# AI/BN 封严涂层在盐雾环境中的腐蚀性能 及表面特征研究

杨国吴<sup>1</sup>, 孙杰<sup>1</sup>, 宋佳<sup>2</sup>, 刘天<sup>1</sup>, 孙海静<sup>1</sup>, 王保杰<sup>1</sup>

(1.沈阳理工大学 环境与化学工程学院,沈阳 110159;2.中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司技术中心,沈阳 110043)

摘要:目的研究 AI/BN 封严涂层在海洋环境下的腐蚀历程。方法 使用扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、电化学等测试方法,对 AI/BN 封严涂层在盐雾环境中的腐蚀行为、形貌、显微结构、相组成及耐腐蚀等性能进行研究,分析 AI/BN 封严涂层在盐雾试验中的电化学腐蚀过程。结果 在 96 h 盐雾试验中, AI/BN 封严涂层的腐蚀过程分为 2 个阶段,分别为孔蚀形成期和孔蚀发展期。在前 72 h 的盐雾腐蚀时间 里,AI/BN 封严涂层的腐蚀产物对于孔洞的堵塞越来越严重,自腐蚀电流密度也处于下降状态,表明 AI/BN 封严涂层的腐蚀产物有效地阻止了腐蚀速度的加剧。在第 2 阶段,阻抗值有所下降,是因为腐蚀产物龟裂 或孔洞内局部酸化造成。结论 AI/BN 涂层的腐蚀产物对 AI/BN 封严涂层的自腐蚀速率有比较大的影响。 关键词:盐雾环境; AI/BN 封严涂层;腐蚀电流密度;阻抗;腐蚀产物;耐蚀性 中图分类号:TG172 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2022)11-0077-07 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2022.11.011

# Corrosion Performance and Surface Characteristics of Al/BN Sealing Coating in Salt Spray Environment

YANG Guo-hao<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>1</sup>, SONG Jia<sup>2</sup>, LIU Tian<sup>1</sup>, SUN Hai-jing<sup>1</sup>, WANG Bao-jie<sup>1</sup>

(1.School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 110159, China; 2.AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**ABSTRACT:** This research aims to study the corrosion process of Al/BN sealing coating in marine environment, the corrosion behaviors, morphology, microstructure, phase composition and corrosion resistance of Al/BN sealing coating in salt spray environment were studied by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), electrochemistry, etc. The electrochemical corrosion process of Al/BN sealing coating in salt spray test was analyzed. The results showed that in the 96h salt

**引文格式:**杨国昊,孙杰,宋佳,等. Al/BN 封严涂层在盐雾环境中的腐蚀性能及表面特征研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 077-083. YANG Guo-hao, SUN Jie, SONG Jia, et al. Corrosion Performance and Surface Characteristics of Al/BN Sealing Coating in Salt Spray Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 077-083.

收稿日期: 2021-11-14;修订日期: 2021-12-16

Received: 2021-11-14; Revised: 2021-12-16

基金项目:沈阳理工大学高水平成果建设项目(SYLUXM202105);科研创新团队支持项目(SYLUTD202004)

Fund: High Level Achievement Construction Project of Shenyang LiGong University (SYLUXM202105); Research Innovation Team Support Project of Shenyang LiGong University (SYLUTD202004)

作者简介:杨国昊(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为腐蚀科学与先进防护技术。

Biography: YANG Guo-hao (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: corrosion science and advanced protection technology.

通讯作者:孙杰(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为材料腐蚀电化学行为及防护方法。

**Corresponding author:** SUN Jie (1971-), Male, Doctor, Professor, Research focus: material corrosion electrochemical behavior and protection methods.

spray test, the corrosion process of the Al/BN sealing coating can be divided into two stages: etched pinhole formation and development. In the first 72 h of salt spray test, the corrosion product of the Al/BN sealing coating blocked the pinholes more and more seriously, and the corrosion current density decreased, indicating that the corrosion products of the Al/BN sealing coating can effectively decrease corrosion rate. In the pinhole development stage, the value of the impedance decreased due to the cracking of the corrosion products or local acidification inside the holes. In conclusion, the corrosion products of Al/BN coating have a great influence on the corrosion rate of Al/BN sealing coating.

