

BN-1 超高吸收导电消光镀层性能 及其空间环境稳定性研究

程德, 王景润, 覃业深, 赵瀚景, 郭中增, 王旭光, 白晶莹, 李思振

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要: **目的** 研究 BN-1 超高吸收导电消光镀层 (简称 BN-1 镀层) 的微观结构、导电消光性能以及空间辐照环境对 BN-1 镀层消光性能的影响, 以考核该镀层是否满足空间光学构件的长寿命使用需求。**方法** 首先对 BN-1 镀层进行微观形貌、元素组成、接触电阻、太阳吸收比 (α_s) 的检测, 考察镀层的导电性能和消光性能, 并对镀层性能的结构基础进行分析。再分别对 BN-1 镀层进行总剂量为 2×10^{21} atoms/cm² 的原子氧辐照以及总剂量为 5000 ESH 的真空-紫外辐照试验, 通过试验结果分析空间模拟辐照环境对 BN-1 镀层 α_s 的影响规律, 研究 BN-1 镀层的耐空间环境稳定性。**结果** BN-1 镀层表面具有微纳尺度的绒毛状光陷阱结构, 从而具备优异的导电消光性能, 镀层接触电阻 < 5 m Ω , $\alpha_s > 0.98$ 。原子氧暴露后, BN-1 镀层 α_s 降低了 0.0049, 变化值小于 0.01, 具备良好的耐原子阳光辐照性能。真空-紫外辐照后, BN-1 镀层 α_s 增加了 0.0009, 变化值小于 0.01, 具有良好的耐真空-紫外辐照能力。**结论** BN-1 镀层的导电消光性能优异, 经历原子氧、真空-紫外模拟辐照后, BN-1 镀层 α_s 变化较小, 具有较好的耐空间辐照性能, 可以满足星敏感器、空间相机等空间光学构件的长寿命服役需求。

关键词: BN-1; 高吸收率; 导电; 消光性能; 镀层; 空间环境

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)11-0195-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.019

Properties and Stability in Space Environment of BN-1: An Ultra-high Absorption Conductive Matting Coating

CHENG De, WANG Jing-run, QIN Ye-shen, ZHAO Lian-jing, GUO Zhong-zeng,
WANG Xu-guang, BAI Jing-ying, LI Si-zhen

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The microstructure, conductivity and absorptivity of an ultra-high absorption conductive matting coating (BN-1 coating) and the influence of space irradiation environment on it were studied to evaluate whether the coating meet the requirements of long-life space optical component. Firstly, the micro morphology, element composition, contact resistance, solar absorption ratio (α_s) of the BN-1 coating were tested to investigate the conductivity and extinction properties of the coating. The structural basis of the coating extinction performance was analyzed on this basis. Then, the BN-1 coating was irradiated with atomic oxygen dose of 2.0×10^{21} atoms/cm² and vacuum-ultraviolet dose of 5000 ESH respectively. The effect of space

收稿日期: 2020-11-26; 修订日期: 2021-05-13

Received: 2020-11-26; Revised: 2021-05-13

作者简介: 程德 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: CHENG De (1989—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering.

引文格式: 程德, 王景润, 覃业深, 等. BN-1 超高吸收导电消光镀层性能及其空间环境稳定性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 195-201.
CHENG De, WANG Jing-run, QIN Ye-shen, et al. Properties and stability in space environment of BN-1: An ultra-high absorption conductive matting coating[J]. Surface technology, 2021, 50(11): 195-201.

simulated irradiation environment on BN-1 coating is analyzed through the test results and the stability of BN-1 coating against space environment was studied. Micro-nanometer holes are evenly distributed on the surface of the BN-1 coating which was called light trap structure, leading to the excellent conductivity and absorptivity of the BN-1 coating. The contact resistance is less than 5 m Ω , and the solar absorption ratio (α_s) is greater than 0.98. After AO exposure, the solar absorption ratio (α_s) of the BN-1 coating decreased by 0.0049 and the change value is less than 0.01. It has good resistance to atomic sunlight irradiation. After VUV irradiation, the solar absorption ratio (α_s) of the BN-1 coating increased by 0.0009 and the change value was less than 0.01. It has good resistance to vacuum ultraviolet radiation. BN-1 coating has excellent conductivity and extinction performance. After AO and VUV simulated irradiation, BN-1 coating α_s change is small and has good space irradiation resistance, which can meet the long-life service requirements of space optical components such as star sensor and space camera.

