

# 纳米晶复合涂层应用于火星玻璃盖片防尘的探索

徐阳<sup>1</sup>, 齐振一<sup>1</sup>, 王志浩<sup>2</sup>, 田东波<sup>2</sup>

(1.中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899; 2.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** **目的** 制备超微结构的纳米晶复合涂层, 降低火星环境中灰尘颗粒在玻璃表面的粘附, 并通过翻转操作, 最大限度地清除沉积的灰尘, 恢复太阳能电池的发电能力。**方法** 采用水热法和表面修饰, 制备了纳米晶复合防尘涂层。通过电子显微镜、分光光度计、接触角仪和翻转除尘试验分别对涂层的微观结构、可见-近红外光透过率、表面性质和除尘效率进行了分析。**结果** 由直径大约为 27 nm 的 ZnO 纳米棒构成的独特涂层结构, 使灰尘颗粒与涂层表面的接触面积相比于普通玻璃减小了一个数量级, 可见光区的透过率提高了 1.1%, 近红外区透过率提高了 0.4%。用氟化物进行表面修饰后, 涂层的水接触角由 25°~45°升高至 155°~165°。经 90°缓慢翻转, 纳米晶复合涂层对 50~100 μm 和 30~50 μm 灰尘颗粒的清除效率分别为 80%~90% 和 60%~70%; 而在相同测试条件下, 普通玻璃的防尘效率仅为 37.5% 和 6.3%。由翻转后涂层表面灰尘的分布情况和倾斜表面上单颗粒的受力分析发现, 灰尘颗粒的脱落存在滑落和滚落两种模式, 高位落下的颗粒将部分动能传递给低位静止的颗粒, 促使更多静止颗粒的滑落或滚落, 形成“雪崩”状的特殊形貌。**结论** ZnO 纳米晶复合涂层不仅可以提高可见光和近红外光的透过率, 还可以极大地减小与灰尘颗粒的接触面积, 降低颗粒的粘附力, 在不使用高压电能的情况下, 经过翻转操作, 清除效率可达 80% 以上, 这将为火星上灰尘的清除提供一种安全的方式。

**关键词:** 纳米晶; 复合涂层; 接触面积; 增透; 超疏水; 粘附力; 除尘效率

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0167-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.025

## Exploration for Nano-crystalline Composite Coatings in Dust-proof of Cover Glasses on Mars

XU Yang<sup>1</sup>, QI Zhen-yi<sup>1</sup>, WANG Zhi-hao<sup>2</sup>, TIAN Dong-bo<sup>2</sup>

(1.Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China;

2.Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare ultrastructure nano-crystalline composite coatings to decrease the dust adhesion on cover glasses and recover the power supply of solar cells by cleaning the deposited dust furthest through a flipping operation in Mars environment. The nano-structured dust proof coatings were fabricated by aqueous chemical growth method with three different reaction times and surface modification procedure. The microstructure, visible- near-infrared light transmittance, surface properties and dust removal efficiency of coatings were analyzed by electron microscope, spectrophotometer, contact angle me-

收稿日期: 2018-09-29; 修订日期: 2018-12-24

Received: 2018-09-29; Revised: 2018-12-24

作者简介: 徐阳 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为特种涂层制备。

**Biography:** XU Yang (1988—), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: special coating.

通讯作者: 齐振一 (1967—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为材料表面改性、晶体生长。邮箱: qzy@mail.sic.ac.cn

**Corresponding author:** QI Zhen-yi (1967—), Male, Master, Professorate senior engineer, Research focus: material surface modification, crystal growth. E-mail: qzy@mail.sic.ac.cn