**KEY WORDS:** salt-sprayenvironment; Al/BN sealing coating; corrosion current density; corrosion products; impedance; corrosion resistance

封严涂层是使役在航空发动机的一种由热喷涂 技术制备的特种涂层,用于降低发动机的径向气流间 隙<sup>[1-2]</sup>。封严涂层一般应用在飞机发动机压气机机匣 内壁,控制飞机发动机中静子与转子部件的间隙间 隔,减少发动机在运转过程中漏气的比例,使飞机获 得更高的推重比<sup>[3-5]</sup>。一般而言,封严涂层是由金属 相(如 Al、Si、Cu 等)和高孔隙率的润滑相(如氮 化硼、聚苯脂、硅藻土等)组成,金属相具备耐腐蚀 性、耐磨损性、耐冲击性等性能,润滑相使涂层更有 弹性,提高孔隙率以降低硬度<sup>[6-9]</sup>。两相组合后的封 严涂层拥有较好的热稳定性、耐冲击性、可磨耗性、 耐腐蚀性以及与基体优良的结合性能<sup>[9-11]</sup>。

Al/BN 是应用比较广泛的封严涂层<sup>[12]</sup>,在工作及 存放环境中,其破坏形式基本分为2种情况:第1种 是在高温、高速气体冲击的运转过程中,涂层会受到 冲蚀、高温氧化等腐蚀形式[13-14];另外一种是飞机在 海洋环境中存放时,高盐度的条件作为良好的腐蚀介 质,以至于涂层内部进行着复杂的电化学腐蚀,电化 学腐蚀是封严涂层降解的主要形式[15]。其中电化学腐 蚀的主要形式有电偶腐蚀和孔洞腐蚀,产生腐蚀的一 部分原因是热喷涂时会产生裂纹、凹坑、成分不均匀 等现象,再就是因涂层本身需要提高孔隙率来降低硬 度<sup>[16-17]</sup>。目前对 Al/BN 封严涂层的常规性能测试比较 多<sup>[18]</sup>,曹玉霞等<sup>[19]</sup>对 Al/BN 封严涂层的维氏硬度和结 合强度进行了性能测试。Xue 等<sup>[20]</sup>研究了 Al/BN 封严 涂层的摩擦过程,并对摩擦机理进行了分析。为研究海 洋环境对涂层更真实的影响,宋佳等<sup>[21]</sup>研究了 Al/BN 封严涂层在实际环境中的性能退化过程。雷兵等[22]研 究了 Al/BN 封严涂层在氯化物溶液中的腐蚀行为。

目前对 Al/BN 封严涂层的力学性能测试比较多, 对于 Al/BN 封严涂层的腐蚀行为研究很有必要。本文 使用电化学、微观形貌等方法,研究了在盐雾环境中 Al/BN 封严涂层的腐蚀行为,对 Al/BN 封严涂层的腐 蚀过程进行了研究分析。

## 1 试验

#### 1.1 试验试剂及试样制备

试验中所使用的试剂为氯化钠(分析纯,天津市

大茂化学试剂厂)。试验所用材料为 Al/BN 封严涂层, 其具体的喷涂结构如图 1 所示。它由基体、粘结层和 面层组成,其成分依次为 0Cr17Ni4Cu4Nb(不锈钢)、 NiAl 粘接层涂层和 Al/BN 面层。NiAl 层和 Al/BN 面 层均采用等离子喷涂技术制备,NiAl 层和 Al/BN 面 层的厚度分别为 0.10~0.20 mm 和(1.50±0.1) mm。喷 涂的主要工艺参数: 氩气流量为 3.28~4.10 m<sup>3</sup>/h,氢 气流量为 0.45~0.61 m<sup>3</sup>/h,电流为 500~550 A,电压为 65~85 V,送粉速率为 65~95 g/min,喷涂距离为 50~ 300 mm。将保持原始状态的 10 mm×10 mm 的片状 Al/BN 封严涂层采用 704 硅橡胶进行封样,等待 704 硅橡胶自然风干后,将试样保存在干燥器中以备用。



