

# 铝-氮化硼粉末复合形式对大气等离子喷涂 涂层组织及磨损性能的影响研究

王玉江<sup>1</sup>, 潘王帅<sup>1,2</sup>, 王旭东<sup>1,2,3</sup>, 杨焜<sup>2\*</sup>

(1.广西科技大学 机械与汽车工程学院, 广西 柳州 545616; 2.广东省科学院新材料研究所  
a.现代材料表面工程技术国家工程实验室 b.广东省现代表面工程技术重点实验室,  
广州 510650; 3.广州广电计量检测股份有限公司, 广州 510627)

**摘要:** **目的** 研究团聚型 (Al-hBN)、镶嵌型 (CuAl-hBN)、hBN 包 Al 型 (hBN/Al) 和 Al 包 hBN 型 (Al/hBN) 等 4 种不同复合形式的粉末在焰流中的熔化行为, 以及对涂层组织和性能的影响。**方法** 采用胶黏团聚工艺制备粉末, 采用 XRD 进行物相分析, 采用 SEM 对粉体和涂层进行微观分析, 采用倒置金相显微镜表征孔隙, 采用洛氏硬度仪测量涂层的表面硬度, 采用氮氧仪测量 hBN 烧损率, 采用高温摩擦磨损试验机对可磨耗性能进行表征。**结果** Al-hBN 粉末粒度较小, 流动性较差; CuAl-hBN 的粉末粒度较大, 松装密度较高, 流动性较好; hBN/Al 粉末粒度大且均匀, 球形度高, 流动性极佳; Al/hBN 粉末粒度分布范围宽, 松装密度低, 流动性较差。在喷涂过程中, Al-hBN 粉末熔化充分, 涂层的孔隙率较低, 硬度较高; CuAl-hBN 粉末中枝晶状 Cu 有效保护了 hBN, 使得涂层中 hBN 含量增加, 且分布均匀; hBN/Al 中的 hBN 烧损率高, 含量降低, 涂层中的未熔化颗粒较多; Al/hBN 粉末中的 hBN 作为核心被保护, 烧损率低, 含量高。在可磨耗性能方面, CuAl-hBN 涂层以叶片摩擦磨损为主, 同时伴随着黏着磨损, 其余 3 种涂层与 TC4 以黏着磨损为主。**结论** 采用 Al/hBN 粉末制备的涂层质地软, 孔隙率较小, hBN 含量较高; 在与 TC4 摩擦销对磨过程中, 其黏附量最低, 磨痕较平整, 可磨耗性能优异。相关结果可为粉末及涂层制备工艺的优化提供有价值的参考, 有助于提升涂层的性能和应用效果。

**关键词:** 铝-氮化硼; 粉末粒径; 复合形式; 孔隙率; 硬度; hBN 烧损率; 可磨耗性; 大气等离子喷涂

**中图分类号:** TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)07-0247-13

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.07.021

## Effect of Aluminum-boron Nitride Powder Composite Form on Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-sprayed Coating

WANG Yujiang<sup>1</sup>, PAN Wangshuai<sup>1,2</sup>, WANG Xudong<sup>1,2,3</sup>, YANG Kun<sup>2\*</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Guangxi Liuzhou

收稿日期: 2024-08-07; 修订日期: 2024-12-07

Received: 2024-08-07; Revised: 2024-12-07

基金项目: 广东特支计划 (2019BT02C629); 广东省科技计划 (2023B1212060045)

Fund: Guangdong Special Support Program (2019BT02C629); Guangdong Province Science and Technology Plan Project (2023B1212060045)

引文格式: 王玉江, 潘王帅, 王旭东, 等. 铝-氮化硼粉末复合形式对大气等离子喷涂涂层组织及磨损性能的影响研究[J]. 表面技术, 2025, 54(7): 247-259.

WANG Yujiang, PAN Wangshuai, WANG Xudong, et al. Effect of Aluminum-boron Nitride Powder Composite Form on Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-sprayed Coating[J]. Surface Technology, 2025, 54(7): 247-259.

\*通信作者 (Corresponding author)

545616, China; 2. a. National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology, b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Guangzhou GRG Metrology & Test Co., Ltd., Guangzhou 510627, China)

**ABSTRACT:** To investigate the melting behavior of different composite powders in flame flows and their impact on coating microstructure and performance, four types of composite powders were prepared: agglomerated type (Al-hBN), embedded type (CuAl-hBN), hBN-coated Al type (hBN/Al), and Al-coated hBN type (Al/hBN). All four powders were prepared according to the binder agglomeration process and coatings were fabricated according to the atmospheric plasma spraying technology. Subsequently, X-ray diffraction (XRD) was used for phase analyses of powders and coatings. A scanning electron microscopy (SEM) was employed for microstructural analysis of both powders and coatings. An inverted metallographic microscopy was used to characterize the coating porosity. A Rockwell hardness tester was used to measure the surface hardness of the coatings. A nitrogen-oxygen analyzer was used to assess the burn-off rate of hBN during spraying. A high-temperature friction and wear tester was used to create the test environment. An energy-dispersive spectroscopy (EDS) was used to analyze the elemental content on the worn surface of the coatings, and a three-dimensional scanner was used to scan the wear marks. The test results indicated that: Al-hBN powders had smaller particle sizes, were more prone to adhesion between particles, exhibited the poorest flowability, and the lowest feed rate; CuAl-hBN powders had relatively larger particle sizes, higher bulk density, and slightly poorer flowability; hBN/Al powders had larger and more uniform particle sizes, high sphericity, excellent flowability, and the highest feed rate; Al/hBN powders had a wide particle size distribution range, low bulk density, and poorer flowability. In terms of coating condition, Al-hBN showed good melting of the Al phase, forming a continuous layer, but the distribution of hBN was uneven, affecting the coating performance; CuAl-hBN powders dispersed Al and hBN well due to dendritic Cu, resulting in a more uniform phase distribution but also an increase in unmelted particles and large pores; In hBN/Al coatings, incomplete melting of particles and less hBN phase were observed; Al/hBN showed good melting with a clear layered structure and uniform phase distribution. The porosity, from highest to lowest, was: CuAl-hBN, hBN/Al, Al/hBN, and Al-hBN. The hardness, from highest to lowest, was: CuAl-hBN, Al-hBN, hBN/Al, and Al/hBN. Regarding hBN content, Al/hBN had larger and heavier hBN particles, which were less likely to disperse; In CuAl-hBN and hBN/Al, hBN was more prone to being crushed by large nucleating particles, leading to greater loss. In hBN/Al, hBN was more exposed to the flame flow and was more easily burnt off. While in Al/hBN, hBN was protected as a nucleating agent, resulting in the highest content. As for wear performance, the friction coefficients of the four coatings ranged from 0.6 to 1. The Al-hBN coating had the lowest friction coefficient and a smooth curve; CuAl-hBN had the highest friction coefficient with a relatively smooth curve; hBN/Al exhibited a higher friction coefficient with a serrated and fluctuating curve; Al/hBN had a curve with fluctuations during the running-in phase, but became smoother after stabilization, showing the lowest overall friction coefficient. In terms of abrasible performance, the CuAl-hBN coating primarily underwent blade friction wear accompanied by adhesive wear, while the other three coatings exhibit predominantly adhesive wear when paired with TC4. All four coatings offered some level of protection to the friction pin, but the Al/hBN powder coating demonstrated the best wear performance due to the lowest adhesion and smooth wear marks during friction with TC4.

**KEY WORDS:** aluminum-boron nitride; powder particle size; composite form; porosity rate; hardness; hBN burn-off rate; abrasibility; APS

为了增强航空发动机的动力、降低油耗,国内外学者们对其影响因素进行了大量研究。其中,旋转叶片与机匣的间隙变化对航空发动机性能的影响十分显著,在不同的发动机和飞行条件下其影响程度各异,且难以预测<sup>[1-4]</sup>。过大的间隙会导致燃气泄漏和压缩机失速,过小的间隙则容易引起叶片与机匣接触,进而磨损叶片、缩短叶片长度,以及增大叶片与机匣的总体间隙<sup>[5]</sup>。采用可磨耗封严涂层能够在叶片接触过程中仅去除接触点的涂层,基本不影响叶片本

身。这不仅能增大局部间隙,还能最大限度地保持系统的气密性,提高燃油效率和飞行安全,延长大修周期,确保发动机的高效稳定运行<sup>[2]</sup>。为了确保涂层在室温或工况温度下都能获得相对稳定的摩擦学性能,在中低温段,通常使用铝基可磨耗封严涂层,国内外已进行了不少相关研究<sup>[6-17]</sup>。涂层的可磨耗性能作为可磨耗封严涂层最关键的性能指标,受到表面硬度、结合强度、孔隙率,以及可磨耗相的成分、含量及分布等多方面因素的影响<sup>[6-9]</sup>。

