

热阻对液氮冷屏性能的影响研究

任永平^{1,2} 李超¹ 党战伟² 李文冰² 杨聪巧² 于春柳³ 任金平³

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050;

2. 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司, 兰州 730070;

3. 陇东学院化学化工学院, 庆阳 745000)

摘要: 超导元件需用液氮降温至极低工作温度才能实现超导性能, 液氮温区仅靠真空多层绝热方式无法达到理想绝热效果, 采用液氮冷屏隔断液氮和环境之间的传热, 能够有效降低液氮系统蒸发损失和液氮用量。为研究热阻对液氮冷屏传热特性的影响, 建立了液氮冷屏热阻模型, 通过理论传热计算得到了不同热阻与冷屏板温度及传热量之间的关系, 利用数值模拟软件对不同热导率材料和不同板厚下冷屏板的温度分布进行了分析。结果表明, 最不利热阻为接触热阻和导热热阻, 采用高导热系数材料及适度增加冷屏板厚度有助于提高冷屏板温度分布的均匀性, 减小接触热阻和冷屏板表面发射率有助于提高冷屏隔热性能, 为改善冷屏热屏蔽效果提供依据。

关键词: 冷屏; 热阻; 液氮; 液氮系统

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2017.04.005

Influence of the thermal resistance on the LN₂ cold shield performance

Ren Yongping^{1,2}, Li Chao¹, Dang Zhanwei², Li Wenbing², Yang Congqiao², Yu Chunliu³, Ren Jinping³

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Lanpec Technologies Co., Ltd, Lanzhou 730070, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Longdong University, Qingyang 74500, China)

Abstract: Superconducting elements need low temperature with usually LHe as a cooling medium to get its performance. Such a LHe system is hard to defend heat leak only with high vacuum multi-layer insulation. LN₂ cold shields can greatly lower the heat leak to the LHe system and reduce the consumption of LHe. In order to research the impact of the thermal resistance to heat transfer characteristics of the LN₂ cold shield, the paper established a thermal resistance model, calculated the affect of different thermal resistance to the cold shield plate temperature and the heat transfer quantity by the theory of heat transfer, and analyzed the temperature of cold shield plate under different thermal conductivity materials and different plate thickness by numerical simulation method. The results show that the most negative thermal resistance is contact and conduction, using the high thermal conductivity material and increasing the thickness of the plate can help to improve the temperature distribution uniformity of cold shield plate, reducing the thermal contact resistance and the surface emissivity can also help to improve cold shield thermal insulation properties, which can provide a reliable method for improving the heat shielding affect of cold shield.

Keywords: Cold shield, Thermal resistance, LN₂, LHe system

1 引言

重粒子直线加速器中的超导腔和超导螺线管等低温超导元件需要在极低的温度下才能实现超导性能。液氮作为最能接近绝对零度的制冷剂, 无毒无害, 是对低温超导元件实现冷却降温的最

佳介质。我国氦气资源和产量较低, 所需主要依赖进口。随着美国这一全球最大的氦气生产国将其列为战略资源加以保护后, 氦气价格不断上涨, 获取困难。液氮温度处在 4K 左右, 将低温系统蒸发的气态氮再液化成液态通常需要付出较大功耗。同时受限于制冷机的制冷能力, 低温系统的

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 陇东学院青年科技创新基金项目(XYBY140211) 资助。

作者简介: 任永平(1985-), 男, 博士生, 主要从事低温储运技术及设备研究。

通讯作者: 李超(1958-), 男, 教授, 主要从事气体压缩机械理论及应用方面的研究。邮箱: lichao@lut.com。

热损失也必须控制在一定范围。对液氮系统加装冷屏,使冷屏能够吸收外界传入的部分热量并将其带出系统,实现冷屏在液氮温区和室温温区之间良好的热屏蔽作用,成为有效降低液氮系统环境热负荷、最大限度降低液氮蒸发损失的一种有效措施。

液氮所处温区较低,来源广泛,获取代价小,价格低廉,利用液氮作为液氮系统冷屏的冷剂是一个很好的选择。中科院等离子体物理研究所刘素梅等对采用低温冷屏来获得屏蔽效应降低超导核磁体的环境热负荷进行了研究,并对温度场、热应力进行了数值模拟和实验研究^[1-2]。刘辰等对低温冷屏表面发射率进行了实验研究^[3-4]。张周卫应用当量分析法对建立的低红外辐射冷屏分层贮液及气流分离冷屏蔽模型进行了研究^[5]。任登凤研究了液氮冷屏蔽罩内的流动与换热机理,对冷屏蔽罩的温度分布与红外辐射进行了分析^[6]。陈叔平等对双夹层液氮冷屏系统的外表面温度分布进行了试验研究并建立了经验模型^[7-8]。回顾国内外学者对低温冷屏的研究,主要集中在冷屏的换热机理和表面温度的分析方面,对冷屏传热性能的影响因素研究较少。

