

低温冷箱中辐射与导热耦合传热的数值模拟

祝银海, 厉彦忠, 余 锋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对 3 种不同的隔热处理方案, 对低温冷箱中辐射和导热耦合传热进行了数值模拟, 同时考虑了管道、支架和横梁对系统传热的影响. 计算结果表明: 在相同情况下, 采取设备包铝箔和加隔热屏的措施使换热器表面的辐射跑冷损失减少了 2/3 以上; 只加铝箔隔热屏时, 换热器与横梁间的热桥跑冷也得到了改善, 跑冷损失减少了 1/2 左右. 因此, 在冷箱与换热器之间加铝箔隔热屏是改善低温冷箱温度分布和降低跑冷损失的一种有效方法.

关键词: 辐射; 冷箱; 耦合传热; 数值模拟

中图分类号: TP65 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)09-0985-04

Numerical Simulation of Radiation Heat Transfer Coupled with Conduction in a Low-Temperature Cold Box

Zhu Yinhai, Li Yanzhong, Yu Feng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Radiation heat transfer coupled with heat conduction in a low-temperature cold box involving the effect of pipes, brackets, and crossbeams on the system was numerically simulated under three different insulation schemes. The calculation results indicate that in the same condition the thermal radiation of heat exchangers can be decreased by a factor of 2/3 adding an aluminum foil covering on the equipments or an aluminum foil heat insulation screen. The thermal conduction through the brackets and crossbeams for the case with the aluminum foil heat insulation screen is only half of that compared with the case without the screen. It is concluded that adding an aluminum foil heat insulation screen is an effective way to ameliorate temperature distribution in the cold box and reduce cold energy loss from low temperature equipments.

Keywords: thermal radiation; cold box; coupled heat transfer; numerical simulation

本文计算模型的背景为中国先进研究堆(CARR)工程冷中子源装置的氦制冷系统. 氦制冷系统采用逆 Brayton 循环制冷方式, 制冷温度为 17 K, 设计中将换热器和膨胀机都放置在冷箱中. 在工作状态下, 换热器表面和冷箱的壁面存在很大的温差, 此时辐射冷损占据主导地位. 在低温系统中, 温度越低, 其冷量的价值就越高, 因此对冷箱和低温换热器进行辐射特性的研究具有重要的实用意义.

对于低温冷箱中设备的辐射跑冷问题, 国内外学者进行了大量的研究, 取得了有价值的结论. 文献

[1]对真空容器中换热器向周围环境的传热进行了研究探讨. 文献[2]对液氮槽罐中的隔热屏的辐射传热问题进行了研究, 同时考虑了隔热屏厚度和表面发射率对隔热性能的影响. 文献[3]则考虑了辐射和导热耦合时的传热问题. 但是, 所有参考文献中采用的物理模型均较为简单, 没有考虑实际存在的管道和横梁支架对系统的影响^[4,5]. 建立既有普遍规律又切合实际的模型, 并考虑实际状态下各种影响因素, 准确地研究低温设备的辐射特性以及支撑系统的导热特性是本文研究的内容, 研究结果可望为低

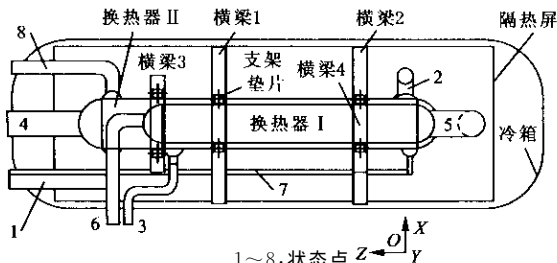
温冷箱和设备的设计提供参考。

1 物理模型和求解

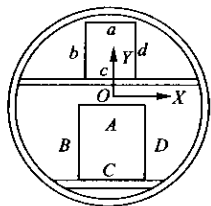
本文研究对象的模型如图 1a 所示,冷箱内抽成真空(真空度为 10^{-4} Pa)。冷箱内放置低温换热器(换热器 I)和高温换热器(换热器 II),高压高温氦气先经过高温换热器、再经过低温换热器冷却,温度从 313 K 降到 25 K 左右。然后,低压低温氦气先经过低温换热器、再经过高温换热器升温,温度从 21 K 上升到 309 K 左右。换热器 I、II 通过直角支架和隔热垫片,分别架在横梁 1、2 和 3、4 上。冷箱的剖面图如图 1b 所示。冷箱内部工质气体的流程如图 1c 所示,图 1 中各状态点的参数列于表 1 中。