Fois 等<sup>[6-7]</sup>研究了低侵入率下铝-六方氮化硼 (Al-hBN) 涂层硬度对钛合金 (TC4) 叶片磨损的影响, 结果表明, 洛氏硬度对磨损和损伤机理有很大的影响, 涂层硬度越高, 则叶片磨损越明显, 涂层的磨损量越小。张佳平等<sup>[8]</sup>从硬度和孔隙率的角度出发, 测试了 Al-hBN (硬度更高) 和铝硅-聚苯酯 (AlSi-PHB, 孔隙率更高) 2 种涂层的可磨耗性能, 高硬度会导致叶片剧烈磨损, 在试验期间观察到叶尖变蓝及强烈的火花现象; 高孔隙率则会使涂层+叶片体系的散热性能变差, 导致涂层软化, 叶尖黏附量增加, 从而加剧磨损, 二者都不利于涂层的可磨耗性。Liu 等<sup>[9]</sup>在研究中发现, 尽管 AlSi-PHB 涂层相对于铝硅-六方氮化硼 (AlSi-hBN) 和铝-铝硅-六方氮化硼 (Al-AlSi-hBN) 具有更低的表面洛氏硬度, 但是在可磨耗测试过程中对叶片的磨损量更多。结合 SEM 图像分析可知, 后两者中第 2 相具有更大的最大尺寸和面积, 因此其可磨耗性能更好。由此可见, 硬度不是衡量涂层可磨耗性的唯一标准, 还与相成分、均匀度, 以及孔隙的大小和分布有关。通过使用不同原料、工艺制得粉末, 利用不同粉末在焰流中熔化效果不同的特点<sup>[10-12]</sup>, 可以调控涂层的硬度、相成分、分布、含量, 从而获得可磨耗性能更好的涂层<sup>[13-14]</sup>。刘笑笑等<sup>[13]</sup>采用固相混合、胶黏团聚、喷雾造粒等 3 种制粉方法, 制备了铝硅聚苯酯复合粉末, 并喷涂。研究发现, 采用胶黏团聚方式制备的粉末的流动性好、粒径可控程度高, 喷涂后得到的涂层的可磨耗相烧损率较低、硬度较低、结合强度较好。Cao 等<sup>[14]</sup>采用水玻璃和乙烯醇 2 种不同的黏结剂制备了 2 种不同的 Al-hBN 粉末, 并进行了喷涂与表征。采用水玻璃为黏结剂的组合的各项力学性能配合更好, 涂层的整体性能良好。目前, 国内针对 Al-hBN 粉末的制备仍处

于仿制阶段<sup>[15-17]</sup>, 鲜有研究不同原始粉末粒径、包覆形式对涂层性能的影响。

本文从原始粉末粒径、粉末复合形式的角度对 Al-hBN 涂层制备及表征的全过程进行研究, 分析不同粒径的 Al 与 hBN 原始粉末组合对成粉性能、涂层性能, 以及涂层中可磨耗相含量及分布的影响, 旨在通过分析 Al 与 hBN 原始粉末的不同组合形式, 提出改进涂层可磨耗性能的新方法。

## 1 实验

### 1.1 粉体制备

如表 1 所示, 选用粒径不同的球状铝粉、hBN 及枝晶状电解 Cu 为原料, 按照相应的质量比例配制。每次制备粉末总质量为 5 kg, 采用机械包覆的造粒方式, 将原料粗混后投入混料机中充分搅拌, 加入黏结剂水玻璃后继续搅拌, 直至黏结剂分散均匀, 再筛分、烘干、二次过筛, 并计算成粉率。采用 FEI Quanta200 FEG 扫描电子显微镜 (SEM) 对粉末进行观察, 并统计粒径。原始粉末材料 SEM 图如图 1 所示, 球状 Al 粉如图 1a、b 所示, 其粒径分别为 3~4  $\mu\text{m}$  和

表 1 原始粉末配比  
Tab.1 Original powder proportions

Category	Particle size/ $\mu\text{m}$			Mass ratio
	Cu	Al	hBN	
Al-hBN		3-4	3-4	4 : 1
CuAl-hBN	30-75	30-40	3-4	1 : 3 : 1
hBN/Al		80-120	30-40	4 : 1
Al/hBN		3-4	80-120	4 : 1

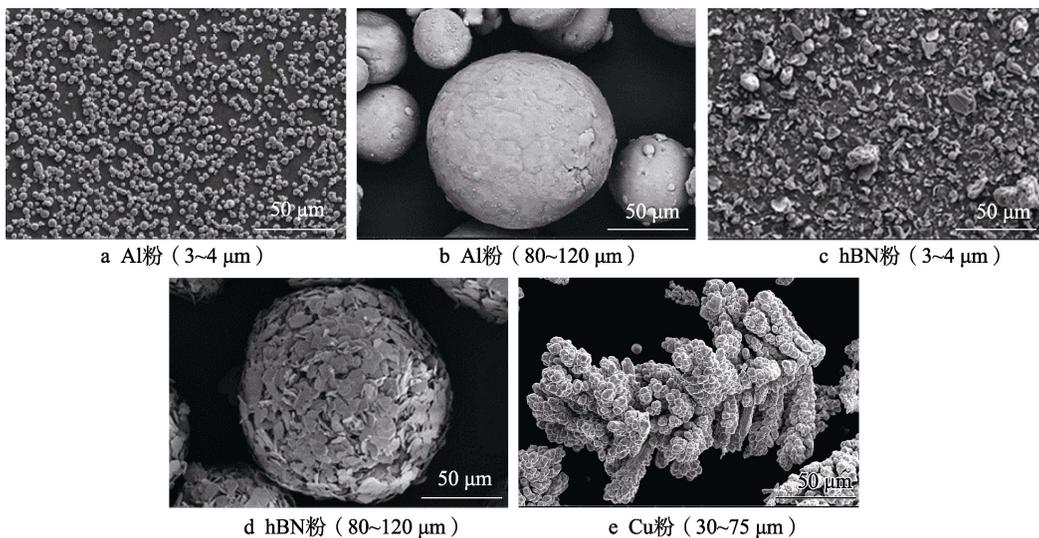


图 1 原料 SEM 图

Fig.1 SEM of raw material: a) Al powder (3-4  $\mu\text{m}$ ); b) Al powder (80-120  $\mu\text{m}$ ); c) hBN powder (3-4  $\mu\text{m}$ ); d) hBN powder (80-120  $\mu\text{m}$ ); e) Cu powder (30-75  $\mu\text{m}$ )

80~120  $\mu\text{m}$ ; 片状 hBN 如图 1c 所示, 其粒径为 3~4  $\mu\text{m}$ , 流动性较差, 容易附着在容器内壁; 球状 hBN 如图 1d 所示, 其粒径为 80~120  $\mu\text{m}$ , 球形度较高, 流动性较好; 枝晶状 Cu 如图 1e 所示, 其粒径为 30~75  $\mu\text{m}$ 。

## 1.2 涂层制备

采用 GTV-MFP-1000 大气等离子喷涂设备(APS), 根据前期大量基础工作得到优化后的喷涂参数(表 2), 在喷涂前测量 4 种粉末的送粉速率。基体选用 TC4 钛合金, 在喷涂前对其进行超声除油和酒精清洗, 并进行喷砂处理, 以活化表面。选用 NiAl 为黏结层, 减小因面层与基体热膨胀系数的不同所引起的热应力, 增强涂层与基体之间的结合强度。

## 1.3 性能表征

采用 XF-02 型霍尔流速计和 XF-20 振实密度仪对 4 种粉末的松装密度、振实密度、霍尔流速、安息角等进行测试, 表征其流动性。采用 FEI Quanta200 FEG 扫描电子显微镜(SEM)对复合粉末和涂层进行微观结构分析。采用 Leica DM ILM 倒置金相显微镜获取涂层孔隙的信息, 在光场下确定 Al 相的分布, 在偏振光场下获取 hBN 相的分布, 将二者叠加后的剩余部分视为孔隙, 放大倍数为 500。采用 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)对沉积态涂层的物相进行检测, 测试范围为 20°~90°, 步长为 2 (°)/min。采用 Leco ONH836 氮氧仪标定涂层中氮元素的质量分数, 对粉体及涂层制备过程中的 hBN 含量进行测定。采用 QUALITEST 电动表面洛氏硬度仪测量涂层的表面硬度。由于涂层表面凹凸不平, 在测试前使用 2 000 目砂纸进行微打磨并清理后, 以圆片圆心为中心等距选取 10 点, 测量标尺为 HR15Y, 加载时间为 5 s, 结果取其平均值<sup>[18-19]</sup>。

