

文章编号: 1672-8785(2018)03-0013-05

空间用多层绝热组件隔热特性的试验研究

雷营生^{1,2} 徐红艳¹ 谢荣建¹ 韩娜丽^{1,2} 董德平¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 多层绝热组件在高真空环境下具有超强的隔热性能, 其优异的隔绝热辐射和热传导能力对红外光电设备可以起到高效的热保护作用, 因此在航空航天上有着极其广泛的应用。主要测试了航天用双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件在高真空环境下的传热性能, 为工程应用提供了具体的数据。

关键词: 多层绝热组件; 隔热性能; 恒热流; 恒温差

中图分类号: TB6 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.03.003

Experimental Study of Heat Insulation Capability of MLI Assembly in Space

LEI Ying-sheng^{1,2}, XU Hong-yan¹, XIE Rong-jian¹, HAN Na-li^{1,2}, DONG DE-Ping¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

Abstract: Multi-layer Insulation (MLI) assemblies have excellent thermal insulation performance in high vacuum environment. Their excellent heat radiation and heat conduction insulation ability can provide an effective thermal protection for infrared opto-electronic equipment. So, they have extremely wide applications in aerospace. The insulation performance of a MLI assembly for space application with duplex aluminized polyester film is mainly tested in the high vacuum environment. The test has provided specific data for an engineering application.

Key words: MLI; insulation capability; constant heat flux; constant temperature difference

0 引言

多层隔热组件是一种适合在高真空环境下使用的高效绝热系统, 它是通过在绝热层空间内设置多层由绝热材料间隔的防热辐射屏并抽高真空实现绝热的。这种隔热组件利用屏间的层层反射, 对辐射热形成很高的热阻, 在真空

下具有极好的隔热性能, 有超级绝热之称。

影响多层绝热组件隔热性能的因素有很多, 包括多层绝热组件的材料种类及其组合方式、真空度、层密度和多层的厚度、孔隙率、边界效应、使用温区等。另外, 多层隔热组件受到的机械负荷、多层空间的杂质、多层的内

收稿日期: 2018-01-23

作者简介: 雷营生(1990-), 男, 河南信阳人, 博士生, 主要从事先进空间多层隔热组件的性能和结构研究。E-mail: leiyingsheng0506@163.com

外壁温以及多层的使用时间都会影响其当量导热系数^[1]。

近年来,随着航天事业的发展,对高真空多层绝热组件提出了更高的要求,国内外均开展了高真空多层绝热组件的理论与实验研究^[2-5]。目前工程项目中已较多使用双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件。因此,本文在具有热沉的真空罐内采用不同热流功率和传热温差对双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件的隔热能力进行了试验研究,获得了多层隔热组件在传递不同热流时的内部温度分布情况。该隔热组件主要用于红外卫星光电设备和红外遥感仪器的热防护,保证设备的正常在轨运行。

1 多层绝热组件隔热能力的理论分析

高真空多层绝热系统传热过程中的热阻主要来自镀铝反射屏的辐射热阻和间隔物的传导热阻。通过增加反射材料的层数可以减少辐射传热量,但反射材料层数的增加会导致反射层间物理接触的概率增加,从而导致固体的传热量增加。增加间隔材料层可以减少固体的传热量。在真空度优于 10^{-3} 的情况下,多层绝热组件中绝大部分气体分子被去除,可忽略气体传热。

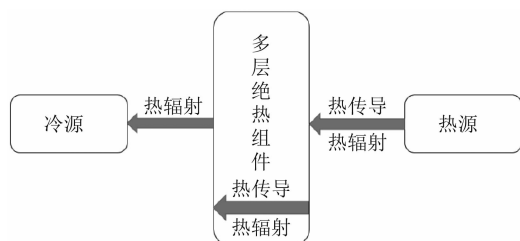


图1 多层绝热组件的传热分析

多层绝热组件的隔热性能与多种因素有关,如热源与冷源的温度、多层绝热组件的材料、打孔率、层密度与层数等。本文主要针对工程上应用广泛的双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件的隔热性能进行试验研究,在不同工况下测试该种多层绝热组件的隔热性能。

