

多层隔热组件的制作工艺

孙 慧 徐抒岩 孙守红 曲洪丰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

文 摘 介绍了多层隔热组件及影响其隔热性能的主要因素,包括反射屏与间隔层的选材、多层组件的层密度、放气孔等。结合实际工程应用,对于多层隔热组件的材料选择和制作工艺进行了着重说明。

关键词 多层隔热组件,被动热控技术,制作工艺

Processing of Multilayer Insulation Blankets

Sun Hui Xu Shuyan Sun Shouhong Qu Hongfeng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract The necessity of multilayer insulation blankets is introduced. The main factors affecting thermal insulation performance of multilayer insulation blankets are elaborated, including the selection of reflective barrier and spacing layer, layer density, stoma and so on. Application in practical engineering, material selection and production process is highlighted.

Key words Multilayer insulation blankets, Passive thermal control technology, Production process

0 引言

卫星在轨道运行阶段,表面温度在 $>200^{\circ}\text{C}$ 和 $<-200^{\circ}\text{C}$ 变化,要在各种热边界条件和内部热状态下,保证各部分温度在规定范围内恒定。为了保证卫星的正常工作,必须对其进行专门的热控硬件设计。本文介绍了一种经飞行试验验证过的、具有优异隔热性能的多层隔热材料组件。它是一种由多层反射屏与间隔物迭合而成的隔热材料。在真空条件下,多层隔热材料的隔热性能尤为突出,被誉为超级绝热材料^[1]。

1 影响多层组件隔热性能的主要因素^[1-3]

1.1 反射屏(reflective barrier)

反射屏又名辐射屏,主要用来阻止来自热壁的热辐射,减少辐射换热,要求有高的反射率 ρ ,低的发射率 ε ,以有效地反射入射到屏上的热流,而自身吸热甚少。这就要求反射屏具有较低的粗糙度,同时必须很薄,但强度又不能太低,通常选用单面或双面镀铝(金)聚酰亚胺膜。

1.2 间隔层(spacing layer)

间隔层材料的主要要求是,与反射屏有较小的接

触面积、低热导率、低粒子污染和适应飞行时所经受的温度。用作间隔物的材料主要有疏松纤维、纤维布、网状织物、泡沫塑料等。经过各种试验对比,其中网状织物的涤纶网综合性能较为优越。这类间隔物尺寸稳定性好,质量轻,放气率低,且易于抽真空。为了减小接触导热,应使网孔的孔径尽可能地大,一般选择网厚为 $75\sim 600\ \mu\text{m}$,网孔尺寸为 $1.5\sim 6.4\ \text{mm}$ 。

有时为了应急也可不用间隔物,而是将表面蒸镀金属层的塑料薄膜揉皱、压花,来减小反射屏之间接触传热量。

1.3 多层单元(element of multilayer insulation blankets)

一层反射屏及间隔层的组合体称一个多层单元。实验表明,对一膜一网的多层隔热材料,当其层密度达到 $60\sim 80$ 层/cm时,其隔热性能显著下降。层数一定时,对多层体的层密度也有一定的要求,辐射换热的表观热导率和残余气体导热的表观热导率与层密度成反比,而层间固体的导热的表观热导率随层密度增大而增大。因此,层密度存在着一个最佳值,此时其总表观热

导率为最小。图 1 为双面镀金聚酯亚胺薄膜-涤纶网多层隔热材料的当量热导率随层密度的变化曲线^[3]。实验证明,最佳层密度值通常在 20~40 层/cm。需要特别注意的是,在实际星体包扎时不能包扎过紧,以免影响多层隔热组件的隔热效果。

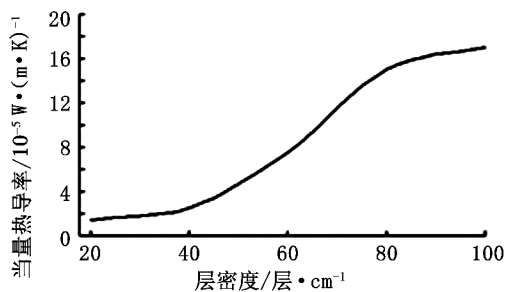


图 1 双面镀金聚酯亚胺薄膜-涤纶网多层隔热组件的当量热导率随层密度的变化曲线

Fig. 1 Changes of equivalent thermal conductivity of double-goldized kapton dacron with layer density

