

热循环对某热控涂层热辐射的影响

刘洋 杨耀东 杨丽 宋杰 赵准

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文摘 对某热控涂层进行了快速高低温循环试验(-196~900℃),通过太阳吸收比、半球发射率检测和SEM形貌等对涂层的热辐射性能进行分析。实验表明,经过热循环后,该涂层保持高吸收比的稳定状态(0.87左右),而半球发射率从原始的0.57提高到0.72,最后稳定在0.75左右。SEM微观形貌研究表明,热循环实验使涂层表面的结晶度和晶粒大小发生变化,导致涂层热辐射性能改变。

关键词 热控涂层,太阳吸收比,半球发射率,热循环

中图分类号:V416.5

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.012

Thermal Cycling Effect on Thermal Radiation Properties of One Type of Thermal Control Coatings

LIU Yang YANG Yaodong YANG Li SONG Jie ZHAO Zhun

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract We investigated the thermal radiation properties of one type of thermal control coatings with stainless steel as substrate under thermal cycles. The rapid thermal cycles ranged from -196℃ to 900℃. Solar absorptance, hemispheric emittance and SEM were measured for analyzing the thermal radiation properties of the coatings. The results show that solar absorptance of the thermal control coating had little change under thermal cycles, while the cycles had obvious effect on hemispheric emittance of the coatings, which increased from 0.57 to 0.72, and finally the hemispheric emittance was steady at 0.75. According to SEM, the surface of the coating was better crystallized under thermal cycles, and the grain size on the surface of the coating was bigger. The difference of microstructures on the surfaces of coatings leads to the changes of thermal radiation properties.

Key words Thermal control coatings, Solar absorptance, Hemispheric emittance, Thermal cycles

0 引言

在空间环境下,物体的表面温度在很大程度上取决于表面的热辐射性能(太阳吸收比和半球发射率)。对非透明物体而言,仅依靠外表面的薄层就能决定其表面的热辐射性质^[1]。因此,通过调节卫星表面热控涂层的太阳吸收比和半球发射率的数值,可决定暴露于空间环境中航天器表面热平衡的温度^[2]。航天器在进入轨道飞行阶段后,长期处于高真空、冷黑和热辐射的空间环境中^[3]。极端的低温或高温环境以及温度的循环变化等热冲击可能会造成热控涂层表面缺陷,或者影响到热控涂层的表面热辐射性能^[4]。

不锈钢箔化学转换涂层(STC涂层)作为高吸收热控涂层,在航天器轨道姿态调整过程中的短时发动

机点火阶段可起高温隔热作用。因为这种热控涂层在短时间内会受到高低温、大温变的热冲击,所以须对其进行热循环前后的分析试验,以满足在轨运行需要。除了要确保热循环后涂层的表面外观无裂纹、无起泡或脱落等情况出现之外,太阳吸收比和半球发射率等热辐射性能指标是更重要的考核点。

本文对STC涂层进行快速高低温热循环,分析了高低温循环实验前后该热控涂层的太阳吸收比和半球发射率的变化规律,并对其变化原因作出解释。

1 实验

1.1 材料及仪器设备

材料基体为不锈钢,表面为STC涂层。每组选取厚度为100 μm,样品尺寸40 mm×40 mm的样品5片进行实验。

收稿日期:2014-09-18

作者简介:刘洋,1987年出生,硕士,助理工程师,主要从事各类涂层的热物理性能检测和分析研究。E-mail:191204@163.com

对热循环前、后的 STC 涂层进行太阳吸收比检测时,采用测量精度为 ± 0.01 的分光光度计,波长范围 200~2 600 nm。基于稳态卡计法,通过实验室自制半球发射率检测仪对涂层进行半球发射率(ε_H)检测。

1.2 热循环实验

高低温交变热循环实验具有两个不同温度的恒温区域。样品快速地(10 s内)从低温恒温区($-196^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$,放置 30 s)转移到高温恒温区($900^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,放置 90 s)。高低温循环次数分别为 50 次、100 次和 150 次。

