

# 无机防静电热控涂层制备及性能研究

蔺鹏婷 靳宇 孟腾 崔林如 张立功

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190)

**文 摘** 采用共沉淀方法制备Al掺杂ZnO(AZO)防静电热控填料,并以硅酸钾为黏结剂,研究掺杂比例、颜填比等因素对涂层电阻率及热控性能的影响,制备无机防静电热控涂层。通过SEM、XRD、3D测量激光显微镜表征填料及涂层的微观组织和相成分,通过接触电阻测试仪和分光光度计评价涂层的电阻率和热控性能。结果表明:该涂层表面致密,厚度均匀,呈现出良好的成膜性,且该涂层与基材结合力好(1级)、热控性能优异( $\alpha_s=0.19\pm 0.02$ ;  $\varepsilon_{11}=0.92\pm 0.02$ )、具有低电阻率 $[(3.0\sim 18.0)\times 10^5 \Omega\cdot\text{m}]$ ,并且具有优异的空间环境适应性,在实现航天器防静电热控领域有极大的应用前景。

**关键词** 热控涂层,无机涂层,防静电性能,电阻率,结合力

中图分类号:V19

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.011

## Preparation and Properties Study of Inorganic Antistatic Thermal Control Coatings

LIN Pengting JIN Yu MENG Teng CUI Linru ZHANG Ligong

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

**Abstract** The Al-doped ZnO(AZO) antistatic thermal control filler was prepared by co-precipitation method with potassium silicate used as the binder. The influence of doping ratio, pigment-to-fill ratio and other factors on the resistivity and thermal control performance of the coating was studied, and the inorganic antistatic thermal control coating was prepared. The microstructure and phase composition of fillers and coatings were characterized by SEM, XRD, and 3D measurement laser microscope, and the resistivity and thermal control properties of coatings were evaluated by contact resistance tester and spectrophotometer. The results show that the coating has a dense surface, uniform thickness, good film-forming properties, good adhesion to the substrate (level 1), and excellent thermal control performance ( $\alpha_s=0.19\pm 0.02$ ;  $\varepsilon_{11}=0.92\pm 0.02$ ), low resistivity  $[(3.0\sim 18.0)\times 10^5 \Omega\cdot\text{m}]$ , and excellent space environment adaptability, which has great application prospects in the field of spacecraft anti-static thermal control.

**Key words** Thermal control coatings, Inorganic coatings, Antistatic properties, Resistivity, Adhesion

### 0 引言

高轨(20 000~65 000 km)航天器如军事通信卫星、电子侦察卫星在轨运行期间,会遭遇等离子体层、外磁层、磁尾和磁鞘的等离子体环境,使航天器表面积聚大量的静电荷,由于航天器表面各部位导电能力的差异,产生电势差,发生充电效应。当充电电位超过材料的击穿阈值,使航天器表面电位发生瞬间变化时,即可能产生放电效应,从而对星载电子设备造成影响。因此,为减少或消除轨道环境对航天器表面的充电影响,需要对航天器进行等电位及防静电处理<sup>[1-2]</sup>。

目前航天器表面涂覆的防静电热控涂层一般采用丙烯酸树脂(ACR-1白漆)和有机硅(SR107-G白漆),这两类涂层在轨寿命末期受高剂量电离辐照影响较大,掺杂填料进一步产生缺陷,形成色心,太阳吸收比呈现大幅度退化趋势。依据在轨退化率分析,到15年寿命末期, $\alpha_s$ 由0.28退化至0.60,无法适应温度分布精度要求高的激光载荷产品,严重影响航天器寿命及末期服役可靠性<sup>[3-4]</sup>。因此,亟须研究空间稳定性更好的无机防静电热控涂层,来避免高真空辐照对热控涂层性能造成的退化。

本文采用Al掺杂ZnO(AZO)作为功能填料,实

收稿日期:2022-05-08

基金项目:国家自然科学基金(5213000262)

