

# ZnO/SBA-15 无机热控涂层填料及涂层性能

张东 张立功 张有玮 张家强 孟腾

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190)

**文 摘** 开展高紫外-可见-近红外反射能力热控填料的制备, 研制新型低吸收比( $\alpha_s$ )高发射率( $\varepsilon_H$ )无机热控涂层。以自制 SBA-15 和 ZnO 前驱体为原料通过溶剂热浸渍和高温煅烧法制备 ZnO/SBA-15 填料, 然后与硅酸钾( $K_2SiO_3$ )制备无机热控涂层; 采用 SAXD、XRD、SEM、太阳反射光谱分析填料和涂层的性能。结果显示采用硝酸锌作为前驱体、 $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$ , 950 °C 下烧结 3 h 可以得到高紫外-可见-近红外反射能力的填料; ZnO/SBA-15/ $K_2SiO_3$  无机涂层的  $\alpha_s$  为 0.09,  $\varepsilon_H$  为 0.91, 涂层结合力等级为 1 级, 经过 100 次-196~100 °C 热循环实验后, 涂层无脱落和开裂现象。SBA-15 改性 ZnO 可以获得具有高紫外反射率和低  $\alpha_s$  的热控填料, ZnO/SBA-15 填料制备的无机热控涂层同样具备高紫外反射率、低  $\alpha_s$  和高  $\varepsilon_H$ , 可以满足航天器高效散热的需求, 应用前景良好。

**关键词** ZnO, SBA-15, 填料, 热控涂层, 低吸收比, 高反射率

中图分类号: TG174.44

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.05.015

## The Performance of Inorganic Thermal Control Pigment and Coatings Based on ZnO/SBA-15

ZHANG Dong ZHANG Ligong ZHANG Youwei ZHANG Jiaqiang MENG Teng

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190)

**Abstract** The work aims to develop a new type of low absorption ( $\alpha_s$ ) high emissivity ( $\varepsilon_H$ ) inorganic thermal control coating, and to study inorganic thermal control pigments with high UV-VIS - NIR reflectivity. Using self-made SBA-15 and ZnO precursors as raw materials, ZnO/SBA-15 fillers were prepared by solvothermal impregnation and high-temperature calcination, and then fillers and potassium silicate ( $K_2SiO_3$ ) were used to prepare inorganic thermal control coatings. SAXD, XRD, SEM, solar reflectance spectroscopy were used to analyze the performance of fillers and coatings. The results showed that using zinc nitrate as the precursor,  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$ , sintered at 950 °C for 3 h to obtain ZnO/SBA-15 pigment with high UV-visible-near infrared reflectance. The test of ZnO/SBA-15/ $K_2SiO_3$  inorganic coating shows that the  $\alpha_s$  is 0.09,  $\varepsilon_H$  is 0.91. Through the cross-cut test, it is known that the adhesion level of the coating is level 1. After 100 thermal cycle experiments at -196~100 °C, the coating did not fall off or crack. It means that SBA-15 modify ZnO can obtain thermal control pigments with high UV reflectivity and low  $\alpha_s$ . The inorganic thermal control coating prepared with ZnO/SBA-15 powder as a pigment also has high ultraviolet reflectance, low  $\alpha_s$  and high  $\varepsilon_H$ , which can meet the needs of spacecraft for efficient heat dissipation and has a good application prospect.

**Key words** ZnO, SBA-15, Pigment, Thermal control coating, Low absorption, High emissivity

### 0 引言

热控涂层是被动热控系统的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 通过自身物理性能调节航天器外表面的吸辐平衡, 维持卫星在轨的适宜温度。随着我国航天技术的发展, 卫星寿命要求也在不断提高<sup>[3]</sup>。同时大功率设备的使用对散热能力提出了更高的要求。而热控涂层

的热辐射特性主要取决于填料性能, 低吸收高发射热控涂层的填料主要为 ZnO<sup>[4-5]</sup>、ZrO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>、Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub><sup>[7-8]</sup>等, 其中 ZnO 应用最为广泛。但现有以 ZnO 作为填料的热控涂层还存在紫外波段吸收过高的问题, 大大影响了填料以及涂层的光反射性能。为了提高热控涂层的性能, 很多研究者都针对 ZnO