1.3 STC 涂层的热辐射性能测试

1.3.1 太阳吸收比

依据公式(1)和(2)对 STC 涂层进行太阳吸收比测试:

$$\rho_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\omega\lambda} \rho_{s\lambda} E_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中, λ_1 为 200 nm; λ_2 为 2 600 nm; ρ_s 为待测样品的太阳反射比; $\rho_{\omega\lambda}$ 为标准样品在波长 λ 处的反射比; $\rho_{s\lambda}$ 为待测样品在波长 λ 处的反射比; $E_s(\lambda)$ 为波长 λ 处时,太阳辐射照度。

$$\alpha_s = 1 - \rho_s \quad (2)$$

式中, α_s 为待测样品的太阳吸收比。

热循环试验前、后的太阳吸收比的相对变化按公式(3)计算:

$$\frac{\Delta\alpha_s}{\alpha_{s0}} = \frac{\Delta\alpha_{s1} - \alpha_{s0}}{\alpha_{s0}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, α_{s0} 、 α_{s1} 为试样热循环试验前、后的太阳吸收比。

1.3.2 半球发射率

依据公式(4)检测 STC 涂层半球发射率(ε_H)

$$\varepsilon_H = \frac{IV}{\sigma A_s (T_s^4 - T_w^4)} \quad (4)$$

式中, I 为输入电流, V 为输入电压, σ 为波尔兹曼常数, A_s 为待测样品面积, T_s 为样品温度, T_w 为腔壁温度。

热循环试验前、后的半球发射率的相对变化按公式(5)计算:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \times 100\%$$

式中, ε_0 、 ε_1 热循环试验前、后发射率。

2 结果与讨论

2.1 热循环试验前后涂层外观

在热循环实验前、后,STC 涂层的宏观变化不明显,热控涂层表面均匀,无裂纹、气泡、斑点、划痕或脱落。唯一不同的是,在热循环实验前,涂层表面为棕褐色;经过热循环后,涂层表面颜色发生改变,色泽变

为灰色。随着热循环次数的增加,涂层由浅灰色逐渐向深灰色过渡。经过热循环后涂层的厚度无明显变化。

2.2 热辐射性能

在 STC 涂层样品中随机截取 5 片尺寸为 40 mm × 40 mm 的试样进行热辐射性能测试。完成测试后用于热循环试验,之后再行热辐射性能测试。

热循环实验后 STC 涂层的太阳光谱反射谱图如图 1 所示。可以看出,不同次数热循环实验后涂层的光谱反射系数基本一致;在 200~500 nm 紫外波段,未经过热循环涂层的光谱反射率略低,即吸收率稍高,表明热循环降低了涂层紫外波段的吸收比。据文献[5]报道,当涂层的厚度较薄时,可能会受光的干涉作用影响,使涂层对紫外、可见光部分有强烈的吸收作用。因此,未热循环的涂层由于光的干涉作用,在紫外光部分吸收略强。经过热循环后,由于高温的影响,涂层表面出现了氧化,致使紫外波段的吸收峰消失。在可见光和红外波段,涂层对可见光、红外波段的吸收基本一致,涂层的太阳吸收比值保持稳定。

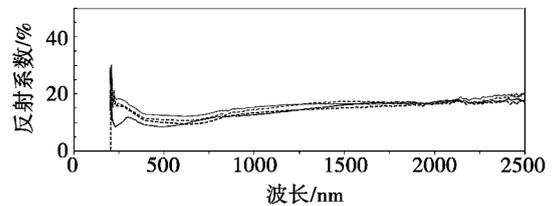


图 1 热循环实验后 STC 涂层的反射比图谱
Fig. 1 Reflectance curves of STC coatings under thermal cycles

太阳吸收比的数据结果显示(图 2),热循环实验前,STC 涂层的太阳吸收比平均值为 0.88。STC 涂层经过 50、100、150 次热循环后的太阳吸收比平均值分别为 0.86、0.88、0.87。由上述可知,不同次数热循环对 STC 涂层的太阳吸收比的相对变化率很小,均在 0.86~0.88,在误差范围之内。