图 1 喷涂结构 Fig.1 Schematic diagram of Spraying structure

#### 1.2 方法及表征

Al/BN 封严涂层在海洋环境下的腐蚀试验按照 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》进 行<sup>[23]</sup>。在盐雾实验箱中分别试验 24、48、72、96 h 后取 1 组试样,分别使用光学显微镜和电子扫描显微 镜(SEM, MIRA3 型, TESCAN 公司)等仪器对 Al/BN 封严涂层在不同测试时间的形貌进行记录,并采用 X-射线衍射仪(XRD, D/max-2200PC 型,日本日立 公司)对不同测试时间的试样分析腐蚀产物的物相组 成。其中,XRD 的扫描范围为 10°≤2θ≤100°,扫描 速度为 10 (°)/min。

使用电化学测试来评价 Al/BN 封严涂层在盐雾 试验中的腐蚀性能。电化学测试使用型号 CS350H(武 汉科思特仪器股份有限公司)的电化学工作站进行。 试验使用三电极系统,参比电极为饱和甘汞电极,对 电极为铂电极,工作电极为 Al/BN 封严涂层,并进行 电化学阻抗(EIS)和电化学极化测试(Tafel)。电化 学阻抗和极化测试都等开路电位稳定时开始。阻抗测 试参数:交流幅值为 10 mV,频率从 10 000 Hz 开始 到 0.01 Hz 停止。极化测试参数:电位扫描区间为相 对开路电位为±0.5 V 之间,扫描速率为 5 mV/s。

• 78 •

第19卷 第11期

## 2 结果及分析

# 2.1 AI/BN 封严涂层在盐雾条件下的表面 形貌形貌及相组成分析

首先使用光学显微镜对不同试验时间(0、24、

48、72、96 h)的 Al/BN 封严涂层的宏观形貌进行观察,如图 2 所示。随着时间的延长,涂层无成片剥落现象发生,但涂层表面的白色颗粒腐蚀产物越来越 多,白色颗粒有脱落现象发生,基体无任何明显变化。 这个现象说明,随着时间的延长,Al/BN 封严涂层的 腐蚀程度逐步加深。







为了对 Al/BN 封严涂层做详细的观察,使用 SEM 方法,对进行了不同盐雾试验时间条件下 Al/BN 封严 涂层的微观形貌进行了测试,如图3所示。从图3中 可以看出,未经过盐雾腐蚀的 Al/BN 封严涂层表面凹 凸不平,并有许多孔洞,也存在许多形状不规整的圆 形球体。当经过盐雾腐蚀 24 h 后,涂层表面变得更 平整,孔洞数量在减少,球状物体也在减少。当经过 盐雾腐蚀 48 h 后,可明显观察到白色光亮的腐蚀产 物,观察整片涂层表面,找不到球状物体,并有裂纹 产生,已无孔洞,孔洞被白色光亮物质堵住,初步认 定此物质为腐蚀产物。此现象说明由于腐蚀产物堵住 孔洞,腐蚀速度会相对减慢。当经过盐雾腐蚀 72 h 后,观察表面腐蚀产物减少,有脱落的可能性。由光 学照片得出结论,腐蚀产物为白色颗粒物质,结合力 很弱,所以推断腐蚀产物减少是由产物脱落造成的。 由于腐蚀产物脱落,露出更多被腐蚀后的涂层表面, 表面的裂纹更密集,并有白色小晶体。当经过盐雾腐 蚀 96 h 后,涂层表面的腐蚀产物发生龟裂现象,说 明腐蚀产物不会起到良好的隔绝介质作用。