ter and flipping dust removal test. The unique coating structure formed by ZnO nanorods with  $\sim 27$  nm made the contact area of dust grains with the composite coating dramatically decrease by one magnitude, compared to bare glass. The transmittance increased by 1.1% in visible region and 0.4% in near IR region. The water contact angle changed from  $25^\circ\sim 45^\circ$  to  $155^\circ\sim 165^\circ$  after surface modification by fluorochemicals. Through a slow flipping for 90 degrees, pre-deposited dust on the nano-crystalline composite coatings was cleaned by 80%~90% for grains of 50~100  $\mu\text{m}$  diameters and by 60%~70% for the ones of 30~50  $\mu\text{m}$ . At the same test condition, the dust proof efficiencies of bare glass were only 37.5% and 6.3%. From the dust distributions on the flipped samples and the force diagram of an individual particle on a tilted plane further, the particle falling included two basic modes of slipping and rolling, and the kinetic energy of a falling particle transferred to one or more static particles at the lower position resulting in an “avalanche” morphology. ZnO nano-crystalline composite coatings can not only improve the transmittance of visible light and near infrared light, but also greatly reduce the contact area with dust particles and reduce the adhesion of particles. Under the condition of not using high-voltage electrical energy, the removal efficiency can reach more than 80% through flipping operation, which will provide a safe way for removing dust on Mars.

**KEY WORDS:** nano-crystalline; composite coating; contact area; anti-reflection; super-hydrophobic; adhesion force; efficiency of dust cleaning

火星大气中悬浮的大量尘埃与太阳辐射、热辐射相互作用,直接关系着火星低层大气的环境变化<sup>[1]</sup>。季节性的剧烈火星风暴使整个火星弥漫着红色的尘埃,因此火星也被称为“红色星球”<sup>[2]</sup>。弥散在空中的大量尘埃可使火星表面接收到的阳光能量下降到正常情况的  $1/3$ <sup>[3]</sup>。火星尘埃通过范德华力和静电力积聚在太阳能电池表面<sup>[4]</sup>,降低太阳光的透过率,使其输出功率下降,甚至由于灰尘的粘附,使太阳能电池的热物理性能变化,导致电池温度升高和性能降低。火星尘埃曾经使开拓者(Mars pathfinder)的太阳翼转换效率下降约 0.28%/火星日,“勇气”号和“机遇”号火星车的电力供应更是下降了 63%和 82%<sup>[5]</sup>。

太阳能电池发电能力的丧失,将直接导致火星地面探测任务的终止。因此,如何有效去除太阳能电池表面沉积的尘埃,保障着陆器能源供给的问题备受关注。美国 NASA 在自然除尘<sup>[6-7]</sup>、机械振动除尘、电帘除尘<sup>[8-9]</sup>和莲叶效应除尘方面展开了细致的研究<sup>[10]</sup>。其中,国内外学者研究最多的是电帘除尘技术,其原理是利用电帘结构产生的行波进行无接触式搬运尘埃颗粒,具有结构简单、除尘效率高的特点<sup>[11-12]</sup>。即便如此,电帘技术的应用仍存在诸多问题,例如,透明电极的透光率只有 80%~90%,造成了光能量一定的损失<sup>[13]</sup>;而且电帘工作电压较高(几百至上千伏),火星大气环境中极易发生低气压放电等危及探测器的隐患<sup>[14]</sup>。本文选择高透明的 ZnO 纳米晶,通过在玻璃表面构建特殊结构的复合涂层,不仅增加了玻璃盖片的透光率,还降低了灰尘颗粒与表面的范德华力,利用重力和风力即可达到清除玻璃表面灰尘颗粒的效果。此除尘技术不需要使用电力,从根本上避免了低气压放电现象的发生,确保了电力系统的安全性,可为火星用除尘技术的开发提供借鉴和支持。

## 1 试验

### 1.1 涂层制备

玻璃表面氧化锌纳米晶复合防尘涂层的制备主要包括四个步骤:1)玻璃表面预处理;2)ZnO 前驱体制备;3)ZnO 纳米晶原位生长;4)疏水修饰。玻璃片经一次酸洗、一次碱洗、三次水洗辅助超声,完成表面的清洁。ZnO 前驱体的制备和 ZnO 纳米晶的生长可参考文献[15-18]。纳米晶的结构形貌可由反应物比例、反应温度和生长时间控制。本文选择摩尔比为 2:1 的  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  与六次甲基四胺,在  $80^\circ\text{C}$ 、不同时间条件下反应,在玻璃表面制备一系列 ZnO 纳米晶。在 ZnO 纳米晶表面喷涂 5%的硅氧烷乙醇溶液,最后在  $130^\circ\text{C}$  鼓风烘箱中干燥 30~40 min,得到具有纳米晶复合涂层的玻璃片。

