

ZnO 白漆的空间环境效应及损伤机理

姜海富^{1,2}, 郑慧奇¹, 李 宇¹, 刘宇明^{1,2}, 姜利祥^{1,2}

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 可靠性与环境工程技术国防科技重点实验室, 北京 100094)

摘 要: 为揭示 ZnO 白漆空间环境作用损伤机理, 优化材料性能, 采用空间环境辐照实验对 ZnO 颜料及硅酸钾包覆的氧化锌(KSZ)白漆空间环境效应及损伤机制进行了研究。电子、质子、紫外及原子氧作用后, ZnO 颜料在 425 nm 左右产生了吸收峰, ZnO 颜料中双电离锌空位(V_{Zn}^{2-})在电子、质子、紫外辐照下发生电离, 生成单电离锌空位($V_{Zn}^{\cdot-}$)是光学性能退化的主要机制, 而原子氧作用使得 V_{Zn}^{2-} 极少一部分转化为 $V_{Zn}^{\cdot-}$, 大部分转化为未电离锌空位(V_{Zn}^0)。相对于紫外及原子氧辐照, 质子和电子辐照对 KSZ 白漆性能影响较大。在质子剂量 $3.15 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$ 、电子剂量 $2.25 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ 、紫外剂量 5000 当量太阳小时条件下, KSZ 涂层太阳吸收比由 0.12 增加至 0.27。

关键词: 氧化锌白漆; 空间环境; 损伤机理; 太阳吸收比

中图分类号: V524.3; V255 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)01-0010-06

网络出版时间: 2024-11-20



ZnO 白漆由 ZnO 颜料和硅酸钾粘结剂组成, 是航天器热控涂层的一种, 多用于航天器天线、舱段及辐射器表面等^[1]。一般来讲, ZnO 白漆的太阳吸收比低于其他热控涂层。

ZnO 主要以纤锌矿结构形式存在^[2], Zn 和 O 的配位数为 4。ZnO 纤锌矿结构如图 1 所示。

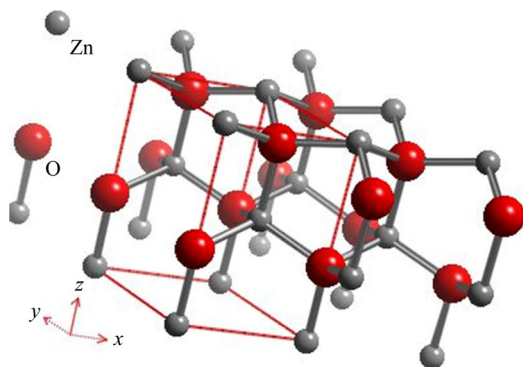


图 1 纤锌矿 ZnO 结构图

Fig. 1 Structure diagram of zinc oxide

在 ZnO 中, 锌有 2 个价电子, 氧有 6 个价电子, 纤锌矿结构要求配位数为 4, 可以把纤锌矿结构中的锌原子看作是 Zn^{2-} , 把氧原子看作是 O^{2+} , 即从每个氧原子上移去 2 个电子, 转移到 1 个锌原子上, 每个氧原子和每个锌原子的最外层的电子组态就变

得与碳原子的外层电子组态相似, 锌和氧离子的外层都具有 sp^3 杂化的轨道, 锌和氧离子可以按照四面体对称配位的方式以 4 个共价键结合成纤锌矿的晶体结构^[3]。

氧化锌具有纤锌矿结构的同时, 作为化合物半导体, 其锌氧比常常会偏离化学计量, 在内部生成本征缺陷, 由于氧化锌中氧容易逸出, 一般生成的是缺氧化合物^[4]。

空间环境包括电子、质子、紫外、原子氧等环境因素, 航天器在轨服役期间, ZnO 无机白漆在这些空间环境的作用下性能会发生退化, 影响航天器的在轨稳定运行, 因此急需开展 ZnO 白漆空间环境作用性能退化及损伤机理研究, 支撑材料性能的优化。

1 实验

1.1 样品制备

ZnO 颜料样品为压满于圆形模具内的粉末薄片, 模具内径为 25 mm, 内侧深度为 2 mm。制备样品时将氧化锌粉末添加于模具中, 用压力机压制粉末试样, 加压参数为压力 10 kN, 加压时间 5 min。

收稿日期: 2024-05-05。 修订日期: 2024-06-05。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0503602)。

第一作者: 姜海富(1980—), 男, 高级工程师。

Received date: 2024-05-05. Revised date: 2024-06-05.