收稿日期: 2021-05-14

第一作者简介: 张东, 1996 出生, 硕士研究生, 研究方向为航天器表面热控涂层。1694310152@qq.com

通信作者: 张立功, 1966 出生, 研究员, 研究方向为航天器表面工程。zhanglg1161818@sina.com

进行了改性研究,如ZnO晶粒调控<sup>[9]</sup>、多界面反射设计<sup>[10-11]</sup>、包覆改性<sup>[12]</sup>等。

复旦大学的赵东元课题组研发制备的SBA-15<sup>[13-15]</sup>作为一种介孔分子筛,拥有独特的六方孔道结构,高紫外反射能力。2013年,伊朗马雷克·阿什塔尔工业大学的Narges Kiomarsipour等人<sup>[16]</sup>将Zn-MCM-41(MCM-41与SBA-15结构相同)加入硅酸钾黏结剂中,制备出了 $\alpha_s$ 为0.154、 $\epsilon_{\text{H}}$ 为0.914的新型的热控涂层。2016年,伊朗科学技术研究组织的Vahid Heydari等<sup>[17]</sup>人将Zn-SBA-15填料与硅酸钾结合,制备出了 $\alpha_s$ 为0.15、 $\epsilon_{\text{H}}$ 为0.93的新型热控涂层。2019年,南京理工大学的孙辉等人<sup>[18]</sup>使用纳米氧化锌与介孔分子筛SBA-15制备出了高紫外反射型热控填料,并与硅酸钾结合,制备出紫外波段反射率超过0.90、吸收比小于0.08的无机热控涂层,但实验采用粉体固相混合和烧结的方式获得,容易造成粉体结构不均一,粉体混合不充分等问题。这些研究证实了二维孔道结构的介孔SBA-15分子筛可以成功的改性氧化锌,并将SBA-15的高紫外反射能力和氧化锌的高可见光和近红外光反射能力相结合,达到增强涂层太阳全光谱的光学性能的目的。但目前尚未有研究人员对填料制备过程参数影响展开详细研究。此外,综合前人的研究结果发现,采取分子筛对氧化锌进行负载后,烧结温度的不同,填料光反射性能同样有较大的改变。但同样尚未见有文献报道烧结温度对复合填料光学性能的影响机理。

本文主要在现有研究基础上,首先采用溶胶-凝胶法和高温烧结获得高紫外反射能力的SBA-15分子筛,然后采用溶剂热浸渍法和固相烧结完善ZnO/SBA-15填料制备过程中前驱体种类、比例、烧结温度和烧结时间等因素的影响研究,然后进一步研究高温固相烧结过程中的参数调控对改性填料的热辐射性能的影响以及采用新填料所制备涂层的光学性能分析。

## 1 实验

### 1.1 材料

六水合硝酸锌( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ):分析纯,北京益利精细化学品有限公司;正硅酸乙酯(TEOS),无水乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ),AR,≥99%,北京市通广精细化工公司;聚(乙二醇)-嵌段-聚(丙二醇)-嵌段-聚(乙二醇)(P123, Aldrich, EO20PO70EO20,  $M_n=5\ 800$ )、HCl,AR,38%,北京化工厂;去离子水等。

### 1.2 实验方法

SBA-15粉体制备方法<sup>[15,19-20]</sup>:将P123加入水和盐酸溶液,在55℃的加热环境下强力搅拌3h获得P123前驱体溶液,随后加入TEOS继续搅拌5min使之与溶液充分混合(反应物组分 $m(\text{P123}):m(\text{TEOS}):m(\text{HCl})$

$:m(\text{H}_2\text{O})=1:2.13:2.13:35.37$ ),然后静置24h后,在90℃水浴加热12~24h,然后进行抽滤和干燥,最后放入马弗炉550℃保温3h获得SBA-15粉体。

ZnO/SBA-15粉体制备方法<sup>[17,21-23]</sup>:将适量Zn( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O加入乙醇溶液,待搅拌至完全溶解后,向溶液中加入自制SBA-15分子筛,再次搅拌并超声震荡10min,使分子筛完全分散在乙醇溶液中。静置18h后,将混合溶液进行蒸干,然后放入坩锅中,使用马弗炉进行烧结,并设置不同烧结温度和烧结时间,得到ZnO/SBA-15粉体。

涂层制备:以ZnO/SBA-15粉体为填料和硅酸钾黏结剂进行配制,并加入去离子水稀释,球磨4h,然后进行喷涂和固化,得到涂层试样。

### 1.3 样品测试及表征

利用岛津XRD-7000S小角度XRD衍射仪(扫描角度为0.6°~5°)分析SBA-15粉体和ZnO/SBA-15填料的物相结构;利用Bruker AXSD8型X射线衍射仪(Cu靶,扫描速度为5°/min,扫描角度为10°~90°)分析ZnO/SBA-15填料的物相组成;采用扫描电子显微镜(SEM, SUPRA55VPX, Germany)对SBA-15粉体和ZnO/SBA-15填料进行形貌分析(电压20kV,放大倍数 $3 \times 10^4$ );采用X射线能量色散光谱(EDS)测试SBA-15粉体和ZnO/SBA-15填料的元素组成;采用紫外-可见光-近红外分光光度计(Lambda 950, PerkinElmer, America)测试SBA-15、ZnO/SBA-15填料和无机热控涂层的太阳吸收比,波长扫描范围为200~2600nm;采用发射率测试仪测试无机涂层的半球发射率;采用划格法检测无机涂层的结合力等级。

## 2 结果与讨论

### 2.1 填料物相分析

图1是采用不同氧化锌前驱体与SBA-15结合制备填料的XRD分析结果,从图谱中可以看出,以 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为前驱体所制备的粉体图谱,所有的衍射峰都跟ZnO有较好的吻合,且观察不到前驱体的峰,说明前驱体已经完全转化为ZnO。但是衍射图谱也显示出,同样实验条件下Zn( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O所得到的ZnO衍射峰比 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 更加尖锐,说明ZnO产物的结晶度更好。随后将XRD数据通过Scherrer公式<sup>[24]</sup>进行晶粒尺寸计算,结果显示Zn( $\text{NO}_3$ )<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O产物的晶粒尺寸(81nm)高于 $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的产物晶粒尺寸(67nm)。以ZnCl<sub>2</sub>为前驱体所得粉体的XRD衍射图谱中不仅存在ZnO的衍射峰,同时在11.24°、22.24°、33.52°等位置还有大量的杂峰,通过物相分析得知杂峰为Zn<sub>2</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O,说明ZnCl<sub>2</sub>不适合作为前驱体。而在23.56°出现了较宽的衍射峰,推测为分子筛作为非晶态介孔SiO<sub>2</sub>所拥