表 1 冷箱内部工质状态参数

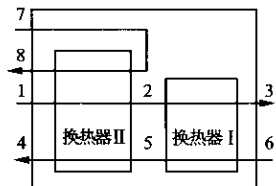
状态点	工质	温度/K	压力/MPa
1	He	313.00	0.8
2		142.62	0.8
3		25.59	0.8
4		309.81	0.2
5		139.27	0.2
6		21.00	0.2
7	N ₂	77.35	0.1
8		300.00	0.1



(a)冷箱结构图



(b)冷箱剖面图



(c)冷箱内部流程示意图

图 1 冷箱模型

为了使计算的数据能指导工程实际,文中所有物性参数都采用实际工程设计要求的参数。同时,为了得出换热器的辐射特性和得到阻止换热器跑冷的最优方法,本文采用了 3 种阻热结构方案并分别进行数值计算,3 种结构方案分别是:①方案 1,换热器

和管道的表面都不包铝箔,没有采取任何降低辐射跑冷的措施,此方案作为方案 2 和方案 3 的对比方案;②方案 2,在换热器和管道的表面包铝箔,利用铝箔的低表面发射率来减少换热器和管道的辐射跑冷;③方案 3,在冷箱与换热器之间加铝箔隔热屏,利用表面发射率低的铝箔把冷箱与箱内设备隔开,使换热器的辐射跑冷减少。

在本文计算的模型中,冷箱中各设备既有与冷箱壁面的辐射传热,又有相邻设备接触处的导热,是一个辐射与导热的耦合传热问题。以垫片支架为例,作示意图如图 2 所示。根据傅里叶定律,有

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx} \tag{1}$$

式中: Φ 为导热量 (w); A 为导热面积 (m^2)。

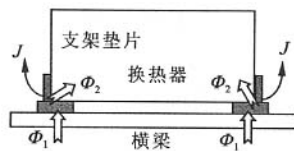


图 2 支架垫片传热示意图

冷箱内换热器、管道、横梁等表面组成一个多表面辐射系统,假设每个表面都是漫灰的,且冷箱内的稀薄空气不参与辐射,则垫片支架表面的有效辐射为^[6]

$$J = \epsilon \sigma T^4 + (1 - \epsilon) \sum_{j=1}^N J_j X_j \tag{2}$$

式中: ϵ 为垫片支架表面的发射率; T 为表面温度 (K); X_j 为垫片支架表面对其他表面 j 的角系数。

对支架垫片列能量平衡方程,有

$$\Phi_1 - \Phi_2 - J = 0 \tag{3}$$

考虑到物理模型的复杂性和辐射与导热耦合传热的特点,利用软件 FLUENT 中计算辐射传热的 DO 模型进行数值模拟。为了简化求解,在数值求解过程中做了如下假设:①各材料的物性以平均温度作为定性温度,并不随温度变化;②换热器的温度变化沿长度方向上按线性处理;③不考虑流体在管道中的温度变化;④不考虑隔热屏的厚度;⑤所有表面均为漫灰表面。

根据上述简化建立三维数学模型。冷箱的壁面温度取 313 K,为等温边界条件。换热器的壁面温度按两端温度线性得出,为等温边界条件。在垫片支架、换热器、横梁的壁面边界条件中,均采用导热耦合边界条件。本文计算中使用的材料表面发射率和导热系数如表 2 所示。

表 2 系统各设备的材料特性

设备	材料	表面发射率 ϵ	导热系数 $\lambda / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
冷箱,管道,横梁	不锈钢	0.8	19.5
换热器	铝	0.2	200
隔热屏	铝箔	0.05	200
隔热垫片	硬塑料	0.9	0.04

2 计算结果与分析

2.1 冷箱内的温度场分布

通过对 3 种方案进行数值求解,得到了 3 种方案下物理模型的温度场分布规律(见图 3、图 4)。图 3 是采用方案 2 时,4 根横梁的温度沿长度方向(X 轴)上的变化。可以看出横梁与隔热垫片的接触点是整个横梁温度的突变点,横梁在 2 个接触点间的温度基本不变。从图 4 可以看出:方案 2 的换热器和管道都包有表面发射率很低的铝箔,从横梁发射出的辐射热流大部分都被换热器表面反射回来,此时横梁的温度最高;由于铝箔隔热板的存在,方案 3 的横梁表面不能直接与冷箱表面进行辐射热交换,而与换热器之间没有铝箔隔离,从横梁发射出的辐射热流大部分被换热器表面吸收,此时横梁的温度最低。