First author: JIANG Haifu (1980—), male, Senior Engineer.

E-mail: haifujiang@163.com

硅酸钾包覆的氧化锌(KSZ)白漆为直径 $\phi 30$ mm 的圆形样品, 由 K_2SiO_3 粘结剂和 ZnO 颜料组成, 通过喷涂工艺制备于铝基底上。

1.2 实验参数

利用综合环境辐照设备及低轨原子氧设备开展了空间环境辐照实验。ZnO 颜料电子、质子、紫外、原子氧单因素作用实验参数为: 电子辐照: 能量 50 keV、总注量 $1 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$; 质子辐照: 能量 50 keV、总注量 $6 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$; 紫外辐照: 波长 115~400 nm、剂量 5000 当量太阳小时(ESH); 原子氧辐照: 通量 $5 \times 10^{15} \text{ atoms/(cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 、总剂量 $1 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$ 。

KSZ 涂层空间环境辐照实验参数为: 电子+质子+紫外综合辐照: 电子能量 50 keV、总注量 $2.25 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$; 质子能量 50 keV、总注量: $3.15 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$; 紫外波长 115~400 nm、剂量: 5000 ESH。实验分 10 个阶段进行; 紫外辐照: 波长 115~400 nm、剂量 5000 ESH; 原子氧辐照: 通量 $5 \times 10^{15} \text{ atoms/(cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 、 $2.0 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$ 。

1.3 样品表征

采用美国 Perkin Elmer 公司的 Lambda 950 型紫外-可见-近红外分光光度计测试 ZnO 颜料及 KSZ 的反射光谱, 波长 300~2200 nm, 并计算 KSZ 的太阳吸收比。采用日本 SHIMADZU 公司的 RF-5301PC 型光谱仪测量 ZnO 颜料的光致荧光光谱, 激发源为氙灯, 激发波长为 220 nm。采用日本 JEOL 公司 JES-FE3AX 型电子自旋共振谱仪对 ZnO 颜料进行电子自旋共振测试, 微波频率 9.435 GHz。

2 结果与讨论

2.1 ZnO 颜料光学性能退化

图 2 为电子、质子、紫外、原子氧辐照前后 ZnO 颜料的反射光谱。由图 2 可见, 原始光谱在近紫外区相当于 ZnO 带隙宽度(室温带隙宽度 3.37 eV)处, 光谱反射系数最低, 只有 6%左右; 在 360~500 nm 范围内, 光谱反射系数随着波长的增大而急剧升高并达到最大值; 而后光谱反射系数总体上随着波长的增大而下降。

空间环境作用后, ZnO 颜料的光谱反射系数发生了明显的衰减, 主要集中在可见光区和近红外区。图 3 为光谱反射系数的变化情况。空间环境作用后, ZnO 颜料光学吸收带的峰值位置在 425 nm 左右, 质子辐照造成的吸收峰最强, 下降最为明显。原子氧作用后, ZnO 颜料的光谱吸收系数最大值只有 1% 左右。

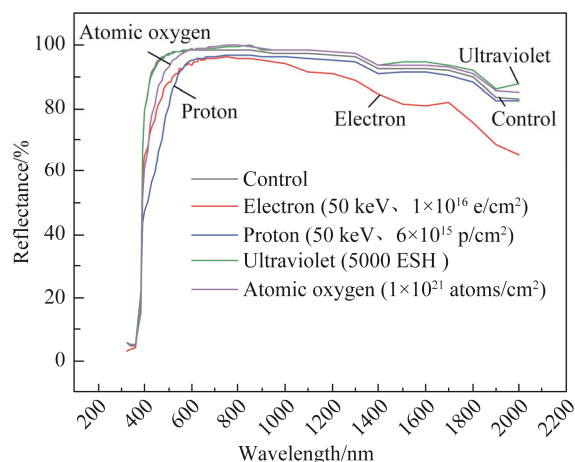


图 2 空间环境实验前后 ZnO 颜料反射光谱
Fig. 2 Spectral reflectance of ZnO paint before and after space environment irradiation