有的特征峰<sup>[25]</sup>,也可以说明分子筛的结构保持较为完整,没有因为负载而被破坏。

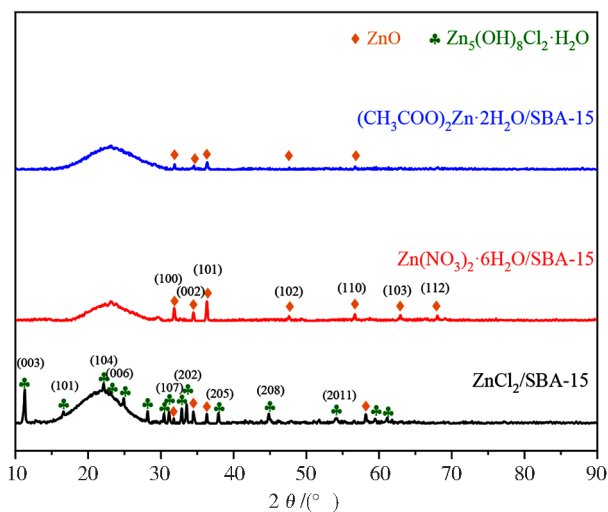


图1 不同锌前驱体 ZnO/SBA-15 填料的 XRD 分析  
Fig. 1 XRD analysis of ZnO/SBA-15 pigments with different zinc precursor

XRD 分析确定了  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  为前驱体得到的填料粉体结晶度更好且不含杂质相,进一步以  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  为前驱体与 SBA-15 进行不同质量比例混合得到 ZnO/SBA-15 填料,并进行 XRD 衍射分析,结果见图 2。

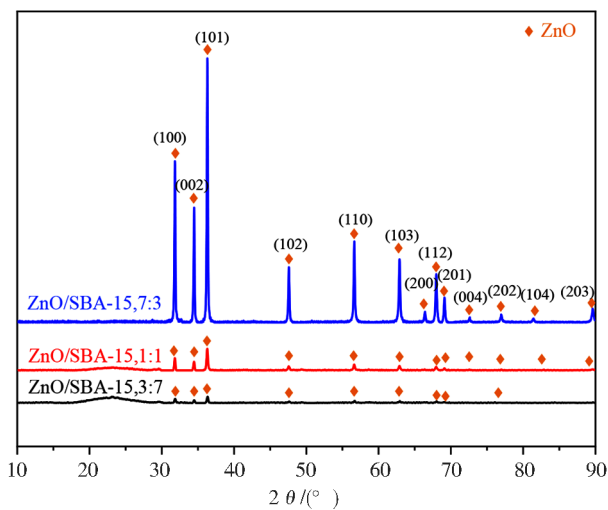


图2 不同比例 ZnO/SBA-15 填料的 XRD 分析  
Fig. 2 XRD analysis of ZnO/SBA-15 pigments with different proportions

结果显示不同混合比例的衍射曲线中都只含有 ZnO 的衍射峰,说明前驱体的添加量增大之后同样完全生成了 ZnO,且随着产物中 ZnO 占比的增大,ZnO 的衍射峰强度迅速增加,导致 SBA-15 的非晶衍射峰逐渐不明显。XRD 衍射中,ZnO 结晶度越高说明 ZnO 含量的越高,这也会导致填料整体的太阳光反射率更加易受 ZnO 性质的影响,使得填料的紫外反射率降低,在一定范围

内 ZnO 的低含量更有利于材料拥有更好的光反射能力。

采用比例  $m(ZnO):m(SBA-15)=3:7$  的 ZnO/SBA-15 粉体进行不同温度下的煅烧并对所得粉体进行 XRD 衍射分析,如图 3 所示。

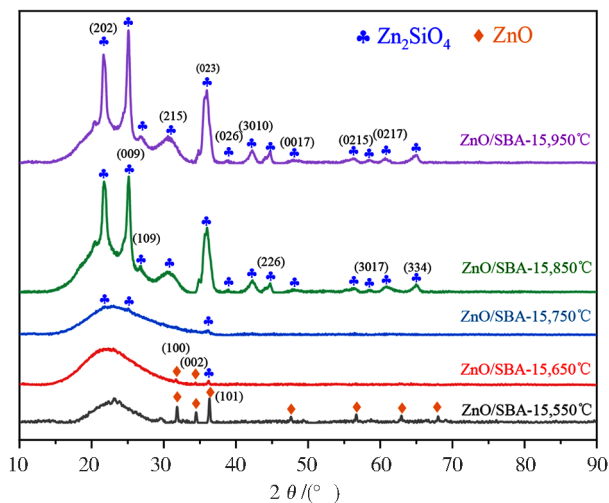


图3 不同煅烧温度 ZnO/SBA-15 填料的 XRD 分析  
Fig. 3 XRD analysis of ZnO/SBA-15 pigment with different calcination temperatures