为了确定腐蚀产物成分,对涂层腐蚀前后 EDS 能谱进行对比,对比结果如图 4 所示。图 4a 为未经 盐雾腐蚀试样的能谱,在 Al/BN 封严涂层中,SiO<sub>2</sub> 作为粘结剂的存在,存在涂层内部。未腐蚀前有孔 洞存在,且 SiO<sub>2</sub>有挥发性,所以有 Si 峰存在。图 4b 为盐雾腐蚀 96h 后试样的能谱,显示有 Al、O、 Cl 等 3 种元素。对比图 4a、b 可以发现,Si 元素在 图谱中消失不见,是因为腐蚀后孔洞有腐蚀产物堆 积,且通过 SEM 只能看到涂层表面的元素,所以 Si 元素消失不见。EDS 中 Cl、O 的峰很高,说明腐 蚀的很严重。由 EDS 结果初步猜测,腐蚀产物为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

由 EDS 分析出腐蚀产物的主要成分,为更进一步了解腐蚀产物,对腐蚀产物做了 X 射线表征手段,结果如图 5 所示。由图 5 可知,腐蚀后的 Al/BN 封严涂层产生新的峰,新产生的峰并不是很高,是因为腐蚀产物很薄,并且易脱落,以至于 XRD 难打出很高的峰。腐蚀后新打出的峰,经比对后与 EDS 结果相对应,所以证实腐蚀产物为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。





图 5 Al/BN 封严涂层不同盐雾时间的 XRD 图谱 Fig.5 XRD patterns of Al/BN seal coatings at different salt spray times

### 2.2 电化学行为分析

为了进一步了解 Al/BN 封严涂层的腐蚀行为,对 经历不同盐雾时间后的 Al/BN 封严涂层进行了电化 学测试。在 3.5% NaCl 溶液中对 Al/BN 封严涂层进行 的动电位极化曲线测试,结果如图6所示。由图6可 知, Al/BN 封严涂层盐雾腐蚀后, 自腐蚀电位和电流 均整体往正方向移动。Al/BN 封严涂层盐雾前后的动 电位极化曲线有很大差别,但盐雾腐蚀后试样的极化 曲线阴、阳级的塔菲尔斜率十分相近。通过 Tafel 直 线反推法拟合可以得到自腐蚀电流密度 Jcorr 和电位 Ecorr,结果见表 1。由表 1 数据可以发现,自腐蚀电 流密度先降低、再升高,进一步认证了在 0~48 h 时, 涂层由于多孔结构,刚开始涂层与溶液的接触面积 大,随着时间的推移,腐蚀产物的累积,涂层内部氧 气减少,所以腐蚀速度减缓。在48~72h时,由于腐 蚀产物堵住多孔涂层的空洞,氧气的供应受阻,使腐 蚀速度进一步减慢。在72~96h时,腐蚀产物有龟裂 现象,推测当时的腐蚀产物为Al(OH)3,经过脱水后 变为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,与 XRD 结果相对应。H<sub>2</sub>通过腐蚀产物 裂缝流出, Cl<sup>-</sup>透过腐蚀产物进入孔洞内, 加速 Al<sup>3+</sup> 离子水解,导致腐蚀速率升高。



Fig.6 Potentiodynamic polarization curves of Al/BNseal coating

| 表 1   | 不同中性盐雾时间后 Al/BN 涂层的极化曲线 |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|-------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| 的拟合结果 |                         |  |  |  |  |  |  |  |