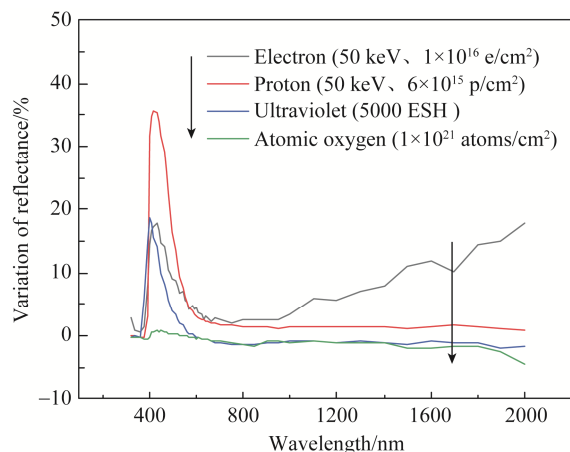


图 3 空间环境作用后 ZnO 颜料反射光谱变化
Fig. 3 Variation of ZnO spectral reflectance under space environment irradiation

2.2 ZnO 颜料光学性能退化机制

为研究空间环境作用下 ZnO 颜料光学性能的退化机制, 对实验前后材料进行了电子顺磁共振与荧光光谱分析。

2.2.1 顺磁共振 ZnO 是一种半导体材料, 半导体材料的辐照缺陷往往是顺磁性的, 电子顺磁共振波谱分析旨在对辐照缺陷进行研究。

图 4 为 ZnO 空间环境作用前后顺磁共振谱。空间环境作用前, ZnO 原始试样产生了 1 个明显的顺磁信号。从对称性看, 该顺磁中心为中心对称结构, $g_{xx}=g_{yy}=g_{zz}$ 。这种情况下, g 因子各向同性, 可用 g_0 表示。根据 2,2-联苯基-1-苦基基肼(DPPH)和弱沥青标准样品的标定结果, 该顺磁中心 $g_0=1.956$ 。 $g \sim 1.96$ 的顺磁信号代表 ZnO 的浅施主和/或导带电子^[5]。

电子辐照后, $g_0=1.956$ 的顺磁信号依然存在, 说明电子辐照后 ZnO 颜料的浅施主和/或导带电子

依然存在。更值得关注的是,在 0.32~0.34 T 范围内出现了新的复杂的顺磁信号。由谱线的不规则性可见,它是由新的顺磁中心信号叠加而成,说明 ZnO 颜料产生了新的辐照缺陷,相关研究认为是单电离锌空位(V_{Zn}^+)的顺磁信号^[6],而非众多文献报道的单电离氧空位(V_O^+)。实际上, V_O^+ 是一种轴对称结构, $g_{\parallel}=1.9948\pm0.0008$ 、 $g_{\perp}=1.9963\pm0.0008$,一般 V_O^+ 仅出现于高能粒子辐照及随后的光激发过程,50 keV 的亚阈值电子辐照,不能产生 V_O^+ 。

质子辐照同电子辐照类似,除了 $g_0=1.956$ 的顺磁信号外,同样产生了 V_{Zn}^+ 的顺磁信号, $g_0=2.0027$ 。相比电子辐照,质子辐照下 V_{Zn}^+ 的顺磁信号更宽,这是一种典型的久期增宽现象。相比电子辐照,单位注量的质子辐照产生了更多的 V_{Zn}^+ ,自旋与自旋间的相互作用更为强烈。

紫外辐照后, $g_0=1.956$ 的顺磁信号依然存在,同时产生了较弱的 $g_0=2.0027$ 的 V_{Zn}^+ 顺磁信号。

原子氧暴露后,除 $g_0=1.956$ 的顺磁信号外, V_{Zn}^+ 的顺磁信号不明显,说明 $1\times10^{21}\text{ cm}^{-2}$ 原子氧暴露诱发产生的 V_{Zn}^+ 数量极少。

2.2.2 荧光光谱 图 5 为 ZnO 空间环境作用前后的荧光光谱。ZnO 原始的光致荧光光谱呈现了 ZnO 典型的近带边发射(峰值位置 380 nm)和宽广的绿色

