

S781 涂层分区喷涂色差分析与试验

郑红阳¹ 范宇峰¹ 满广龙¹ 张建贤²

(1 中国空间技术研究院总体部,北京 100094)

(2 中国科学院有机化学研究所,上海 200032)

文 摘 为满足载人飞船返回舱的温度要求,需要在返回舱外壁喷涂 S781 热控涂层。若采用分区喷涂的方式,在搭接区域会出现色差。本文对 S781 热控涂层搭接色差进行了特性分析,并进行了不同温度、间隔时间和基材的验证试验。结果表明:色差是由于分区喷涂间隔时间大于涂层的表干时间引起的。分区间隔时间为 1 min 时没有色差,间隔时间越长,色差越明显;温度较高时,表干时间变短,色差更明显,且会出现大颗粒现象。将喷涂温度控制在 20℃ 左右,分区间隔时间小于 2 min,可以有效的减弱或控制色差。提出了一种返回舱热控涂层喷涂改进方法,可以有效的减弱色差。

关键词 S781,热控涂层,分区喷涂,色差

Analysis and Experiments of Color Difference on S781 Coating Partition Painting

Zheng Hongyang¹ Fan Yufeng¹ Man Guanglong¹ Zhang Jianxian²

(1 Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

(2 Institute of Organic Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032)

Abstract In order to maintain the temperature of the reentry capsule, the S781 thermal coating is painted on outside wall of the reentry capsule of manned spacecraft. In the painting process, the color difference appears between the partition and adjacent partition. In this paper, the composition of color difference area of S781 coating is analyzed, and several experiments are designed with different painting temperatures, interval time and materials. The result reveals that the color difference is due to that the interval time of partition painting is longer than the surface drying time of the coating. The color difference becomes obviously with the interval time, which is more than 1 minute. And there are granules when the temperature is high, because the surface dries much more quickly. At last, an improved painting method of S781 thermal coat is proposed to control the joint color difference. The result will be helpful to the implement of thermal control of manned spacecraft.

Key words S781, Thermal coating, Partition painting, Color difference

0 引言

热控涂层是专门用于改善固体表面热辐射性质,从而达到对物体温度控制目的的表面材料,其技术简单、工艺可靠,是航天器热控制最基本手段之一^[1]。选择涂层的最主要的依据是航天器热控制所需的各种表面的热辐射性质,太阳辐射吸收比 α_s 与红外半球发射率 ε_h 的比值对航天器的温度水平有决定性的影响。常见的热控涂层有电化学型、涂料型和二次表

面镜等^[2]。

我国载人飞船返回舱外壁热控涂层为 S781 铝灰漆^[3],其 ε_h 较低, α_s 较高,因此可以减弱飞船返回舱的散热,提高返回舱温度。喷涂时采取的是人工喷涂,由于返回舱面积较大,且表面为椭圆形,因此需要将返回舱划分成不同大小的区域分别进行喷涂,这样就会出现涂层搭接区域。在喷涂中发现,S781 热控涂层在一定条件下会出现搭接区色差现象,影响涂层的整体外

收稿日期:2012-04-17;修回日期:2012-05-22

作者简介:郑红阳,1984 年出生,工程师,主要从事载人航天器热控技术研究。E-mail:ustchy@gmail.com

观。本文对 S781 热控涂层的搭接色差进行了特性分析和试验验证,提出了搭接色差的初步控制方法。

1 搭接色差的特性分析

S781 涂层的成分包括 S781 有机硅树脂溶液、炭黑、铝粉、二甲苯溶液,辅以玻璃珠使其搅拌均匀。S781 涂层的热物理性能是炭黑的高发射率、高吸收率和铝粉的低发射率、低吸收率在单位面积上综合平均所形成。若固定铝粉含量,随着炭黑比例的增加,涂层的 ε_h 、 α_s 以及 α_s/ε_h 都有所增大。因此,通过调整炭黑比例,可以得到不同的 α_s/ε_h 比值,即热物理性能满足不同要求的 S781 热控涂层。

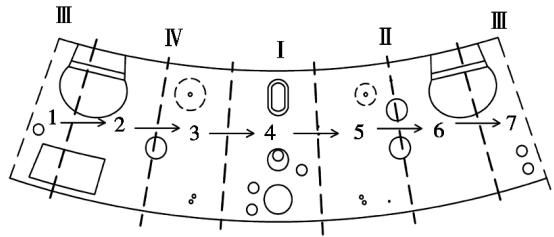


图1 载人飞船返回舱及喷涂方式示意图

Fig.1 Picture of reentry capsule of manned spacecraft and map of the painting method