实验证明,在每对反射屏间,加置 2~3 层间隔物(一膜二网或一膜三网),可进一步提高其隔热性能。

2 多层隔热组件的制作工艺

依据卫星和有效载荷的工作环境及工作年限的不同需求,多层组件的制作工艺也分为多种,但整个工艺流程大体相同,如图 2 所示。

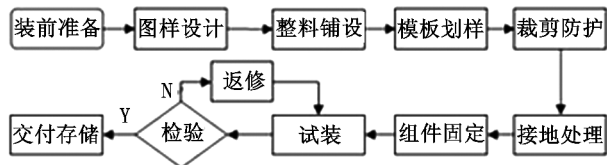


图 2 多层制作工艺流程图

Fig. 2 Production flow chart of multilayer insulation blankets

2.1 装前准备

在多层隔热组件的制作过程要对工作环境及操作人员进行严格控制,以确保其优良的隔热性能。

2.1.1 环境要求

温度:(20±5)℃;相对湿度:35%~60%;洁净度:10 万级超净;照度:≤750 lx。

2.1.2 人员要求

操作人员需要穿防静电工作服及工作鞋,戴棉质白色细纱手套、指套和工作帽。在包扎多层隔热体时,也必须在同样的工作环境下进行,否则会影响反射屏的反射率、间隔物的热导率和多层体内真空度的提高。不允许人员皮肤直接接触星体、仪器及部件的热控表面,主体包覆时需佩带防静电手腕带。

2.2 图样设计

图样设计在整个多层组件的制作过程中起着关键作用。图样的制作有如下两种方法。

(1)依据被包覆星体、设备机械图规划和推算出多层组件的形状与尺寸。此方法简单、精确,适用于

形状规则组件的多层制作。

(2)用样纸在实物上画出图样(透明样纸效果较好),详细标出多层边缘、开口位置、固定位置等。此方法较为直观,适用于不规则组件的多层制作。

2.3 整料准备

2.3.1 开设放气孔^[4-5]

多层隔热体在高真空环境下的隔热性能更佳,可有效地阻止残余气体的导热。为了减小层间的气体压力梯度,提高抽空效率,采用在反射屏上穿孔的措施。穿孔的面积率(穿孔率)会影响反射屏的有效反射率,穿孔率越大,有效反射率就越小,而抽空效率越高,气体的导热越小。但打孔率进一步增加时,隔热性能反而会发生近于线性的下降。所以在选择反射屏材料时应尽可能的选择已经开好放气孔的材料,如果没有放气孔,则在多层组件的铺设前要对反射屏进行开孔操作。例如直径为 0.8 mm,中心距为 20~50 mm 的小孔。

2.3.2 整料铺设

(1)先将一层反射屏展平在工作台上,然后铺设一层或若干层间隔层。在铺设第二层反射屏时,必须注意将放气孔错开。应使一层反射屏与一层间隔层相叠加,并且相互平行,否则,会引起多层体内局部区域层间距离太近,使反射屏间接触形成“热短路”。

(2)用缝制线缝制一条固定线,缝制不能太紧。优良的多层隔热体应当是相当松散的。同时又具有较大的层密度和良好的缠绕牢固性,在振动、冲击作用下,多层隔热体不会松散而脱落。

(3)考虑原子氧对反射屏的腐蚀作用,航天器暴露在舱外的多层组件应包覆防原子氧布(组成为 Beta-silicon 光纤织物表面涂覆 Teflon 涂层)。为消除静电积累,还需在防原子氧布上预缝制 5 mm×5 mm 间隔的金属线网格。

2.4 模板划样

2.4.1 划样

依据制作完成的多层组件图样,在铺设完毕的大块多层料上画出样线。然后在样线内侧缝制出外形圈,包括有较大开口处,以免散料。

2.4.2 缝制

多层组件的缝合应松紧适度,且边缘整齐,无毛边,表面无污染,针脚距一般为 30~50 mm,同一类多层组件针脚距应一致、均匀。

2.5 裁减与防护

(1)依据图样用剪刀沿缝制线外侧将多层隔热材料外形裁剪下来,要求裁剪端面平直、无毛刺、无损伤。

(2)防护处理——用双面镀铝聚丙烯压敏胶带封闭多层隔热组件的周边和切口,减少边缘漏热;保

护有机缝合线不受原子氧的侵蚀,增强内部或包覆层的机械性能以及改进多层组件的接地性能。

2.6 接地处理^[6]

多层隔热组件电接地是设计多层组件的一个重要要求。接地装置的形式、结构和接地数量,对于多层隔热组件的整体热性能有较大影响。任何形式的静电放电,都会干扰航天器有效载荷工作,损害关键的电子电气设备,其结果有可能造成航天器失效。所以要对多层隔热组件进行必要的接地处理。