采用英国 Bruker 公司生产的 BMT-3 型高温摩擦磨损试验机表征涂层的高温可磨耗性能。实验样品为直径 25.4 mm 的含涂层的 TC4 材料圆片, 包括基体(5 mm)、黏结层(0.125 mm)和封严涂层(2 mm), 样品总厚度约为 7.125 mm。考虑到封严涂层在实际应用中(如发动机叶片尖端等极端工况)的需求, 本实验设计了特殊的摩擦副, 模拟并放大涂层的磨损程度。将摩擦副设计为销状, 总高度为 50 mm, 接触面为 2 mm×2 mm 的正方形, 磨头的径向截面为 4 mm×4 mm, 对顶端接触面进行 R=1 mm 的倒圆角处理。

磨损条件设置: 轴向载荷为 8.5 N, 摩擦半径为 9 mm, 转台转速为 500 r/min, 温度为 450  $^{\circ}\text{C}$ , 加载时间为 10 min, 在空气氛围下进行。在试验开始时, 先将试样置于密闭加热炉内加热, 并逐步升温至 450  $^{\circ}\text{C}$  且稳定后, 启动与试样相连的旋转台。通过施加轴向载荷于摩擦副, 施加转速于试样, 使得涂层与摩擦销接触并摩擦。在试验完成后, 将试样在炉内自然冷却至 100  $^{\circ}\text{C}$ , 然后取出冷却至室温。记录实验后涂层与摩擦副的质量, 分析质量变化情况, 并对磨痕形貌及物相进行详细表征<sup>[20-21]</sup>。再采用 DEKTAK XT 3D 轮廓仪表征涂层磨痕表面的起伏情况及磨痕深度, 同时根据 Metco 公司及北京矿冶研究院企业标准<sup>[22-23]</sup>推荐的涂层深度侵入率(Incursion depth ration,  $R_{\text{ID}}$ )及涂层质量变化率(Incursion quality ration,  $R_{\text{IQ}}$ )对涂层的可磨耗性能进行评价, 计算见式(1)~(2)。

$$R_{\text{ID}} = \begin{cases} \frac{\Delta h}{D} \times 100\%; (\Delta h < 0) \\ \frac{\Delta h}{D + \Delta h} \times 100\%; (\Delta h > 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{\text{IQ}} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\Delta h$  为叶尖磨损前后高度差;  $D$  为摩擦后涂层的深度;  $m_1$  为叶尖磨损前质量,  $m_2$  为叶尖磨损后质量;  $m_3$  为涂层磨损前涂层质量;  $m_4$  为涂层磨损后涂层质量。

通常, 根据  $|R_{\text{ID}}|$  的大小评估涂层可磨耗性能, 结合  $R_{\text{IQ}}$  判定磨损类型, 见式(3)。

$$|R_{\text{ID}}| = \begin{cases} \text{小于}10\%, \text{优异} \\ \text{10}\% \sim \text{20}\%, \text{良好} \\ \text{20}\% \sim \text{30}\%, \text{可接受} \\ \text{大于}30\%, \text{不合格} \end{cases} \quad (3)$$

当  $R_{\text{ID}}$  与  $R_{\text{IQ}}$  为正时, 磨损形式为以叶片磨损为主。当  $R_{\text{ID}}$  为负、 $R_{\text{IQ}}$  为正时, 表明叶片被磨损的同时又被涂层黏附, 叶片长度增加, 但质量减少。由于黏附的涂层密度较轻, 叶片总体质量仍然下降。当  $R_{\text{ID}}$ 、 $R_{\text{IQ}}$  都为负时, 主要发生黏附转移。

考虑到涂层黏附、堆积, 叶片磨损等摩擦行为都较复杂且同时进行,  $R_{\text{ID}}$  和  $R_{\text{IQ}}$  的测量结果存在不准确等情况, 在实际评价过程中还需要结合摩擦后涂层的表面微观形貌、相成分等共同分析。

表 2 等离子喷涂工艺参数  
Tab.2 Technological parameters of plasma spraying

Category	Current/A	Distance/mm	Ar flow/(L·min <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> flow/(L·min <sup>-1</sup> )	Carrier gas/(L·min <sup>-1</sup> )	Speed/(r·min <sup>-1</sup> )
Bond coating	650	120	50	10	2.5	1.7
Top coating	400	110	35	8	2.5	4

## 2 结果与讨论

### 2.1 粉末特性

制备态粉末 SEM 图像如图 2 所示, 团聚粉 (记作 Al-hBN) 见图 2a; 以枝晶 Cu 为骨架的镶嵌粉 (记作 CuAl-hBN) 见图 2b; hBN 包 Al 粉 (记作 hBN/Al) 见图 2c; Al 包 hBN 粉 (记作 Al/hBN) 见图 2d。为了便于描述, 在下文中均用简称。如图 2 所示, 粉末灰白色部分为 Cu, 灰色部分为 Al, 灰黑色部分为 hBN 及少量黏结剂。其中, Al-hBN 粉末用较细小的 Al 与 hBN 颗粒团聚在一起得到。由于原料的粒径较小, 相对于其他成粉, 其比表面积较大, 在等量黏结剂情况下, 其成粉粒径较小, 在过筛时易通过筛网, 因此其成粉率较高。如图 2b 所示, CuAl-hBN 粉末大多以粗 Cu 为骨架, 细 Al 与细 hBN 镶嵌在其内部及表面, 粒径较大, 少部分为 Al-hBN 自团聚, 粒径较小, 成

粉体粒度跨度较大。如图 2c 所示, hBN/Al 粉末以粗 Al 为形核, 细 hBN 粘在其表面, 形成 hBN 包 Al 的包覆结构, 其成粉粒度较大、均匀性好。如图 2d 所示, 在 Al/hBN 粉末中同时存在大量细粉 (15~70 μm) 和粗粉 (120 μm 左右), 细粉为破碎的 hBN 颗粒与 Al 或 Al 自团聚, 粗粉为细 Al 包覆粗 hBN。细粉的数量占比更大, 这是由于相同质量的 100 μm 的球状 hBN 粉末颗粒较少, 且 hBN 表面能低, 无法作为有效的形核基底, 形成的颗粒较疏松、密度较低。若强行增大 Al 的沉积量, 可能因包覆不均匀导致颗粒团聚或破碎, 反而生成更多的细粉, 因此不能包覆太厚的 Al 层。

如表 3 所示, 由于 Al-hBN 粉末的粒度较小, 粒子间容易吸附而聚集成团, 黏结性较大, 因此休止角较大、流动性能较差, 在喷涂过程中送粉速率较低。CuAl-hBN 粉末受到球形度稍差及细粉的影响, 其流动性有所降低, 但其粉末松装密度较大, 因此其送粉

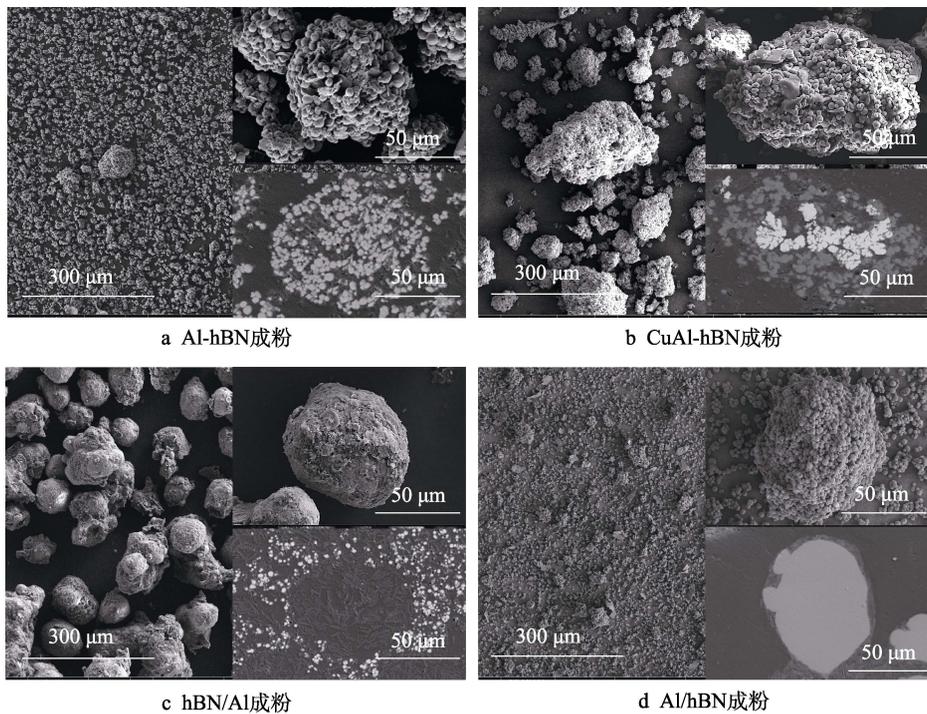


图 2 制备态粉末 SEM 图

Fig.2 SEM image of prepared powder: a) Al-hBN powder; b) CuAl-hBN powder; c) hBN/Al powder; d) Al/hBN powder