### 1.2 性能测试

采用 Zeiss Supra 55 扫描电镜观察涂层微观形貌,并测量相关结构尺寸。采用 Perkin Elmer 公司的 Lambda 950 型分光光度计,测定涂层的透光率。采用德国克吕士的 DSA25E 型接触角仪测量涂层的表面润湿性能。

灰尘去除效率的评价选用 30~50  $\mu\text{m}$  和 50~100  $\mu\text{m}$  两种粒径范围的火星模拟尘埃,将制备有涂层的玻璃片贴合在太阳能电池表面作为测试样品,用太阳模拟器 and 万用表测量其初始开路电压  $V_0$ ;然后将电池样品固定于水平的翻转台上,在其表面均匀散布干燥灰尘至开路电压  $V_1$  为  $0.6V_0$ ,以  $1^\circ/\text{s}$  的速度缓慢翻转样品台至  $90^\circ$  位置,记录翻转过程中灰尘开始滑落的倾斜角;最后缓慢恢复水平状态,测试翻转后电池的开路电压  $V_2$ ,记录最终样品表面尘埃的分布情

况。防尘效率  $\eta=(V_2-V_1)/(V_0-V_1)=2.5(V_1-0.6V_0)/V_0$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 防尘涂层的微观结构

不同时间、80 °C 条件下生长的涂层的表面形貌如图 1 所示。棒状 ZnO 纳米晶以一定的倾角杂乱无章地生长在玻璃基底之上<sup>[19-20]</sup>。随着反应时间由 30 min 增加到 35 min 和 40 min, 纳米晶的直径保持在 27 nm 左右, 长度大约由 90 nm 增加到 110 nm 和

120 nm。这是因为水热法制备的 ZnO 纳米晶沿 c 轴方向择优取向, 所以长度方向生长很快, 而短时间内侧向变化不大。

根据图 1 的放大图统计, 400 nm×400 nm 范围内大约有 60 根棒状 ZnO 纳米晶, 将 ZnO 纳米棒等效为圆柱, 并假设圆柱上表面完全与灰尘颗粒接触, 则有效接触面积为 34353 nm<sup>2</sup>, 占正方形统计范围的 21.5%。考虑到 ZnO 纳米棒高度参差不齐, 上端面并不是完全与灰尘颗粒接触, 因此实际的有效接触面积之比将更低。