KEY WORDS: BN-1; high absorption; conductivity; extinction performance; coating; space environment

光学构件表面的杂散光会干扰光学相机、星敏感器对正常光学信号的捕捉,从而影响到航天器光学成像的质量以及姿轨控精度^[1-2]。为消除内部光线的漫反射等杂散光的影响,光学相机、星敏感器等光学构件表面应镀覆黑色等具有高吸收率的消杂光功能涂镀层。

作为航天器光学构件的关键材料之一,国内外对消杂光功能涂镀层开展了大量研究^[3-13]。英国公司开发的 Super Black 涂层和 Vanta Black 涂层的太阳吸收比 $\alpha_s > 0.99$,俄罗斯开发的 AK-512 涂层、AK-243 涂层以及美国公司开发的 Marting Black 涂层、J-black 涂层等也实现了应用。我国航天器光学构件应用的多为进口消杂光涂层产品,涂层 α_s 约为 0.97。在航天器光学构件消杂光技术研究方面,国内单位以北京卫星制造厂有限公司、中国科学院上海有机化学研究所等单位为主,消杂光技术主要包括铝合金超黑阳极氧化、电镀黑镍、黑铜以及黑色热控涂层等, α_s 为 0.92~0.97。

基于型号研制需求,本项目组开展了 BN-1 镀层制备技术研究,以解决航天器光学构件表面导电消光表面处理的需求,BN-1 镀层 $\alpha_s > 0.98$,接触电阻 $< 5 \text{ m}\Omega$,应用状态良好。本文对 BN-1 镀层的微观结构、导电消光性能进行了表征,并针对航天器近地轨道环境中存在的大量原子氧以及高真空下的紫外辐照对镀层性能的影响开展了 BN-1 镀层空间抗辐照性能测试,从而判断 BN-1 镀层的空间环境稳定性。

1 实验

1.1 BN-1 镀层试样制备

BN-1 镀层采用微纳刻蚀的方法在化学镀层表面制备微纳消光结构,在具备超高吸收性能的前提下,保留镀层的导电性。BN-1 为镀层代号。

试验样品为铝合金试片,牌号为 2A12T4,规格为 40 mm×40 mm×2 mm。按照工艺流程“有机溶剂除油→碱洗→酸洗→浸锌→镀层制备→微纳刻蚀”,制备 BN-1 导电消光镀层。其中有机溶剂除油为无水乙醇擦拭除油;碱洗溶液为 15~25 g/L 的氢氧化钠溶液,溶液温度为 70~80℃,碱洗时间为 60~90 s;酸洗溶液

为 300~400 g/L 的硝酸溶液,溶液温度为常温,酸洗时间为 60~120 s;浸锌溶液组分为氢氧化钠 110~120 g/L、氧化锌 20~25 g/L、硝酸钠 1~2 g/L、酒石酸钾钠 20~25 g/L,溶液温度为常温,浸锌时间为 30~60 s。通过镀覆后刻蚀获得具有毛绒状“光陷阱”的微纳尺度导电消光镀层结构,所得导电消光镀层厚度为 10~15 μm 。

1.2 测试分析方法

镀层微观形貌通过 ZEISS SUPER 55VP 型 SEM 观察。三维形貌通过 VK-X200 激光 3D 显微镜进行表征。采用 INCA 能谱仪半定量分析镀层元素含量。

镀层导电性能采用接触电阻测试仪按照 QJ 1827《低阻值金属镀覆层和化学转换膜层接触电阻测试方法》进行测量。

镀层消光性能采用太阳吸收比 α_s 进行表征, α_s 是吸收与入射的太阳辐射能通量之比,采用 UV3100 分光光度计测试,测试方法按照 GJB 2502.2—2006《航天器热控涂层试验方法 第 2 部分:太阳吸收比测试》执行。

辐照试验测试试样耐原子氧和真空-紫外辐照情况,按照 GJB 2502 的规定执行,具体试验条件如下。

1) 原子氧辐照试验条件:真空度优于 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$;辐照总通量为 $2.0 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$,通量为 $5.0 \times 10^{15} \text{ atoms/(cm}^2 \cdot \text{s)}$,加速因子为 5。测试辐照前后镀层的 α_s 。