根据以上研究成果,本文首先建立了用于超导元件液氮系统的液氮冷屏模型,对影响冷屏传热性能的各种热阻进行了分析。其次,在建立模型的基础上推导出导热热阻与冷屏板温度分布之间的解析关系式,并借助数值模拟研究了二者之间的相互关系,同时研究了接触热阻对冷屏传热性能的影响,为提高冷屏的传热性能和应用提供依据。

2 冷屏模型与热阻分析

液氮冷屏模型如图1所示,主要由液氮输送管和冷屏板组成,液氮输送管均匀的布置在冷屏板的一侧并与冷屏板焊接在一起。设冷屏的厚度为 δ ,沿液氮输送管方向的长度为 L 。当热量从冷屏板进入液氮输送管后被带出系统时需要通过的热阻依次有:冷屏板的导热热阻 R_1 ;冷屏板与液氮输送管的接触热阻 R_2 ;液氮输送管的导热热阻 R_3 ;液氮与液氮输送管的对流换热热阻 R_4 ;冷屏的热阻如图2所示。

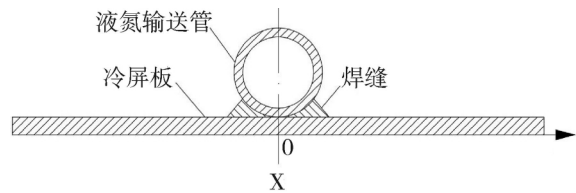


图1 冷屏模型(截面)

Fig. 1 Model of cold shield

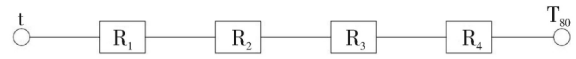


图2 冷屏热阻示意图

Fig. 2 Thermal resistance of cold shield

考虑到传热和加工等因素,液氮输送管大多采用导热系数较大的铜管,稳态工况下液氮输送管内充满液氮,液氮与液氮输送管的对流换热热阻 R_4 和液氮输送管的导热热阻 R_3 可以忽略不计,即可以认为液氮输送管外壁的温度 t_g 即为管内的液氮温度 T_{80} 。

接触热阻 R_2 受加工因素影响较大,不同的加工工艺形成的接触热阻不同,理论分析无法给出精确关系,需要进行实验测定。从当前的工艺水平来讲,接触热阻 R_2 要远大于导热热阻 R_1 ,在分析过程中不能忽略接触热阻对传热的影响。

以液氮输送管中心线为界,冷屏呈对称形态。为便于对冷屏传热进行分析,取冷屏的一半进行分析。以液氮输送管的中心线为零点,冷屏板断面方向为 x 轴,假设冷屏板在 $x=0$ 处的温度为 t_a ,冷屏板距液氮输送管中心线距离 dx 处温度为 t ,环境温度 T_{300} 为300K,液氮温度 $T_{4.2}$ 为4.2K。

3 导热热阻对冷屏板温度分布的影响

稳态下可将冷屏板等效成为一个有内热源的平板,其中冷屏板的内热源项等于冷屏板的辐射散热量,导热系数不随冷屏板温度的变化而变化。则冷屏的传热微分方程为:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

式中 $\dot{\Phi}$:单位面积热流量, W/m^2 ; λ :冷屏板导热率, $W/(m \cdot K)$ 。

冷屏板两侧均为多层绝热膜,处于真空环境,冷屏板与周围环境主要以辐射换热为主。 dx 长的一段冷屏与环境侧和液氮系统侧的辐射换热量

分别为:

$$\Phi_1 = (T_{300}^4 - t^4) \times \varepsilon_1 \sigma L dx \quad (2)$$

$$\Phi_2 = (t^4 - T_{4.2}^4) \times \varepsilon_2 \sigma L dx \quad (3)$$

式中, Φ_1 : 冷屏与环境侧的辐射换热量, W; Φ_2 : 冷屏与液氮系统侧的辐射换热量, W; ε_1 : 冷屏与环境之间的综合发射率; ε_2 : 冷屏与液氮系统之间的综合发射率; σ : 斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。

$$\text{其中 } \varepsilon_1 = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{300}} + \frac{1}{\varepsilon_t} - 1} \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{4.2}} + \frac{1}{\varepsilon_t} - 1} \quad (5)$$