Tab.1 Parameters extracted from potentiodynamic polarization curves of Al/BN coating after different neutral salt spray time

| Corrosion<br>times/h | $J_{\rm corr}$ (A/cm <sup>2</sup> ) | $E_{\rm corr}/{ m V}$ | $b_{\rm a}/{ m mV}$ | $b_{\rm c}/{ m mV}$ |
|----------------------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 0                    | $2.010 \times 10^{-3}$              | -1.197                | 8540                | 1405.5              |
| 24                   | $1.223 \times 10^{-4}$              | -0.968                | 397.56              | 380.13              |
| 48                   | $9.040 \times 10^{-5}$              | -0.92                 | 322.03              | 346.49              |
| 72                   | $8.391 \times 10^{-5}$              | -1.019                | 385.01              | 248.71              |
| 96                   | $1.044 \times 10^{-4}$              | -0.972                | 371.61              | 373.31              |



对 Al/BN 封严涂层在不同盐雾腐蚀时间的阻抗 (EIS)进行了测试, Nyquist 曲线如图 7 所示。在图 7 中可得到,阻抗谱总体都呈现 2 个容抗弧,高频容 抗弧是双电层的信号反馈,低频容抗弧是腐蚀介质的 反应特征。Al/BN 封严涂层阻抗图的低频部分,在盐 雾腐蚀的前后,有感抗弧的出现和消失。根据曹楚南 等<sup>[24]</sup>研究指出,无论是自腐蚀现象或阳极腐蚀的情况 下,阻抗图谱的低频部分有感性收缩的现象,这种感 性收缩是随时间减弱并消失不见的,消失不见时有孔 蚀形成。Al/BN 涂层中的 Al 单质为钝态金属相。在 盐雾腐蚀后,感抗弧的消失说明可能发生孔蚀。在图 8 的 Bode 图中, 5 条曲线的 Angel-lgf 图中都有 2 个 峰,表明腐蚀历程都是 2 个时间常数。



图 7 Al/BN 封严涂层的 Nyquist 图 Fig.7 Nyquist diagram of Al/BN seal coating



图 8 Al/BN 封严涂层的 Bode 图 Fig.8 Bode diagram of Al/BN seal coating

选取图 9 中所示的  $R\{Q[R(QR)]\}$ 等效电路对 EIS 数据进行拟合。图 9 中电路的元素定义如下:  $R_1$ 为溶 液电阻;  $R_2$ 为电荷转移电阻;  $R_3$ 为腐蚀产物膜电阻;  $Q_1$ 是双电层电容;  $Q_2$ 腐蚀产物膜电容<sup>[25]</sup>。拟合数据 见表 2,  $R_3$ 先增大、后减小,在 72 h时,腐蚀产物 的膜电阻最大,与极化曲线 72 h时的自腐蚀电流密 度最小相对应。因此,把最值 72 h 作为分界点,把 腐蚀分为 2 个阶段。



图 9 Al/BN 封严涂层的等效电路 Fig.9 Equivalent circuit diagram of Al/BN seal coating

2022年11月

| 表 2 不同中性盐雾时间后 AI/BN 封严涂层的 EIS 数据的拟合结果<br>Tab.2 Fitting results of EIS data of AI/BN sealing coating after different neutral salt spray time |                                    |  |      |                                |  |      |                         |  |  |
|---|------------------------------------|--|------|--------------------------------|--|------|-------------------------|--|--|
| Times/h   | $R_1/(\Omega \cdot \mathrm{cm}^2)$ | $Q_1$  |      | $P/(\Omega_{c}cm^{2})$         | $Q_2$  |      | $P/(\Omega_{com^2})$    |  |  |
|   |                                    | $Y_0/(10^{-3}\mathrm{F}\cdot\mathrm{cm}^{-2})$ | n    | $- K_2/(32^{\circ} \text{cm})$ | $Y_0/(10^{-3}\mathrm{F}\cdot\mathrm{cm}^{-2})$ | n    | $K_{3}/(22 \text{ cm})$ |  |  |
| 0   | 64.44                              | 1.13   | 0.57 | 888.7                          | 1.13   | 1    | 82.77                   |  |  |
| 24  | 69.26                              | 2.87   | 0.43 | 231.4                          | 0.737  | 1    | 471.3                   |  |  |
| 48  | 64.06                              | 2.81   | 0.43 | 258.7                          | 0.535  | 1    | 500.9                   |  |  |
| 72  | 70.42                              | 1.85   | 0.45 | 139.3                          | 1.18   | 0.85 | 578.5                   |  |  |
| 96  | 67.68                              | 2.23   | 0.45 | 199.3                          | 1.02   | 0.92 | 384.2                   |  |  |