2) 真空-紫外辐照试验条件:真空度优于 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,辐照剂量为 5000 ESH(当量太阳小时),加速因子为 5。测试辐照前后镀层的 α_s 。

2 结果及分析

2.1 BN-1 镀层的微观形貌及元素组成

BN-1 镀层的外观如图 1 所示,为均匀的深黑色。BN-1 镀层刻蚀前后的微观 SEM 形貌如图 2 所示。可以看出,镀层刻蚀前为致密的胞状结构,刻蚀后镀层表面均布大量微小的绒毛状结构,绒毛结构介于微米与纳米尺度之间。BN-1 镀层刻蚀前后的三维光学微观形貌如图 3 所示。镀层刻蚀后表面粗糙,镀层结构

与 SEM 照片结果基本一致。BN-1 镀层刻蚀前后的元素组成如图 4 所示。刻蚀前，镀层以 Ni、P 元素为主要成分；刻蚀后，镀层中除了 Ni、P 元素外，还出现了 O 元素，说明刻蚀后形成了一定的 Ni、P 氧化物。

由此推断出，BN-1 镀层所具有的微纳尺度绒毛状“光陷阱”结构，是镀层具备超高吸收消杂光性能的结构基础，而氧化物的出现为镀层实现超高吸收消杂光提供了物质基础。



图 1 BN-1 镀层外观
Fig.1 Photos of BN-1 coating

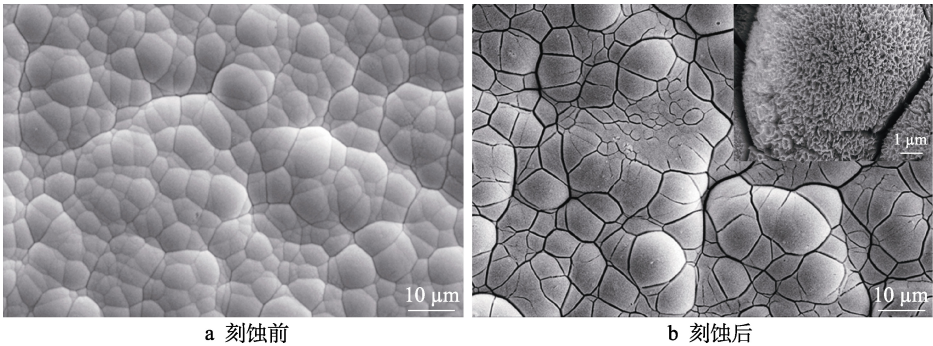


图 2 BN-1 镀层微观形貌
Fig.2 SEM images of BN-1 coating: a) before etching; b) after etching

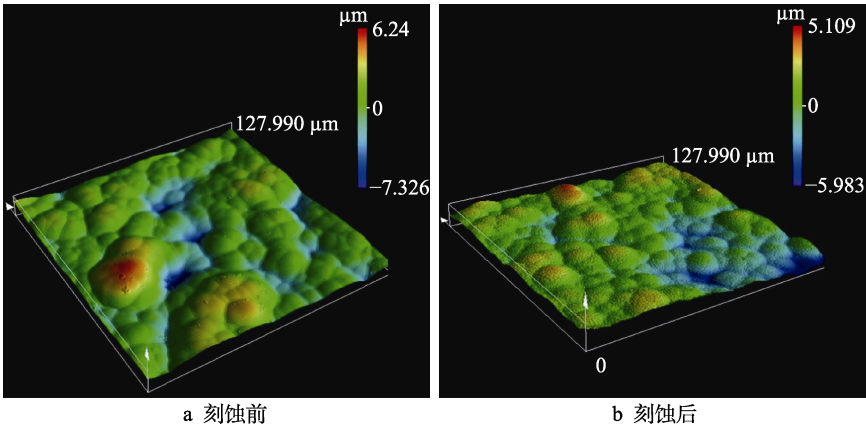


图 3 BN-1 镀层光学 3D 微观形貌
Fig.3 3D optic images of BN-1 coating: a) before etching; b) after etching