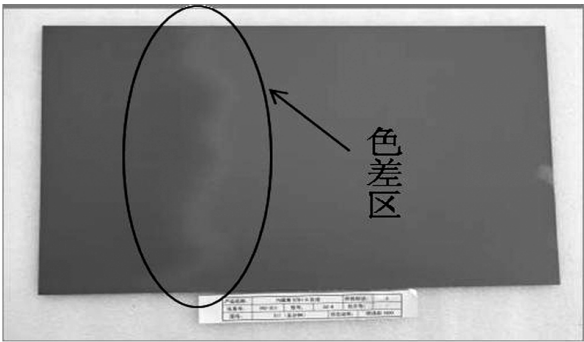


图2 搭接区色差

Fig.2 Color difference of partition painting

S781 涂层为悬浮混合物,其中 S781 树脂完全溶解在二甲苯内,炭黑与铝粉不溶于二甲苯,炭黑的主要性质有粒径、结构和表面特性,平均粒径越小,黑度越高,且常形成聚集;铝粉平均粒径越大,颜色越浅。铝粉除了两端为漫反射外,其余均为镜面反射(图3)。

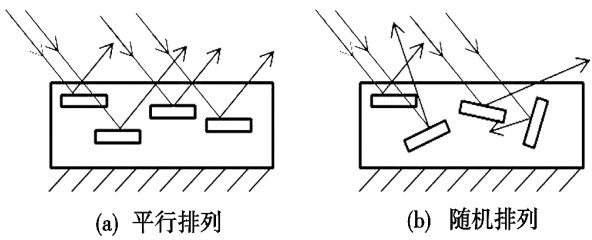


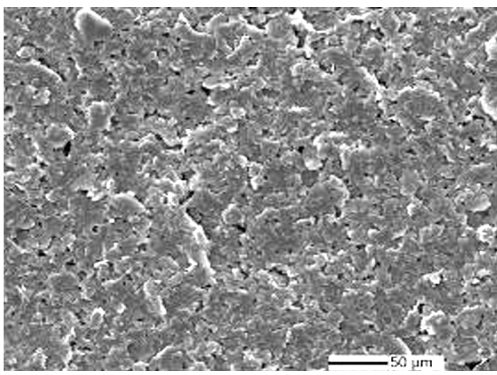
图3 铝粉排列与发射光线的关系

Fig.3 Relation between the array of aluminum powder and the rays

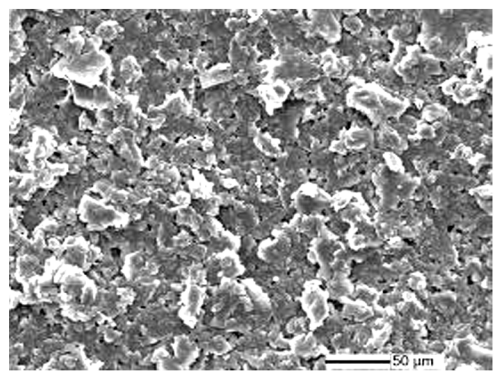
飞船返回舱外壁表面为椭圆形,面积约为 16 m²,均要喷涂 S781 涂层,基材包括玻璃钢(极少)和烧蚀材料^[4]。由于舱体面积较大,人工喷涂无法一次操作完成,所以事先将舱体划分成若干区域,分区进行喷涂,如图 1 所示。在每个分区中,由上到下、由左至右连续完成该分区的喷涂。相邻分区喷涂的间隔时间称之为分区间隔时间。喷涂完毕 1.5 ~ 2 h 后,将舱体置入烘箱进行烘烤固化。在试验喷涂中发现,连续区域的搭接处会出现一定的色差现象,一般呈不规则的带状分布,颜色比非搭接区要浅,如图 2 所示(基材为铝合金)。

喷涂后,二甲苯溶剂挥发,随着漆的黏度增加和漆膜的收缩,理论上使铝片呈与基材表面平行的方向多层排列。若溶剂挥发得过快,漆膜未充分流平,铝粉就失去了定向排列的时间和空间,铝片随机排列趋向增加,形成不同层次的排列分布,对于同一光线入射角度,反射出去的光线亮度就不一样^[5]。