## 3 结论

1) 在 96 h 盐雾试验中, Al/BN 封严涂层的腐蚀 可分为2个阶段,阶段I(0~72h)为孔蚀形成期, 自腐蚀速度降低,与之对应的阻抗值升高;阶段Ⅱ (72~96h)为孔蚀发展期,自腐蚀速度升高,与之 对应的阻抗值降低。

2)腐蚀产物为白色凝胶状的 Al(OH)3, 经脱水后 成为白色颗粒状的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。在一定时间内,腐蚀产物 的生成使自腐蚀速率降低。当腐蚀产物一定量时,涂 层内部形成自催化效应,内部会呈现酸性环境,加速 腐蚀。

#### 参考文献:

- 尹春雷,陈美英,占佳,等.可磨耗封严涂层研究进展 [1] [J]. 航空制造技术, 2008, 51(20): 92-94. YIN Chun-lei, CHEN Mei-ying, ZHAN Jia, et al. Development Progress of Abradable Seal Coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(20): 92-94.
- 侯伟骜, 沈婕, 魏伟, 等. 一种可磨耗封严涂层制备及 [2] 性能研究[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 37-41. HOU Wei-ao, SHEN Jie, WEI Wei, et al. Preparation and Property Study of Flame Sprayed an Abradable Sealing Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(2): 37-41.
- 刘伟,周奎,杜令忠,等.可磨耗封严涂层的摩擦磨损 [3] 和抗冲蚀性能[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(4): 34-37. LIU Wei, ZHOU Kui, DU Ling-zhong, et al. Frictional Wear Resistance and Erosion Resistance of Abradable Seal Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(4): 34-37.
- YI Mao-zhong, HE Jia-wen, HUANG Bai-yun, et al. [4] Friction and Wear Behaviour and Abradability of Abradable Seal Coating[J]. Wear, 1999, 231(1): 47-53.
- 刘通, 于月光, 沈婕, 等. 进给速率对 AlSi/hBN 封严涂 [5] 层可磨耗性的影响[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(3): 43-49. LIU Tong, YU Yue-guang, SHEN Jie, et al. The Influence of Incursion Rate on Abradability of AlSi-hBN Abradable Seal Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2014, 6(3): 43-49
- 张佳平, 高禩洋, 李浩宇, 等. 高速刮擦条件下两种铝 [6] 基封严涂层的可刮削性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6):

90-97.

ZHANG Jia-ping, GAO Si-yang, LI Hao-yu, et al. Investigation on Abradability of Two Aluminum-Based Seal Coatings under High-Speed Rubbing Condition[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 90-97.