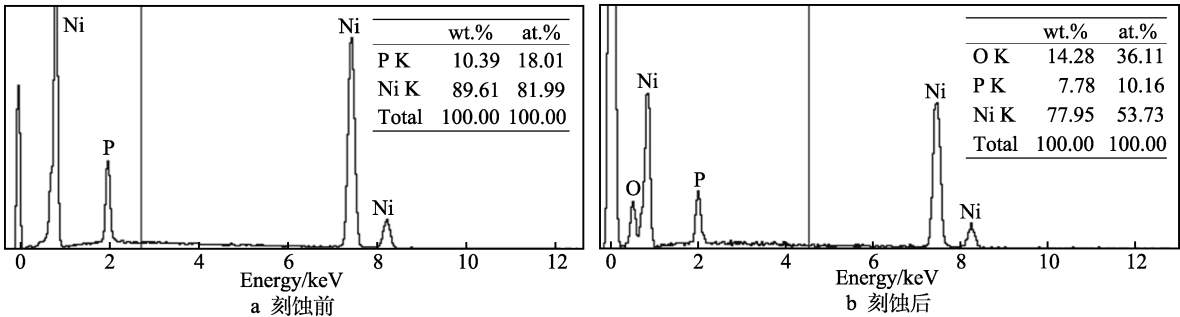


图 4 BN-1 镀层成分
Fig.4 Element composition of BN-1 coating: a) before etching; b) after etching

2.2 BN-1 镀层的导电消光性能

10 个批次连续生产的 BN-1 镀层的接触电阻测试结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 镀层接触电阻为 2~3 m Ω , 能够满足多数光学构件对镀层导电性能的需求。镀层接触电阻的测试数据随镀层批次变化不大, 说明用镀层刻蚀法制备的超高吸收导电消光镀层的接触电阻稳定性好, 工艺稳定性较高。

200~2500 nm 波段 BN-1 镀层的吸收率变化如图 6 所示, 10 个批次连续生产的 BN-1 镀层的 α_s 测试结果如图 7 所示。由图 6、图 7 可以看出, 镀层 $\alpha_s > 0.98$,