表 3 制备态粉末性能  
Tab.3 Properties of prepared powder

Category	Fineness rate/%	Particle size distribution/μm	Loose bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Tapped density/(g·cm <sup>-3</sup> )	Compression ratio	Flowability/[s·(50 g) <sup>-1</sup> ]	Angle of repose/(°)	Powder feed rate/(g·min <sup>-1</sup> )	Deposition rate/(μm·pass <sup>-1</sup> )
Al-hBN	97.0	15-70	0.496	0.877	1.768	203.12	37.7	8.5	13.829
CuAl-hBN	87.1	50-130	0.381	0.900	1.223	130.42	30.1	20.1	22.443
hBN/Al	46.6	80-140	0.452	1.038	1.394	20.23	24.1	24.7	22.170
Al/hBN	47.8	15-130	0.399	0.886	2.221	180.43	34.3	13.5	7.165

速率仍较大。hBN/Al 粉末的球形度较高，休止角较小，不易堆叠，且粒度分布均匀适中，松装密度也较高，因此其流动性最好、送粉率最高。Al/hBN 粉末因含有细粉，其粉末粒径跨度较大，振实密度和松装密度较低，压缩比最大且休止角较大，因此粉末易堆积，导致其流动性较差，在喷涂时送粉速率较低。

### 2.2 涂层组织与性能

采用 4 种不同复合形式粉末制备的涂层的 SEM 截面形貌如图 3 所示。结合涂层表面 XRD (图 4) 可知，图 3 中白色区域的成分为 Cu，灰色区域的成分为 Al，黑色及深黑色区域的成分为涂层中的非金属 hBN 及少量孔隙、氧化物。Al-hBN 涂层如图 3a 所示，Al 相熔化良好，连成一片，形成的涂层较为致密，但

hBN 分布存在偏聚。这可能是因为 hBN 颗粒 (图 1c) 较小且表面不规则、粗糙，更易形成单相团聚体。同时，氮化硼层间的范德华力具有离子键的特征，也使得氮化硼出现再团聚<sup>[24-25]</sup>。CuAl-hBN 涂层如图 3b 所示，与 Al-hBN 涂层相比，其粉末中大粒径枝晶 Cu 粉的引入使得成粉粒度增大，涂层中未熔颗粒增多，大孔增加。同时，以枝晶 Cu 为骨架，粒度更小且混合均匀的铝和氮化硼粉末可嵌入枝晶 Cu 间隙被固定，从而可以缓解喷涂过程中 Al 和 hBN 的脱离，不易出现某一组分的偏聚，又减小了 hBN 的烧损，增大了 hBN 在涂层中的含量，从而提升了涂层中各相分布的均匀性<sup>[26-27]</sup>。hBN/Al 涂层如图 3c 所示，颗粒熔融不充分，hBN 相较少，涂层的组织均匀性较差。Al/hBN 涂层如图 3d 所示，涂层内 Al 与 hBN 熔化良好，层状结构明显，各相分布均匀。

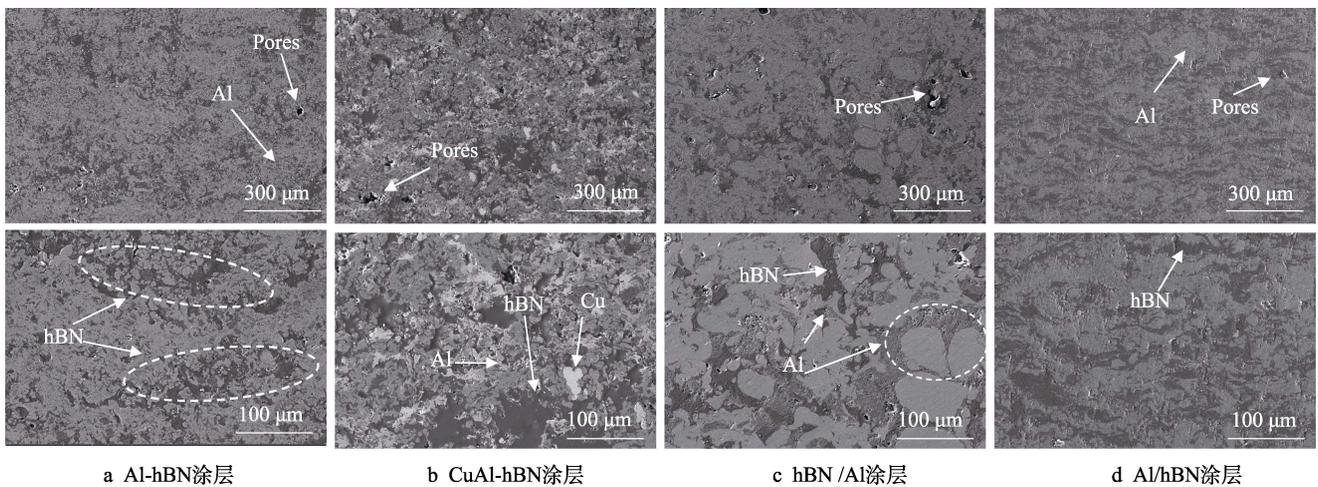


图 3 沉积态涂层 SEM 图  
Fig.3 SEM image of coating in deposited state: a) Al-hBN coating; b) CuAl-hBN coating; c) hBN/Al coating; d) Al/hBN coating

孔隙率及其分布特征是耐磨密封涂层的重要技术指标<sup>[28-29]</sup>，由于在 SEM 下孔隙与 hBN 的衬度接近，因此难以区分。hBN 为结晶体，它在偏振光下清晰可见<sup>[5-6,29]</sup>，因此采用 Leica DM ILM 倒置金相显微镜对涂层截面同一位置，分别在光场和交叉偏振光下拍照，获得可区分金属相的光场图像 (图 5a) 和可区分 hBN 的交叉偏振光图像 (图 5b)。利用 Image J 将图 5a 和图 5b 合成，如图 5c 所示。考虑到孔隙的不规则性，采用 Image J 图像分析软件进行二值化后，采用 Trainable weka segmentation 模块对合成图像进行 AI 自动分割，如图 5d 所示，最终计算出孔隙率，具体过程如图 5 所示。对所制备的 4 种涂层采用上述方法分析后可知，Al-hBN 粉末在熔流中熔化完好，孔隙主要以沉积过程中熔滴冷却、搭接时形成气孔为主，其形状为类球状，直径较小；其他 3 种涂层，除了存在与 Al-hBN 涂层相同的细孔外，还存在超过 50 μm 的大孔。这是由于大粒径粉末颗粒在熔流中熔

化不够充分，半熔融或未熔融颗粒发生碰撞型损失，形成空洞，或在金相制样过程中被拔出。Al/hBN 与 hBN/Al、CuAl-hBN 相比，其孔隙率略低，这是由其大颗粒粉体数量较少所致。