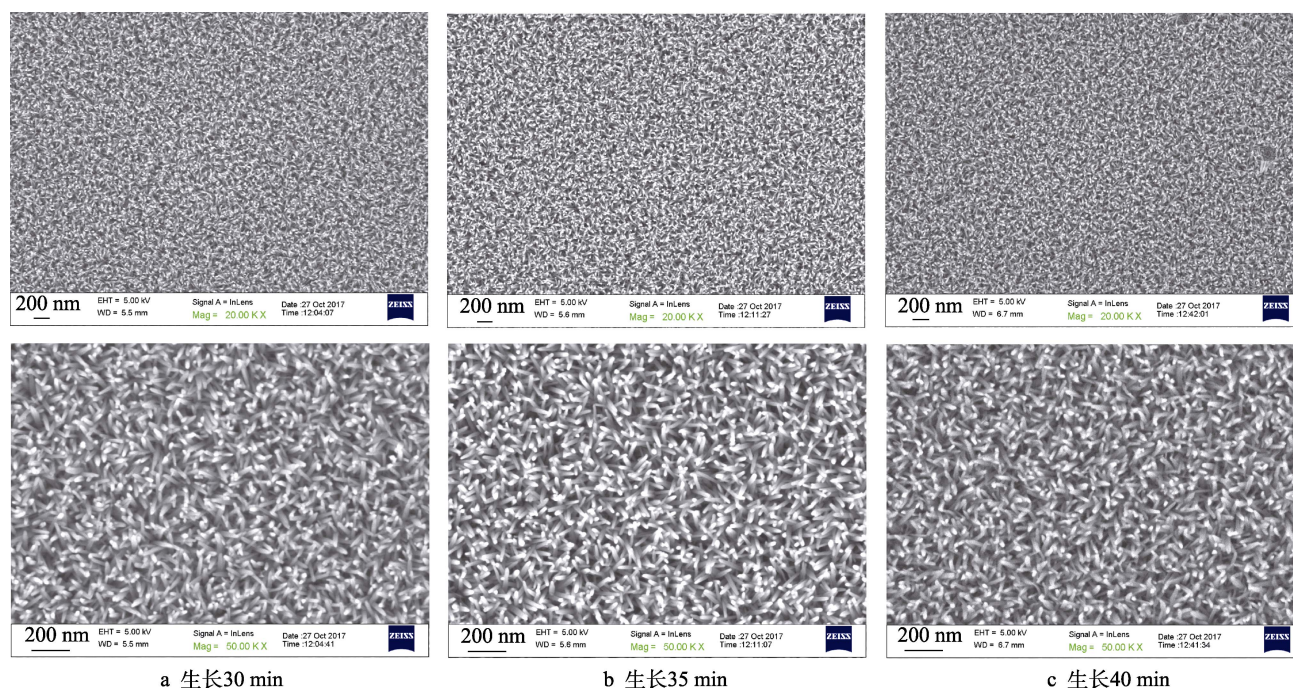


图 1 不同生长时间的涂层表面形貌

Fig.1 SEM of coatings for different growth times: a) 30 min; b) 35 min; c) 40min

### 2.2 纳米晶复合涂层对玻璃片透光率的影响

不断累积的灰尘遮挡阳光, 使太阳能电池的发电功率严重降低。玻璃片外表面防尘涂层的制备应以不影响玻璃片透光率为前提。如图 2 所示, 相比于空白玻璃片, 制备有纳米晶复合涂层的玻璃片的透过率在可见光区提升明显, 在近红外区的透过率也有一定的提高。仔细观察发现, 空白样和涂层样在 380 nm 波长的透过率, 均高于 90%, 且随着波长的增加, 透过率均呈上升趋势。不同的是, 空白样的透过率在可见光区缓慢增大, 进入近红外区 (780~1100 nm) 后趋于平缓, 稳定在 92% 左右; 而涂层样的透过率在 380~430 nm 区间急剧增大, 之后呈现非常缓慢的降低趋势, 最终稳定在 92.5% 左右。

在三个涂层样品中, 2 号样透过率最高, 1 号样次之, 3 号样最低。可见在 80 °C 反应条件下, 反应 35 min 得到的涂层样品增透最高。由计算结果 (表 1) 可知, 玻璃表面制备防尘涂层后, 其透过率在可见光

区提高了 1.1%, 在近红外区提高了 0.4%。本文制备的纳米晶复合涂层在赋予防尘功能的同时, 还有增透效果, 有助于太阳能电池接收更多的光线, 提高其发电量。

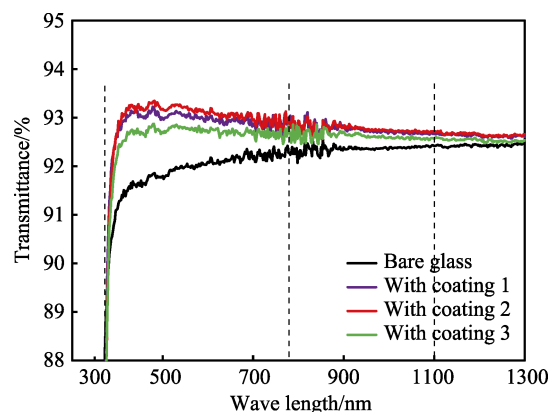


图 2 空白玻璃和涂层样品的透过率曲线比较

Fig.2 Transmittance curves of bare glass and coating samples



表 1 制备纳米晶复合涂层后玻璃片在可见和近红外区的透过率增量

Tab.1 Improvements of transmittance in visible and near IR region for coated glasses

Samples	Visible region	Near infrared region
Glass with Coating 1	1.01	0.39
Glass with Coating 2	1.12	0.41
Glass with Coating 3	0.73	0.26