在用喷枪喷涂时,漆料在高速气流的作用下,雾化成为微小的液滴,呈椭圆形,边缘区雾化程度更高,因此表干时间比中心区域要短。如果在搭接区喷涂时涂层尚未表干,即进行“湿碰湿”的工艺操作,涂层就会继续流平,不易出现色差现象;如果搭接时涂层已经表干,在搭接区极易出现色差。图 4 是用扫描电镜拍摄的非搭接区和搭接色差区的电子图像,可以看出,在正常区域,铝粉基本平行于基材排列,平铺在表面,颜色一致性好;在搭接区,多数铝粉与基材表面有一定角度,呈杂乱不规则排列,片状铝粉的边缘部分颜色发亮。能谱分析结果表明:与非搭接区相比(表 1),搭接区表面成分质量分数中 C、Si 元素相差不大,变化率分别为 4% 和 0.5%;Al 元素降低了约 13.6%,O 元素升高了 11.2%。由此可见,铝含量的不同是搭接区和非搭接区表面成分分布的最大差异(O 元素主要来自于有机树脂,对色差无影响),也从另一方面验证了铝粉的杂乱不规则排列。



(a) 搭接区



(b) 非搭接区

图4 S781涂层搭接区和非搭接区的电子图像比较

Fig. 4 Electron micrographs of overlapping area and ordinary area

表1 S781涂层试样表面成分

Tab. 1 Surface composition of S781 thermal coating

喷涂区域	wt%			
	C	O	Si	Al
搭接区 ¹⁾	22.49	18.49	42.67	16.35
非搭接区 ²⁾	21.58	16.63	42.87	18.93

注:1)取3个试样的均值;2)取4个试样的均值。

基于以上分析可以看出,处理好涂层的表干时间和分区间隔时间极为关键。控制分区间隔时间小于表干时间,涂层就会在搭接区有足够的时间流平,将有效的控制或减弱色差。因此需要从两方面着手:一是增大表干时间;二是减小分区间隔时间。本文重点考察了不同温度和基材条件下,分区间隔时间对搭接色差的影响,并给出了控制、减弱色差的建议。

2 搭接色差试验

试验所用试片分为铝合金和烧蚀材料两种,规格为500 mm×300 mm,将其分为左右两个分区,左侧分区喷涂完毕后等待一定时间,继续喷涂右侧分区,此时间即分区间隔时间;喷涂1遍后等待10~15 min至涂层完全表干重复此操作,共喷涂3遍,以达到涂层的厚度要求。

2.1 铝合金基材试验

利用铝合金基材进行了试验。试验工况如表2所示,共包含13个工况。在20和30℃时,分别设置了不同的分区间隔时间;另外,还进行了不同喷漆技工和喷枪的比较喷涂,摸索了不同炭黑搅拌速度对搭接色差的影响。搭接色差分为3个等级:没有、不明显和明显。显然,温度越高,涂层的表干时间越短。试件涂层的表干是一个缓慢过程,边缘和中心的表干程度并不均匀。试验表明,表干时间在20℃和30℃时均<2 min;若分区间隔时间>10 min,则色差较为明显。

表2 铝合金基材色差试验工况

Tab. 2 Experiment items of color difference with aluminum alloy

工况	温度 /℃	分区间隔 /min	炭黑转速 /r·min ⁻¹	铝粉转速 /r·min ⁻¹	搭接色差	备注
1		1			没有	
2	20	2	1600±	400±	不明显	-
3		10	100	50	明显	
4		20			明显	
5	30	1			没有	
6		3	1600±	400±	明显	搭接区有较大颗粒
7		5	100	50	明显	搭接区有较大颗粒
8	20				明显	搭接区有较大颗粒
9	34	10	1600±	400±	明显	喷漆技工甲,喷枪甲
10		10	100	50	明显	喷漆技工乙,喷枪甲
11		10			明显	喷漆技工乙,喷枪乙
12	30	1			没有	将炭黑搅拌速度提高
13		3	1800±	400±	明显	将炭黑搅拌速度提高
14		5	100	50	明显	将炭黑搅拌速度提高
15		20			明显	将炭黑搅拌速度提高

从图5和图6可看出:(1)在同一温度下,分区间隔越长,涂层色差越明显;(2)分区间隔在1 min内没有色差;(3)在30℃时涂层出现虚漆现象,即搭接区表面有较大颗粒;20℃时无大颗粒。

