

内饰材料发射率对密封舱室热防护效率的影响

黄安畏, 吴永鹏, 李忠盛, 李晓晖, 吴道勋, 孙彩云, 舒露,
花泽荟, 蒋龙

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 探究密封舱室热防护效率与其内饰材料表面发射率的关系, 分析内饰材料发射率对其表面温度、舱室内温度的影响规律。**方法** 采用自行设计的小型密封舱室和加热测量装置, 对内饰材料表面及舱室内温度进行测量。**结果** 当内饰材料发射率为 0.09 时, 内饰表面温度为 141.2 °C, 舱室内平均温度仅为 90.8 °C; 内饰材料发射率为 0.91 时, 内饰表面温度为 124.4 °C, 舱室内平均温度为 109.1 °C。**结论** 试样表面温度随材料发射率的提高而降低, 舱室内部空气平均温度随材料发射率的提高而升高; 试样表面温度与舱室空气平均温度的温度差随材料发射率的提高而减小; 同时, 相同试样表面温度与舱室平均温度的温度差随加热温度的提高而增加。

关键词: 辐射传热; 参与性介质; 发射率; 平均温度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.08.009

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)08-0058-05

Effect of Interior Material Emissivity on Thermal Insulation Efficiency of Sealed Cabin

HUANG An-wei, WU Yong-peng, LI Zhong-sheng, LI Xiao-hui, WU Dao-xun,
SUN Cai-yun, SHU Lu, HUA Ze-hui, JIANG Long

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the relationship between thermal protection efficiency of sealed cabin and surface emissivity of interior materials, and analyze the influence of emissivity of interior materials on surface temperature and cabin temperature. A small sealed cabin and heating measuring device were designed to measure the surface temperature of interior materials and the interior temperature of cabin. When the emissivity of interior materials was 0.09, the interior surface temperature was 141.2 °C, and the average temperature in the cabin was only 90.8 °C. When the emissivity of interior materials was 0.91, the interior surface temperature was 124.4 °C and the average temperature in the cabin was 109.1 °C. The surface temperature of specimen decreases with the increase of material emissivity, but the average air temperature of the cabin increases with the increase of material emissivity. The temperature difference between the surface temperature of the specimen and the average air temperature of the sealed cabin decreases with the increase of material emissivity. Meanwhile, the temperature difference between the surface temperature of the same specimen and the average temperature of the cabin increases as the heating temperature rises.

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-03-20

Received: 2020-02-10; Revised: 2020-03-20

作者简介: 黄安畏(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为隔热降噪功能性复合材料及结构。

Biography: HUANG An-wei (1982—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: thermal insulation and noise reduction functional composite materials and structures.

KEY WORDS: radiative heat transfer; participating medium; emissivity; average temperature

在使用过程中,一些特殊装备或设备周围将产生大量热量,如导弹高速飞行过程中,弹体因气动加热,其周围将产生大量热量,这些热量将通过装备或设备本体向其内部的控制舱室等传递。为确保舱室内电子设备正常运转,通常需要对此类装备或设备进行热防护设计,在舱室内铺设隔热材料作为舱室热防护设计的一种重要手段已广泛应用于各类密封舱室、各型方舱等领域。因隔热材料大多采用纤维类或多孔类材质,为防止隔热材料中粉体或短纤维等物质在设备存储或使用过程中对舱内电子元器件等造成不良影响,同时为进一步提升隔热材料的隔热效果以及舱室的美观程度,通常需要在隔热材料靠舱室侧采用内饰材料或密封材料等,将其与舱内环境隔离。本文主要探究了内饰材料或密封材料的发射率在不同加热温度下对舱室内空气平均温度的影响,为舱室热防护设计提供思路。

1 无介质密封舱室中的辐射传热

在由加热面与散热面共同组成的密封舱室中,当舱室内无介质时(如真空),加热面与散热面之间的传热主要由舱室本体热传导和各不同温度面间的辐射换热构成,舱室本体热传导主要与舱室自身结构及材料等相关,本文未予以考虑。依据斯蒂芬-波尔兹曼定律,辐射传热效率与各部件温度的四次方差以及辐射传热面的发射率成正比,同时与相互之间的角系数以及表面积等有关。因工程设计时,舱室内所采用的内饰材料或密封材料通常为灰体表面,此时辐射换热计算比黑体表面复杂很多。这是因为热源面在辐射热能的同时会吸收和反射其余表面投射辐射出的能量,而散热面在吸收、反射热能的同时也将向外部辐射热能,在舱室灰体表面形成多次吸收、反射的现象^[1-4]。