荧光带(峰值位置 520 nm)。对于 ZnO 380nm 附近的近带边发射,人们的认识较为统一,将其归属为施主束缚激子以及施主/受主对复合的发射过程。而对于 ZnO 520 nm 附近宽广的绿色荧光带,研究表明与 ZnO 中固有的点缺陷相关,是由 ZnO 颜料中的锌空位(V_{Zn})产生的^[7]。

电子辐照后,光致荧光光谱的近带边发射显著增强,而绿带荧光发生了猝灭。 V_{Zn} 是一种深受主, V_{Zn}^0 与 V_{Zn}^- 的转变能级和 V_{Zn}^- 与 V_{Zn}^{2-} 的转变能级分别位于 ZnO 价带顶以上约 0.18 eV 和 0.87 eV^[8-9]。

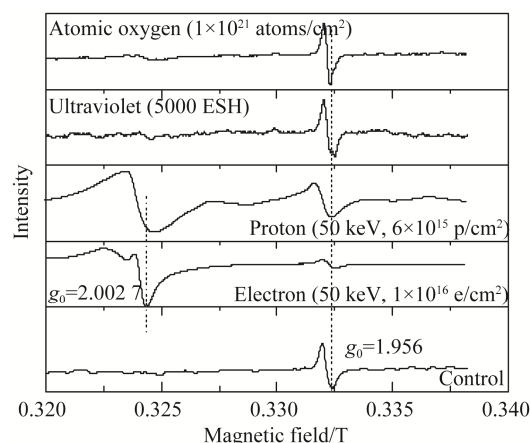


图 4 ZnO 空间环境作用前后顺磁共振谱
Fig. 4 Diagram of ZnO under space environment irradiation

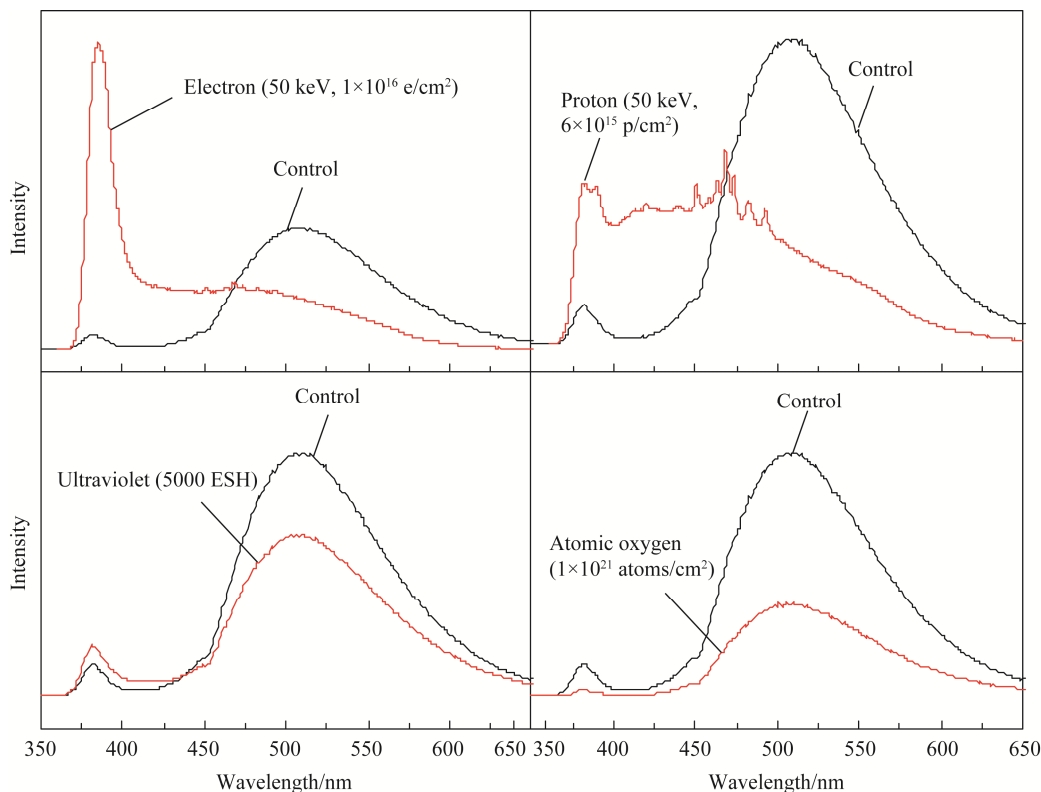


图 5 ZnO 空间环境作用前后荧光光谱
Fig. 5 Fluorescence spectra of ZnO under space environment irradiation