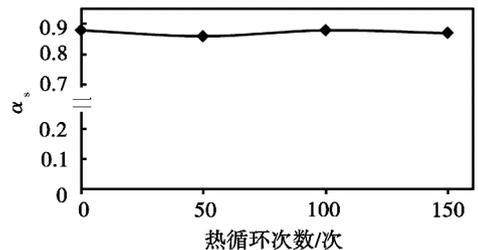


图 2 热循环次数对 STC 涂层太阳 α_s 的影响
Fig. 2 Effect of different times of thermal cycles on α_s of STC coatings

热循环实验前,STC 涂层的半球发射率平均值为 0.57,经过 50、100、150 次热循环实验后分别为 0.72、0.76、0.75。由上述可知,经过 50 次热循环后,STC 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 1 期

涂层的半球发射率的相对变化率为 26.32%，由 0.57 大幅提升至 0.72；100 次热循环实验后涂层的半球发射率继续提升至 0.76，变化率 33.33%；在 100 次热循环后，涂层的半球发射率维持稳定，后续不再发生明显的变化（图 3）。

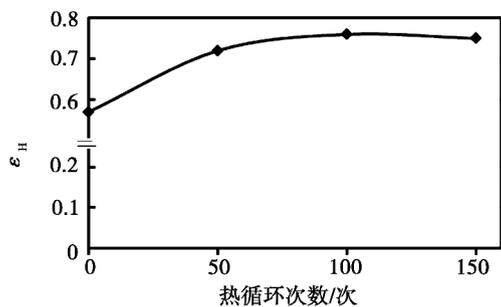


图 3 热循环次数对 STC 涂层的 ϵ_H 的影响

Fig. 3 Effect of different times of thermal cycles on ϵ_H of STC coatings

2.3 微观结构分析

材料的发射率是影响热结构件高温环境下散热的最重要参数，其值越大说明材料的散热能力越强，

它与材料的表面状态^[6]，化学组成^[7]及微观结构^[8]均有关系。图 4 为 STC 涂层热循环实验前、后的微观形貌。由图 4 中可看出，热循环前后的热控涂层发生了明显的变化。高低温热循环前，材料表面结晶度较低，而且整个涂层表面粒径较小；随着热循环次数的增加，涂层表面结晶度提高，而且表面颗粒一定程度增大，晶粒二次长大现象明显。由于涂层的厚度较薄，XRD 谱图并未获得有价值的晶相信息。上述微观结构的改变，可能导致了半球发射率的显著增加。当热循环次数达到 100 次之后，涂层的表面晶粒增长缓慢，形貌趋于稳定，涂层的半球发射率也随着稳定在 0.75 左右。

上述检测结果表明，涂层在热循环前、后的半球发射率发生了显著改变，太阳吸收比基本没有变化，仅是紫外光附近的吸收比经热循环后有小幅降低。其原因除了热循环对涂层表面的高温氧化外，也可能和涂层表面微观结构的改变有关。