2 试验装置及测试方法

试验在直径为1 m的具有热沉的真空罐内进行。试验装置由真空罐(冷源)、加热片(热

源)、铝箔、双面镀铝聚酯薄膜多层组件、温度测量和采集系统、直流电源和控温设备等组成,如图2所示。

试验采用4片并联的 $400\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 薄膜加热片充当热源,加热片单片的电阻为 $88\ \Omega$,将其固定在铝箔上,铝箔的面积为 $450\text{ mm}\times 450\text{ mm}$ 。铝箔两侧分别用15层双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件包裹,面积为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$,两侧的多层绝热组件在边缘处用聚酰亚胺胶带连接。

整个试验件悬吊在直径为1 m具有热沉的真空罐内,在持续通液氮的情况下,真空罐的温度可达到 -100°C 以下。以真空管为冷源,对整个多层两侧外表面进行辐射换热。

在每侧的15层聚酯薄膜上各均匀分布8个测点,测点使用Pt100三线制铂电阻实现温度测量;通过电缆接外部XMTJK8路控温仪实现温度控制,控温仪连接电脑,通过软件实现温度采集。加热片并联后,用电缆将其连接罐外30 V直流电源,然后通过调节直流电源输出电压的高低来实现工况的改变。具体试验设备见表1。

3 试验工况

安装并调试试验装置,调节安装高度,保证加热系统和采集系统能够正常工作。检验设备一切正常之后,关闭真空罐,开始试验,具体试验程序如下:

(1)开启数据采集系统,测试初始状态时的温度测量误差,控制测量精度在 0.5°C 范围内。

(2)开启真空机组,抽真空。

(3)真空度到达 10^{-3} 量级之后开始通液氮降温,继续抽真空并维持真空度在 10^{-4} 量级。

(4)待热沉温度降低并稳定到 -100°C 以下,且罐内多层绝热组件上各测温点的温度稳定之后,开启直流电源以模拟发热。

(5)对不同工况下的双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件进行绝热性能测试,工况设置为控温 $T_H = 40^\circ\text{C}$, $T_H = 0^\circ\text{C}$,恒定功率为5 W、4 W、3 W、2 W、1 W,共七种工况。

表 1 试验设备列表

设备名称	型号参数
双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件	两套, 每套 15 层, 厚度 2 mm, 面积 500 mm×500 mm
热源模拟板	450 mm×450 mm 铝箔, 4 片 400 mm×100 mm 加热片
真空设备及冷源模拟	直径为 1 m 带热沉的真空罐
测温元件	Pt100
温度采集及控制仪	XMTJK8 路控温仪
加热电源	30 V 直流电源

考虑试验的可靠性, 以上各工况试验在多层绝热组件内部温度达到平衡以后维持稳态 4 h 以上, 然后进入下一工况试验。

4 测试结果分析

本文在试验中的主要从双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件的热源侧 T_H 和冷源侧 T_C 的温

差情况来考察其隔热性能。

图 4 给出了真空低温试验下多层绝热组件在不同工况下达到稳态之后的各层温度分布。从测试结果来看, 无论在什么工况之下, 双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件均可以起到一定的绝热作用。控温为 40℃ 时, 冷面温度为 -93.1℃, 内外温差为 133.1℃; 控温为 0℃