由于电子的电离作用, V_{Zn}^{2-} 转化为辐照后的单电离锌空位 $V_{Zn}^{\cdot-}$, 与 $V_{Zn}^{\cdot-}$ 相关的电子跃迁将在 ZnO 导带(或者是浅施主)与弛豫的 V_{Zn}^0 能级间进行, 并在 380 nm 附近产生近带边发射, 从而造成绿带荧光猝灭, 近带边发射增强的结果。

质子、紫外辐照后, 光致荧光光谱中的近带边发射均增强, 但增强幅度远不及电子辐照, 这说明质子、紫外辐照后 ZnO 颜料的浅施主和/或导带电子数量虽有增加, 但增加数量不及电子辐照。同时绿带荧光减弱, 这是由质子辐照产生的 $V_{Zn}^{\cdot-}$ 导致的。

原子氧暴露后, 光致荧光光谱的近带边发射大幅减弱, 同电子辐照、质子辐照、真空紫外辐照类似, ZnO 颜料的绿带荧光也大幅减弱。但显然, ZnO 颜料绿带荧光大幅减弱与图 4 原子氧暴露诱发产生极少量的 $V_{Zn}^{\cdot-}$ 是不相符的。原子氧暴露后 ZnO 颜料的绿带荧光大幅减弱, 说明原子氧暴露下 ZnO 颜料固有的双电离锌空位(V_{Zn}^{2-})数量大幅减少。而原子氧暴露后只诱发了极少量的 $V_{Zn}^{\cdot-}$, 又说明消失的 V_{Zn}^{2-} 中只有极少一部分转化为 $V_{Zn}^{\cdot-}$ 。考虑到原子氧极强的电子亲和性和氧化性, 大部分消失的 V_{Zn}^{2-} 有可能转化为未电离锌空位(V_{Zn}^0)。由于无顺磁性, V_{Zn}^0 无法被电子顺磁共振波谱捕获。

综合以上, 电子、质子、紫外辐照下, ZnO 颜料中固有的 V_{Zn}^{2-} 发生电离, 生成 $V_{Zn}^{\cdot-}$, 只是数量不同而已。而原子氧由于具有极强的电子亲和性和氧化性, 使得 ZnO 颜料固有的 V_{Zn}^{2-} 极少一部分转化为 $V_{Zn}^{\cdot-}$, 大部分 V_{Zn}^{2-} 转化为 V_{Zn}^0 。

2.3 KSZ 电子+质子+紫外综合辐照效应

表 1 为 KSZ 涂层电子+质子+紫外综合辐照实验参数, 实验共分 10 个阶段进行, 电子能量 50 keV, 质子能量 50 keV, 紫外波长 115~400 nm。图 6 为 KSZ 涂层太阳吸收比的变化。由图 6 可见, KSZ 涂层太阳吸收比初始值为 0.12, 随着环境实验剂量的增大, 涂层太阳吸收比呈现上升趋势, 当第 10 阶段结束后, 涂层太阳吸收比增加至 0.27。

2.4 KSZ 紫外辐照效应

对 KSZ 涂层开展了紫外辐照实验, 图 7 为实验前后太阳吸收比的变化情况。由图 7 可见, 紫外辐照 2000 ESH 以内 KSZ 涂层太阳吸收比呈增加趋势, 紫外辐照 2000 ESH 后, KSZ 太阳吸收比基本稳定, 达到 0.15。

表 1 KSZ 涂层“质子+电子+紫外”综合辐照实验参数
Table 1 Electron, proton, and ultraviolet combined irradiation experiment parameter of ZnO

Stage	Electron/($e^- \cdot cm^{-2}$)	Proton/($p^+ \cdot cm^{-2}$)	Ultraviolet time/ESH
1	0	0	0
2	0.25×10^{16}	0.35×10^{16}	361
3	0.5×10^{16}	0.70×10^{16}	800
4	0.75×10^{16}	1.05×10^{16}	1592
5	1.0×10^{16}	1.4×10^{16}	2104
6	1.25×10^{16}	1.75×10^{16}	2652
7	1.5×10^{16}	2.1×10^{16}	3307
8	1.75×10^{16}	2.45×10^{16}	3797
9	2.0×10^{16}	2.8×10^{16}	4362
10	2.25×10^{16}	3.15×10^{16}	5000

ESH is equivalent solar hour.