第一作者简介:蔺鹏婷,1986年出生,硕士,高级工程师,主要从事航天器表面工程技术研究工作。E-mail:369265114@qq.com

通信作者:靳宇,1987年出生,博士,高级工程师,主要从事航天器表面工程技术研究工作。E-mail:jinyu529Cast@126.com

现涂层防静电、低吸收、高发射性能;同时采用无机硅酸钾为黏结剂,提高涂层的抗辐照性能。通过研究掺杂比例、颜填比等因素对涂层电阻率及热控性能的影响,制备与基材结合力好(1级)、热控性能优异( $\alpha_s \leq 0.2$ ;  $\varepsilon_{11} \geq 0.93$ )及低电阻率( $\leq 1 \times 10^7 \Omega \cdot m$ )的无机防静电热控涂层,同时研究空间环境辐照试验对涂层性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 共沉淀法制备 AZO 粉末填料

采用共沉淀法制备 AZO 粉末填料,称取一定量的  $Zn(NO)_2 \cdot 6H_2O$ 、 $Al(NO)_3 \cdot 6H_2O$  与一定量的  $CO(NH_2)_2$  配制成混合溶液,搅拌均匀后,保持恒温水浴  $95^\circ C$  加热 8 h 进行均匀沉淀反应。共沉淀反应生成的混合物经过抽滤、洗涤后放置于烘箱中干燥,干燥温度为  $120^\circ C$ ,干燥时间为 4 h,得到 Al 掺杂碱式碳酸锌粉末中间体,再在马弗炉中煅烧得到 AZO 粉末填料。

### 1.2 无机防静电热控涂层制备

将称量好的填料、黏结剂和去离子水置于刚玉球磨罐中,在球磨机上球磨混合 8~12 h。采用空气喷枪对混合涂料进行喷涂,喷涂压力保持在 0.3~0.4 MPa,喷涂距离为 20~30 cm。实验所需的 Cu 试片及 Al 试片在喷涂前需要进行打磨或喷砂前处理。

### 1.3 填料结构表征及涂层性能测试

采用 D/max2200 pc 型 X-射线衍射仪对 Al 掺杂碱式碳酸锌粉末和煅烧后得到的 AZO 试样进行结构分析;采用 JSM 6010 型扫描电子显微镜和 3D 测量激光显微镜观察填料显微组织形貌及对填料元素含量进行能谱分析;采用划格法评价涂层的结合力;采用分光光度计对防静电热控涂层的热辐射性能进行测试;采用接触电阻测试仪对防静电热控涂层的电阻率进行测试。

按照《航天器热控涂层试验方法 第 5 部分:真空-紫外辐照试验》的测试方法进行真空-紫外辐照试验,真空室内压力  $< 1.3 \text{ mPa}$ ,加速因子为 5,紫外辐射量为 5 000 ESH,对试片的热辐射性能和电阻率进行测试。

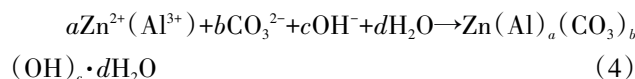
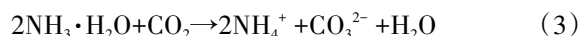
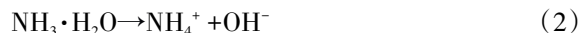
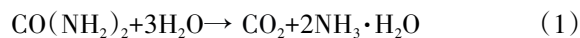
按照《航天器热控涂层试验方法 第 6 部分:真空-质子辐照试验》和《航天器热控涂层试验方法 第 7 部分:真空-电子辐照试验》的测试方法进行真空-质子及真空-电子辐照试验,真空室内压力  $< 1.3 \text{ mPa}$ ,质子能量为 50 keV,质子注量为  $2.0 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$ ;电子能量为 40 keV,辐射量为  $3.5 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ ,交替对涂层的热辐射性能进行测试。

## 2 结果及分析

### 2.1 AZO 粉末填料结构分析

采用共沉淀法制备 AZO 粉末填料,选取尿素为沉淀剂,该反应过程主要分为以下三个步骤:尿素在

热水条件下发生水解反应、水解产物与锌盐(铝盐)反应生成碱式碳酸锌(铝掺杂)、碱式碳酸铝(铝掺杂)热分解生成 AZO。采用共沉淀法制备的纳米颗粒具有分散性好、粒径分布窄、成本低等优点,易于实现工业化生产<sup>[5-6]</sup>。



