

110keV 质子辐照对温控涂层 性质的影响*

文万信^{1,1)} 杨生胜² 王立²

1 (苏州大学放射医学系 苏州 215007)

2 (真空低温国家级重点实验室 兰州 730000)

摘要 实验研究了 1.0×10^{11} — 1.0×10^{17} p/cm² 通量范围内 110keV 质子辐照引起的温控涂层热光性能的变化. 实验表明, 在 1.0×10^{11} p/cm² 通量辐照下 6 种温控涂层材料的相对光反射率基本没有变化, 当辐射通量在 1.0×10^{12} — 1.0×10^{16} p/cm² 范围变化时, 某些低吸收率的温控涂层的太阳吸收率随着辐射通量增加先变小而后又增大. 这一特性对于制备更低太阳吸收率的温控涂层具有应用价值.

关键词 温控涂层 质子辐照 反射率

1 引言

航天器材表面一般都涂有温控涂层, 通过调整涂层的太阳吸收率 α_s 与热发射率 ε 的适当比率实现对温度的有效控制, 以保证航天器正常工作及为宇航员提供适宜的生活工作环境^[1]. 在太空飞行中, 航天器的涂层要受到强紫外线与宇宙射线及其次级粒子的照射, 要受到高速气体、强磁场、高频振动等恶劣条件的影响或损伤^[2, 3]. 太空中的各种粒子会引起材料辐射损伤与辐照改性, 地面上需要进行针对性实验研究, 即需要研究不同辐照条件下不同材料的温控涂层的损伤与改性程度及其可能造成的后果, 评估不同温控涂层抗太空辐射的能力, 为选择适当的成膜物和涂料配方及设计最佳的温控涂层提供数据.

太空辐射对航天器材温控涂层热光性能的影响比较复杂, 粒子种类、能量、通量、通量率对不同材料的温控涂层在不同波段的热光性能的影响不尽相同^[4]. 太空辐射环境中的低能电子与质子对温控涂层材料的性能影响较大^[5], 本文主要研究不同辐射通量的低能质子辐照引起的温控涂层热光性能的变化, 并探讨质子辐照改善温控涂层热光性能的可能性.

2 辐照实验

太空辐射环境复杂, 在地面很难完全模拟与其相同的实验条件. 一般根据航天器在太空的运行时间长短以及针对所关心的问题确定加速器流强、辐射通量、照射时间等参数的大小及其调节范围等. 本项工作中温控涂层样品的质子辐照实验是利用中国科学院近代物理研究所的 200kV 离子注入机完成的, 束流能量为 110keV, 流强根据需要在 0.01—50 μ A 范围调节, 散射室的真空为 1.333×10^{-3} Pa. 根据航天器在太空的运行时间长短以及太空的辐射环境, 实验中质子通量确定为 10^{11} — 10^{17} p/cm² 范围.

为满足质子通量在 7 个数量级范围变化的要求, 注入机的流强至少在 0.01—50 μ A 范围可调. 而正常的质子流强为 10 μ A, 与实验要求相差甚远. 注入机设计流强基本固定, 可调余量很小. 经过反复试验, 通过对离子源系统、准直系统、磁铁系统等综合调控, 实现了质子束流强在 0.01—50 μ A 范围可调. 辐射通量在 6—7 个数量级范围内可调及准确测量是空间辐照地面模拟实验的重要实验条件, 实验比较好地解决了这一问题.