从图中可以看到,550 °C 时产物组成为 ZnO 和 SBA-15;650 °C 时 ZnO 的衍射峰逐渐消失;750 °C 时出现了新相  $Zn_2SiO_4$ ,ZnO 的衍射峰完全消失;850 °C 时  $Zn_2SiO_4$  的衍射峰十分清晰;950 °C 时  $Zn_2SiO_4$  的衍射峰进一步增强。说明了煅烧温度的提升使 SBA-15 发生了化学相变,Si 元素和 Zn 元素结合生成了  $Zn_2SiO_4$ 。

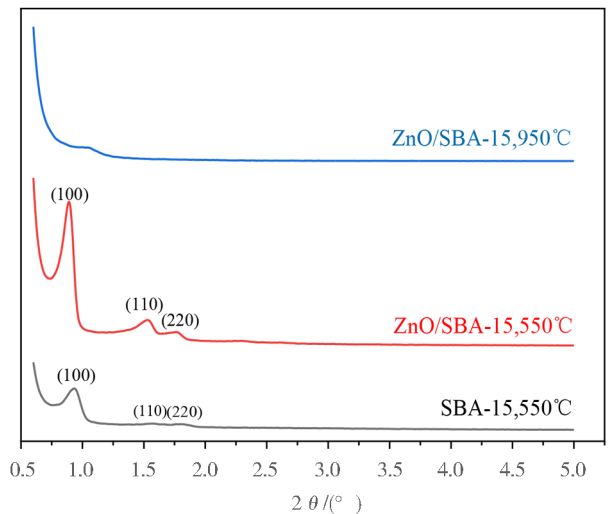
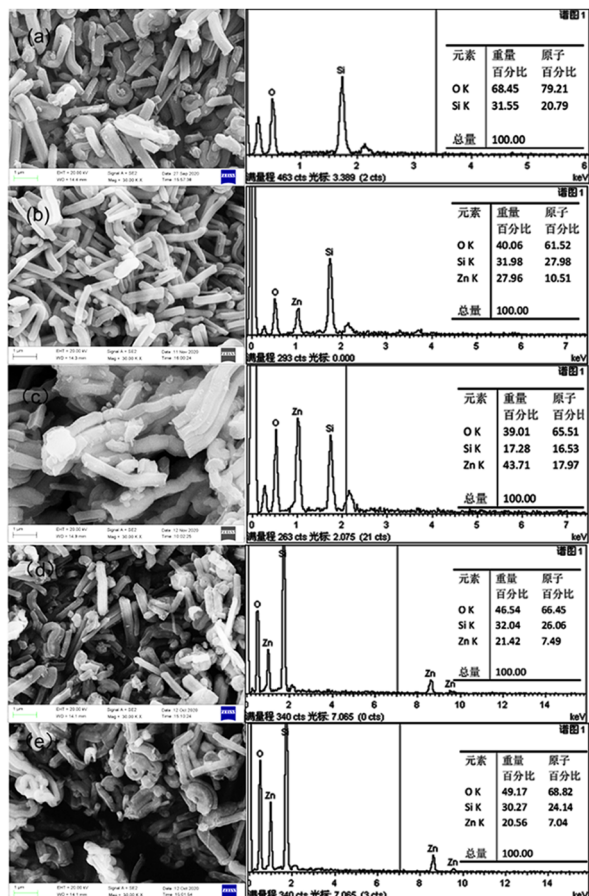


图4 不同比例和煅烧温度 ZnO/SBA-15 填料的 SAXD 分析  
Fig. 4 SAXD analysis of ZnO/SBA-15 pigments with different proportions and calcination temperatures

图 4 显示的不同比例及煅烧温度的 ZnO/SBA-15 填料的 SAXD 分析,从图中可以看出在 550 °C 纯 SBA-15 和混合比例  $m(ZnO):m(SBA-15)=3:7$  的 ZnO/SBA-15 两种粉体都可以观察到三个属于 SBA-15 结构中六方

孔道引起的衍射峰<sup>[15,26]</sup>,且混合 ZnO 后衍射峰并没有消失或减弱,说明 ZnO 晶粒并未完全填充在孔内。但同样混合比例的 ZnO/SBA-15 粉体在经过 950 °C 烧结后,所有衍射峰都消失了,结合 XRD 分析发现是过高的温度造成 SBA-15 和 ZnO 生成 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>后本身的化学结构发生改变导致内部孔道消失,结合 SEM 结果得知,外部微观形貌并未发生改变<sup>[15]</sup>。不同实验条件下 ZnO/SBA-15 复合填料和 SBA-15 的 SEM 及 EDS 结果如图 5 所示。



注:(a) SBA-15, 550 °C; (b)  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$ , 550 °C, 1 h; (c)  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=7:3$ , 550 °C, 1 h; (d)  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$ , 950 °C, 1 h; (e)  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$ , 950 °C, 5 h。

图 5 不同实验条件下 ZnO/SBA-15 填料的 SEM 及 EDS 结果

Fig. 5 SEM and EDS results of ZnO/SBA-15 pigments with different experimental conditions