此方法中,尿素不直接与被沉淀组分( $Zn^{2+}$ )发生反应,而是在整个溶液中均匀、缓慢地水解成  $CO_2$  和  $NH_3 \cdot H_2O$ ,是速率控制步骤<sup>[7]</sup>。如图 1 所示,随着反应的进行,pH 值略微升高,具体原因是在室温下, $Zn(NO)_2 \cdot 6H_2O$  溶液呈弱酸性( $pH=5.2$ ),尿素溶液呈弱碱性( $pH=7.3$ ),二者混合后溶液仍呈酸性( $pH=5.3$ ),在水浴加热的作用下,尿素缓慢分解生成大量的  $OH^-$  离子,其分解速度大于碱式碳酸锌沉淀速度。随着反应的进行,原料浓度逐渐减小,尿素分解速度减慢,尿素分解与碱式碳酸锌沉淀达到平衡,pH 值维持不变( $\sim 6.2$ )。但是即使 pH 值在缓慢升高,仍然变化不大(变化值  $< 1$ ),说明在整个反应过程中,尿素分解及沉淀速度处于一个相对恒定的状态,有利于生成粒径分布均匀的纳米颗粒。

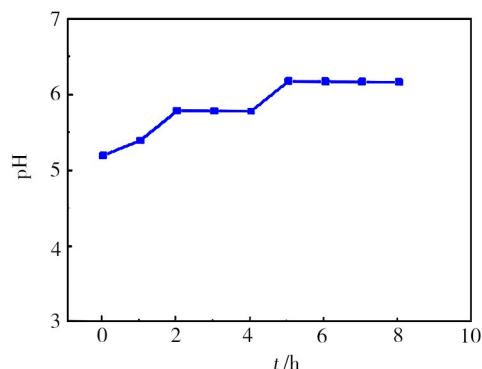


图 1 共沉淀反应过程中溶液的 pH 值随时间的变化

Fig. 1 Variation of pH value of solution with time during co-precipitation reaction

采用 XRD、SEM 及 EDX 等分析方法对高温热分解前后的粉末填料(1%Al 元素掺杂)成分形貌分析如图 2 所示。从 XRD 图谱可以看出,煅烧前粉末呈现出典型的碱式碳酸锌的衍射峰,煅烧后的粉末则呈现出典型的 ZnO 晶体结构,未检出氧化铝的晶体结构。但能谱分析数据中检测到 Al 元素的存在,约占 Zn-Al 元素含量的 2%,表明通过共沉淀及煅烧反应,Al 元素掺杂进入 ZnO 颗粒中,形成了 AZO。此外,由 SEM 照片可以