2005 - 04 - 18 收稿

* 国防科技重点实验室基金(5147030401ZK5103)资助

1) E-mail: wxwen@suda.edu.cn

温控涂层样品由真空与低温重点实验室提供, 共6种, 即导电型F46镀银二次表面镜、导电型聚酰亚胺镀铝表面镜、白漆、石英玻璃镀银二次表面镜、铝薄光亮阳极氧化表面镜和黑漆等样品。

3 样品辐照前热光性能同一性测试

实验中希望同种材料的温控涂层样品的物理性能完全相同, 以便能够系统研究不同辐射条件下其性能的变化。实际上即使采取最严格的制备工艺, 环境因素仍然可能造成涂层厚度、颜料与粘料比例难以控制的变化, 从而造成样品物理性能的微小差异。辐照之前对每组样品都做了光反射率的同一性测试。

由图1看出, 温控涂层样品的热光同一性不尽相同。6片导电型F46镀银二次表面镜样品在波长600nm以上波段即部分可见光波段与红外波段相对光反射率的差值在5%之内(图1(a)所示)。6片导电型聚酰亚胺镀铝表面镜样品在波长600nm以上波段的相对光反射率的差值也在5%之内, 在紫外光波段几乎看不出差别(如图1(b)所示)。6片白漆涂层样品在可见光波段的相对光反射率差值在5%之内, 而在紫外光波段与红外光波段光反射率看不出差别(如图1(c)所示)。另外, 2片石英玻璃镀银二次表面镜样品与2片黑漆

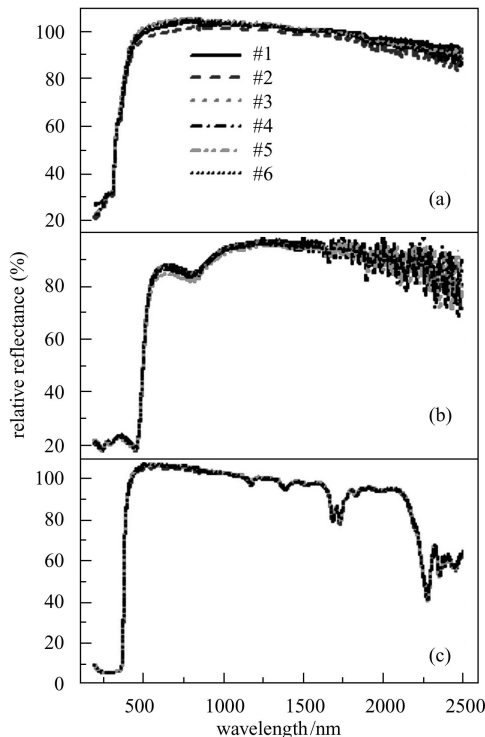


图1 温控涂层样品辐照前光反射率同一性测试
(a) 导电型F46镀银二次表面镜样品; (b) 导电型聚酰亚胺镀铝表面镜样品; (c) 白漆样品。

涂层样品各自的光反射率在测量波段看不出差别, 样品的热光性能的同—性好; 2片铝薄光亮阳极氧化表面镜样品在300nm以上波段的光反射率差值在5%之内, 在300nm以下的紫外光波段没有差别。

同一性测试表明, 不同材料的6组样品的热光同一性较好, 虽在某些波段光反射率还存在可观察到的差异, 但能够满足实验要求。同一性差异要求实验方案的设计与实验数据的分析应该考虑同种材料温控涂层样品物理性能本身的差异。

4 结果与分析

温控涂层用于航天器材, 工作在太空辐射与真空环境。温控涂层样品的照射与测试都应该在高真空环境中完成, 即需要作原位测试。实验已经证实照射的样品如果在大气环境下进行离位测试, 测得的太阳吸收率要低于原位测试结果, 即离位测试存在漂白效果。目前国内还没有既能完成较高能量的质子照射实验又能完成样品性能原位分析测试的联合装置。本项实验中样品照射与分析测试在不同实验室完成, 样品离位测试分析。在真空与低温重点实验室和中国科学院兰州化学物理研究所完成。

导电型F46镀银二次表面镜样品在 $1.0 \times 10^{11} \text{p/cm}^2$ 质子通量下辐照前后光反射率基本没有变化(见图2)。随着质子通量从 $1.0 \times 10^{12} \text{p/cm}^2$ 增加到 10^{14}p/cm^2 数量级, 相对光反射率在500nm以上波段都有不同程度的增加, 相应地样品的太阳吸收率 α_s 降低。只有在 $1.0 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ 通量以后相对光反射率才有所下降, 太阳吸收率有所增加。质子辐射通量在 $1.0 \times 10^{14} \text{p/cm}^2$ 以下, 质子辐照反倒能够使导电型F46镀银二次表面镜样品在大气环境下的太阳吸收率下降, 亦即样品的热光性能反而有所改善。