图 2 试验装置实物图

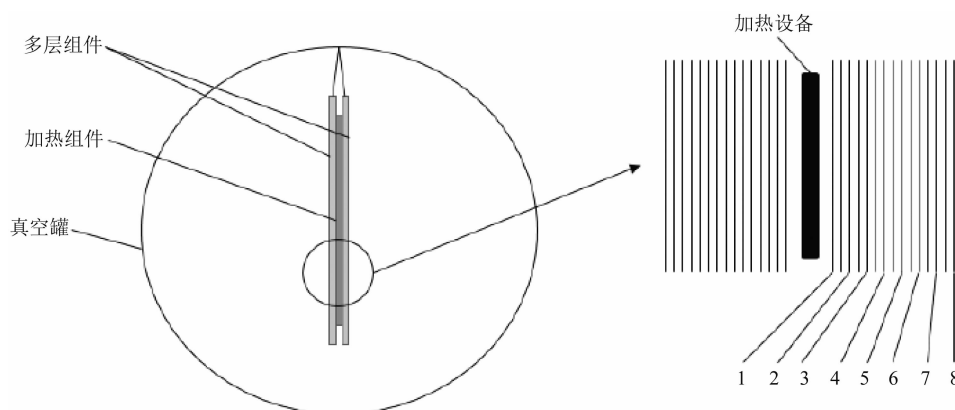


图 3 试验各测点的分布

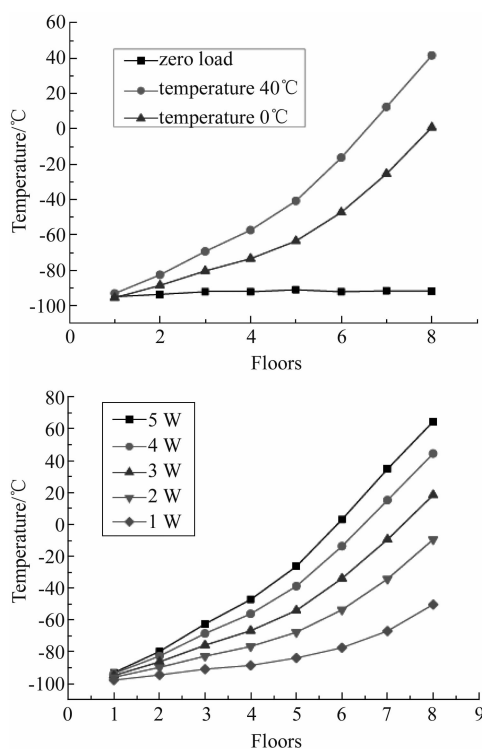


图4 多层绝热组件在不同工况下的稳态温度分布

时,冷面温度为 -95.5°C ,内外温差为 95.5°C 。在外部环境保持不变的情况下,增加内部温度会增加通过多层绝热组件的热流。恒定总热流功率为 5 W 时,热面温度为 64.6°C ,冷面温度为 -93.1°C ;恒定总热流功率为 4 W 时,热面温度为 44.4°C ,冷面温度为 -93.7°C ;恒定总热流功率为 3 W 时,热面温度为 18.4°C ,冷面温度为 -94.9°C ;恒定总热流功率为 2 W 时,热面温度为 -9.5°C ,冷面温度为 -96°C ;恒定总热流功率为 1 W 时,热面温度为 -50.3°C ,冷面温度为 -97.8°C 。随着通过多层绝热组件总热流的增加,多层组件内外温度均有所增加。通过比较控温为 40°C 时与恒定功率为 5 W 和 4 W 时的温度也可以得出,在总散热面积为 0.5 m^2 、外部环境为 -100°C 以下时,维持保温体温度 40°C 的漏热功率在 $4\sim 5\text{ W}$ 之间。

根据传热学理论,在达到稳态之后,内部模拟热源输出的热量在通过多层绝热组件之后全部被真空罐体接受,所以有

$$Q = \epsilon A \sigma (T_c^4 - T_{out}^4) = \lambda A (T_H - T_c) / \delta \quad (1)$$

式中, T_H 为多层绝热组件的内部温度, T_c 为多层绝热组件的外层温度, T_{out} 为低温真空罐体的平均温度, ϵ 为多层绝热组件的外表面发射率, A 为总表面积, δ 为多层绝热组件的厚度, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$, λ 为多层绝热组件的当量导热系数。

通过计算可以得出在本次试验中双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件在各工况下的当量导热系数,结果见表2。