从图中可以看出,混合少量 ZnO 的 ZnO/SBA-15 复合填料与 SBA-15 的微观形貌几乎一致,推测由于 ZnO 含量较小导致。而混合大量 ZnO 后,可以在微观形貌图中看到大量晶粒尺寸远小于 SBA-15 的颗粒聚集,应该是过量的 ZnO 沉积在 SBA-15 的表面,这一现象与 XRD 分析结果的中 ZnO 的衍射峰迅速增强相吻合。同时,提高煅烧温度和延长煅烧时间后 ZnO/SBA-15 复合填料的微观形貌无较大改变。能谱中显示的元素占比也很直观的表明粉体产物中 ZnO 的混合量一直满足实验预期设计,证明了通过前驱体获得 ZnO 颗粒可以精确控制混合量。

## 2.2 氧化锌前驱体种类对填料光学性能的影响

基于有机溶性选择了三种不同的 ZnO 前驱体用于实验研究,对不同 ZnO 前驱体制备的 ZnO/SBA-15 填料进行太阳吸收比测试,结果如图 6 所示。

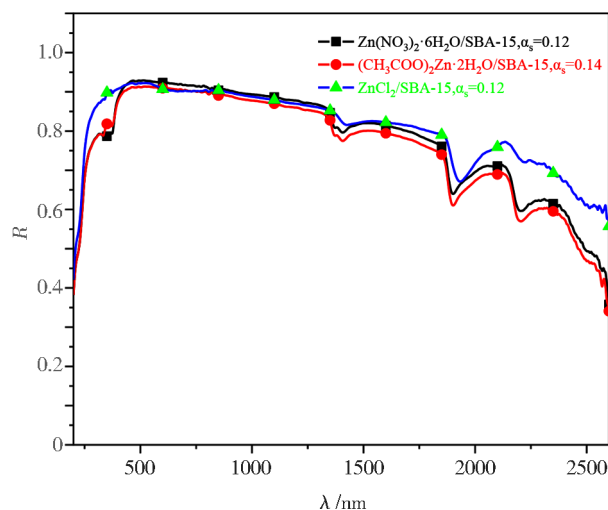


图 6 不同锌前驱体 ZnO/SBA-15 填料的太阳光谱反射率  
Fig. 6 Solar spectral reflectance of ZnO/SBA-15 pigments with different zinc precursor

从图谱中可以看出, ZnCl<sub>2</sub> 作为前驱体所得到的 ZnO/SBA-15 填料图谱在近紫外段有更高的反射能力,结合 XRD 分析得知,是由于 ZnCl<sub>2</sub> 没有完全变成 ZnO,导致粉体产物中 ZnO 的含量少于另外两种,这也导致此粉体产物在可见光波段的反射能力较弱。使用 (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn·2H<sub>2</sub>O 和 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 做前驱体得到的填料曲线高度一致,但 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 的曲线图谱整体高于 (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn·2H<sub>2</sub>O,此现象符合 XRD 分析得到的 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 制备 ZnO 的晶粒尺寸(81 nm)高于 (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn·2H<sub>2</sub>O 制备 ZnO 的晶粒尺寸(67 nm)这一结果,也符合文献[9]记载中,更大尺寸的 ZnO 晶粒拥有更低的初始太阳吸收比。

## 2.3 混合比例对填料光学性能的影响

图 7 为不同混合比例 ZnO/SBA-15 填料的太阳光反射图谱,从图中可以看到纯 SBA-15 能反射掉超过 90% 的近紫外光、在可见光和近红外波段的反射能力下降明显,并且由于 SBA-15 的结构中含有大量的羟基,导致在 1 300 nm 出现第一倍频吸收峰、1 900 nm 出现第二倍频吸收峰以及 2 200 nm 处出现的吸收峰<sup>[27]</sup>。而纯 ZnO 虽然可以反射超过 95% 的可见光和近红外光,但仅能反射 5% 的近紫外光。将 ZnO 与 SBA-15 设置不同比例均匀混合后,得到填料的光反射图谱。可以明显的看出随着 ZnO 比例的增大,近紫外的光反射能力下降,可见光和近红外光的反射能力增强。通过对光谱的积分计算得知,混合比例  $m(\text{ZnO}):m(\text{SBA-15})=3:7$  的 ZnO/SBA-15 填料太阳吸

收比为0.12,且能反射80%的近紫外光。

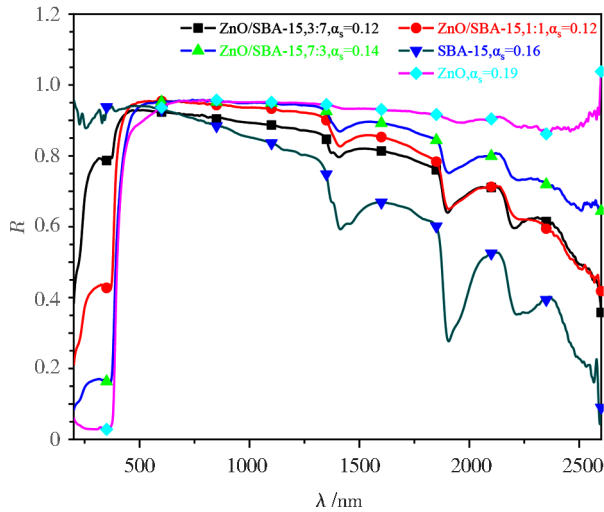


图7 不同比例ZnO/SBA-15填料的太阳光谱反射率

Fig. 7 Solar spectral reflectance of ZnO/SBA-15 pigments with different proportions