导电型聚酰亚胺镀铝表面镜样品光反射率随质子辐射通量的变化见图3。其在远红外波段剧烈振荡, 而在1500nm以下波段, 即在紫外光、可见光与近红外波段, 光反射率比较平滑。质子通量在 $1.0 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ 以下时, 辐照前后样品相对光反射率在500nm以下波段基本不变, 在500—1500nm波段辐照之后的相对光反射率有不同程度的增加。质子通量达到 $1.0 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$ 时, 1000nm以下波段的相对光反射率都下降。如果不考虑振荡部分, $1.0 \times 10^{11} \text{p/cm}^2$ 的质子通量对导电型聚酰亚胺镀铝表面镜样品的光反射率基本没有影响。如果只从光反射率角度考虑, 导电型聚酰亚胺镀铝表面镜样品的抗辐照能力较强。

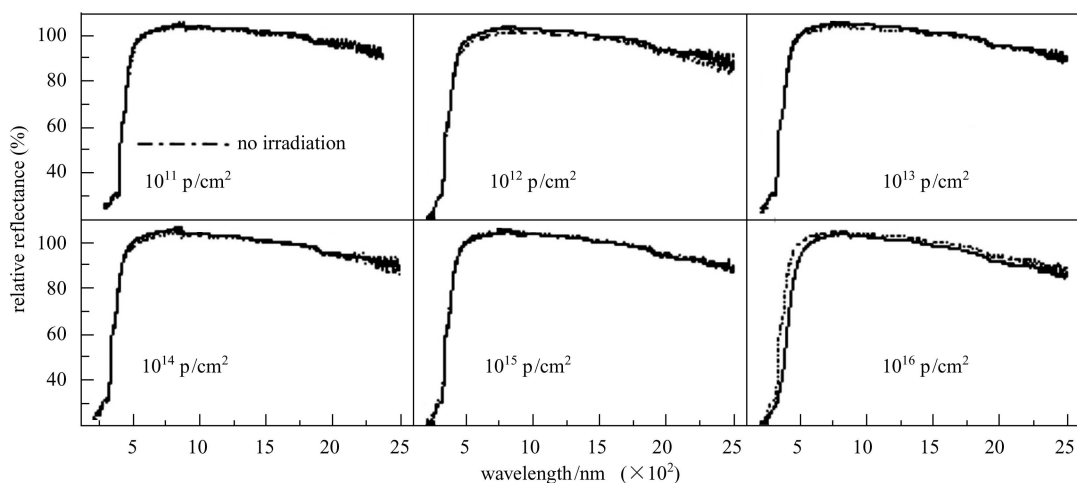


图2 导电型F46镀银二次表面镜辐照前后光反射率对比
点线与实线分别为辐照前后的光反射率。

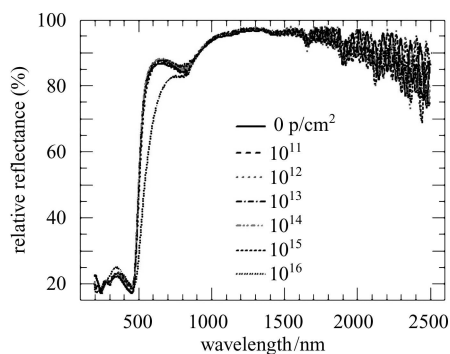


图3 导电型聚酰胺镀铝表面镜光反射率随质子辐射通量的变化

在 $1.0 \times 10^{11} \text{p/cm}^2$ 质子通量辐照前后, 白漆样品光反射率在测量波段范围内基本没有变化(见图4)。

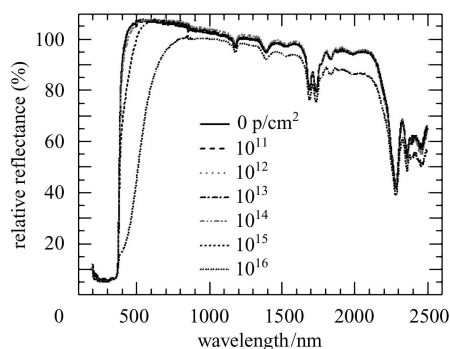


图4 白漆温控涂层光反射率随质子辐射通量的变化

通量在 $1.0 \times 10^{12} \text{p/cm}^2$ 与 $1.0 \times 10^{13} \text{p/cm}^2$ 时, 辐照之后的样品相对光反射率在 500—2000nm 波段范围内较辐照之前有不同程度的增加, 但在紫外线波段基本不变, 因此相应的太阳吸收率 α_s 变小。在 $1.0 \times 10^{14} \text{p/cm}^2$ 通量辐照之后, 紫外线波段反射率基本不变, 450—550nm 反射率略为下降, 550nm 以上波段反射率有