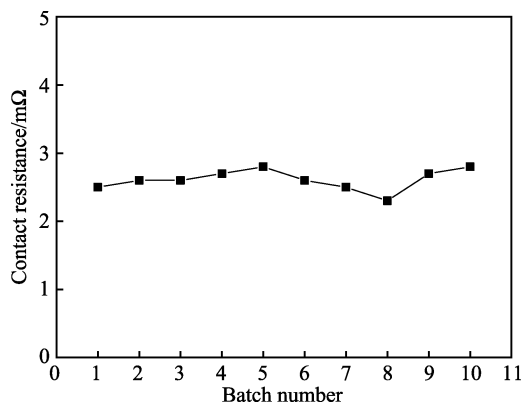


图 5 BN-1 镀层接触电阻批次稳定性

Fig.5 Stability of batches of BN-1 coating contact resistance

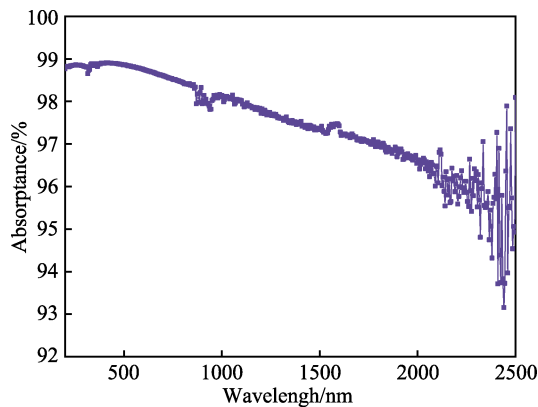


图 6 BN-1 镀层的吸收率变化光谱

Fig.6 Absorption spectrum of the BN-1 coating

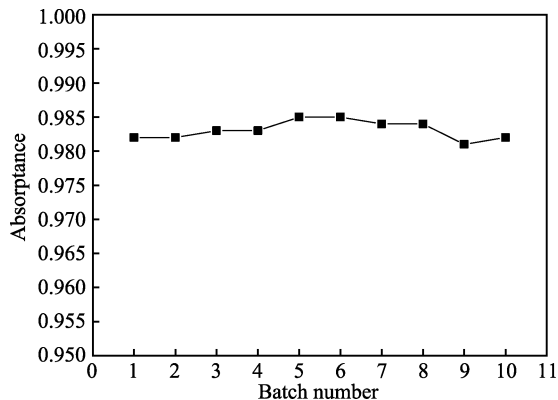


图 7 BN-1 镀层太阳吸收比批次稳定性

Fig.7 Stability of batches of BN-1 coating solar absorption ratio

且随镀层批次变化不大。这说明镀层刻蚀法制备的 BN-1 镀层的消光性能稳定性好, 工艺稳定性较高。

2.3 空间辐照环境对 BN-1 镀层的影响

2.3.1 原子氧对 BN-1 镀层性能的影响

在航天器低轨道环境中, 氧气在紫外等作用下能够电离为具有极强氧化能力和高速碰撞能量的原子氧。原子氧对材料表面的高温氧化、高速撞击伴随着提取、添加、置换、析出、嵌入等过程, 会使大部分有机材料含有的 C、H、O、N、S 分子键发生断裂, 生成 CO、CO₂、水蒸气等气相挥发物, 造成材料质损、光学性质、热学性质等性能参数退化, 材料的物理、化学性质发生变化, 影响航天器的正常运行^[14-20]。BN-1 镀层是具有超高吸收性能的无机热控镀层, 为了满足航天器长寿命服役要求, 有必要对其耐原子氧性能进行考察。

原子氧试验前后镀层的外观状态如图 8 所示。图 8 表明, 原子氧试验后, BN-1 镀层状态良好, 为均匀的深黑色, 未发现起皮、开裂、脱落等现象。原子氧试验后镀层的微观形貌如图 9 所示。从 SEM 照片可以看出, 原子氧辐照后, 镀层的绒毛状消光结构完好, 没有脱落退化的迹象。BN-1 镀层原子氧暴露前后的吸收率变化光谱见图 10。BN-1 镀层原子氧实验前后 α_s 的变化见表 1。由上述结果可知, 随着辐照剂



图 8 原子氧辐照前后 BN-1 镀层外观状态

Fig.8 Appearance state of the BN-1 coating before and after AO exposure: a) before AO exposure; b) after AO exposure

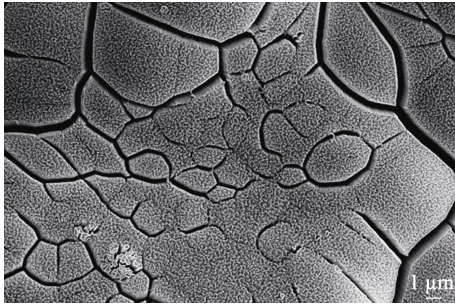


图 9 原子氧辐照后 BN-1 镀层微观形貌
Fig.9 SEM images of BN-1 coating after AO exposure

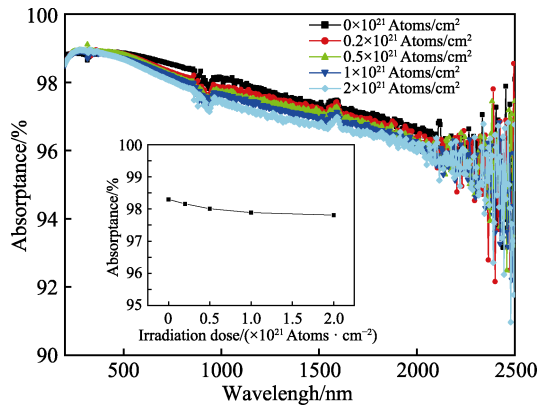


图 10 BN-1 镀层原子氧辐照过程的吸收率变化光谱
Fig.10 Absorption spectrum of the BN-1 coating during AO exposure

表 1 BN-1 镀层原子氧暴露前后的 α_s 变化
Tab.1 α_s value of the BN-1 coating before and after AO exposure

Before AO exposure	AO exposure dose/($\times 10^{21}$ atoms \cdot cm $^{-2}$)				Value change
	0.2	0.5	1.0	2.0	
0.9830	0.9816	0.9801	0.9789	0.9781	0.0049