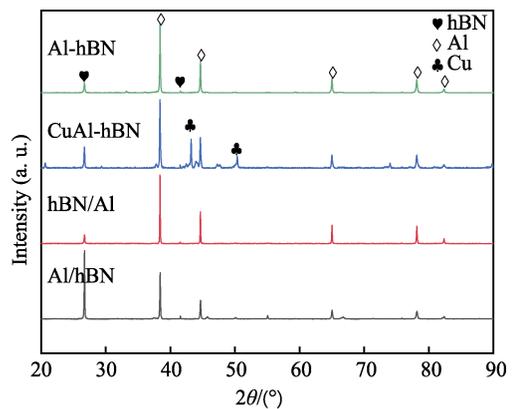


图 4 沉积态涂层 XRD  
Fig.4 XRD of coating in deposited state

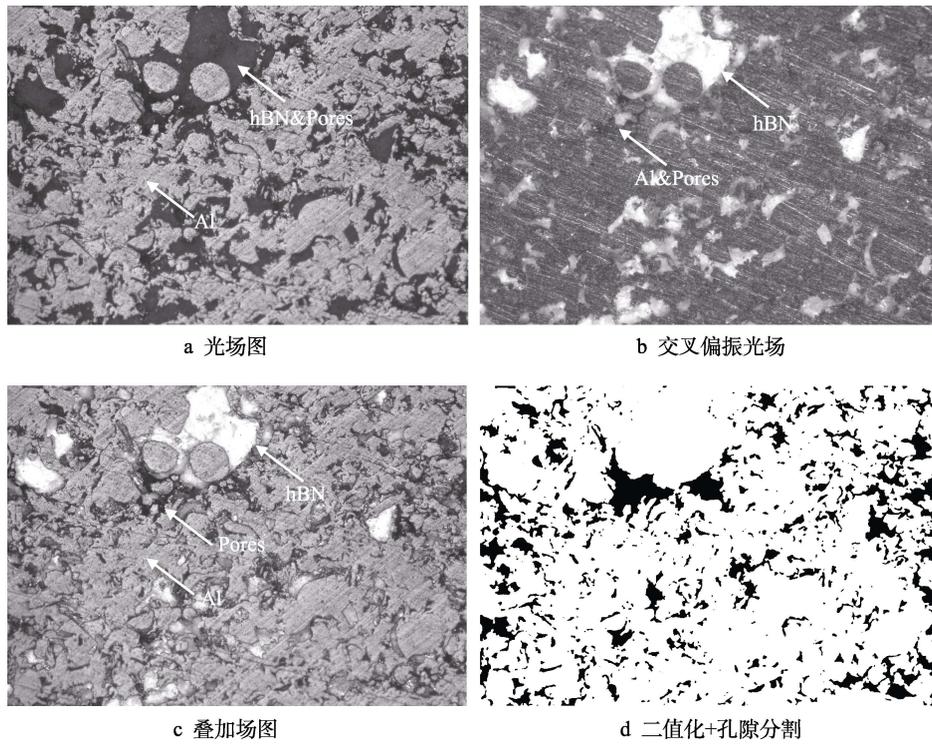


图 5 沉积态 hBN/Al 涂层光镜图

Fig.5 Optical microscopy image of hBN/Al coating in deposited state: a) light field pattern; b) cross polarized light field; c) superposition field pattern; d) binarization + pore segmentation

涂层的硬度与材料、制备方法及孔隙率等结构特征密切相关<sup>[30-32]</sup>。由 4 种涂层的孔隙率及洛氏硬度结果 (表 4) 可知, CuAl-hBN 涂层的孔隙率和硬度都最大; Al-hBN 涂层较为致密, 硬度较大; hBN/Al 涂层的硬度较低、孔隙大; Al/hBN 涂层的孔隙率小, 但涂层硬度最小。这是因为在 Al-hBN 型涂层中, 由于粉末粒径很小, 粒度分布均匀, 在焰流中熔化较为充分, 粉末形成的涂层中 Al 相与 hBN 相均匀分布, 涂层较为致密, 涂层也具有较高的硬度。CuAl-hBN 涂层具有最高的表面洛氏硬度和孔隙率, 这是由于加入的 Cu 的硬度比 Al 大, 因此涂层总体硬度增大。Cu 与 Al 的冷却速率不同, 导致气孔出现, 使得涂层中细孔数增加。与 Al-hBN 粉末相比, 以 Cu 为骨架, 使得粉末粒径增大, 粒度分布不均匀, 含 Cu 的大颗粒粉末在焰流中熔化不充分, 在沉积过程中发生碰撞型损失, 结合不紧密的冷粒子在制样过程中脱落, 也会使大孔增多。这与 hBN/Al 涂层中出现大孔隙的原因相同, 同时因 hBN 含量较多, 拉低了整体涂层的硬

度, 又在焰流中先被烧损, 而内部的 Al 颗粒含量少且未能充分熔融, 最终导致 hBN/Al 涂层的硬度较低。Al/hBN 粉末在高温焰流中熔化良好, hBN 在 Al 中均匀分布, 涂层层状结构明显, 孔隙率较低。基于粉末粒径、密度, 以及在等离子射流中的位置、加温加速等诸多因素, 导致其涂层的硬度最低。

### 2.3 hBN 含量变化

在铝-六方氮化硼体系的涂层中, 一方面 hBN 可以降低涂层的硬度, 更好地适配于 TC4 叶片, 起到保护作用; 另一方面, 还具有抑制黏附及增大热传导速率的作用。在由粉体原料—制备态成粉—沉积态涂层这一过程中, hBN 会经历 2 次损耗, 一是在造粒过程中由于 hBN 的密度很小、黏性较大, 容易黏附在造粒设备内壁或从缝隙中逸散; 其二, 在喷涂过程中, 焰流中心的瞬时温度可达上万摄氏度, hBN 容易达到沸点而烧损<sup>[26, 33]</sup>。由此, 对涂层粉末态和沉积态下 hBN 含量及其变化进行了统计与分析。在制粉过程中, 4 种粉体的总物料质量相同, hBN 的质量、水玻璃的用量也相同, 理论上 hBN 的含量应为略小于 20% (质量分数) 的某个固定值。使用氮氧元素分析仪测出 4 种成粉及与其对应涂层内 N 的含量, 计算得出对应的 hBN 含量和烧损率, 如表 5 所示。

由表 5 可知, 成粉中的 hBN 含量相较于原料都有所下降, 在喷涂过程中 hBN 也都有些损耗。其中, Al/hBN 型在造粒过程中的损耗较小, 这是由于此类

表 4 4 种涂层孔隙率和洛氏硬度结果  
Tab.4 Pore and Rockwell hardness results of four types of coatings

Category	Porosity/%	Rockwell hardness (HR15Y)
Al-hBN	9.0	52.2
CuAl-hBN	17.2	59.4
hBN/Al	16.2	43.9
Al/hBN	11.4	35.4

型粉末的 hBN 粒度较大、质量大，不易逸散。在造粒过程中，CuAl-hBN 和 hBN/Al 粉末的 hBN 损耗较大，一方面大颗粒、高密度的形核容易将 hBN 压碎，使得其颗粒更加细小，更易逸散或黏附于内壁；另一方面，过筛时黏附的 hBN 颗粒更多，较大粒径的 hBN 颗粒将无法通过筛网而废弃，造成 hBN 的损失量更大。在沉积态涂层中，hBN/Al 中 hBN 的含量最低、烧损率最高。这是由于粉体颗粒在接触高温焰流时，外部的 hBN 最先接触焰流，在过高的温度下烧损。与 hBN/Al 相反，Al/hBN 的 hBN 烧损率最低，这得益于其 Al 包覆 hBN 形核的结构，在高温焰流中，Al 对 hBN 起到了良好的保护作用。与 hBN/Al 型相比，Al-hBN 型、CuAl-hBN 型涂层的 hBN 烧损率较低。这是基于其细粉团聚型的结构，使得大部分形核内部的 hBN 未被蒸发，枝晶 Cu 的添加又进一步增强了保护作用，使得 CuAl-hBN 型涂层的 hBN 烧损率进一步降低。

表 5 hBN 的含量及变化  
Tab.5 Content and variation of hBN

Category	Powdered/%	Deposited/%	Burnout rate/%
Al-hBN	18.74	17.56	6.76
CuAl-hBN	16.79	16.12	4.01
hBN/Al	14.93	10.04	32.74
Al/hBN	19.13	18.76	1.93

## 2.4 可磨耗性能分析

4 种制备态涂层在 450 °C 下摩擦测试的结果如

表 6 所示，可知 4 种涂层的厚度及质量均有所下降，表明在叶片与涂层的摩擦过程中，主要以涂层磨损为主，4 种涂层都在一定程度上起到了保护叶片的作用。其中，hBN/Al 涂层的质量减少量最大，对磨副（叶片）的增长量、质量增量都最大，表明在摩擦过程中 hBN/Al 涂层与叶片之间发生了剧烈摩擦，且磨损类型以黏附磨损为主。CuAl-hBN 涂层的质量减少量较小，且对磨叶片的质量和长度均有所降低，表明在摩擦过程中其对磨副有所磨损。Al-hBN 涂层的质量变化、磨痕深度变化都不大，其对磨副的长度和质量增量也不大。Al/hBN 涂层的磨损量较小，对磨副质量和长度的变化也较小，未明显黏附和磨损。

4 种涂层摩擦后的  $R_{ID}$ 、 $R_{IQ}$  如图 6 所示， $R_{ID}$ 、 $R_{IQ}$  大于 0，表明其磨损形式以对磨副磨损为主， $R_{ID}$ 、 $R_{IQ}$  小于 0，则表示涂层黏附转移到对磨副上； $R_{ID}$ 、 $R_{IQ}$  越接近于 0，则表示涂层的可磨耗性能越好。由图 6 可知，Al-hBN 型、hBN/Al 型、Al/hBN 型涂层的  $R_{ID}$ 、 $R_{IQ}$  均为负，表明它们与叶片的主要磨损形式均为黏附转移，不排除伴随少量叶片磨损的可能，还需要结合其他实验结果具体分析。CuAl-hBN 涂层与叶片摩擦的主要失效形式为叶片磨损，伴随着少量涂层黏附转移。从评价指标来看，Al/hBN 的  $R_{ID}$  绝对值为 9.7%，小于 10%，表明其可磨耗性评价为优秀；其他 3 种涂层的可磨耗性评价为可接受。