所增加。在 $1.0 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ 通量辐照之后, 在 400—600nm 波段范围相对光反射率明显减少, 其余波段基本不变。但在 $1.0 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$ 通量辐照之后, 在测量波段范围内相对光反射率呈现明显的下降, 太阳吸收率增加, 白漆温控涂层的热光性能随之变差。

由图5看出, 在 $1.0 \times 10^{11}—1.0 \times 10^{13} \text{p/cm}^2$ 质子通量范围, 辐照前后铝薄光亮阳极氧化表面镜样品相对光反射率在测量波段范围内基本没有变化。当通量增加到 $1.0 \times 10^{14} \text{p/cm}^2$ 以后时, 样品相对光反射率在紫外光与可见光波段随着质子通量的增加而明显减小, 但在红外波段仍然基本保持不变。

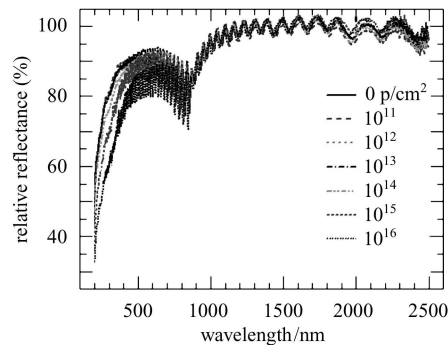


图5 铝薄光亮阳极氧化表面镜样品光反射率随质子辐射通量的变化

由图6看出, 在 $1.0 \times 10^{11}—1.0 \times 10^{14} \text{p/cm}^2$ 通量范围, 辐照前后黑漆样品相对光反射率在测量波段范围内基本没有变化。当通量达到 $1.0 \times 10^{15} \text{p/cm}^2$ 与 $1.0 \times 10^{16} \text{p/cm}^2$ 时, 辐照后的黑漆样品的相对光反射率随着辐射通量在测量波段范围内明显增加, 样品的吸热性能下降。黑漆涂层是高太阳吸收率的温控涂层, 旨在通过吸热保持温度, 以维持某些部件正常工作。大通量的质子辐照使黑漆的热光性能变差。

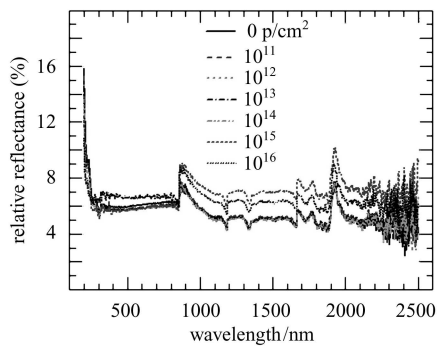


图6 黑漆温控涂层样品辐照前后光反射率随质子辐射通量的变化

此外,在 1.0×10^{11} — 1.0×10^{13} p/cm² 质子通量范围内,辐照前后的石英玻璃镀银二次表面镜控涂层样品的相对光反射率数值在测量波段范围内变化仅在1%之内,基本上保持不变。