## 2.3 纳米晶涂层的表面润湿性

原位反应生长的纳米晶涂层呈现亲水性,水滴滴在涂层表面,逐渐浸润扩展,接触角不断减小,达到平衡后,水接触角稳定在  $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。为了降低涂层表面能,采用含氟硅氧烷进行修饰。如图 3 所示,修饰后的纳米晶复合涂层转变为超疏水状态,水接触角为  $150^{\circ}\sim 170^{\circ}$ ;随着观察时间的延长,接触角表现得非常稳定 ( $\pm 1^{\circ}$ ),这将进一步降低灰尘颗粒在涂层表面的附着力。

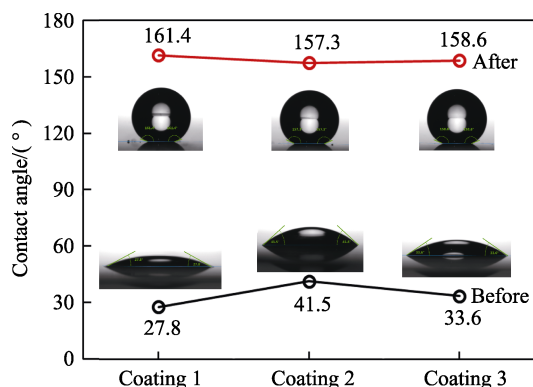


图 3 表面修饰前后纳米晶涂层的水接触角变化

Fig.3 Water contact angle changes of nano-crystalline coatings before and after surface modification

## 2.4 纳米晶复合涂层的防尘效果

由翻转除尘试验结果(见表 2)显示,  $50\sim 100\ \mu\text{m}$  的大颗粒灰尘与空白玻璃片表面之间存在较强的粘附力。当翻转达到  $81.3^{\circ}$  时,才有少量灰尘滑落;翻转至  $90^{\circ}$  时,防尘效率仅为 37.5%。而本文制备的三种涂层样品在翻转约  $50^{\circ}$  时,就有大量灰尘开始滑落,最终的防尘效率在 80%~90%。说明稀疏的纳米结构能极大地减少灰尘与样品表面的有效接触面积,降低它们之间的粘附力,灰尘在重力作用下更容易从表面脱落。在使用  $30\sim 50\ \mu\text{m}$  的小颗粒灰尘进行翻转的试验中发现,空白玻璃表面的灰尘没有明显的滑落,防尘效率只有 6.3%。本文制备的防尘涂层样品在翻转约  $65^{\circ}$  时,灰尘开始滑落,防尘效率达到 60%~70%。这同样证明了减少有效接触面积能降低灰尘在表面的粘附。

表 2 空白玻璃片和纳米晶复合涂层的防尘效率

Tab.2 Dustproof efficiencies of bare glass and nano-crystalline composite coatings

Grain	Sample	$V_{OC}$ without dust ( $V_0$ )/V	Slide Angle/ $(^{\circ})$	$V_{OC}$ after flipping ( $V_2$ )/V	Dustproof Efficiency ( $\eta$ )/%
50~100 $\mu\text{m}$	Bare Glass	0.24	81.3	0.18	37.5
	with Coating 1	0.25	51.7	0.23	80.0
	with Coating 2	0.26	48.6	0.25	90.4
	with Coating 3	0.26	49.4	0.24	80.8
30~50 $\mu\text{m}$	Bare Glass	0.24		0.15	6.3
	with Coating 1	0.25	64.6	0.22	70.0
	with Coating 2	0.26	65.5	0.23	71.2
	with Coating 3	0.26	65.2	0.22	61.5

进一步对比两种粒径灰尘在玻璃和涂层表面的滑落情况不难发现:灰尘的颗粒越小,同一表面表现出的防尘效率越低,空白玻璃的防尘效率由 37.5%降至 6.3%,纳米晶复合涂层的防尘效率由 80%~90%降至 60%~70%。此外,颗粒越小,灰尘开始滑动所需的倾斜角就越大,  $30\sim 50\ \mu\text{m}$  的灰尘在空白玻璃上无明显滑落,纳米晶复合涂层上的滑落角由  $50^{\circ}$  增大到  $65^{\circ}$ 。