假设密封舱室的每个面为不透射等温面,且具有均匀的有效辐射和投射辐射密度,最终该灰体表面 i 在单位时间内离开单位面积的总辐射能的有效辐射 J_i (由灰体表面的本身辐射 $\varepsilon_i E_{bi}$ 和投入辐射的反射 $\rho_i G_i$ 组成)为:

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (1)$$

式中: ε_i 为表面发射率, E_{bi} 为表面发射功率, ρ_i 为表面反射率, G_i 为表面的辐照密度。

当舱室各面处于辐射传热平衡时,此时热源面的净辐射热能等于散热面发生辐射换热的各个净辐射换热能之和。即:

$$J_i = \sum_{j=1}^N J_j \quad (2)$$

2 参与性介质对舱室传热的影响

2.1 对流换热

当密封舱室中存在参与性介质(如空气),且内表面温度与空气温度不同时,他们之间将产生对流换热,该换热模式借助于空气分子随机运动和边界层中流体的整体运动所维持。当靠近加热面的气体接触热源时,其局部温度将升高,局部体积范围内的气体密度将降低,从而产生密度梯度,密度较小的气体因浮力向反重力方向运动,即产生自然对流换热。此时对流换热密度 $q = h(T_s - T_\infty)$, h 为对流换热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$), T_s 为加热表面温度, T_∞ 为远离该表面的温度,取决于热源表面的几何形状、参与换热流体的运动特性以及流体的热力学性质和运输性质等^[5-8]。

2.2 辐射换热

密封舱室中存在的参与性介质(空气)中所包含的非极性气体(如 O_2 、 N_2),热辐射在其内传播可忽略不计,而存在的 CO_2 、 H_2O 等极性气体在很大温度范围内对热辐射射线存在吸收现象。不同于固体和液体热辐射发射随波长连续变化,参与性气体介质对热辐射波具有选择性,即所谓的吸收带。同时,非极性分子在吸收热辐射的同时因分子能级跃迁也将发生热辐射^[9-12]。

大部分固体和液体热辐射的发射和吸收都在表面进行,而气体是在整个容积内进行的,即气体分子与热辐射射线作用为容积现象。吸收为投射到气体界面上的辐射能在辐射行程中被吸收减弱;发射为气体层界面上所接收到的辐射能为到达界面上的整个容积气体的辐射能,即气体辐射的发射和吸收是在整个容积进行的,与气体的形状和容积有关。气体辐射的发射与吸收,除与气体的种类有关外,还与气体的温度、压力与物性参数(密度和吸收系数等)分布有关。

当固体表面辐射的波长为 λ 、强度为 $I_{\lambda,0}$ 的红外射线辐射至参与性介质中时,假设参与性介质对该红外射线的吸收系数为 K_λ ,该红外射线将产生指数衰减,衰减幅度符合比尔定律,即该红外射线通过厚度为 1 的介质层后的透射率为:

$$\eta_\lambda = \frac{I_{\lambda,1}}{I_{\lambda,0}} e^{-k_\lambda \cdot 1} \quad (3)$$

当舱室内部的参与性介质吸收的热辐射能量大于其所发射的热辐射能量时,参与性介质的分子能量增加,能量较大的参与性介质的分子将以随机碰撞的方式将能量传递至周围能量较低的分子,从而使得舱室内所有分子的整体能量增加。同时,辐射使得局部

空气温度升高后,将在整个容积内对自然对流换热进行强化,整体表现为空气整体温度的增加^[13-17]。

3 材料发射率对舱室内部空气平均温度的影响

3.1 材料发射率测试

实验基材为 0.02 mm 铝箔,其中方案 I 为铝箔,方案 II—IV 分别为涂覆不同发射率涂层所制备得到的复合箔。材料的发射率采用美国 D&S 仪器有限公司生产的 AE1/RD1 发射率测量仪进行测量,测量时分别在样品表面测 5 个点的反射率,取平均值,测试结果见表 1。

表 1 发射率测试结果
Tab.1 Test results of emissivity

方案	I	II	III	IV
发射率	0.09	0.45	0.74	0.91

3.2 试验装置、设备及试验过程

搭建的试验装置如图 1 所示,主要由加热板、温控箱、无纸记录仪、热电偶等组成。密封舱室由 1 mm 的不锈钢板焊接而成,舱室外部尺寸为 300 mm × 250 mm × 250 mm。六个面内部均铺设隔热材料,其中,下表面为加热面,其余面为散热面,散热面均采用铝箔将隔热材料与内部空气环境隔离。箱体与外部空气环境直接接触,外部环境温度 22 °C,试验过程中环境温度维持不变。