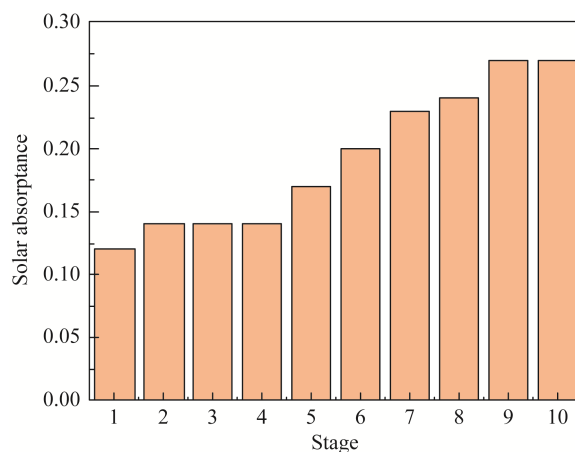


图 6 KSZ 涂层“质子+电子+紫外”综合辐照太阳吸收比
Fig. 6 Solar absorbance of potassium silicate-coated zinc oxide (KSZ) under proton, electron, and ultraviolet combined irradiation

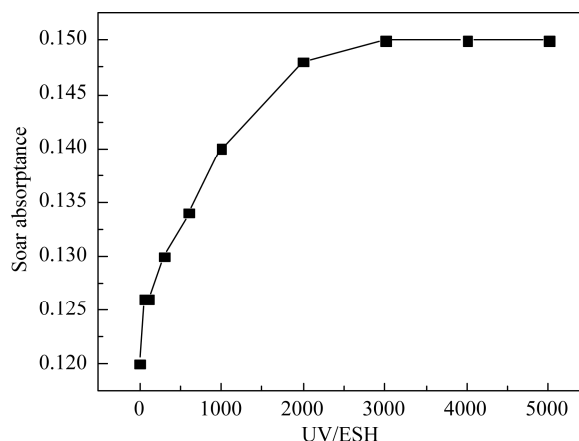


图 7 KSZ 涂层紫外辐照太阳吸收比
Fig. 7 Solar absorbance of KSZ under ultraviolet irradiation

2.5 KSZ 原子氧辐照效应

对 KSZ 涂层开展了原子氧辐照实验, 图 8 为实验前后太阳吸收比的变化情况。由图 8 可见, 经过

2.0×10^{22} atoms/cm² 原子氧辐照后, KSZ 太阳吸收比升高 0.02。

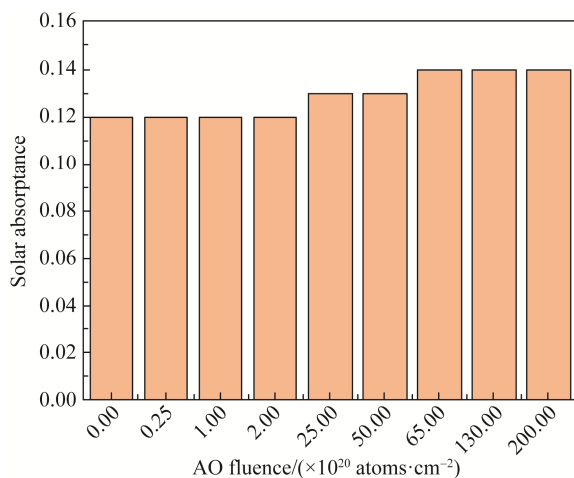


图 8 KSZ 涂层原子氧辐照前后太阳吸收比

Fig. 8 Solar absorbance of KSZ under atomic oxygen (AO) irradiation

3 结论

对 ZnO 颜料的空间环境损伤机制进行了分析, 针对 KSZ 白漆开展了空间环境效应实验, 结论为:

1) 空间环境作用后, ZnO 颜料的光谱反射系数发生了明显的衰减, 主要集中在可见光区和近红外区, 光学吸收带的峰值位置在 425 nm 左右。

2) ZnO 颜料中固有的 V_{Zn}^{2-} 发生电离, 生成 $V_{Zn}^{\cdot -}$ 是电子、质子、紫外辐照下 ZnO 颜料光学性能退化的主要机制, 而原子氧由于具有极强的电子亲和性和氧化性, 使得 V_{Zn}^{2-} 极少一部分转化为 $V_{Zn}^{\cdot -}$, 大部分转化为 V_{Zn}^0 。