对单个灰尘颗粒作如图 4 所示的受力分析:在静止环境、不带静电的情况下,灰尘颗粒主要受重力  $G$ 、粘附力  $\eta$ 、静摩擦力  $F_r$  和支撑力  $F_b$  的作用。重力  $G$  可分解为法向力  $G'$  和切向力  $G''$ 。当  $G'' > F_{r,\max}$  时,颗粒将向下滑动。以  $O$  点为支点,当  $G''$  产生的力矩大于  $G' + \eta$  的力矩时,颗粒将绕  $O$  点向下滚动。因为  $G \propto R^3$ 、 $\eta \propto R^2$ 、 $F_r \propto R^2$ 、 $G' = G \cos \theta$ 、 $G'' = G \sin \theta$ ,所以粒径  $R$  和倾斜角  $\theta$  越大,越有利于颗粒的滑落或者滚落;颗粒长径比接近 1 或者越接近球形,则越容易滚落。小粒径的灰尘不容易滑落或者滚落,这就需要增大倾斜角  $\theta$  来逾越滑动或滚动的临界点。

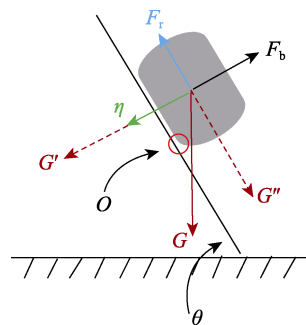
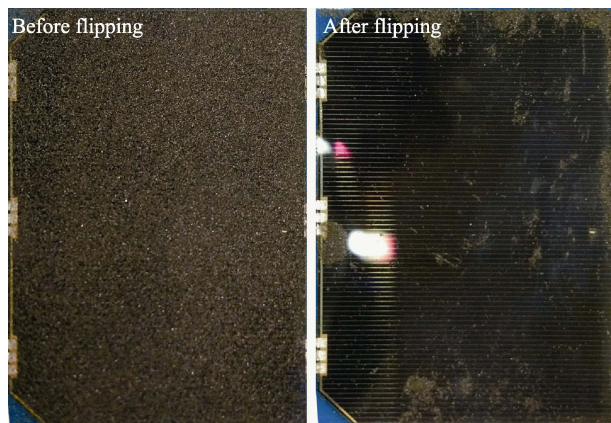


图 4 倾斜表面上颗粒物的受力分析

Fig.4 Force diagram of the particle on a tilted plane

如图 5 所示,防尘涂层表面  $50\sim 100\ \mu\text{m}$  的大颗粒灰尘在  $90^{\circ}$  翻转后,几乎全部掉落;而  $30\sim 50\ \mu\text{m}$  的小颗粒灰尘在翻转过程中呈现出“雪崩”的形态,最终残留的灰尘全部位于上部区域,边缘呈锯齿状,而下部区域几乎没有灰尘残留。显然,这是由于从上部

掉落的颗粒与下部的颗粒发生了摩擦或碰撞, 为下部颗粒发生滑动和滚动提供了初始动能造成的。鉴于此, 当涂层表面积累的灰尘较多时, 采取翻转操作去除表面灰尘的效率更高。



a 50~100  $\mu\text{m}$  的灰尘



b 30~50  $\mu\text{m}$  的灰尘

图 5 翻转前后不同粒径的灰尘在纳米晶复合涂层表面的分布

Fig.5 Photographs of dust with different particle sizes on nano-crystalline composite coatings before and after flipping: a) 50~100  $\mu\text{m}$ ; b) 30~50  $\mu\text{m}$

### 3 结论

1) 纳米晶复合涂层的超微结构使灰尘与表面的实际接触面积减小了一个数量级, 极大程度地降低了灰尘在涂层表面的粘附力。

2) 80  $^{\circ}\text{C}$  下生长 35 min 制备的纳米晶涂层的纳米结构对玻璃基底具有一定的增透作用(可见光区透过率提高 1.1%, 近红外区提高 0.4%), 可使太阳能电池接收更多的光线, 提高其发电功率。