看出, AZO 粉末粒径分布均匀, 约在 100 nm, 是制备防

静电涂层的理想填料。

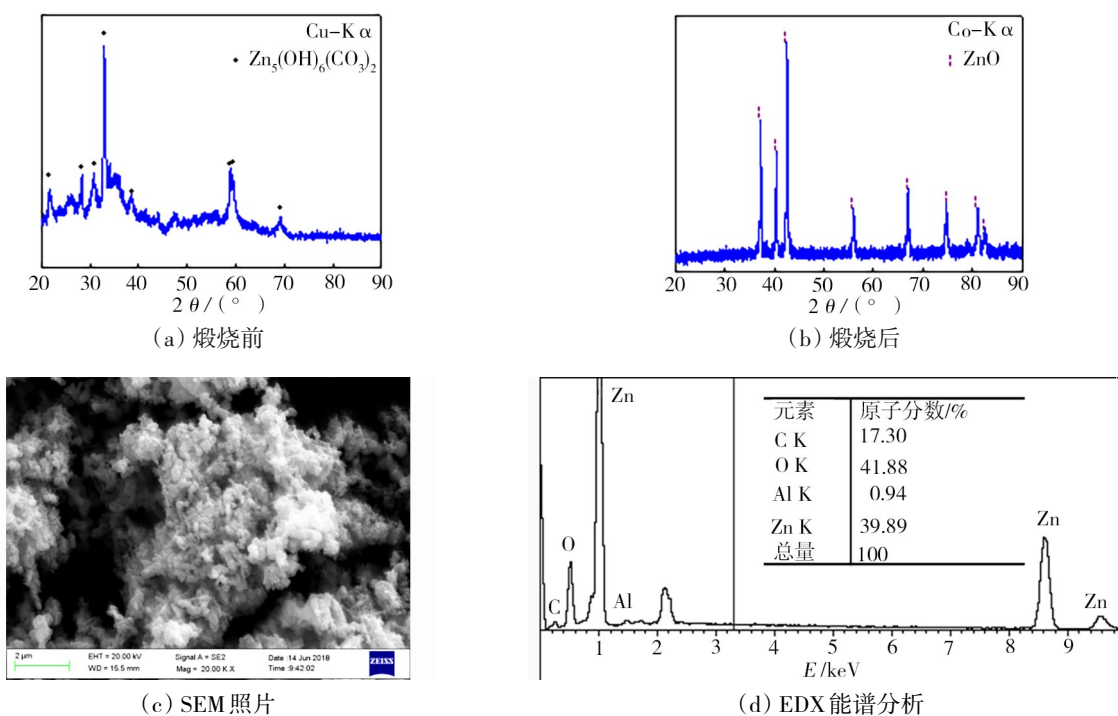


图2 共沉淀法制备1%Al掺杂ZnO粉末煅烧前后的XRD衍射图谱、SEM照片及EDX能谱分析

Fig. 2 The XRD diffraction pattern, SEM image and EDX energy spectrum analysis analysis of 1% Al-doped ZnO powder prepared by co-precipitation method before and after calcination

## 2.2 无机防静电热控涂层制备及性能分析

无机防静电热控涂层主要由无机黏结剂、防静电填料和水组成。采用空间环境稳定、结合力好的无机  $K_2SiO_3$  为黏结剂<sup>[8]</sup>, 研究不同颜填比、掺杂比例等因素对涂层结合力、热控性能及电阻率的影响, 同时研究真空-紫外辐照、真空-质子及真空-电子辐照试验对涂层热控性能及电阻率的影响。

### 2.2.1 不同颜填比对涂层性能影响分析

无机黏结剂和防静电填料的比列决定涂层的各项性能。防静电填料比例增大, 有助于提高涂层的热控性能和防静电性能; 但是随之会引起黏度增加, 涂层易掉粉、开裂, 因此, 需优化最佳颜填比。不同颜填配比对涂层热控性能、电阻率以及结合力的影响具体结果如表1所示。由表1结果可以看出, 颜填比的提高可以使涂层的太阳吸收比由0.20(颜填比为3.5:1)降低到

表1 颜填比对涂层性能的影响

Tab. 1 Influence of pigment-to-fill ratio on coating properties

试样	颜填比	$\alpha_s$	$\epsilon_{Hf}$	$\rho/10^6 \Omega \cdot m$	涂层结合力
1#	3.5:1	0.20	0.92	15.0~390.0	良好
2#	4.0:1	0.19	0.92	3.2~15.0	良好
3#	4.5:1	0.19	0.92	0.3~1.8	轻微掉粉
4#	5.0:1	0.18	0.93	-	掉粉

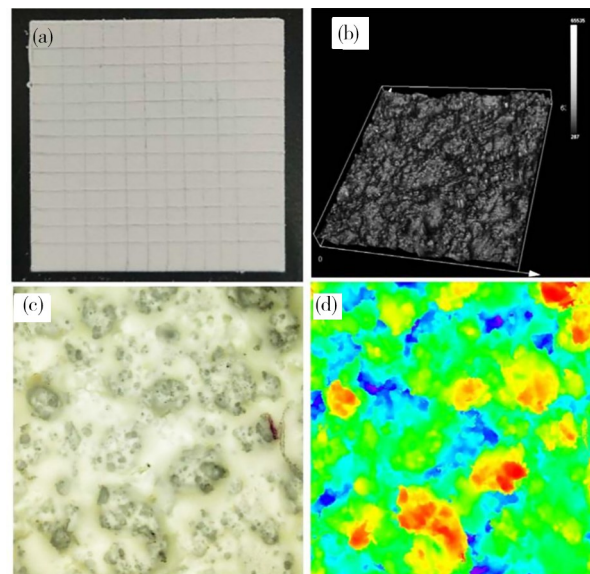


图3 划格法测试涂层结合力图片(a)以及3D测量激光显微镜照片(b-d)(颜填比4:1)