式中 ε_{300} : 300K 时环境的发射率; ε_t : t K 时冷屏的发射率; $\varepsilon_{4.2}$: 4.2K 时液氮的发射率。

dx 段冷屏板的吸热量为:

$$\Phi_s = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (6)$$

将式 (2) 和式 (3) 带入式 (6), 得到:

$$\Phi_s = \sigma L dx [\varepsilon_1 T_{300}^4 + \varepsilon_2 T_{4.2}^4 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) t^4] \quad (7)$$

将 dx 段冷屏板的吸热量折算成冷屏板的内热源项:

$$\dot{\Phi} = \frac{\Phi_s}{A_c dx} \quad (8)$$

$$\text{其中 } A_c = L \delta \quad (9)$$

将式 (8) 代入冷屏的微分方程式 (1), 可以得到冷屏距液氮输送管中心线 x 处的温度 t 与 x 之间的关系式:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{\sigma}{\delta \lambda} (E t^4 - F) \quad (10)$$

$$\text{其中 } E = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (11)$$

$$F = \varepsilon_1 T_{300}^4 + \varepsilon_2 T_{4.2}^4 \quad (12)$$

设冷屏液氮输送管之间的距离为 d , 根据冷屏的传热特性, 可写出式 (10) 的定解边界条件

$$\left. \begin{aligned} x = \frac{d}{2}; \quad \frac{dt}{dx} = 0 \\ x = 0; \quad t = t_a \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式 (10) 求取解析解存在困难, 可借助数值模拟软件进行分析。假设液氮输送管与冷屏的接触良好, 接触热阻为零, 用数值模拟软件对铝板冷屏、铜板冷屏和加厚铜板冷屏的传热和温度分布进行模拟。

从图 3 与图 4 的比较可以看出, 采用较高导

热系数的铜板制作冷屏, 其温度分布的均匀性要

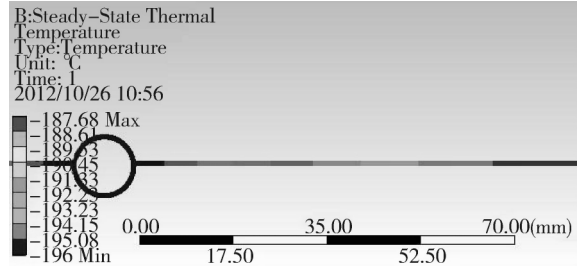


图 3 铝板冷屏温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of Al shield

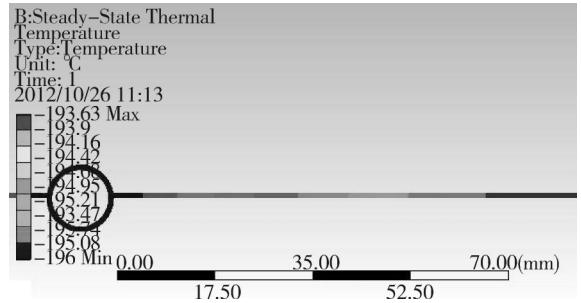


图 4 铜板冷屏温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of Cu shield

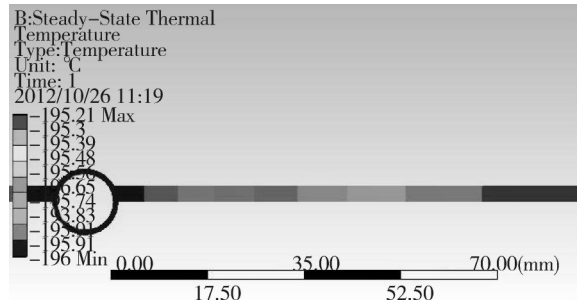


图 5 加厚铜板冷屏温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of thick Cu shield

优于使用低导热系数的铝板冷屏。比较图 4 与图 5 可以看出, 冷屏板的热导率相同时, 采用较厚的冷屏板可以使冷屏温度分布更均匀。随着冷屏板厚度的继续增加, 冷屏温度分布的均匀性并不随冷屏板厚度成比例提升, 同时冷屏的重量和加工难度将会增加。