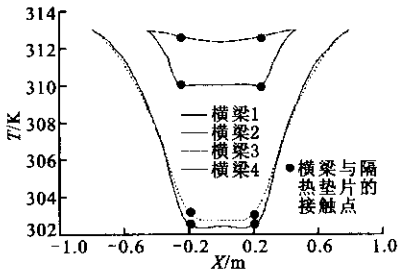


图 3 采用方案 2 时 4 根横梁的温度沿长度方向上的变化

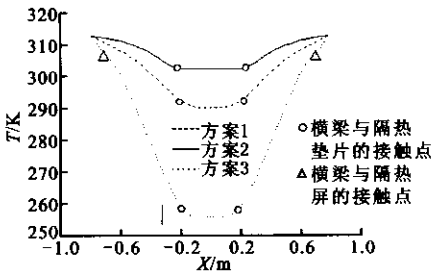
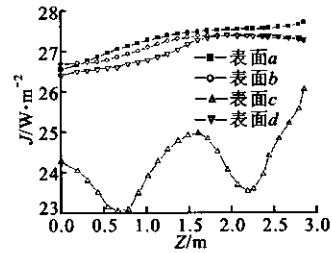


图 4 3 种方案下横梁 1 的温度沿长度方向上的变化

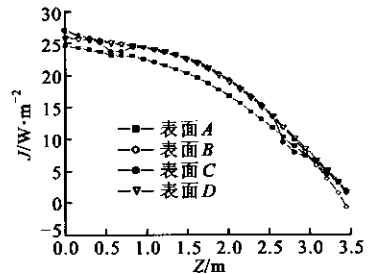
2.2 换热器表面的辐射热流分布特性

从图 5 可以看出:在换热器 I 的 4 个表面中,表面 c 的辐射热流最小,在与横梁相对的位置出现了二处极小值(见图 5a);在换热器 II 的 4 个表面中,表面 A 的辐射热流最小,表面 C 的辐射热流在与横

梁相对的位置也出现了二处极小值(见图 5b)。从图 6 可以看出:在采用方案 1 和方案 2 时,换热器 I 表面 c 的辐射热流在与横梁相对的位置都出现了 2 个极小值;在采用方案 3 时,由于换热器表面和冷箱壁面间被隔热屏隔开,隔热屏的温度和横梁的温度比较接近,但是横梁的表面发射率远大于隔热屏的表面发射率,使得换热器表面在与横梁相对的位置出现了 2 个极大值。



(a) 换热器 I



(b) 换热器 II

图 5 采用方案 2 时换热器表面的有效辐射沿换热器长度方向上的变化

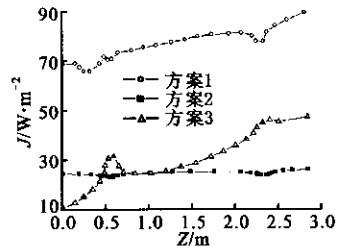


图 6 3 种方案下换热器 I 表面 c 的有效辐射沿换热器长度方向上的变化

2.3 3 种方案下换热器的跑冷量比较

表 3 中列出了 3 种不同隔热方案时换热器各种跑冷损失的比较情况。采用方案 1 时的辐射跑冷远大于方案 2 和方案 3 时的辐射跑冷损失,方案 1 的跑冷损失大约是方案 2 和方案 3 的 3 倍,充分证明给低温换热器和管路加铝箔来减小辐射是必需的。对于换热器 I 来说,采用方案 2 和方案 3 时辐射跑冷损失接近,但对于换热器 II 来说,采用方案 3 时效果更优,而且采用方案 3 时换热器通过隔热垫片的导热最小。在本文所计算的 3 种隔热方案中,换热

表3 3种方案下换热器跑冷的比较

方案	换热器 I			换热器 II		
	辐射跑冷/W	通过隔热垫片的导热跑冷/W	总跑冷占换热器热负荷的比值/%	辐射跑冷/W	通过隔热垫片的导热跑冷/W	总跑冷占换热器热负荷的比值/%
1	442.68	53.68	0.282	480.03	28.86	0.209
2	120.24	58.21	0.102	136.96	32.78	0.070
3	140.94	29.10	0.097	46.60	24.91	0.029

器 I 的传热负荷为 175.9 kW, 换热器 II 的传热负荷为 243.3 kW.