量的增加, BN-1 镀层的 α_s 逐渐降低, 降速由快变慢, 从 0.9830 下降至 0.9781, $\Delta\alpha_s=0.0049$ 。原子氧辐照前后 BN-1 镀层 α_s 变化值不超过 0.01, 说明 BN-1 镀层性能相对稳定, 具有较好的耐原子氧性能。这是由于 BN-1 镀层是由无机 Ni、P 及其氧化物形成的镀层, 在原子氧辐照实验中性质稳定, 原子氧不会对 Ni、P 及其氧化物造成明显的物理、化学性质改变。

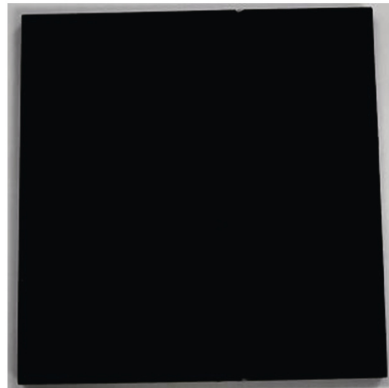
2.3.2 真空-紫外辐照对 BN-1 镀层性能的影响

在航天器的真空轨道环境中, 虽然紫外光占太阳辐射总能量的百分比较小, 但是真空-紫外辐照是造成航天器热控涂层老化变色、光学性能下降的重要原因^[21-25]。基于航天器长寿命服役方面的考虑, 有必要对其耐真空-紫外性能进行研究。

真空-紫外辐照试验前后镀层的外观状态如图 11 所示。图 11 表明, 真空-紫外辐照试验后, BN-1 镀层状态良好, 为均匀的深黑色, 未发现起皮、开裂、脱落等现象。从真空-紫外辐照试验后镀层的 SEM 照片 (见图 12) 可以看出, 真空-紫外辐照后, 镀层的绒毛状消光结构完好, 没有脱落退化的迹象。图 13



a 真空-紫外辐照前



b 真空-紫外辐照后

图 11 真空-紫外辐照前后 BN-1 镀层外观状态
Fig.11 Appearance state of the BN-1 coating before and after VUV irradiation: a) before VUV irradiation; b) after VUV irradiation

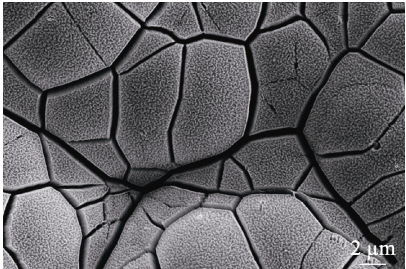


图 12 真空-紫外辐照后 BN-1 镀层的微观形貌
Fig.12 SEM images of BN-1 coating after VUV irradiation

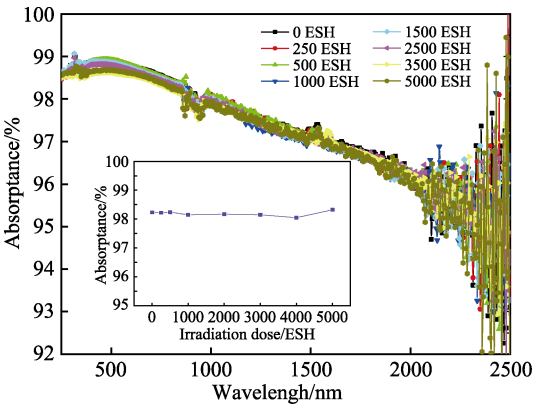


图 13 真空-紫外辐照前后 BN-1 镀层的吸收率变化光谱
Fig. 13 Absorption spectrum of BN-1 coating before and after VUV irradiation

给出了 BN-1 镀层真空-紫外暴露前后的吸收率变化光谱图。BN-1 镀层真空-紫外实验前后 α_s 的变化见表 2。由上述结果可知,在辐照的不同阶段,BN-1 镀层的 α_s 较为稳定。当辐照剂量达到 5000 ESH 时,BN-1 镀层 α_s 出现轻微上升。紫外辐照前后,BN-1 镀层的 α_s

从 0.9823 增加至 0.9832, $\Delta\alpha_s < 0.01$, 说明 BN-1 镀层性能相对稳定,具有较好的抗紫外辐照性能。这也说明由无机 Ni、P 及其氧化物形成的 BN-1 镀层,在真空-紫外辐照实验中性质稳定,真空-紫外辐照不会对 Ni、P 及其氧化物造成明显的物理、化学性质改变。