## 2.4 烧结温度对填料光学性能的影响

图8是以比例3:7所得的填料,经过不同的煅烧温度之后所测得的光反射图谱。

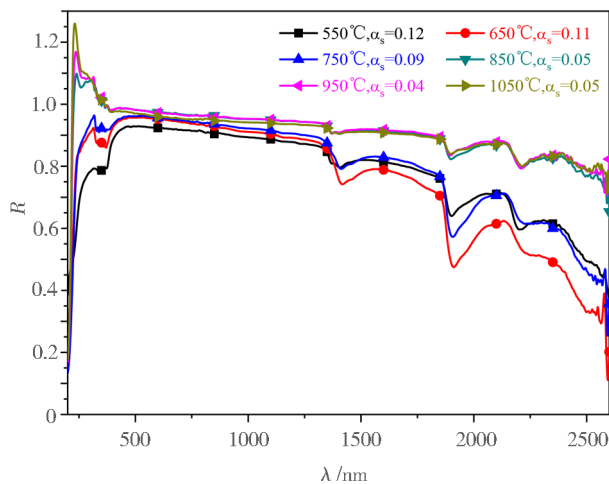


图8 不同煅烧温度的ZnO/SBA-15填料太阳光谱反射率

Fig. 8 Solar spectral reflectance of ZnO/SBA-15 pigments with different calcination temperature

可以看出,550~750 °C烧结的填料图谱变化趋势相同,从750~850 °C图谱变化趋势发生了重大改变,且1 300、1 900和2 200 nm处的三个由羟基引起的吸收峰大幅度减弱,是由于过高的烧结温度去除了SBA-15表面的羟基。结合SAXD和XRD的分析结果,推测是SBA-15原本的化学结构发生了变化跟氧化锌产生化学相变生成了 $Zn_2SiO_4$ ,同时又保留了自身的微观形貌结构,造成了填料紫外波段的高反射性能。同时从图谱中观察到850、950、1 050 °C煅烧所得填料的反射率在紫外波段超过1,这是由于测试设备在测试前统一采用聚四氟乙烯材质的涂层进行校正,而实验得到的填料粉体在

紫外波段对光的反射能力超过了校正样品,这说明了填料粉体拥有极高的反射紫外反射能力,但超过量程的测试数据同样在一定程度上存在失真的情况。

## 2.5 烧结时间对填料光学性能的影响

从图9可以看出,以950 °C的烧结温度,不同烧结时间下的ZnO/SBA-15填料的辐射特性曲线有差异。分析原因有二:其一是从固相烧结的原理来看,烧结时间的增加会导致晶粒的长大和粉体的致密化,进而影响粉体的光反射能力;其二是此煅烧温度下,反应物在1 h内未完全反应导致整体反射能力较弱。

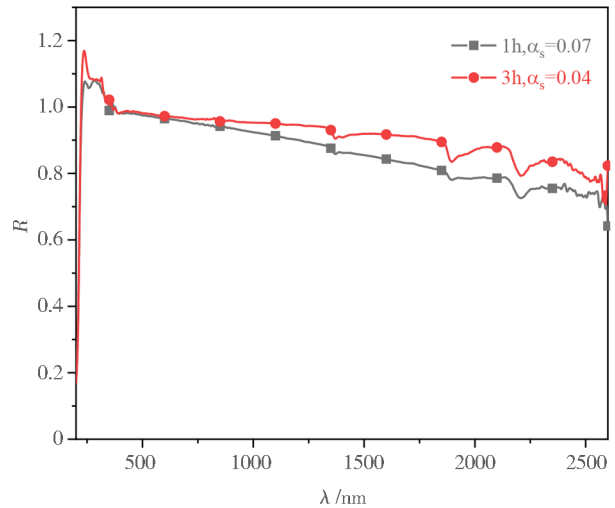


图9 不同煅烧时间的ZnO/SBA-15填料太阳光谱反射率

Fig. 9 Solar spectral reflectance of ZnO/SBA-15 pigments with different calcination time

## 2.6 ZnO/SBA-15无机涂层性能

将硝酸锌作为前驱体、比例为3:7、950 °C下烧结3 h得到的ZnO/SBA-15粉体作为填料,无机硅酸钾溶液作为黏结剂,制备无机热控涂层。经过热辐射性能测试,ZnO/SBA-15无机涂层的太阳吸收比为0.09,半球发射率为0.91。图10是ZnO/SBA-15无机涂层和采用

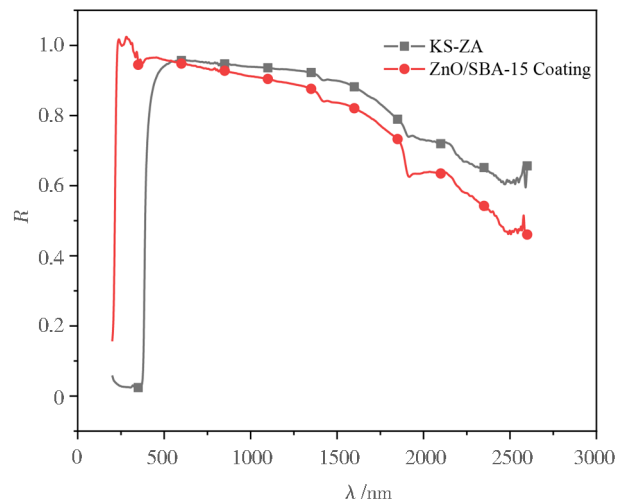


图10 不同无机热控涂层太阳光谱反射率曲线

Fig. 10 Spectral reflectance curve of different inorganic thermal control coating