Fig. 3 The images of coating adhesion force test by the cross-cut method(a) and 3D measurement laser microscope(b-d) (color-to-fill ratio 4:1)

0.18(颜填比为5:1), 电阻率由  $1.5 \times 10^7 \sim 3.9 \times 10^8 \Omega \cdot m$  (颜填比为3.5:1)降低到  $3.0 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^6 \Omega \cdot m$  (颜填比为4.5:1), 但是颜填比大于4:1后, 涂层表面出现掉粉现象。综合涂层的热控、防静电以及结合力三项性

能,选取颜填比例为4:1作为无机防静电电热控涂层的最佳配比。采用划格法对此涂层进行结合力测试结果如图3所示,其结合力为1级(间隔3 mm横纵划格,在切口交叉处和沿切口边缘有微量涂层脱落,受影响的交叉切割面积小于5%),可见涂层表面致密,厚度均匀,呈现出良好的成膜性。

### 2.2.2 不同Al掺杂比例对涂层性能影响分析

#### (1)不同Al掺杂比例对涂层电阻率的影响

AZO粉体为n型半导体材料,其电阻率与载流子浓度(电子电量×电子浓度)和迁移率的乘积成反比,即:

$$\rho=1/nq\mu \quad (6)$$

式中, $q$ 为电子电量, $n$ 为电子浓度, $\mu$ 为迁移率。

电子浓度主要与Al<sup>3+</sup>粒子的有效替代数和氧空位有关,而迁移率主要与AZO中的自由载流子浓度和Al掺杂浓度相关。掺杂Al<sup>3+</sup>粒子在ZnO中存在固溶极限,当Al<sup>3+</sup>粒子掺杂浓度过高时,部分的Al<sup>3+</sup>粒子不能完全进入ZnO晶格中,过量Al<sup>3+</sup>粒子与O作用形成不导电的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,致使部分晶格处于无序状态,对载流子的迁移率造成影响<sup>[9]</sup>。

不同Al掺杂比例对涂层电阻率影响如表2所示。随着Al掺杂浓度的提高(0%~1%),电阻率逐渐降低,表明Al元素的添加可以增加ZnO晶格中的载流子浓度;当Al掺杂浓度大于1%时,电阻率降低不明显,说明掺杂浓度达到极限,电子迁移率由于散射和晶界势垒的提高而降低。

#### (2)不同Al掺杂比例对涂层热控性能的影响

由图4和表2分别显示了不同Al掺杂浓度对无机防静电电热控涂层的光谱反射系数的影响和性能的影响。从图表可以看出,Al掺杂浓度在0%~1.5%范围内,相比于未经任何处理的纯ZnO,改性颜料的太阳吸收比的变化值呈递增趋势,电阻率由 $10^7\sim 10^8 \Omega\cdot m$ 显著降低到 $(1.0\sim 30)\times 10^5 \Omega\cdot m$ 。由固体材料对光的吸收原理可知,当固体材料受到高能量的光照射时,价带中的电子被激发越过禁带而进入导带,产生光的吸收<sup>[10-11]</sup>,因此,半导体材料的吸收性能与禁带宽度密切相关。禁带宽度主要由材料中的原子组成和成键状态决定,同时缺陷和掺杂均可使载流子浓度增大,进而引起电阻率降低。同时,过多的载流子填充导带较低的能级,致使禁带吸收光子的波长向短波移动,带隙增大,太阳吸收比增高<sup>[12-13]</sup>。但是当掺杂量超过1.5%后, $\Delta\alpha_s$ 随掺杂浓度的提高出现下降趋势,在Al掺杂浓度为2%时, $\Delta\alpha_s$ 增加了约0.02。这是由于当Al掺杂到一定程度时,其在ZnO中的溶解度会达到上限,载流子浓度达到饱和。同时,