3 结论

本文以工程实际为背景, 建立了冷箱和换热器系统的物理模型. 采用 3 种隔热方案对低温环境下辐射和导热的耦合传热问题进行了数值计算, 得出了冷箱的温度场分布和换热器的表面辐射特性. 计算结果表明: 低温设备在冷箱中的辐射跑冷量较大, 通过在冷箱与内部设备之间加铝箔隔热屏, 既可以减小换热器的辐射跑冷, 同时又能改善冷箱内的温度场分布, 降低换热器通过隔热垫片的导热跑冷.

参考文献:

[1] Madhusudana C V. Accuracy in thermal contact conductance experiments; the effect of heat losses to the surroundings [J]. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 2000, 27(6): 877-891.

[2] Reiss H. A coupled numerical analysis of shield temperatures, heat losses and residual gas pressures in an evacuated super-insulation using thermal and fluid networks [J]. *Cryogenics*, 2004, 44(4): 259-271.

[3] Ramesh N, Merzkirch W. Combined convective and radiative heat transfer in side-vented open cavities [J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 2001, 22(2): 180-187.

[4] Xia Xinlin, Huang Yong, Tan Heping, et al. Simultaneous radiation and conduction heat transfer in a graded index semitransparent slab with gray boundaries [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45(13): 2 673-2 688.

[5] 于帆, 张欣欣, 高仲龙. 圆筒形半透明介质内非稳态复合导热与辐射的研究 [J]. *工程热物理学报*, 1997, 18(4): 464-468.

[6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998. 280-285.

(编辑 王焕雪)

(上接第 973 页)

参考文献:

[1] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode [J]. *Nature*, 1972, 238(5358): 37-38.

[2] 钱丽苹, 刘奎仁, 魏绪钧. 半导体光解水制氢的研究 [J]. *材料与冶金学报*, 2003, 2(1): 10-15.

[3] Shangguan W F, Yoshida A. Synthesis and photocatalytic properties of CdS-intercalated metal oxides [J]. *Sol Energy Sol Cells*, 2001, 69(2): 189-194.

[4] 杨萍, 管延勇, 赵宗昱. 硫硒化锌基颜料颜色与组成关系的研究 [J]. *硅酸盐学报*, 1996, 27(3): 316-323.

[5] Arakawa H, Sayama K. Solar hydrogen production; significant effect of Na_2CO_3 addition on water splitting using simple oxide semiconductor photocatalysts [J]. *Catal Surv Jpn*, 2000, 4(1): 75-80.

[6] 康锡惠, 刘梅清. 光化学原理与应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1995. 147-153.

[7] 杨萍, 赵宗昱. 掺杂剂对硫硒化锌基颜料的影响

[J]. *山东陶瓷*, 1996, 19(4): 8-12.

[8] 沈强华, 陈雯, 朱祖泽. 从硫化锌精矿直接制备氧化锌针状晶须 [J]. *昆明理工大学学报*, 2003, 28(6): 20-22.

[9] 余晓艳, 马鸿文, 杨静. 黄铜矿型 CuInSe_2 单晶光电材料研究评述 [J]. *人工晶体学报*, 1999, 28(1): 96-102.

[10] 梁敬魁. 粉末衍射法测定晶体结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 132-148.

[11] Tsuji I, Kudo A. H_2 evolution from aqueous sulfite solutions under visible-light irradiation over Pb and halogen-codoped ZnS photocatalysts. [J]. *J Photochem Photobiol: A*, 2003, 156(1): 249-252.

[12] 张彭义, 余刚, 蒋展鹏. 半导体光催化剂及其改性技术进展 [J]. *环境科学进展*, 1997, 5(3): 1-10.

[13] Zou Z G, Ye J, Sayama K, et al. Photocatalytic and photophysical properties of a novel series of solid photocatalysts, $\text{BiTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) [J]. *Chem Phys Lett*, 2001, 343(3): 303-308.

(编辑 王焕雪)