5 小结

不同材料的温控涂层抗质子辐照的能力不尽相同,热光性能随着辐射通量变化的规律比较复杂,性能的改变与温控涂层的颜料和粘料的化学组态及结构变化有关。实验表明, 1.0×10^{11} p/cm² 质子通量下100keV的质子辐照对6种温控涂层材料的相对光反射率基本没有影响。石英玻璃镀银二次表面镜、铝薄光亮阳极氧化表面镜及与黑漆样品的抗质子辐照能力相对较强,在 1.0×10^{12} — 1.0×10^{14} p/cm² 辐射通量范围

内,辐照前后的相对光反射率变化很小;当通量达到 1.0×10^{15} p/cm² 与 1.0×10^{16} p/cm² 时,辐照后的样品的相对光反射率的变化比较明显,样品的热光性能下降。随着辐射通量从 1.0×10^{12} — 1.0×10^{16} p/cm² 范围内增加,导电型F46镀银二次表面镜、导电型聚酰亚胺镀铝表面镜与白漆样品的大气环境下的相对光反射率在可见光波段及近红外波段先增加,通量达到一定限度后又减小;相应的太阳吸收率 α_s 也随着辐射通量增加而变小,达到一定程度后又变大。这种现象对于制备更低太阳吸收率 α_s 的温控涂层有理论参考价值。实验现象还需作进一步的理论分析。

以往相关实验所关心的主要是太空辐射对温控涂层的破坏性作用,因为破坏性的影响可能导致航天器不能正常工作。本项实验的结果从另一个角度说明在适当的辐射条件下,辐照手段也可以改善温控涂层的热光性能,也可以得到更低太阳吸收率 α_s (光反射率大)的温控涂层。

在主要关注辐射对温控涂层的破坏性作用的同时,建议适当开展利用辐照改善温控涂层热光性能的研究,通过原位与离位测量方法观察温控涂层热光性能随辐射通量变化的规律,探讨利用质子、电子与 γ 射线辐照手段制备更低太阳吸收率的温控涂层的可行性。

作者对中国科学院近代物理研究所靳根明与王志光研究员及离子注入机组提供的帮助表示感谢!

参考文献(References)

- 1 Silverman E M. Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide: NASA Contractor Report 4661
- 2 Strategic Program Plan for Space Radiation Health Research: NASA's report. 1998
- 3 Howards J W, Hardage D M Jr. Space Environments Interactions: Space Radiation and Its Effects on Electronic Systems: NASA/TP-1999-209373
- 4 Grossman E, Gouzman I. Nuclear Instruments in Physics Research, 2003, **B208**: 48—57
- 5 Houdayer A. Nuclear Instruments in Physics Research, 1997, **B131**: 335—340

Effects of 110keV Proton Irradiation on Thermal Property of Thermal Control Coatings^{*}

WEN Wan-Xin^{1;1)} YANG Sheng-Sheng² WANG Li²

1 (Department of Radiation Medicine, Soochow University, Suzhou 215007, China)

2 (National Key Lab. of Vacuum & Cryogenics Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract It is investigated experimentally how the thermal properties of some specimens of thermal control coatings change with irradiation fluence ranging from 1.0×10^{11} p/cm² to 1.0×10^{17} p/cm² with 110keV proton beam. It is shown the thermal properties of all the 6 specimens examined nearly do not change at exposure of 1.0×10^{11} p/cm². The solar absorptance of some specimens of thermal control coating of low absorptance increases at first and decreases whereafter as the proton fluence rises from 1.0×10^{12} p/cm² to 1.0×10^{16} p/cm². This indicates that the irradiation method may be used to promote the thermal properties of some thermal control coatings of low solar absorptance.

Key words thermal control coating, proton irradiation, reflectance

Received 18 April 2005

^{*}Supported by National Key Laboratory Fund (5147030401ZK5103)

1) E-mail: wxwen@suda.edu.cn