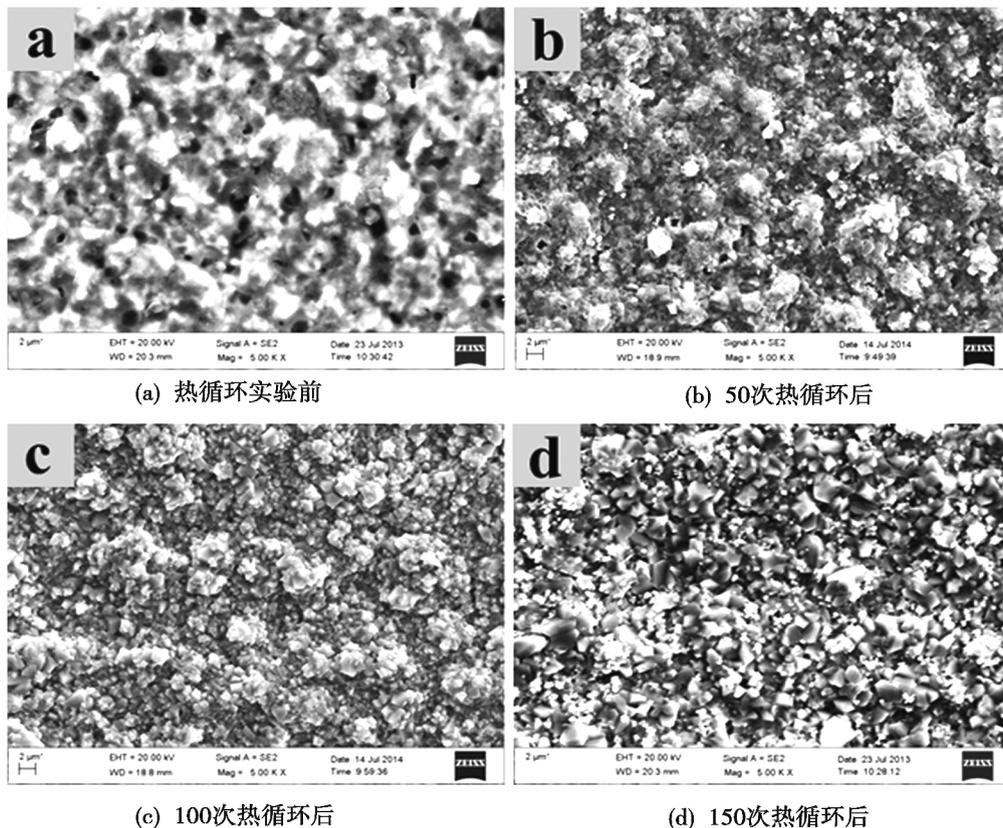


图 4 STC 涂层的微观形貌

Fig. 4 SEM of STC coatings

3 结论

热循环对 STC 涂层的太阳吸收比基本没有影响，其值都稳定在 0.87 左右。经过 50 次热循环后，涂层的半球发射率从 0.57 提高到 0.72。100 次热循环后涂层的半球发射率提升到 0.75 左右，且随着宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 1 期

环次数的增加保持稳定。微观形貌研究表明，热循环增加了涂层表面的结晶度，晶粒二次长大现象明显，这些因素导致涂层的半球发射率显著增长。

参考文献

[1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 中国宇航出

版社, 1991: 138-140

[2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007: 129-131

[3] 中国宇航学会. 2006 年度结构强度与环境工程专委会与航空气环境工程信息网学术研讨会[C]. 成都: [出版者不详], 2006

[4] 李涛, 易忠, 高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 37-40

[5] 罗列超, 赵荣根, 孟佳, 等. 航天器用铝光亮阳极氧化涂层特性研究[J]. 无机材料学报, 2002, 17(6): 1269-1276

[6] 武文明, 成来飞, 王伟. 3D C/SiC 复合材料的热辐射性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 79-84

[7] Neuer G, Jaroma-Weiland G. Spectral and total emissivity of high-temperature materials[J]. International Journal of Thermophysics, 1998, 19(3): 917-929

[8] 沈轩, 徐国跃, 程传伟, 等. 不同形貌 ZnO 的制备、表征及 8 ~ 14 μm 红外发射率研究[J]. 功能材料, 2007, 38: 3988-3990

(编辑 吴坚)

《宇航材料工艺》编排格式

稿件编排格式如下(以下每个□代表一个空格):

文 题(二宋)

作者姓名(四楷)

(作者单位□地名□邮编)(小五宋)

□□文□摘(五黑)□(下接文摘内容,转行顶格排,以下同)(五楷)

□□关键词(五黑)□(下接 3 ~ 8 个关键词,词间用逗号隔开)(五楷)

□□中图法分类号□(下接具体号码)(五楷)

英文文题(三白正)

作者姓名汉语拼音(小四白正)

(对外英文单位名称□英文地名□邮编)(小五白正)

□□Abstract(五黑正)□(下接文摘内容)(五白正)

□□Key words(五黑正)□(3 ~ 8 个关键词,词间用逗号隔开)(五白正)

1□(一级标题)(五黑)

□□(正文)(五宋)

1.1□(二级标题)(五黑)

□□(正文)(五宋)

1.1.1□(三级标题)(五黑)

□□(正文)(五宋)

.....

□□致谢(小五黑)□(内容)(小五宋)

□□参考文献(五黑)(请注明作者、题名、书刊名、卷、期、年、版本、出版地、出版者、出版年、页次等)

□□1□(下接著录内容,转行顶格排)(小五宋)