测试时分别在箱体内部下表面及舱室中部分别均布 3 个测温点,如图 2 所示,热电偶采用丝径为 1.0 mm 的镍铬-镍硅(K 型)热电偶,均经过计量验证,合格。试验过程中,设定加热温度并启动加热器待舱室内部测温点所测温度稳定 30 min 后,重新设定下一个加热温度,进行下一步试验,加热温度设定点为 200、250、300、350、400 °C。试验完成后,只更换下表层材料,其余参数及材料等保持一致,下表面测温点所布置的热电偶热接点采用耐高温玻璃布胶带固定。



图 1 试验装置
Fig.1 Test apparatus

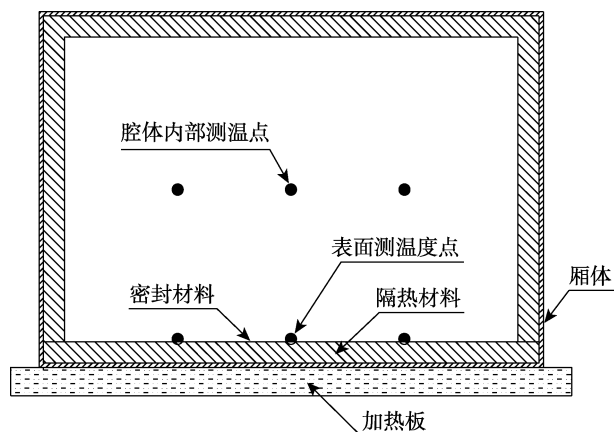


图 2 测温点布置
Fig.2 Arrangement of temperature measuring points

3.3 试验结果

在不同加热温度下,各方案中舱室内部下表面平均温度及舱室内空气平均温度的测试结果见表 2。图 3 为舱室下表面平均温度随加热温度的柱状图,图 4 为舱室内空气平均温度随加热温度的柱状图。可以看出,舱室下表面温度及舱室内空气平均温度随加热温度升高而升高,表层材料发射率越高,相同加热温度下,表层温度越低,而舱室内空气的平均温度越高。由于自然对流主要与外表层的几何形状、参与换流

表 2 各方案测试结果
Tab.2 Test results of each scheme

方案	热面温度/°C	表面温度/°C	舱室平均温度/°C
I ($\varepsilon=0.09$)	200	64.9	42.7
	250	84.2	56.1
	300	101.3	66.6
	350	120.3	78.5
	400	141.2	90.8
II ($\varepsilon=0.45$)	200	63.6	48.1
	250	82.8	61.4
	300	98.9	72.6
	350	115.8	84.6
	400	135.1	98.8
III ($\varepsilon=0.74$)	200	66.3	52.6
	250	79.2	65.1
	300	95.7	77.2
	350	111.5	90.2
	400	130.1	104.5
IV ($\varepsilon=0.91$)	200	62.8	56.9
	250	75.3	68.4
	300	90.2	81.1
	350	105.5	94.7
	400	124.4	109.1

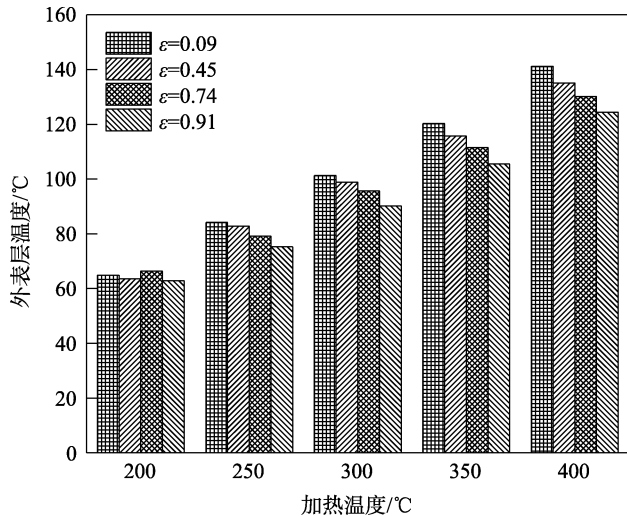


图 3 外表层温度与加热温度的关系

Fig.3 Relationship between the outer surface temperature and the heating temperature