从式 (7) 可以看出, 冷屏表面的发射率对冷屏的热负荷有较大影响, 降低冷屏的表面发射率可以减小冷屏热负荷。对冷屏板表面进行镀银处理, 发射率会远低于不锈钢抛光表面, 将有助于降低冷屏的热负荷和液氮损耗, 同时也可以降低从冷屏向液氮系统 4.2K 温区的热辐射, 有助于冷屏性能的提高。

4 接触热阻对冷屏性能的影响

由于加工工艺原因,液氮输送管与冷屏板的接触热阻要远大于冷屏板的导热热阻,需要分析接触热阻对冷屏传热性能的影响。

从冷屏板传入的热量都需要从 $x=0$ 处传入液氮输送管。冷屏板在 $x=0$ 处传入的热量为:

$$\Phi|_{x=0} = -\lambda A_c \left(\frac{dt}{dx} \right) \Big|_{x=0} \quad (14)$$

实际当中接触热阻需要由实验进行测定。根据假设的冷屏与液氮输送管接触热阻 R_2 可以得到从冷屏板输入液氮输送管的热量为:

$$\Phi = \frac{t_a - t_g}{R_2} L \delta \quad (15)$$

设液氮的潜热为 r ,冷屏的面积为 A ,则冷屏消耗液氮的速率为:

$$\dot{m} = \frac{2A \int_0^{d/2} \Phi_s dx}{Lr} \quad (16)$$

在低温系统运行稳定时,冷屏的热负荷是一定的,即传热量 Φ 保持恒定。从式(15)可以看出,接触热阻与传热温差成正比,要想使冷屏板的温度 t_a 接近液氮输送管内液氮的温度 t_g ,只有尽可能减小冷屏板与液氮输送管的接触热阻。只有冷屏的温度充分接近液氮的温度,冷屏的热隔离作用才能更好。提高冷屏的加工工艺水平是减小接触热阻的有效措施,具体方法可采用导热性能较好的焊材,运用先进的焊接工艺,提高焊接精度,减少焊缝夹渣、气孔、裂纹等焊接缺陷,确保焊接质量等。

5 结论

(1) 从导热热阻方面来看,对冷屏换热性能影响最大的有害热阻主要是液氮输送管与冷屏板的接触热阻和冷屏板的导热热阻。

(2) 数值模拟结果表明,采用较高导热系数的材料制作冷屏板对提高冷屏的温度均匀性具有明显的效果。增加冷屏板的厚度,也可以提高冷

屏板温度分布的均匀性。但在超过一定厚度之后,冷屏板的温度分布均匀性随冷屏板厚度的增加不再成比例变化,实践中在冷屏板厚度的取值时应考虑在保证冷屏机械强度和加工便捷的前提下,选择合适的厚度。

(3) 液氮输送管与冷屏板的接触热阻,与传热温差成正比关系,是影响冷屏板温度分布均匀性的主要因素,采用先进的加工工艺,可以降低冷屏板与液氮输送管的接触热阻,能有效提高冷屏的工作性能。

(4) 通过对冷屏板表面的处理,降低冷屏板表面发射率有助于降低冷屏的热负荷,从而降低冷屏的液氮损耗,在一定程度上也可以降低从冷屏向 4.2K 温区的热辐射,能够改善冷屏的工作性能。

参考文献

- [1] 刘素梅,宋云涛,武松涛,等. 国际热核聚变反应堆馈线系统线圈终端盒冷屏热性能分析及实验研究[J]. 真空科学与技术学报,2010,30(1):28-32.
- [2] 祝燕云,庄明,王学敏,等. EAST 内冷屏降温过程瞬态温度场和热应力分析[J]. 低温工程,2010(2):37-41.
- [3] Nama K,Noha C H,Chunga W,et al. Progress of detailed design and supporting analysis of ITER thermal shield[J]. Fusion Engineering and Design,2010,85:1866-1874.
- [4] 刘辰. 托克马克冷屏表面超低温发射率实验研究[J]. 低温与超导,2014,42(3):22-24.
- [5] 张周卫,厉彦忠,汪雅红,等. 空间低红外辐射液氮冷屏低温特性研究[J]. 机械工程学报,2010,46(2):111-118.
- [6] 任登凤,韩玉阁,宣益民. 液氮冷屏蔽罩对弹道导弹红外特性抑制的分析[J]. 弹道学报,2012,24(4):107-110.
- [7] 陈叔平,谭风光,吴睿,等. 空间飞行器冷屏防霜结构[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):853-857.
- [8] 陈叔平,谢福寿,谭风光,等. 空间冷屏表面温度分布实验研究[J]. 红外与激光工程,2012,41(6):1411-1415.