ZnO为填料的KS-ZA无机涂层的太阳反射光谱对比。可以看出,ZnO/SBA-15无机涂层在紫外波段的反射率远高于KS-ZA无机涂层,反射率高于0.98,几乎可以反射所有的近紫外光,部分波段反射能力甚至高于标准测试样品,在可见光和近红外波段反射能力与ZnO/SBA-15填料相比有所下降,同时也弱于KS-ZA涂层。ZnO/SBA-15无机涂层光反射性能的变化来源于所用填料的性能,ZnO/SBA-15粉体与纯ZnO

相比,紫外反射能力极强,可见和近红外反射能力相对减弱。

涂层外观如图11(a)所示,涂层表面略粗糙,然后对涂层试片进行通过100次-196~200℃热循环试验后,涂层无脱落、无裂纹,如图11(b)所示。然后进行划格法测试,划格法测试后试样如图11(c)所示,测试结果与标准比对得出,涂层结合力等级为1级。

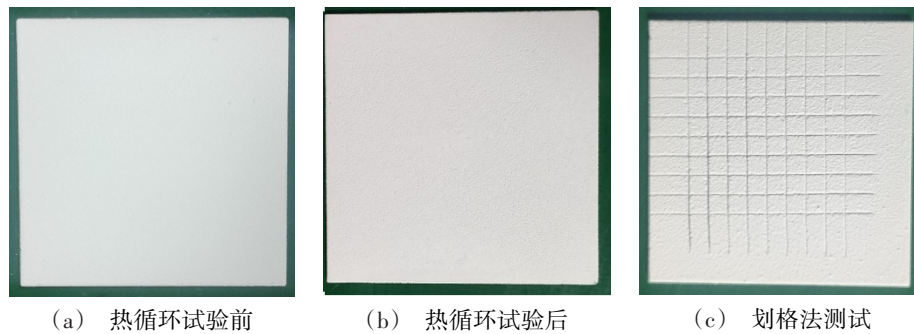


图11 涂层结合力测试

Fig. 11 Bonding test of ZnO/SBA-15 inorganic thermal control coating

### 3 结论

(1)实验针对原料以及ZnO占比对ZnO/SBA-15填料的光学性能影响展开了全面的分析讨论,确定了以 $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 作为前驱体,产物混合比例3:7的ZnO/SBA-15填料具有最均衡的光反射能力。

(2)通过针对煅烧温度和煅烧时间的综合讨论及分析,解释了ZnO/SBA-15填料光学性能进一步提高的原因是高温改变了SBA-15的化学结构,除去了产生吸收峰的羟基并发生化学相变生成 $Zn_2SiO_4$ ,并保留了微观形貌结构,得到了具有高紫外-可见-近红外反射能力的ZnO/SBA-15填料, $\alpha_s$ 稳定达到0.04。

(3)将ZnO/SBA-15填料配制为无机涂层,并进行性能测试发现,太阳吸收比为0.09,半球发射率为0.91,光学性能优异。涂层外观平整度较好,表面略粗糙,结合力等级为1级。经100次-196~100℃热循环实验后,涂层无脱落开裂现象。

#### 参考文献

[1] 范含林,范宇峰. 航天器热控系统对材料的需求分析[J]. 航天器环境工程,2010,27(2):130,135-138.

FAN Hanlin, FAN Yufeng. Analysis of material requirements for spacecraft thermal control system [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 130, 135-138.

[2] 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. Test of environmental degradation of thermal control white coating used for spacecraft thermal control system [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(1): 102-106.

for long-life manned spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(1): 102-106.

[3] 吴超,谢伟. “星链”计划未来发展分析[J]. 国际太空,2020(6):13-17.

WU Chao, XIE Wei. Analysis on the future development of “Starlink” project [J]. Space International, 2020(6): 13-17.

[4] 刘丁,于洋,米乐,等. 有机/无机杂化室温固化热控涂层的制备[J]. 无机材料学报,2018,33(8):914-918.

LIU Ding, YU Yang, MI Le, et al. Preparation of room temperature curable organic-inorganic hybrid thermal control coatings [J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(8): 914-918.

[5] 李瑜婧,刘刚,曹康丽,等. POSS改性卫星用白漆热控涂层的研究[J]. 涂料工业,2017,47(7):6-12.

LI Yujing, LIU Gang, CAO Kangli, et al. Research on POSS-modified thermal control white coating for satellite [J]. Paint & Coatings Industry, 2017, 47(7): 6-12.

[6] 邹洋,赵丽丽,游丽君,等.  $TiO_2$ 热控涂层激光辐照特性研究[J]. 表面技术,2019,48(6):189-194.

ZOU Yang, ZHAO Lili, YOU Lijun, et al. Laser irradiation characteristics of  $TiO_2$  thermal control coatings [J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 189-194.