在高温高速摩擦磨损过程中，全局摩擦因数如图 7 所示。可知，4 种涂层的摩擦因数在 0.6~1 之间。其中，Al-hBN 涂层的摩擦因数最小，这与其表面粗糙度最低有关，其表面较为光滑。由于 Al-hBN 型

表 6 高温磨损实验涂层及磨头质量变化

Tab.6 Changes in quality of coating and friction pair in high temperature wear test

Category	Coating quality change/g	Friction pair quality change/g	Coating wear depth/ $\mu\text{m}$	Friction pair length variation/ $\mu\text{m}$
Al-hBN	-0.126 65	0.001 18	-454.01	139.74
CuAl/hBN	-0.064 4	-0.000 15	-245.71	-79.85
hBN/Al	-0.568 29	0.001 47	-1 081.17	389.28
Al/hBN	-0.021 68	0.000 14	-359.80	34.9

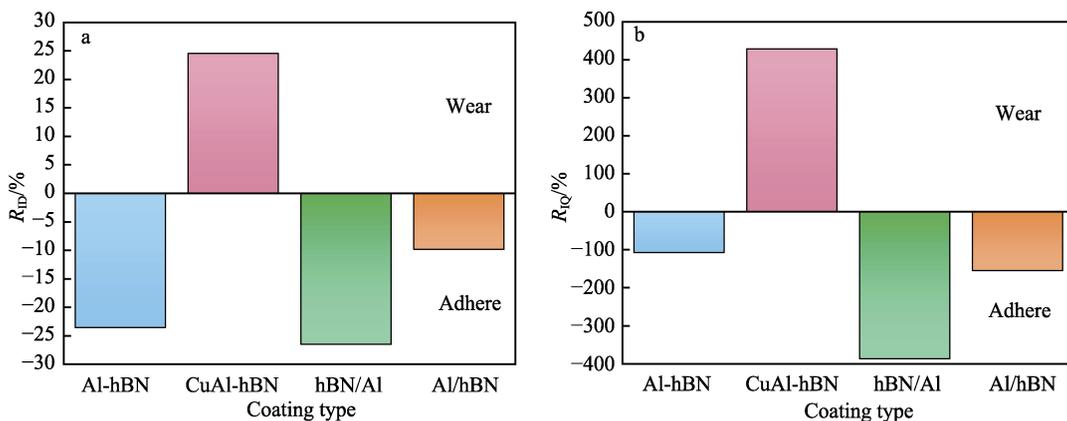


图 6 涂层/摩擦销长度变化 ( $R_{ID}$ ) (a) 及涂层/摩擦销质量变化 ( $R_{IQ}$ ) (b)  
Fig.6 Coating/friction length change ratio ( $R_{ID}$ ) (a) and coating/friction mass change ratio ( $R_{IQ}$ ) (b)

复合粉末的粒度较小, 在焰流中熔化良好, 形成的涂层组织的均匀度较高, 在摩擦过程中可以均匀地被去除, 这也是其曲线较为平缓、光滑的原因。CuAl-hBN 的摩擦因数最大, 且曲线较均匀、光滑。这是由于其表面粗糙度较大, 且涂层的硬度最高, 涂层较均匀连续。hBN/Al 涂层的摩擦因数较大, 曲线呈锯齿状, 且在 530 s 左右突然下降, 随后剧烈波动。hBN/Al 涂层摩擦因数较大的原因是其表面粗糙度较大, 摩擦时与叶片接触面积较大。曲线不光滑的原因是因为 hBN/Al 型粉末的粒度较大, 在焰流中熔化得不够充分, 形成的涂层组织不均匀, 在摩擦时熔融的热粒子与冷粒子的摩擦情况不一致。涂层摩擦因数突然下降, 结合涂层被磨去的量较多, 叶片增长较多, 可判断涂层不断地在向叶片转移黏附, 当黏附量达到一定值时, 摩擦加剧, 应力过大, 导致黏附层断裂后又重新被碾压, 重新涂敷在涂层上。Al/hBN 涂层的摩擦因数在磨合阶段的曲线有所波动, 在磨合稳定后曲线较为平滑, 总体摩擦因数较小, 这与其较高的 hBN 含量及较好的层状结构有关。

4 种涂层及其对磨叶片磨损后的宏观图如图 8 所示。由图 8a 可知, 除了在 Al-hBN 涂层表面观察到正常沟槽外, 还观察到类波浪状的径向条纹。如图 8a1 所示, 在其摩擦销上观察到部分灰色物质, 即黏附转移的涂层。CuAl-hBN 涂层表面摩擦图像如图 8b1 所示, 在摩擦销表面发现大量银白色亮条纹, 表明摩擦销顶部被涂层磨损。如图 8c 所示, hBN/Al 型涂层的磨削量最大, 这与其组织中较大粒径粉末未熔相

关。如图 8c1 所示, 在磨头上观察到大量涂层黏附转移现象, 基本铺满整个磨头表面。Al/hBN 涂层的磨痕宏观形貌如图 8d 所示, 可知磨痕表面颜色由原始涂层的灰白变成灰黑, 涂层中的磨痕较宽。由图 8d1 可知, 磨头上黏附转移的涂层量较少, 表明其摩擦性能良好。结合三维轮廓仪扫描结果 (图 9) 可知, Al-hBN 型涂层表面沟槽较为宽大, 表明磨损不算严重; CuAl-hBN 型涂层表面沟槽狭窄、数量多且密集, 表明摩擦较为严重; hBN/Al 型涂层表面沟槽较少, 结合图 7 所示涂层磨痕深度及摩擦因数突变可知, 此涂层与叶片之间的黏着磨损较为严重, 且黏附层发生断裂, 在之后的磨损过程中发生磨粒磨损, 被涂抹在磨痕表面, 覆盖了磨痕, 使得磨损痕迹不明显; Al/hBN