3) 亲水的纳米晶涂层经氟表面修饰后, 表现出超疏水特性, 水接触角由 25 $^{\circ}$ ~45 $^{\circ}$ 升高至 155 $^{\circ}$ ~165 $^{\circ}$ , 涂层表面能的降低可进一步降低灰尘在其表面的粘附力。

4) 翻转除尘试验表明, 纳米晶复合涂层对 50~100  $\mu\text{m}$  灰尘颗粒的清除率为 80%~90%, 对 30~50  $\mu\text{m}$

灰尘的清除率为 60%~70%。灰尘颗粒越大, 防尘效率越高, 初始滑落角越小。上层滑落的灰尘对下层静止的灰尘有冲刷作用。因此涂层表面积累的灰尘越多, 翻转除尘的效率就越高。

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS B S. Dust mitigation for martian exploration [J]. NASA usrp-intership final report, 2011(0014552): 1-7.
- [2] 杨瑞琰, 闫霏霏, 黄定华, 等. 火星大气环流模型研究进展[J]. 地质科技情报, 2008(1): 31-34.  
YANG Rui-yan, YAN Fei-fei, HUANG Ding-hua, et al. Evolvement of mars atmospheric circulation model[J]. Geological science and technology information, 2008(1): 31-34.
- [3] RICHARD P, THOMAS K. Mars surface solar arrays: Part 2 power performance[C]// Future in-space operations (FISO) working group. Cleveland, OH: NASA, 2017: 1-43.
- [4] LANDIS G A. Mars dust removal technology[C]// The thirty-second intersociety energy conversion engineering conference. Honolulu: IECEC, 1997: 764-767.
- [5] STELLA P M, HERMAN J A. The mars surface environment and solar array performance[C]// 35<sup>th</sup> IEEE photovoltaic specialists conference. Honolulu: IEEE, 2010: 2631-2635.
- [6] GAIER J R, PERAZ-DAVIS M E, RUTLEDGE S K, et al. Aeolian removal of dust from radiator surfaces on Mars[J]. NASA technical memorandum, 1990(103205): 1-13.
- [7] GAIER J R, PERAZDAVIS M E, MARABITO M. Aeolian removal of dust types from photovoltaic surfaces on mars[J]. NASA technical memorandum, 1990(102507): 1-17.
- [8] JOHANSEN M R, MACKEY P J, HOGUE M D, et al. History and flight development of the electrodynamic dust shield[C]// AIAA SPACE 2015 conference and exposition. Pasadena: AIAA, 2015: 4446.
- [9] ASHPIS D E. Dust removal from solar cells: United States, US9123845B2[P]. 2015-09-01.
- [10] 袁亚飞, 刘民, 杨亦强. 火星太阳能电池翼除尘方法综述[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(5): 604-606.  
YUAN Ya-fei, LIU Min, YANG Yi-qiang. Dust removal techniques for mars solar arrays[J]. Spacecraft environment engineering, 2010, 27(5): 604-606.
- [11] 袁亚飞, 刘民, 柏向春. 电帘除尘技术的研究现状[J]. 航天器工程, 2010, 19(5): 89-94.  
YUAN Ya-fei, LIU Min, BO Xiang-chun. Research of electrode screen as dust mitigation technology[J]. Spacecraft engineering, 2010, 19(5): 89-94.

(下转第 224 页)