从表2可以看出,目前工程用高真空多层聚酯薄膜绝热组件在低温真空下的隔热性能已极优异,绝热系数达到 10^{-4} 量级,且在温度越低的领域,有更小的绝热系数 λ ,即更优的绝热能力。从图4可以看出,在多层绝热组件绝热性能的测试实验中,各层温度随层数呈线性变化,且曲线的斜率随层数的增大而增加,在靠近保温物体一侧斜率达到最大,说明更靠近保温物体的多层组件部分起到了更大的绝热作用。

5 结论

通过对高真空双面镀铝聚酯薄膜多层隔热组件在不同温差和不同功率条件下的隔热性能进行测试,获得了以下结论:

(1)同种安装条件下,随着加热量的增加或者内外温差的增大,多层绝热组件的隔热性能呈减弱趋势。

(2)同种安装条件下,多层绝热组件越靠近保温物体的部分起的绝热作用越大。工程应用上,可以考虑使用变密度多层绝热组件。在靠近保温物体的部分,加大多层绝热组件的层密度及隔热能力,可增加整体隔热效果。

表2 双面镀铝聚酯薄膜多层绝热组件在各工况下的当量导热系数

工况	控温 40°C	控温 0°C	恒功率 5 W	恒功率 4 W	恒功率 3 W	恒功率 2 W	恒功率 1 W
λ	1.15×10^{-3}	0.99×10^{-3}	1.27×10^{-3}	1.16×10^{-3}	1.06×10^{-3}	0.92×10^{-3}	0.83×10^{-3}

(3)提高多层绝热组件隔热性能的稳定性仍然是工程上努力的方向。

参考文献

- [1] 江经善,张世伶. 多层隔热材料的性能研究 [J]. *中国空间科学技术*, 1988(1):64-70.
- [2] 李永春,刘强,马洪炯,等. 真空环境中多层隔热材料的隔热性能 [J]. *宇航材料工艺*, 2012(4): 90-92.
- [3] 孙培杰,吴静怡,张鹏,等. 层间稀薄气体传热对多层绝热材料性能的影响分析 [J]. *低温与超导*, 2008(9):11-17.
- [4] 吴同文,杨磊,刘大群,等. 低温下真空多层绝热材料导热系数的试验 [J]. *低温与超导*, 1996(2):39-41.
- [5] Kropschot R H, Schrod J E, Fulk M M, et al. Multiple-layer Insulation [J]. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1960(5): 189-198.

(上接第 12 页)

3 结论

通过对 InSb 晶体的生长方法、生长条件以及位错密度控制进行研究, 成功生长出了 100 mm 直径低位错密度的 InSb 晶体, 与国外同尺寸 InSb 晶体相当。在热场优化方面, 还有待于进行更进一步的模拟, 继续优化热场结构, 降低径向以及轴向的温度梯度, 从而进一步地降低晶体的位错密度。在下一步的研究工作中, 不仅需要控制高质量大尺寸 InSb 晶体的位错密度, 还需要对其杂质分布(即电参数)进行优化研究。

参考文献

- [1] Goldschmidt V M. Crystal Structure and Chemical Constitution[J]. *Science Progress in the Twentieth Century* (1919-1933), 1929, **24**(93):102-103.
- [2] Predel B. In-Sb (Indium-Antimony) [M]. Hg-Ho-La-Zr. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [3] 邓志杰. 半导体材料[M]. 化学工业出版社, 2004.
- [4] 巩锋, 程鹏, 吴卿, 等. InSb 晶片材料性能表征与机理分析[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(10):1146-1148.
- [5] 林达荃. 铋化锑的物理特性及其应用[J]. *物理*, 1963(2): 18-27.
- [6] Michel E, Singh G, Slivken S, et al. Molecular Beam Epitaxial Growth of High Quality InSb [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(26): 3338-3340.
- [7] 秦朗. 半导体级直拉法的工艺控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] 王猛. $\Phi 200$ mm 低氧碳 CZSi 单晶的制备及计算机数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.
- [9] 冯德伸, 李楠, 苏小平, 等. 4 英寸低位错锗单晶生长[J]. *稀有金属*, 2008, **32**(1):34-37.