多层组件每一层反射屏及多层面膜均需与主体接地桩连接,如图3所示。每个组件,无论是内部还是外部,都应至少用两个接地点连接到结构上。对于长度大于500 mm的组件,应每隔500 mm提供一个接地点。

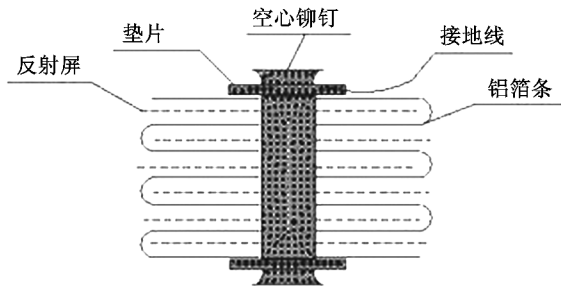


图3 多层组件接地桩的制作

Fig.3 Production of ground piles

2.7 固定

多层隔热组件与被包覆的主体需要通过一定方法进行固定,确保多层组件与主体严密接触、不脱落。固定方法有胶带粘贴、尼龙网兜扎、尼龙搭扣搭接、销钉压片固定、结构夹层固定、金属箍带固定等。

实验证明最简单、实用的固定方法是“尼龙搭扣搭接”法:将尼龙搭扣的“钩”带用粘接剂(推荐用914胶或GD414)粘贴在仪器及星体表面上,将尼龙搭扣的“圈”带缝制在多层隔热材料组件上,然后将尼龙搭扣的“钩”带与“圈”带互相对准压紧。这种结构和固定方式已广泛用于各种航天器。

2.8 试装

为避免试装过程中对多层组件不必要的损伤,需要在多层组件内侧用纸样进行防护,确保多层面膜不与机械件直接接触。

将多层组件与相应机械件进行试装,检验开口处是否正确、边缘是否整齐、互不干涉。检验多层组件与包覆件的尼龙搭扣是否吻合,检验多层组件松紧是否适度。针对有问题的部分进行适当的修改。

2.9 检验

(1) 检验多层隔热组件是否全部缝制完毕。

(2) 检验多层隔热组件表面是否有污垢、油渍等,如有,用无尘布蘸无水乙醇小心清理。

(3) 接地桩的检验:接地点中的任何一个到结构

参考面件的直流连接电阻应不大于100 mΩ(在0.5 A电流下测试)。金属膜表面到最近接地点间的直流电阻应不大于10 Ω(在100 mA电流下测试)。

(4) 尼龙搭扣固定的检验:用1 kg砝码随剥离方向挂在尼龙搭扣的钩带上,检验尼龙搭扣“钩”带粘接力;目测用缝制线缝制在多层隔热组件上的尼龙搭扣“圈”带是否牢固,不应有松动脱线现象。

(5) 检验现场是否留有多余物,并进行清理,将多余物放进自封袋,带出现场。

2.10 存储

(1) 包装

多层组件按图号归类封存在有干燥剂、抗氧化剂的密封塑料袋内,并将包装袋放入专用包装箱,包装过程中应避免用手直接接触多层表面。

(2) 标记

在每件多层组件、包装袋、包装箱外表面都应有明显标志,包括:多层组件的名称、包装箱表面还应标有防挤压、通风、防潮与防腐蚀标记。

(3) 运输

在运输过程中应避免挤压、揉搓、污染与腐蚀。

(4) 贮存

贮存期间产品应平放在干燥、通风、无腐蚀性的环境中。装星后及组装后的产品应存放在相对湿度不大于60%的净化间。

3 结语

多层隔热组件的优点是技术简单、工作可靠、使用寿命长,为提高其隔热性能与可靠性,需要从反射屏、间隔物等材料的选择以及层密度、开孔率、图样设计、裁剪防护、接地处理、组件固定和组件存储等制作工艺方面进行综合考虑。在制作过程中应严格按照相关工艺标准执行,确保发挥其优良的隔热性能。

参考文献

- [1] 江经善. 多层隔热材料及其在航天器上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(4): 1-2
- [2] Keller C W. Thermal performance of multilayer insulations[R]. NASA N74-22564
- [3] Spacecraft thermal control design data[R]. NASA N76-11:20203-20206
- [4] 任亚杰. 多层隔热体的包扎技术[J]. 汉中师范学院学报, 1999(1): 3-4
- [5] David G Gilmore. Satellite Thermal Control Handbook [M]. 1994: 4-62
- [6] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 45-55

(编辑 吴坚)