由于掺杂引起的晶格结构畸变严重,产生定域态能级,使带隙减小。

表2 掺杂比例对涂层性能的影响  
Tab. 2 Effect of doping ratio on coating properties

试样	掺杂比例/%	$\alpha_s$	$\varepsilon_{11}$	$\rho/10^6\Omega\cdot m$
1#	0	0.18±0.02	0.92±0.02	10~100
2#	0.5	0.19±0.02	0.92±0.02	4.5~78
3#	1.0	0.19±0.02	0.92±0.02	0.3~1.8
4#	1.5	0.23±0.02	0.92±0.02	0.1~3.0
5#	2.0	0.21±0.02	0.92±0.02	0.22~1.80

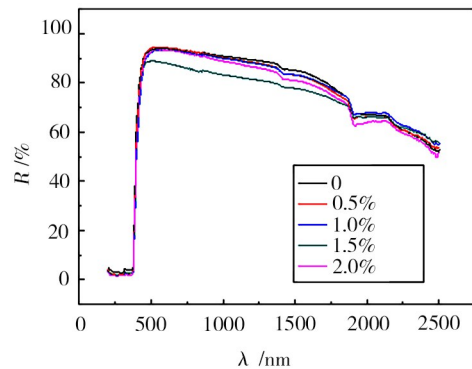


图4 掺杂浓度对改性颜料光谱反射系数的影响

Fig. 4 The effect of doping concentration on the spectral reflectance of modified pigment

### 2.2.3 真空-紫外辐照对无机防静电电热控涂层影响分析

无机防静电电热控涂层经5 000 ESH的真空-紫外辐照后,其热辐射性能变化数据如表3所示,涂层太阳吸收比 $\alpha_s$ 上升了0.05~0.06,涂层半球发射率 $\varepsilon_{11}$ 和电阻率变化较小。

图5展示无机防静电电热控涂层吸收比随紫外辐照剂量的变化。由图中所示,涂层在辐照剂量为1 500 ESH至2 000 ESH时,太阳吸收比 $\alpha_s$ 上升明显,由0.190左右迅速升高至0.235左右。经2 000 ESH紫外辐照后,其太阳吸收比趋于平稳,无明显变化。这是由于辐照剂量在0~2 000 ESH时,涂层经紫外辐照后形成色心等缺陷,致使太阳吸收比显著增大;紫外辐照剂量在2 000 ESH至5 000 ESH时,涂层产生的缺陷达到饱和,太阳吸收比基本稳定。从电阻率测试结果来看,真空-紫外辐照会造成电阻率的略微降低,这是因为晶格缺陷的产生,反而会导致载流子的迁移率升高,进而使电阻率降低。

图6展示了无机防静电电热控涂层经5 000 ESH真空-紫外辐照前后的表面外观状态,通过对比可见,涂层经紫外辐照后表面未发现脱落现象,外观颜色稍微变黄,与辐照后太阳吸收比增大的结果一致。

表3 真空-紫外辐照对无机防静电热控涂层的影响

Tab. 3 Effects of vacuum-ultraviolet irradiation on inorganic antistatic thermal control coatings

试样	太阳吸收比 $\alpha_s$			半球发射率 $\varepsilon_H$			电阻率 $\rho/10^5 \Omega \cdot m$		
	辐照前	辐照后	$\Delta\alpha_s$	辐照前	辐照后	$\Delta\varepsilon_H$	辐照前	辐照后	$\Delta\rho$
1#	0.192	0.241	0.049	0.92	0.93	0.01	11	4.5	-6.5
2#	0.189	0.240	0.051	0.93	0.93	0	14	8.7	-5.3
3#	0.191	0.239	0.048	0.93	0.93	0	5.7	3.2	-2.5
4#	0.191	0.241	0.050	0.93	0.92	-0.01	7.2	5.1	-2.1
5#	0.190	0.241	0.051	0.92	0.93	0.01	16	12	-4.0

