗量,与理论计算结果进行对比,从而验证设计的 杜瓦结构与实际使用的一致性。

### 参考文献

- [1] 王家素. 高温超导磁悬浮研究进展[J]. 低温物理学报,2009,31(5):142-151.
- [2] 王素玉,王家素. 一种薄底液氮低温容器[J]. 低温 与超导,1999,27(3):1-3.
- [3] 徐成海. 真空低温技术与设备[M]. 北京:冶金工业 出版杜,2007.
- [4] 张奕主. 传热学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
- [5] 陈国邦. 低温绝热与传热技术 [M]. 北京: 科学出版 社, 2004.
- [6] 徐烈. 低温容器──设计、制造与使用[M]. 北京: 机械工业出版社,1987.
- [7] 张开达 张长贵. 低温技术 [M]. 北京: 中国计量出 版社, 1987.