出现大颗粒现象的原因是:如果温度较高,有机溶剂在雾化液滴到达基材表面时已经挥发,表面就会有成团的固体颗粒出现,并随着喷涂遍数的增加颗粒越来越大。为了证明上述想法,同时排除喷漆技工和喷涂工具的影响,进行了喷漆技工和喷枪的对比试验,具体设置见表2中工况9~11。图7表明,三种工况喷涂均出现相似的大颗粒现象,可见喷漆技工的手法不是造成大颗粒的原因,大颗粒与温度直接相关,温度越高越容易形成大颗粒。因此,喷涂时环境温度设置为不大于20℃为宜。另外,将炭黑的研磨速率从(1 600±100) r/min增加至(1 800±100) r/min,色差情况一样,随着分区间隔时间的增加,色差越来越明显。

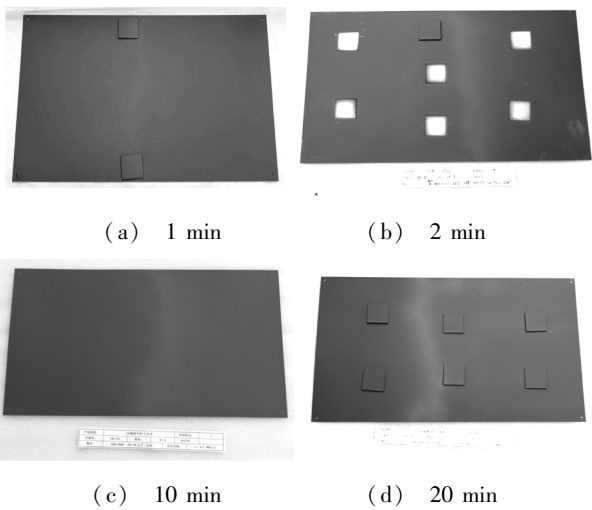


图5 铝合金基材试件表面状态,喷涂环境温度 20℃

Fig.5 Surface of aluminum alloy painted at 20℃

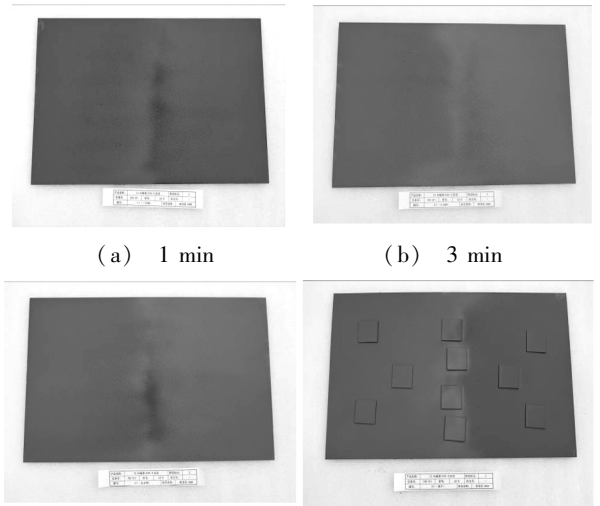
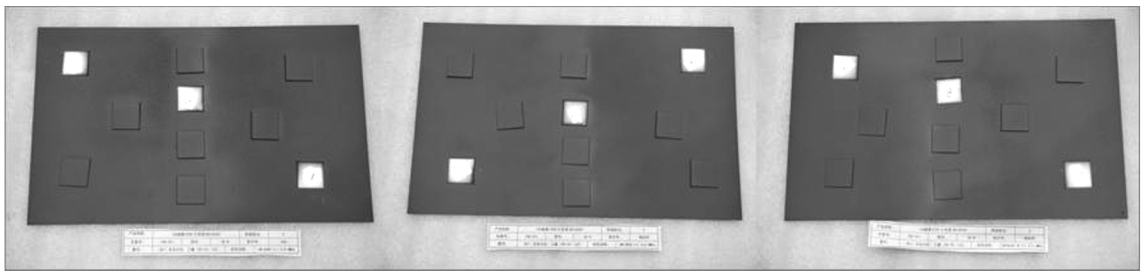


图6 铝合金基材试件表面状态,喷涂环境温度 30℃

Fig.6 Surface of aluminum alloy painted at 30℃



(a) 喷漆技工甲, 1.3 mm 喷枪甲 (b) 喷漆技工乙, 1.3 mm 喷枪甲 (c) 喷漆技工乙, 1.3 mm 喷枪乙

图7 铝合金基材试件表面状态,喷枪对比试验

Fig.7 Comprasion of surface of Al painted at different comdition

2.2 烧蚀材料基材试验

烧蚀材料试验方法与上述一致(表3)。

表3 烧蚀材料基材色差试验工况¹⁾

Tab.3 Experiment items of color difference with ablative material

工 况	分区间 隔/min	炭黑转速 /r·min ⁻¹	铝粉转速 /r·min ⁻¹	搭接 色差	ε_h	α_s/ε_h
1	1	1600±	400±	没有	0.56	1.34
2	2	100	50	不明显	0.55 ~ 0.56	1.34 ~ 1.36
3	10			明显	0.55 ~ 0.57	1.32 ~ 1.34