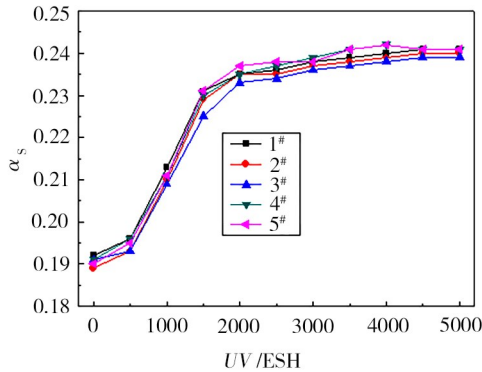
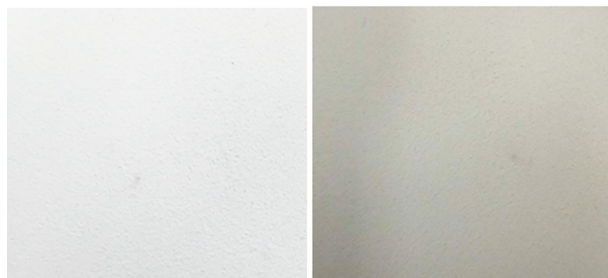


图5 涂层太阳吸收比随紫外辐照剂量的变化

Fig. 5 The change of solar absorption ratio of the coating with the ultraviolet irradiation dose



(a) 真空-紫外辐照前 (b) 真空-紫外辐照后

图6 无机防静电热控涂层经真空-紫外辐照前后外观状态

Fig. 6 Appearance of the coating before and after vacuum-ultraviolet irradiation

### 2.2.4 真空-电子、质子综合辐照对无机防静电热控涂层影响分析

无机防静电热控涂层经真空-电子与真空-质子交替辐照后(电子能量 40 keV、总剂量  $3.5 \times 10^{14} e/cm^2$  的电子辐照,质子能量 50 keV、总剂量  $2.0 \times 10^{14} p/cm^2$  的质子辐照)太阳吸收比性能变化数据如表 4 所示。表 4 表明:太阳吸收比  $\alpha_s$  上升了 0.015,半球发射率变化不明显,电阻率略有下降,相较于有机防静电热控涂层,表现出良好的辐照稳定性。真空-电子、质子综合辐照试验前后太阳光谱吸收曲线如图 7 所示,无机防静电热控涂层吸收比表现为整体略微上升。

表4 无机防静电热控涂层真空-电子、质子辐照试验结果

Tab. 4 Vacuum-electron and proton irradiation test results of inorganic antistatic thermal control coatings

试样	太阳吸收比 $\alpha_s$			半球发射率 $\varepsilon_H$			电阻率 $\rho/10^5 \Omega \cdot m$		
	辐照前	辐照后	$\Delta\alpha_s$	辐照前	辐照后	$\Delta\varepsilon_H$	辐照前	辐照后	$\Delta\rho$
	1#	0.193	0.209	0.016	0.92	0.93	0.01	23	5.1
2#	0.195	0.213	0.018	0.93	0.93	0	6.5	1.6	-4.9
3#	0.195	0.206	0.011	0.93	0.93	0	3.7	2.2	-1.5

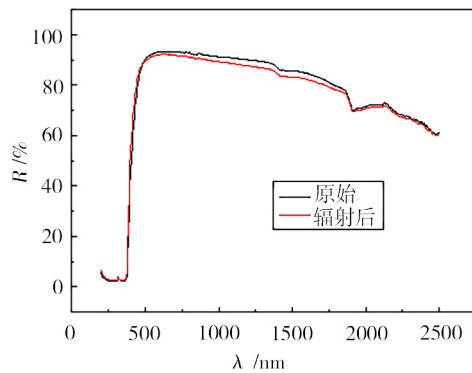


图7 真空-电子、质子综合辐照试验前后光谱反射曲线

Fig. 7 Spectral reflectance curves before and after vacuum-electron and proton comprehensive irradiation test