表 2 真空紫外辐照前后 BN-1 镀层的 α_s 变化
Tab.2 α_s value of BN-1 coating before and after VUV irradiation

Before VUV irradiation	VUV irradiation dose/ESH							Value change
	250	500	1000	2000	3000	4000	5000	
0.9823	0.9822	0.9824	0.9815	0.9817	0.9815	0.9805	0.9832	0.0009

3 结论

本研究对 BN-1 镀层进行了微观形貌、导电消光性能、原子氧及真空-紫外辐照模拟试验。通过分析,得出以下结论:

1) BN-1 镀层通过刻蚀在化学镀层表面获得了微纳尺度的绒毛状消光结构, $\alpha_s > 0.98$, 镀层接触电阻 $< 5 \text{ m}\Omega$, 具有优异的导电消光性能。

2) BN-1 镀层的 α_s 随着原子氧辐照剂量的增加逐渐降低,从 0.9830 下降至 0.9781, α_s 变化不超过 0.01, 说明镀层性能相对稳定,具有较好的耐原子氧性能。

3) BN-1 镀层在真空-紫外辐照过程中, α_s 较为稳定。当辐照剂量达到 5000 ESH 时, α_s 出现轻微上升趋势。紫外辐照前后,BN-1 镀层的 α_s 从 0.9823 增加至 0.9832, 说明紫外辐照后镀层性能退化较小,BN-1 镀层具有优异的抗紫外辐照性能。

4) 综合原子氧与真空紫外辐照试验结果来看,BN-1 镀层空间环境稳定性优异,满足航天器光学构件长寿命在轨运行应用需求。

参考文献:

- [1] 李岩, 刘剑峰. 红外光学传感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 285-289.
LI Yan, LIU Jian-feng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor[J]. Acta optica sinica, 2013, 33(9): 285-289.
- [2] 陈学, 孙创, 夏新林. 具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 230-234.
CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xin-lin. Stray light suppression property of baffle with honeycombed wall[J]. Acta optica sinica, 2012, 32(5): 230-234.
- [3] DE NICOLA F, HINES P, DE CRESCENZI M, et al. Moth-eye effect in hierarchical carbon nanotube anti-reflective coatings[J]. Carbon, 2016, 108: 262-267.
- [4] EBRAHIMI F, YAZDI S S, NAJAFABADI M H, et al. Influence of nanoporous aluminum oxide interlayer on the optical absorptance of black electroless nickel-phosphorus coating[J]. Thin solid films, 2015, 592: 88-93.
- [5] BAYATI M R, ZARGAR H R, TALIMIAN A, et al. Characterization of Al_2O_3 - TiO_2 nano porous solar absorbers derived via MAO/sol-gel hybrid process[J]. Surface and coatings technology, 2010, 205(7): 2483-2489.
- [6] UMA RANI R, SHARMA A K, MINU C, et al. Studies on black electroless nickel coatings on titanium alloys for spacecraft thermal control applications[J]. Journal of applied electrochemistry, 2010, 40(2): 333-339.
- [7] LIU Huan-jing, HUANG Qian, HOU Guo-fu, et al. Cost-effective hollow honeycomb textured back reflector for flexible thin film solar cells[J]. Solar energy materials and solar cells, 2016, 155: 128-133.
- [8] 邓天奇. 铝硅合金表面导电型消杂光涂层的制备及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
DENG Tian-qi. Preparation and properties of conductive anti impurity light coating on Al-Si alloy surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [9] 朱善旭. 6061 铝合金表面导电型热控膜层的制备及其性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
ZHU Shan-xu. Study on preparation and properties of conductive thermal control coatings on 6061 aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [10] 王泽江. 多孔结构高吸收涂层的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Ze-jiang. Preparation and properties of porous high absorbing coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [11] 张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(6): 88-90.
ZHANG Jian-xian, ZOU Yong-jun, XU Lei, et al. Matte coating and its application in optical system[J]. Aerospace materials & technology, 2014, 44(6): 88-90.
- [12] 郝云彩, 余成武, 梁士通, 等. 新一代星敏感器遮光罩——碳纳米管遮光罩技术研究[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(2): 1-7, 31.
HAO Yun-cai, YU Cheng-wu, LIANG Shi-tong, et al. New generation of star tracker baffle—CNT baffle[J].