3) 电子、质子、紫外综合实验(质子剂量 3.15×10^{16} p/cm²、电子剂量 2.25×10^{16} e/cm²、紫外剂量 5000 ESH)后, KSZ 涂层太阳吸收比由 0.12 增加至

0.27。经过 5000 ESH 紫外辐照后, KSZ 太阳吸收比达到 0.15。经过 2.0×10^{22} atoms/cm² 原子氧辐照后, KSZ 太阳吸收比升高 0.02。相对于紫外和原子氧, 电子和质子辐照对 KSZ 无机白漆光学性能影响较大。

参考文献:

- [1] 李振宇, 韩海鹰, 刘炳清, 等. 长寿命载人航天器热控白漆退化性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(1): 102–106.
LI Zhenyu, HAN Haiying, LIU Bingqing, et al. Spacecr Environ Eng, 2020, 37(1): 102–106.
- [2] JOHNSON J A, HEIDENREICH J J, MANTZ R A, et al. A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings[J]. Prog Org Coat, 2003, 47(3–4): 432–442.
- [3] TONON C, DUVIGNACQ C, TEYSSSEDRE G, et al. Degradation of the optical properties of ZnO-based thermal control coatings in simulated space environment[J]. J Phys D: Appl Phys, 2001, 34(1): 124–130.
- [4] MOOKHERJI T. Electron spin resonance of ultraviolet radiation induced defects in ZnO thermal control coating pigment[J]. Phys Stat Sol (A), 1972, 13(1): 293–301.
- [5] SMITH J M, VEHSSE W E. ESR of electron irradiated ZnO confirmation of the F^+ center[J]. Phys Lett A, 1970, 31(3): 147–148.
- [6] EVANS S M, GILES N C, HALLIBURTON L E, et al. Further characterization of oxygen vacancies and zinc vacancies in electron-irradiated ZnO[J]. J Appl Phys, 2008, 103(4): 43710–43710–7.
- [7] 林碧霞, 傅竹西, 贾云波, 等. 非掺杂 ZnO 薄膜中紫外与绿色发光中心[J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2208–2211.
LIN Bixia, FU Zhuxi, JIA Yunbo, et al. Acta Phys Sin, 2001, 50(11): 2208–2211.
- [8] 王旭东, 顾鹏飞, 李春东, 等. ZnO 白漆空间性能退化的地面恢复与保护研究[J]. 材料工程, 2011, 39(1): 7–10.
WANG Xudong, GU Pengfei, LI Chundong, et al. J Mater Eng, 2011, 39(1): 7–10.
- [9] 肖海英, 李春东, 杨德庄, 等. 低能质子辐照对 ZnO 白漆光学性能退化的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1369–1372.
XIAO Haiying, LI Chundong, YANG Dezhuang, et al. High Power Laser Part Beams, 2008, 20(8): 1369–1372.

Space Environmental Effects and Damage Mechanism of ZnO White Paint

JIANG Haifu^{1,2}, ZHENG Huiqi¹, LI Yu¹, LIU Yuming^{1,2}, JIANG Lixiang^{1,2}

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100094, China)

Extended Abstract

Introduction ZnO inorganic white paint is composed of ZnO pigment and a potassium silicate binder as a type of thermal control coating of spacecraft. It is commonly used for spacecraft antennas, cabin sections, and radiator surfaces. In general, the solar absorbance of ZnO inorganic white paint is lower than that of other thermal control coatings. ZnO mainly exists in the form of wurtzite structure, and its zinc oxygen ratio often deviates from stoichiometry, generating intrinsic defects internally. Oxygen deficient compounds are generally generated due to the easy escape of oxygen in zinc oxide. During the in-orbit service of spacecraft, ZnO inorganic white paint is subjected to space environmental effects, such as electrons, protons, ultraviolet (UV), and atomic oxygen

(AO), resulting in its performance degradation and affecting the stable service of spacecraft in orbit. It is thus necessary to investigate the degradation and damage mechanism of ZnO inorganic white paint to support the optimization of material properties.