- 组织结构及电化学性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 96-99.
- SU Xin, XING Lu-kuo, CHENG Xu-dong, et al. Effects of heat treatment on microstructure and electrochemical performance of cold sprayed Zn-Ni coating[J]. Heat treatment of metals, 2015, 40(3): 96-99.
- [17] TAO Y S, XIONG T Y, SUN C, et al. Effect of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the properties of cold sprayed Al/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings on AZ91D magnesium alloy[J]. Applied surface science, 2009, 256(1): 261-266.
- [18] 马颖, 任峻, 陈体军, 等. AZ91D 镁合金的摩擦磨损行为及其机理探讨[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(1): 33-36.
- MA Ying, REN Jun, CHEN Ti-jun, et al. Inquiry of friction and wear behavior and mechanism of AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(1): 33-36.
- [19] 刘彦学, 袁晓光, 吕楠, 等. 镁合金表面锌铝合金冷喷涂层的磨损行为[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(4): 385-388.
- LIU Yan-xue, YUAN Xiao-guang, LYU Nan, et al. Wear behavior of cold spray Zn-Al alloy coating on magnesium alloy[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2005, 27(4): 385-388.
- [20] 李凌杰, 于生海, 雷惊雷, 等. AZ31 和 AZ61 镁合金在模拟海水中的腐蚀电化学行为[J]. 电化学, 2008, 14(1): 95-99.
- LI Ling-jie, YU Sheng-hai, LEI Jing-lei, et al. Corrosion electrochemical behavior of AZ31 and AZ61 magnesium alloys in simulated sea water[J]. Electrochemistry, 2008, 14(1): 95-99.
- [21] SONG D, MA A B, JIANG J H, et al. Corrosion behavior of equal-channel-angular-pressed pure magnesium in NaCl aqueous solution[J]. Corrosion science, 2010, 52(2): 481-490.
- [22] 孔纲, 卢锦堂, 车淳山, 等. 热镀锌钢白锈产生原因分析及预防[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(10): 450-452.
- KONG Gang, LU Jin-tang, CHE Chun-shan, et al. Analyses of formation of white rust on hot-dip galvanized steel and relevant counter measures[J]. Corrosion & protection, 2005, 26(10): 450-452.
- [23] 郑裙, 王树林, 侯臣, 等. 超声化学法合成 Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O 以及高温转化 ZnO 和光催化性能研究[J]. 功能材料, 2015, 46(7): 7138-7142.
- ZHENG Jun, WANG Shu-lin, HOU Chen, et al. Sonochemical fabrication of Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>Cl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O and its conversion into ZnO, photocatalytic performance[J]. Journal of functional materials, 2015, 46(7): 7138-7142.

(上接第 171 页)

- [12] ASHPIS D E. Dust removal from solar cells: United States, US007999173B1[P]. 2011-08-16.
- [13] 史济群, 周京英, 马稚尧, 等. 电子束法沉积 ITO 透明导电膜的研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 10-12.
- SHI Ji-qun, ZHOU Jing-ying, MA Zhi-yao, et al. A study on transparent & electrically conducting film (ito) deposited by electron beam[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science editon), 1998, 26(3): 10-12.
- [14] 刘治钢, 王飞, 陈燕, 等. 火星表面环境对太阳电池阵列设计影响分析与对策[J]. 航天器工程, 2016, 25(2): 39-45.
- LIU Zhi-gang, WANG Fei, CHEN Yan, et al. Impact analysis and solution of solar array design in martian surface environment[J]. Spacecraft engineering, 2016, 25(2): 39-45.
- [15] QIN Y, WANG X D, WANG Z L. Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging[J]. Nature, 2008, 451(14): 809-813.
- [16] 李汶军. 纳米晶粒水热制备过程中的粒度与形态调控[D]. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所, 2001.
- LI Wen-jun. Modulation of size and morphology of nanocrystallites under hydrothermal conditions[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [17] 占世平, 高永毅. 氧化锌纳米线阵列的可控合成与光学性能[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 80-82.
- ZHAN Shi-ping, GAO Yong-yi. The controllable synthesis of ZnO nanowire-arrays and optical properties[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (natural science editon), 2011, 26(4): 80-82.
- [18] 俞有幸, 郝维昌, 杜轶, 等. 氧化锌纳米棒有序阵列的制备及表征[J]. 功能材料, 2007, 38(8): 1370-1372.
- YU You-xing, HAO Wei-chang, DU Yi, et al. Preparation and characterization of ZnO nanorods oriented arrays[J]. Journal of functional materials, 2007, 38(8): 1370-1372.
- [19] LI W J, SHI E W, ZHONG W Z, et al. Growth mechanism and growth habit of oxide crystals[J]. Journal of crystal growth, 1999, 203(1): 186-196.
- [20] TIAN Z R, VOIGT J A, LIU J, et al. Complex and oriented ZnO nanostructures[J]. Nature materials, 2003, 2(12): 821-826.