- [7] JOHNSTON R E, EVANS W J. Freestanding Abradable Coating Manufacture and Tensile Test Development[J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4-7): 725-729.
- [8] FARAOUN H I, SEICHEPINE J L, CODDET C, et al. Modelling Route for Abradable Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(22-23): 6578-6582.
- [9] WANG Zhe, DU Ling-zhong, LAN Hao, et al. A Novel Technology of Sol Precursor Plasma Spraying to Obtain the Ceramic Matrix Abradable Sealing Coating[J]. Materials Letters, 2019, 253: 226-229.
- [10] ZHANG Na, SHEN Jie, XUAN Hai-jun, et al. Evaluation of an AlSi-Polyester Abradable Seal Coating Performance Using High-Temperature and High-Velocity Abrasion Tests[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2016, 230(7): 842-851.
- [11] 刘军海, 何家文, 陆明珠, 苏启生. 封严涂层性能评定 的新方法[J]. 材料工程, 1997, 25(11): 43-44. LIU Jun-hai, HE Jia-wen, LU Ming-zhu, et al. A New Method for Evaluation of Mechanical Properties of Sealing Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(11): 43-44.
- [12] 王贺权, 董士峰, 张佳平. 基体结构对 Al/BN 涂层性能 的影响[J]. 真空, 2015, 52(1): 1-3. WANG He-quan, DONG Shi-feng, ZHANG Jia-ping. Effect of Substrate Structure on the Performance of Al/BN Coating[J]. Vacuum, 2015, 52(1): 1-3.
- [13] 段思华. Ti 基表面激光重熔 Al 涂层及高温氧化行为研 究[J]. 冶金设备, 2019(4): 17-20. DUAN Si-hua. Study on High Temperature Oxidation Behavior of Al Coating on Ti Substrate by Laser Remelting[J]. Metallurgical Equipment, 2019(4): 17-20.
- [14] 李力,魏天酬,刘明维,等.冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂 层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 70-74.

LI Li, WEI Tian-chou, LIU Ming-wei, et al. Research Progress on Erosion Wear Mechanism and Anti-Erosion Coatings[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(8): 70-74.

- [15] LEI Bing, LI Man, ZHAO Zhong-xing, et al. Corrosion Mechanism of an Al-BN Abradable Seal Coating System in Chloride Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 79: 198-205.
- [16] ZHANG Feng, XU Cun-guan, LAN Hao, et al. Corrosion Behavior of an Abradable Seal Coating System[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(6): 1019-1028.
- [17] FARAOUN H I, GROSDIDIER T, SEICHEPINE J L, et al. Improvement of Thermally Sprayed Abradable Coating by Microstructure Control[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2303-2312.
- [18] ÖKSÜZ M, YıLDıRıM H. Structure and Properties of AlSi/Polyester Coating[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 93(5): 2437-2444.
- [19] 曹玉霞, 刘伟, 杜令忠, 等. 等离子喷涂 Al/hBN 可磨 耗封严涂层的制备与性能(英文)[J]. 稀有金属材料与 工程, 2012(S2): 813-816.
  CAO Yu-xia, LIU Wei, DU Ling-zhong, et al. Preparation and Property of Al/hBN Plasma Sprayed Abradable Sealing Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012(S2): 813-816.
- [20] XUE W H, GAO S Y, DUAN D L, et al. Material Transfer Behaviour between a Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Blade and an Aluminium Hexagonal Boron Nitride Abradable Coating during High-Speed Rubbing[J]. Wear, 2015, 322-323: 76-90.

- [21] 宋佳,李明康,李瑛,等. 环境暴露实验对 Al/BN 可磨 耗封严涂层使役性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(10): 78-80.
  SONG Jia, LI Ming-kang, LI Ying, et al. Effects of Environmental Exposure Test on Serviceability of Al/BN Abradable Seal Coating[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(10): 78-80.
- [22] LEI Bing, PENG Ming-xiao, LIU Ling, et al. Galvanic Corrosion Performance of an Al-BN Abradable Seal Coating System in Chloride Solution[J]. Coatings, 2020, 11(1): 9.
- [23] GB/T 10125—2012, 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验[S]. GB/T 10125—2012, Corrosion Tests in Artificial Atmospheres—Salt Spray Tests[S].
- [24] 曹楚南, 王佳, 林海潮. 氯离子对钝态金属电极阻抗频 谱的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1989, 9(4): 261-270. CAO Chu-nan, WANG Jia, LIN Hai-chao. Effect of Cl<sup>-</sup> Ion on the Impedance of Passive-Film-Covered Electrodes[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1989, 9(4): 261-270.
- [25] 王楠. AlSi/BN 封严涂层在海洋环境下的腐蚀行为研究
   [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
   WANG Nan. Study on Corrosion Behavior of AlSi/BN Sealing Coating in Marine Environment[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2017.

责任编辑:刘世忠