Methods ZnO pigment sample was a circular flake powder, which was pressed into a grinding tool with an inner diameter of 25 mm using a machine. The pressure parameter is 10 kN and the pressure time is 5 min. A circular sample with potassium silicate-coated zinc oxide (KSZ) inorganic white paint with a diameter of 30 mm, composed of K_2SiO_3 binder and ZnO pigment was prepared on an aluminum substrate by a spray coating process.

Space environmental irradiation experiments were conducted on ZnO pigments and KSZ coatings by environmental irradiation and low orbit AO equipment. The electron energy of ZnO pigment irradiation experiment is 50 keV, with a fluence of $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, a proton energy is 50 keV, with a fluence $6 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$ and the UV dose is 5000 ESH. The AO fluence is $1 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$. The electron and proton energies of KSZ irradiation experiment are the same as those in the ZnO pigment experiment, with fluence of $2.25 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ and $3.15 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$, respectively. The UV dose is 5000 ESH. The AO fluence is $2.0 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$.

The spectrum reflectance of ZnO pigment and KSZ at wavelengths of 300–2200 nm was determined by a model Lambda 950 UV-Vis-NIR spectrophotometer (Perkin Elmer Co., USA), and the solar absorptance of KSZ was calculated. The fluorescence spectra of ZnO pigment were characterized by a model RF-5301PC spectrometer (SHIMADZU Co., Japan). The excitation source was a xenon lamp with an 220 nm wavelength. The electron spin resonance on ZnO pigments at a microwave frequency of 9.435 GHz was measured by a model JES-FE3AX electron spin resonance spectrometer (JEOL Co., Japan).

Results and discussion After environment irradiation experiment, the spectral reflectance coefficient of ZnO pigment increases sharply and reaches its maximum value in a wavelength range of 360–500 nm. The spectral reflectance coefficient decreases with increasing wavelength. The peak position of the optical absorption band of ZnO pigment is at 425 nm. Compared to other environments, the absorption peak changes most severely under proton irradiation.

Under electron, proton, and UV irradiation, the inherent V_{Zn}^{2-} in ZnO pigments undergoes ionization, generating single ionized zinc vacancies (V'_{Zn}). AO causes a very small portion of the inherent V_{Zn}^{2-} in ZnO pigments to be converted into V'_{Zn} due to its intense electron affinity and oxidizing properties, while the majority of V_{Zn}^{2-} is converted into V_{Zn}^0 .

The initial value of the solar absorptance of KSZ coating is 0.12. After the electron, proton, and UV combined irradiation experiment, the solar absorptance of the coating increases with the increase of environmental test fluence. The solar absorptance of the coating increases to 0.27 at electron fluence of $2.25 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$, proton fluence of $3.15 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$, and UV dose of 5000 ESH. The solar absorptance of KSZ coating increases within 2000 ESH UV irradiation, and then the solar absorptance stabilizes at 0.15. The KSZ solar absorptance is increased by 0.02 after $2.0 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$ AO irradiation.

Conclusions After space environment irradiation experiment, the spectral reflectance coefficient of ZnO pigment decreased, mainly concentrated in the visible and near-infrared regions, and the peak position of the optical absorption band was at 425 nm. The ionization of the inherent V_{Zn}^{2-} in ZnO pigments occurred, resulting in the formation V'_{Zn} , which was the main mechanism for the degradation of the optical properties of ZnO pigments under electron, proton, and UV irradiation. AO caused a very small portion of the inherent V_{Zn}^{2-} in ZnO pigments to be converted into V'_{Zn} due to its intense electron affinity and oxidizing properties, and the majority was converted into V_{Zn}^0 . After the combined experiments of electron, proton, and UV (i.e., electron fluence of $2.25 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$, proton fluence of $3.15 \times 10^{16} \text{ p/cm}^2$, UV dose of 5000 ESH), the solar absorptance of KSZ coating increased from 0.12 to 0.27. After 5000 ESH UV irradiation, the KSZ solar absorptance reached to 0.15. After AO irradiation of $2.0 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$, the KSZ solar absorptance was increased by 0.02. Compared to UV and AO, the electron and proton irradiation had a greater impact on the optical properties of KSZ inorganic white paint.

Keywords zinc oxide white paint; space environment; damage mechanism; solar absorptance