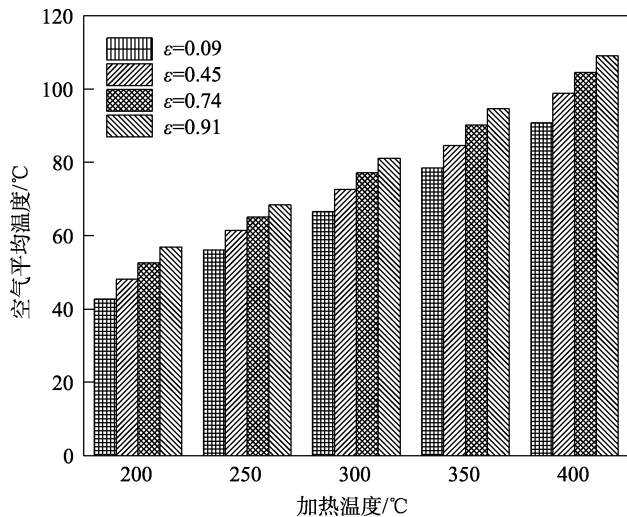


图 4 舱室平均温度与加热温度的关系

Fig.4 Relationship between the average temperature of the cabin and the heating temperature

体的运动特性以及流体的热力学性质和运输性质等相关,当假定各方案下表面与舱室内部空气自然换热系数相同时,舱室内空气平均温度不同主要由辐射换热所致。根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,辐射换热时换热效率与材料发射率成正比,表层材料的发射率越高,其向舱室散热面及舱室内部空气所辐射的能量越多,舱室内空气温度越高。同时,发射率越高,该表面辐射传热效率越高,从而表层热量聚集较少,表层温度较低。

图 5 为表层材料不同发射率时,下表面温度与舱室空气平均温度的温度差与加热温度的关系。可以看出,材料发射率越高,相同加热温度时,表层温度与舱室平均温度的温度差越小,相同材料时,随加热温度的升高,其下表面温度与舱室平均温度的温度差越大。

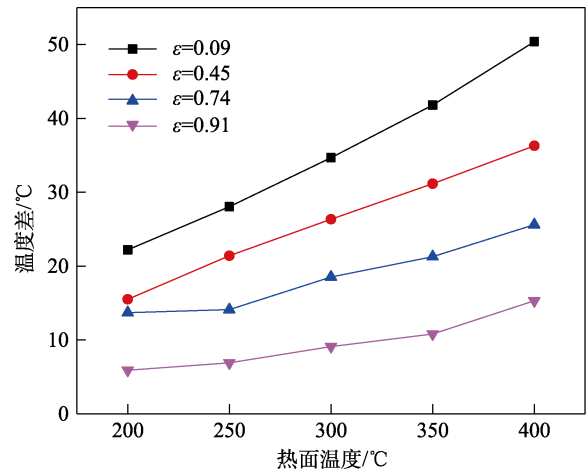


图 5 外表层与舱室平均温度的温度差与加热温度的关系
Fig.5 Temperature difference between the outer surface and the mean cabin temperature as a function of heating temperature

4 结论

1) 密封舱室在外部热源加热时,舱室内部加热面内饰材料或密封材料其表面温度随材料发射率提高而降低,舱室内部空气平均温度随该层材料发射率提高而升高。

2) 加热面内饰材料或密封材料表层温度与舱室空气平均温度的温度差随内饰材料或密封材料发射率的提高而减小;材料相同时,该温度差随加热温度升高而增加。

3) 在密封舱室等以外外部热源作为主要热量来源的环境中,为进一步提升舱室热防护水平,保证舱室内电子设备等正常运转,舱室内部的内饰材料或密封材料宜选用发射率较低的材料。

参考文献:

[1] 罗剑峰, 谈和平, 夏新林. 漫反射下多层参与性介质内的耦合换热[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(5): 596-601.
LUO Jian-feng, TAN He-ping, XIA Xin-lin. Coupled Heat Transfer in Multi-layer Participating Media With Diffuse Reflection[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(5): 596-601.

[2] 帅永董, 董士奎, 刘林华, 等. 双向蒙特卡罗法模拟参与性介质中的辐射换热[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 109-111.
SHUAI Yong-dong, DONG Shi-kui, LIU Lin-hua, et al. Bi-directional Monte-carlo Simulation for Radiative Heat Transfer in Participating Medium[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 109-111.

[3] 夏宇, 仇性启, 惠媛媛. 伴有参与性介质的开口系统传热研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1367-1372.