- Aerospace control and application, 2016, 42(2): 1-7, 31.
- [13] 杜保林, 李林, 黄一帆, 等. 空间遥感器消杂散光涂料的分析与研究[J]. 光子学报, 2008, 37(S2): 220-222.
DU Bao-lin, LI Lin, HUANG Yi-fan, et al. Analysis and study on coating suppressing stray-light of space remote sensor[J]. Acta photonica sinica, 2008, 37(S2): 220-222.
- [14] MISAK H E, MALL S. Characterization of carbon nanotube yarn after exposure to hyperthermal atomic oxygen and thermal fatigue[J]. Advances in space research, 2016, 58(11): 2385-2392.
- [15] 李涛, 姜海富, 刘向鹏, 等. 空间原子氧环境对常用热控涂层的影响[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 268-272.
LI Tao, JIANG Hai-fu, LIU Xiang-peng, et al. The effects of atomic oxygen on the thermal control coatings in common use[J]. Spacecraft environment engineering, 2012, 29(3): 268-272.
- [16] 张宗波, 郎冠卿, 姜海富, 等. 低地球轨道航天器涂层防护技术研究进展[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(1): 109-114.
ZHANG Zong-bo, LANG Guan-qing, JIANG Hai-fu, et al. Review of protection coating techniques for LEO spacecrafts[J]. Spacecraft environment engineering, 2016, 33(1): 109-114.
- [17] 湛永钟, 张国定. 低地球轨道环境对材料的影响[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(1): 1-5, 23.
ZHAN Yong-zhong, ZHANG Guo-ding. Low earth orbit environmental effects on materials[J]. Aerospace materials & technology, 2003, 33(1): 1-5, 23.
- [18] REDDY M R. Effect of low earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials[J]. Journal of materials science, 1995, 30(2): 281-307.
- [19] ZHAO Xiao-hu, SHEN Zhi-gang, XING Yu-shan, et al. An experimental study of low earth orbit atomic oxygen and ultraviolet radiation effects on a spacecraft material-polytetrafluoroethylene[J]. Polymer degradation and stability, 2005, 88(2): 275-285.
- [20] 张岚, 刘勇, 董尚利, 等. 原子氧对航天材料的影响与防护[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 185-190.
ZHANG Lan, LIU Yong, DONG Shang-li, et al. The effect of atomic oxygen on spacecraft materials and the protection measures[J]. Spacecraft environment engineering, 2012, 29(2): 185-190.
- [21] 章俞之, 曹韞真, 吴岭南, 等. 几种热控涂层的真空-紫外辐照试验[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 126-131.
ZHANG Yu-zhi, CAO Yun-zhen, WU Ling-nan, et al. Ultraviolet irradiation tests of some thermal control coatings in vacuum[J]. Spacecraft environment engineering, 2011, 28(2): 126-131.
- [22] 马伟, 宣益民, 韩玉阁, 等. 长寿命卫星热控涂层性能退化及其对卫星热特征的影响[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 568-572.
MA Wei, XUAN Yi-min, HAN Yu-ge, et al. Degradation performance of long-life satellite thermal coating and its influence on thermal character[J]. Journal of astronautics, 2010, 31(2): 568-572.
- [23] 刘超峰, 王振红, 胡行方. 氧化锌色素在真空紫外辐照下降解机理的研究[J]. 中国空间科学技术, 1999, 19(4): 34-39.
LIU Chao-feng, WANG Zhen-hong, HU Xing-fang. Mechanism of degradation of ZnO pigment induced by ultraviolet irradiation in vacuum[J]. Chinese space science and technology, 1999, 19(4): 34-39.
- [24] 张会. 消毒柜密封条用耐紫外/臭氧老化硅橡胶的制备与性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
ZHANG Hui. Preparation and properties of UV and ozone resistant silicone rubber for sealing strip of disinfection cabinet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [25] 谭必恩, 尹朝晖, 潘慧铭, 等. 真空紫外辐照对加成型硅橡胶光学性能的影响[J]. 功能高分子学报, 2001, 14(4): 432-436.
TAN Bi-en, YIN Zhao-hui, PAN Hui-ming, et al. Behaviors of addition type silicone rubber in space ultraviolet environment simulates[J]. Journal of functional polymers, 2001, 14(4): 432-436.