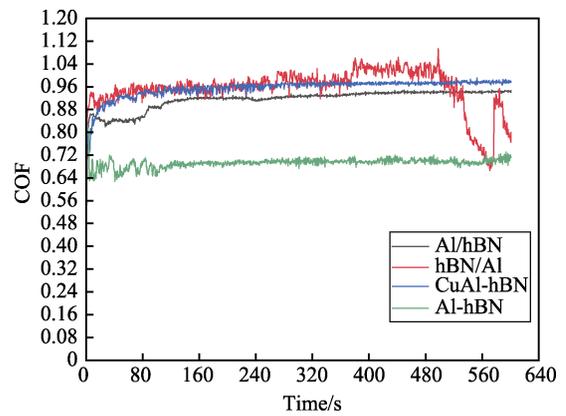


图 7 涂层-摩擦销的摩擦因数  
Fig.7 Friction coefficient of coating - friction cutting

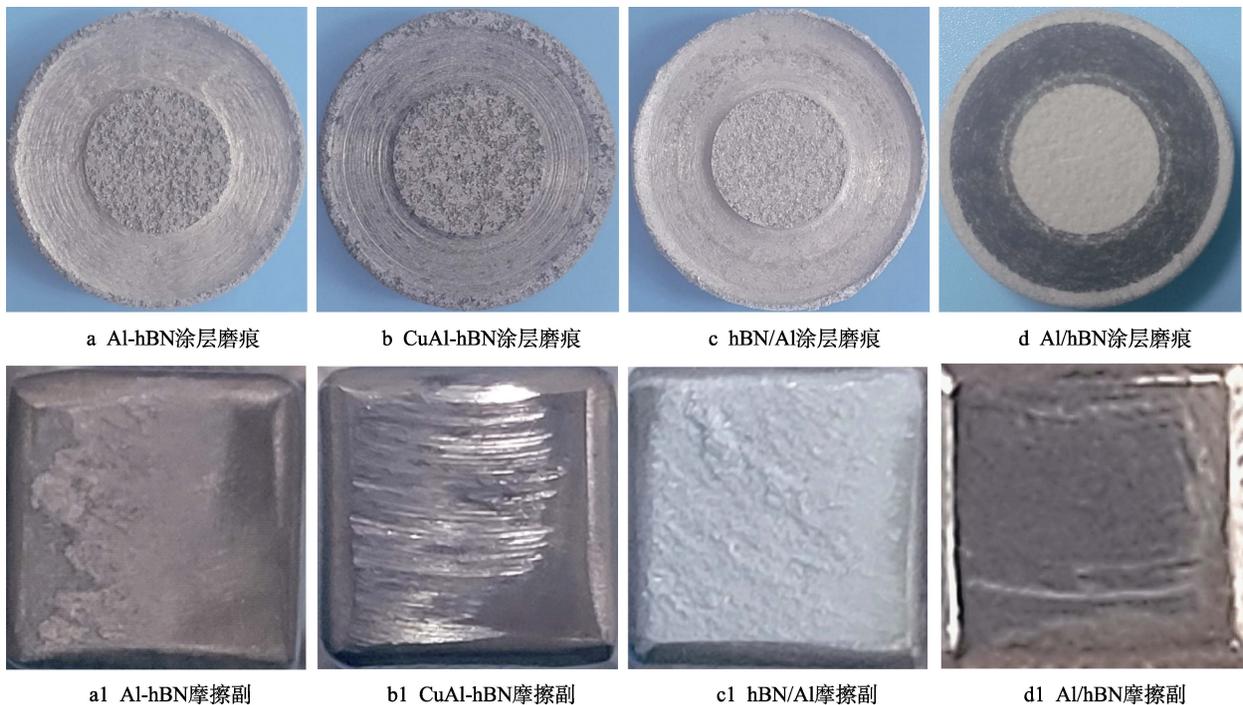


图 8 摩擦测试结果宏观图

Fig.8 Macroscopic view of friction test results: a) Al-hBN coating abrasion mark; b) CuAl-hBN coating abrasion mark; c) hBN/Al coating abrasion mark; d) Al/hBN coating abrasion mark; a1) Al-hBN friction pair; b1) CuAl-hBN friction pair; c1) hBN/Al friction pair; d1) Al/hBN friction pair

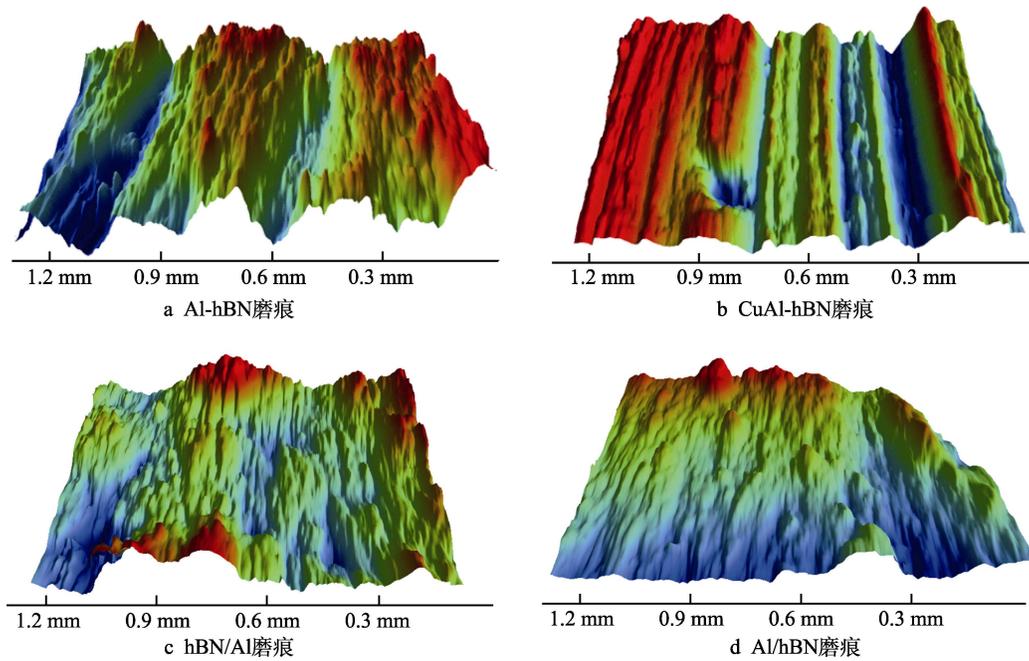


图9 三维轮廓仪扫描图

Fig.9 Three position profilometer scan: a) Al-hBN abrasion mark; b) CuAl-hBN abrasion mark; c) hBN/Al abrasion mark; d) Al/hBN abrasion mark

涂层表面较为平整,磨痕不明显,考虑涂层硬度、结合强度可知,Al/hBN型涂层与摩擦销的契合度较好,二者的磨损量较低。

本测试对摩擦副接触面形状进行了改进,采用平面方形磨头而非球形磨头,能起到放大摩擦效果的作用,也能更好地模拟叶片与封严涂层的摩擦行为。4种涂层磨痕表面SEM图如图10所示。由图10a、e及图9a可知,Al-hBN涂层表面形貌主要以切削与犁削形成的沟壑为主,同时伴有少量残余磨损颗粒留存,表明黏附层发生了部分脱落,重新涂抹到涂层上。由图

10b、f及图9b可知,CuAl-hBN涂层磨痕表面有大量狭窄而密集的沟槽,表明涂层磨痕发生了剧烈磨粒磨损和少量的氧化磨损,面应力较大。由表7的EDS能谱检测结果可知,在涂层表面检测到较高的氧含量,同时检测到叶片独有的Ti元素。结合图11的XRD扫描图可知,由于摩擦过于剧烈,因此局部温度升至600℃,满足CuO的生成条件,达到了Cu和Al的相变点,随之产生硬质相Al<sub>2</sub>Cu,且随着摩擦时间的延长和局部温度的下降,Al<sub>2</sub>Cu逐渐向Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>转变。这些硬质磨粒加剧了涂层对摩擦销的

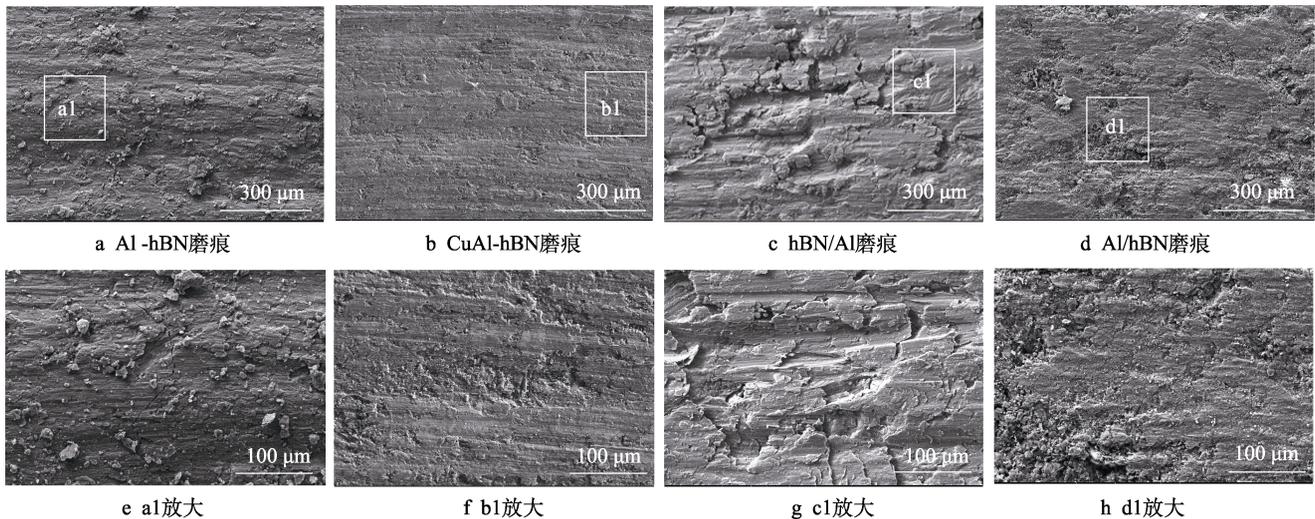


图10 摩擦测试后表面SEM图

Fig.10 SEM image of surface after friction test: a) Al-hBN abrasion mark; b) CuAl-hBN abrasion mark; c) hBN/Al grinding mark; d) Al/hBN abrasion mark; e) a1 zone high magnification; f) b1 zone high magnification; g) c1 zone high magnification; h) d1 zone high magnification

磨损,如图 8b1 所示<sup>[33-34]</sup>。如图 10c、g 所示, hBN/Al 涂层表面磨痕较深, 结合图 9c 可知涂层表面黏附着大面积的块状物。由图 10c、g 可知, 涂层大面积被磨头去除, 并黏附在磨头上, 堆积到一定程度后断裂, 重新被碾压而涂抹在涂层上。如图 10d、h 所示, Al/hBN 涂层表面较为平整, 可以看到大块的 hBN 被碾压, 并均匀涂抹在涂层表面, 形成了良好的润滑层, 故其可磨耗性最好。

表 7 涂层磨痕表面 EDS 分析  
Tab.7 EDS analysis of coating abrasion mark

Category	Mass fraction/%					
	B	Al	Cu	O	Ti	Si
Al-hBN	7.53	52.64	0	12.11	0.01	1.33
CuAl-hBN	8.92	48.98	4.89	14.07	0.18	1.55
hBN/Al	6.39	60.43	0	9.67	0.09	1.40
Al/hBN	12.37	50.07	0	10.03	0	1.02