- XIA Yu, QIU Xing-qi, HUI Yuan-yuan. Heat Transfer in Opening System with Participating Mediums[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2016, 50(7): 1367-1372.
- [4] 张敏, 晏刚, 陶锴. 内置发热体的封闭方腔自然对流换热数值模拟[J]. 化工学报, 2010(6): 1373-1378.
ZHANG Min, YAN Gang, TAO Kai. Numerical Simulation of Natural Convection in Rectangular Cavities with a Heater of Variable Dimension[J]. CIESC Journal, 2010(6): 1373-1378.
- [5] 殷亮, 李维, 陈丽萍. 含热源方腔的耦合自然对流换热的三维数值模拟[J]. 能源技术, 2007, 28(4): 203-206.
YIN Liang, LI Wei, CHEN Li-ping. Numerical Simulation of Three-dimensional Conjugate Natural Convection in a Square Enclosure Containing Volumetric Sources[J]. Energy Technology, 2007, 28(4): 203-206.
- [6] 王志航, 何梅. 辐射散热器表面发射率对室内平均辐射温度分布的影响[J]. 暖通空调, 2014, 44(2): 95-100.
WANG Zhi-hang, HE Mei. Influence of Radiator Surface Emissivity on Distribution of Indoor Mean Radiant Temperature[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2014, 44(2): 95-100.
- [7] 马金凤, 陈海耿, 李国军, 等. 均匀散射介质参与体系辐射换热分析[J]. 材料与冶金学报, 2007(4): 55-58.
MA Jin-feng, CHEN Hai-geng, LI Guo-jun, et al. Analyses of Radiant Heat Exchange in an Enclosure with Homogeneous Scattering Media[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2007(4): 55-58.
- [8] 李志信, 过增元. 对流换热优化的场协同理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LI Zhi-xin, GUO Zeng-yuan. Field Synergy Theory of Heat Transfer Optimization by Convection[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [9] 程新广, 李志信, 过增元. 基于最小热量传递势容耗散原理的导热优化[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 94-96.
CHENG Xin-guang, LI Zhi-xin, GUO Zeng-yuan. Heat-conduction Optimization Based on Least Dissipation Principle of Heat Transport Potential Capacity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 94-96.
- [10] 夏少军, 陈林根, 孙丰瑞. 广义辐射传热有热漏换热过程(焓)耗散最小化[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(6): 1350-1361.
XIA Shao-jun, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui. Entransy Dissipation Minimization for Heat Exchange Processes with Heat Leakage and Generalized Radiative Heat Transfer Law[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(6): 1350-1361.
- [11] 林国星, 陈金灿. 多种能量转换系统的性能优化与参数设计的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2011, 50(2): 227-238.
LIN Guo-xing, CHEN Jin-can. Investigation on the Optimum Performance and Parametric Design of a Variety of Energy Conversion Systems[J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2011, 50(2): 227-238.
- [12] 中国科协学术部. 热学新理论及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
Academic Department of China Association for Science and Technology. New Theory of Heat and Its Application[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [13] 路远, 李玉波, 乔亚, 等. 红外发射率控制方法及机理研究[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 294-296.
LU Yuan, LI Yu-bo, QIAO Ya, et al. The Study on the Method and Mechanism to Control the Infrared Emissivity[J]. Infrared Technology, 2008, 30(5): 294-296.
- [14] 赵秉文, 邢荣鹏, 张世将, 等. 矩形方腔湍流自然对流数值模拟研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(4): 457-461.
ZHAO Bing-wen, XING Rong-peng, ZHANG Shi-jiang, et al. The Numerical Simulation Study of Turbulence Natural Convection in Rectangular Cavity[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech Technology, 2008, 25(4): 457-461.
- [15] 丁华, 李晨, 王海军. 军用方舱传热系数值的计算及优化研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 25-29.
DING Hua, LI Chen, WANG Hai-jun. Research on Calculation and Optimization of the Value of Military Shelter's Heat Transfer Coefficient[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 25-29.
- [16] 王向东, 李智, 庄信武. 某型车载方舱调温系统的设计及设备选型[J]. 机电产品开发与创新, 2016, 29(5): 3-5.
WANG Xiang-dong, LI Zhi, ZHUANG Xin-wu. The Designing of the Temperature Regulating System and the Equipment Selection for a Certain Type of Vehicular Shelter[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2016, 29(5): 3-5.
- [17] 刘晓红, 杨金志, 章玉太, 等. 某雷达方舱的热环境仿真分析[J]. 电子机械工程, 2012, 28(4): 8-11.
LIU Xiao-hong, YANG Jin-zhi, ZHANG Yu-tai, et al. Simulation Analysis of Thermal Environment in a Radar Shelter[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(4): 8-11.