[7] MEBREK A, ALLEG S, BENAYACHE S, et al. Preparation and characterization of spinel type  $Zn_2TiO_4$  nanocomposite [J]. Ceramics International, 2018, 44(9): 72-78.

[8] 张杭,贺光辉,张家强,等. 正钛酸锌无机热控涂层制备及其性能研究[J]. 表面技术,2018,47(9):81-85.

ZHANG Hang, HE Guanghui, ZHANG Jiaqiang, et al. Preparation and performance of inorganic thermal control coatings based on zinc orthotitanate [J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 81-85.

[9] JOHNSON J, CERBUS C, HAINES A, et al. Review of

improved thermal control coating development for NASA's SEE program [C]// 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2013.

[10] MIKHAILOV M M, NESHCHIMENKO V V, LI C, et al. Influence of proton irradiation on the photoluminescence spectra of zinc oxide modified by ZrO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>·Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopowders[J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(10):1671-1675.

[11] HEYDARIV, BAHREINI Z. Synthesis of silica-supported ZnO pigments for thermal control coatings and analysis of their reflection model[J]. Journal of Coatings Technology & Research, 2017, 15(1):223-230.

[12] LI C, LIANG Z, XIAO H, et al. Synthesis of ZnO/Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> composite pigments with enhanced reflectance and radiation-stability under low-energy proton irradiation [J]. Materials Letters, 2010, 64(18):1972-1974.

[13] CYRIL P, JEAN C M, MANAYIL J C, et al. Sol-gel synthesis of SBA-15: Impact of HCl on surface chemistry [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2018, 271:196-202.

[14] ANN M, CVIZ B, AGV M. Synthesis of ceria nanoparticles in pores of SBA-15: Pore size effect and influence of citric acid addition [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2019, 277:10-16.

[15] ZOU C, SHA G, HUANG Y, et al. Incorporation of Al<sup>3+</sup> ions to promote the stabilization effect of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> treatment on the hydrothermal stability of mesoporous SBA-15 zeolite [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2015, 36(7):1001-1008.

[16] KIOMARSIPOUR N, RAZAVI R S, GHANI K. Improvement of spacecraft white thermal control coatings using the new synthesized Zn-MCM-41 pigment[J]. Dyes & Pigments, 2013, 96(2):403-406.

[17] HEYDARI V, BAHREINI Z, HEIDARI M, et al. Synthesis of Zn-SBA-15 as a new pigment for spacecraft white thermal control coatings [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2016, 13(4):727-33.

[18] 孙辉, 王君, 范德松. 高紫外反射型颜料与热控涂层的制备与性能研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(06):1-6.

SUN Hui, WANG Jun, FAN Desong. Preparation and performance study of highly ultraviolet reflective pigments and thermal control coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2019, 49(6):1-6.

[19] BERA B, DAS N. Synthesis of high surface area

mesoporous silica SBA-15 for hydrogen storage application [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2019, 16(1):294-303.

[20] 吴南, 沈继军, 周志彬. 棒状SBA-15的制备与调控 [J]. 材料与冶金学报, 2019, 18(4):293-299.

WU Nan, SHEN Jijun, ZHOU Zhibin. Review on typical preparations of SBA-15 rods [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2019, 18(4):293-299.

[21] EI-NAHHAL I M, SALEM J K, TABASH N S, et al. Synthesis and structural characterization of ZnO-and CuO-NPs supported mesoporous silica materials (hexagonal SBA-15 and lamellar-SiO<sub>2</sub>) [J]. Chemical Physics Letters, 2018, 691:211-218.

[22] SOUSA W R D N, OLIVEIRA A R, CRUZ F J F, et al. Ciprofloxacin adsorption on ZnO supported on SBA-15 [J]. Water Air & Soil Pollution, 2018, 229(4):125.1-125.12.

[23] EI-NAHHAL I M, SALEM J K, SELMANE M, et al. Synthesis and structural characterization of ZnO and CuO nanoparticles supported mesoporous silica SBA-15 [J]. Chemical Physics Letters, 2017: S0009261416309447.

[24] SEN S K, BARMAN U C, MANIR M S, et al. X-ray peak profile analysis of pure and dy-doped  $\alpha$ -MoO<sub>3</sub> nanobelts using debye-scherrer, Williamson-Hall and Halder-Wagner methods [J]. Advances in Natural Ence: Nanoence and, Nanotechnology, 2020, 11(2):025004.

[25] 林敏, 纳薇, 叶海船, 等. 不同助剂对CuO-ZnO/SBA-15催化CO<sub>2</sub>加氢制甲醇性能影响的研究 [J]. 燃料化学学报, 2019, 47(10):1214-1225.

LIN Min, NA Wei, YE Haichuan, et al. Effects of additive on CuO-ZnO/SBA-15 catalytic performance of CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2019, 47(10):1214-1225.

[26] ZHAO Y, LI S, WANG Z, et al. New ZnCe catalyst encapsulated in SBA-15 in the production of 1,3-butadiene from ethanol [J]. Chinese Chemical Letters, 2020, 31(2):535-538.

[27] 王楠, 马承伟, 赵淑梅, 等. 日光温室常用透光覆盖材料辐射透过性能测试研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2013(5):531-535.

WANG Nan, MA Chengwei, ZHAO Shumei, et al. Measurement of transmissivity of solar greenhouse covering materials [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013(5):531-535.