注:1)温度为 20℃。

经观察,烧蚀材料的涂层表干时间比铝合金要快,但第三遍喷涂的表干时间同样约小于 2 min。随着分区间隔时间的增加,涂层的色差变得明显(图8)。间隔时间为 1 min 时,基本无色差;间隔时间为 2 min 时,色差不明显;间隔时间为 10 min 时,有明显色差,可以模拟返回舱喷涂时的最差色差状况。经测试,涂层的热物理性能稳定,满足使用要求。



(a) 1 min

(b) 2 min

(c) 10 min

图8 烧蚀材料基材试件表面状态

Fig.8 Ablative material experiments

基于上述结果,可以认为在喷涂时设置环境温度为 20℃,分区间隔时间小于 2 min,能有效减弱和控制色差。

3 S781 热控涂层搭接色差的控制方法

在目前人工喷涂的条件下,仍然需要采取分区喷涂的方式。因此需要从两方面控制搭接色差:(1)严格控制喷涂环境温度不大于 20℃,增大涂层的表干时间;(2)合理划分舱体喷涂区域,尽量减少分区间隔时间。如图 9 所示的两人配合喷涂法,将原来的一个分区分为两个分区,A 角喷涂完 M1 之后转动舱体,B 角等待;A 角喷涂 M2 时,B 角喷涂 N1,然后依次进行。采用两人配合喷涂法后,分区间隔时间约为 90 s,没有明显的搭接色差现象。

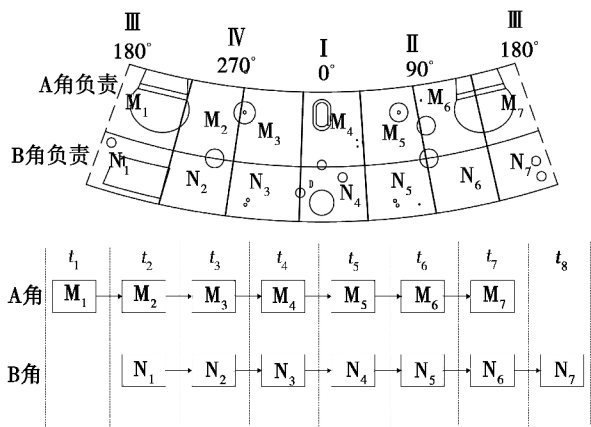


图 9 两人配合分区喷涂方式示意图

Fig. 9 Map of improved painting method with two painters

4 结论

对 S781 热控涂层的搭接色差特性分析表明,当分区间隔时间大于涂层的表干时间时,铝粉在搭接区呈杂乱不规则排列,与基材表面呈随机角度,导致视觉上的色差现象。铝合金和烧蚀材料的试验结果表明,分区间隔时间为 1 min 时没有色差,间隔时间越长,色差越明显;温度较高时,表干时间变短,色差更明显,且会出现大颗粒现象。将喷涂温度控制在 20℃,分区间隔时间小于 2 min,可以有效的减弱或控制色差。采用两人配合喷涂法后,增加了舱体分区,分区间隔时间约为 90 s,没有明显的色差现象。

由于人工喷涂的局限性,涂层的表面状态不可能完全一致,分区间隔时间控制的精度也因人而异。因此,发展精密控制的自动化喷涂系统将是解决搭接色差问题的根本途径。

参考文献

- [1] 侯增祺,胡金刚. 航天器热控制技术——原理及其应用[M]. 中国科学技术出版社,2007:129
- [2] 闵桂荣,郭舜. 航天器热控制[M]. 第二版,北京:科学出版社,1998:93-105
- [3] 陈淑芬,王丽芳,徐蕾,等. 试验飞船有机热控涂层研制(I)——返回舱外表面热控涂层[J]. 宇航材料工艺,2005,35(4):33-36
- [4] 王春明,梁馨,孙宝岗,等. 低密度烧蚀材料在神舟飞船上的应用[J]. 宇航材料工艺,2011,41(2):5-8
- [5] 刘仁龙. 车身油漆色差控制[J]. 上海涂料,2009,47(3):34-37

(编辑 吴坚)