### 3 结论

通过共沉淀法,采用尿素为沉淀剂,保持沉淀过程中 pH 值的稳定性,成功制备出粒径分布均匀( $\sim 100$  nm)的 AZO 防静电热控填料。在此基础上,以硅酸钾为黏结剂,研究掺杂比例、颜填比等因素对涂层结合力、电阻率及热控性能的影响,制备无机防静电热控涂层。该涂层表面致密,厚度均匀,呈现出良好的成膜性,且该涂层与基材结合力好(1级),热控性能优异( $\alpha_s=0.19 \pm 0.02$ ;  $\varepsilon_H=0.92 \pm 0.02$ ),具有低电阻率 [ $(3.0 \sim 18) \times 10^5 \Omega \cdot m$ ],且具有优异的真空-紫外辐照性(辐照后太阳吸收比上升 0.05 左右),真空-电子、真空-质子辐照稳定性良好(交替辐照后太阳吸收比上升 0.15 左右),在实现航天器防静电热控领域有极大的应用前景。

## 参考文献

- [1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社, 1991:4-379.
- MIN G R. Thermal Control Technology of Satellite [M]. Beijing: Astronautical Press, 1991:4-379.
- [2] 胡金刚. 中国航天器热控制技术进展[J]. 航天器工程, 2001(1):14-29.
- HU J G. Progress in thermal control technology of Chinese spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2001(1):14-29.
- [3] CLAIRE T. Model of degradation of thermal control coatings in space environment [C]//5<sup>th</sup> International Symposium on Materials in the Space Environment, Arcachon France, 2000: 57-61.
- [4] 冯伟泉, 丁义刚, 闫德葵, 等. 地球同步轨道长寿命卫星热控涂层太阳吸收率性能退化研究[J]. 中国空间科学技术, 2005(2):34-40.
- FENG W Q, DING Y G, YAN D K, et al. Study on performance degradation of solar absorptivity of thermal control coating for geosynchronous orbit long-lived satellites [J]. China Space Science and Technology, 2005(2):34-40.
- [5] DE A A, SOLER-LLIA G J, JOBBAGY M, et al. Synthesis of metal oxide particles from aqueous media: The homogeneous alkalization method [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 1998, 19(2/3):207-228.
- [6] 张宪玺, 王晓娟, 翟冠杰, 等. 碱式碳酸锌煅烧制备纳米氧化锌[J]. 无机化学学报, 2002, 18(10):1037-1041.
- ZHANG X X, WANG X J, ZHAI G J, et al. Nanometer ZnO preparation through basic zinc carbonate calcination[J]. Chinese J. Inorg. Chem., 2002, 18(10):1037-1041.
- [7] 曹培江, 解振宇, 韩舜, 等. 不同氧流量条件下 ZnO 纳米棒阵列的形成及机理分析[J]. 材料导报, 2014, 28(14):1-3.
- CAO P J, XIE Z Y, HAN S, et al. Formation and mechanism analysis of ZnO nanorod arrays fabricated at different oxygen flow rates[J]. Mater. Rev.: Res., 2014, 28(14):1-3.
- [8] HARADA Y, MELL R J. Inorganic thermal control coatings: A review[R]. AIAA Paper, AIAA-83-0074:1-8.
- [9] 吕金鹏. Al<sup>3+</sup>掺杂抗静电改性 ZnO 颜料制备及其质子辐照效应[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- LYU J P. Preparation of Al<sup>3+</sup> Doped Antistatic Modified ZnO Pigment and Proton Irradiation Effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [10] ZHANG Y H, HAN J. Microstructure and temperature coefficient of resistivity for ZnO ceramics doped with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. Materials Letters, 2006, 60(2):2522-2525.
- [11] AYADI Z B, EL MIR L, DJESSAS K, et al. Effect of the annealing temperature on transparency and conductivity of ZnO Al thin films[J]. Thin Solid Films, 2009: 517(23): 6305-6309.
- [12] PROGAR D J, WADE W R. Vacuum and ultraviolet-radiation effects on binders and pigments for spacecraft thermal-control coatings[R]. Report No. NASA TN D-6546, 1971:1-5.
- [13] CLAIRE Tonon, CAROLE Duvignacq, et al. Degradation of the optical properties of ZnO-based thermal control coatings in Simulated space environment [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(1):124-130.