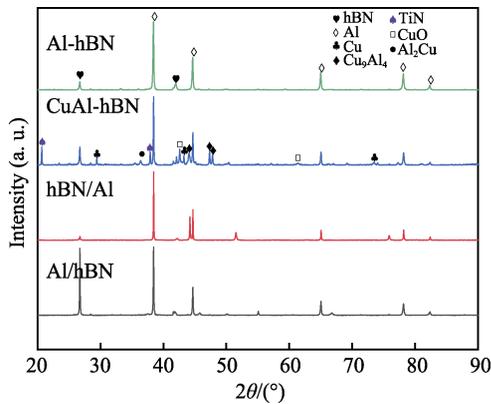


图 11 磨痕 XRD 图

Fig.11 XRD pattern of abrasion marks

### 3 结论

研究了团聚型 (Al-hBN)、镶嵌型 (CuAl-hBN)、hBN 包 Al 型 (hBN/Al)、Al 包 hBN 型 (Al/hBN) 等 4 种不同复合形式的粉末特征, 在大气等离子喷涂中的熔化行为, 以及对涂层组织和性能的影响, 得出以下结论。

1) 采用细 Al 和细 hBN 制备的团聚型粉末 (Al-hBN), 颗粒内部由细微的 Al 和 hBN 非均匀分散组成, 粉末的粒度较小, 流动性较差。在喷涂过程中, 熔化效果好, 涂层的孔隙率较小, 硬度较高。hBN 在 Al 中存在偏聚现象, 但烧损率不高。在高温摩擦过程中, 以黏着磨损为主。

2) 采用枝晶 Cu 为骨架形成的镶嵌型粉末 (CuAl-hBN), 其细微的 Al 与 hBN 均匀镶嵌在 Cu 骨架内, 粉末粒度大大增加, 流动性得到提升。在喷涂过程中, 送粉速率、沉积效率及涂层中 hBN 分布均匀性均得到提升。涂层的孔隙数量较多, 且存在大

孔, 但涂层的硬度仍然最高。在与 TC4 摩擦销的摩擦过程中, 以摩擦销摩擦磨损为主, 同时伴随着涂层黏着磨损。

3) 采用细 hBN 和粗 Al 制备的包覆型粉末 (hBN/Al), 其细微的 hBN 均匀包覆在 Al 外部, 形成的粉末的粒度较大且均匀, 流动性较好。在喷涂过程中, 送粉率、沉积效率较高。在涂层中, hBN 的含量较低, 未熔颗粒较多, 孔隙率较大, 硬度较低。hBN/Al 型涂层在摩擦销顶部的黏附量最大。

4) 采用细 Al 和粗 hBN 制备的包覆型粉末 (Al/hBN) 及细 Al 自团聚型粉末, 其细微的 Al 均匀包覆在 hBN 外部, 或自团聚为小颗粒, 粉末的松装密度较小, 流动性较差。涂层组织分布均匀, 层状结构明显, 致密度较高, 硬度较小; hBN 烧损率较低, 含量较高; 在与 TC4 摩擦销对磨的过程中, 其黏附量较小, 可磨耗性能最好。

### 参考文献:

- [1] 张少平, 苏廷铭, 罗秋生, 等. 航空发动机压气机径向间隙设计方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2011, 24(4): 25-27.  
ZHANG S P, SU T M, LUO Q S, et al. Design Method for Compressor Radial Clearance of an Aero-Engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(4): 25-27.
- [2] 王涛, 陈思宇, 孟琨, 等. 航空发动机机匣-叶尖封严涂层结构设计及制备研究进展[J]. 中国表面工程, 2023, 36(1): 1-11.  
WANG T, CHEN S Y, MENG K, et al. Research Progress on Structural Designs and Preparations of Sealing Coating between Aero-Engine Casing and Blade Tip[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(1): 1-11.
- [3] 胡延青, 申秀丽. 航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 60-67.  
HU Y Q, SHEN X L. Overview on Aeroengine Radial Tip Clearance[J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 60-67.
- [4] SCHMID R K, GHASRIPOOR F, DORFMAN M, et al. An Overview of Compressor Abradables[C]// ITSC, 2000: 1087-1093.
- [5] 王旭东, 王玉江, 张学敏, 等. 铝基可磨耗封严涂层制备及性能评价研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(5): 967-982.  
WANG X D, WANG Y J, ZHANG X M, et al. Progress in the Preparation and Performance Evaluation of Aluminum Based Abradable Seal Coating[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(5): 967-982.
- [6] FOIS N. Investigation and Characterisation of the Wear Mechanisms of Abradable Compressor Linings[D]. Sheffield: The University of Sheffield, 2015: 44-47.
- [7] FOIS N, WATSON M, MARSHALL M B. The Influence

- of Material Properties on the Wear of Abradable Materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(2): 240-253.
- [8] 张佳平, 高祺洋, 李浩宇, 等. 高速刮擦条件下两种铝基封严涂层的可刮削性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 90-97.  
ZHANG J P, GAO S Y, LI H Y, 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.
- [9] LIU J M, YU Y G, LIU T, et al. The Influence of Composition and Microstructure on the Abradability of Aluminum-Based Abradable Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(6): 1095-1103.
- [10] 陈国安, 颜永根, 杨王玥, 等. 粉末的物理性能对热喷涂涂层的影响[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(1): 55-60.  
CHEN G A, YAN Y G, YANG W Y, et al. Physical Property Effect of Powder on Thermal Spraying Coatings [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(1): 55-60.
- [11] 杨焜, 邓畅光, 刘敏, 等. 大气等离子喷涂不同粉末在不锈钢基体上沉积行为的研究[J]. 材料研究与应用, 2013, 7(3): 162-167.  
YANG K, DENG C G, LIU M, et al. Splat Formation Process of Different Powders on Stainless Steel Substrate in Atmospheric Plasma Spraying[J]. Materials Research and Application, 2013, 7(3): 162-167.
- [12] 韩志海, 王海军, 白宇, 等. 喷涂粒子在等离子体射流中的加热历程及熔化状态研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(2): 35-43.  
HAN Z H, WANG H J, BAI Y, et al. The Study of Heat Process and Molten State of Sprayed Particles in Plasma Jet[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(2): 35-43.
- [13] 刘笑笑, 章德铭, 刘建明, 等. 制粉工艺对铝基聚苯酯封严涂层材料粉末及涂层性能影响研究[J]. 热喷涂技术, 2011, 3(3): 24-27.  
LIU X X, ZHANG D M, LIU J M, et al. The Influence of Milling Technology on Aluminum-Based PHB Powder and Coating Performance[J]. Thermal Spray Technology, 2011, 3(3): 24-27.
- [14] CAO Y X, LIU W, DU L Z, et al. Preparation and Property of Al/hBN Plasma Sprayed Abradable Sealing Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S2): 813-816.
- [15] 郭永明, 朱胜, 宋占永, 等. 亚音速火焰喷涂铝硅/聚苯酯涂层的组织与摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 85-90.  
GUO Y M, ZHU S, SONG Z Y, et al. Microstructure and Friction Behavior of AlSi/Polyester Compositing Coating Prepared by Subsonic Flame Spraying[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 85-90.
- [16] 肇国锋, 袁福河, 张佳平, 等. 一种等离子喷涂 Al/BN 封严涂层[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(1): 27-30.  
ZHAO G F, YUAN F H, ZHANG J P, et al. An Atmospheric Plasma Sprayed Al/BN Abradable Coating [J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(1): 27-30.
- [17] 刘伟, 周奎, 杜令忠, 等. 可磨耗封严涂层的摩擦磨损和抗冲蚀性能[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(4): 34-37.  
LIU W, ZHOU K, DU L Z, et al. Frictional Wear Resistance and Erosion Resistance of Abradable Seal Coating[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 4(4): 34-37.
- [18] 虞伟良. 硬度测试技术的新动态与发展趋势[J]. 理化检验(物理分册), 2003, 39(8): 401-405.  
YU W L. Study of the Latest Development and Trend of Hardness Measurement Technology[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A Physical Testing, 2003, 39(8): 401-405.
- [19] 李晓东. 洛氏硬度试验结果的影响因素[J]. 理化检验(物理分册), 2010, 46(4): 274-276.  
LI X D. Influence Factors on Rockwell Hardness Test Results[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A, Physical Testing), 2010, 46(4): 274-276.
- [20] 李荣泽, 赵晓琴, 段文山, 等. 等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层与高硬配副的摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 184-195.  
LI R Z, ZHAO X Q, DUAN W S, et al. Study on Tribological Properties of Plasma Thermal Spraying Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coating Sliding Against Counterparts with High Hardness[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 184-195.
- [21] 刘畅, 张春晖, 杜鹏程, 等. TC4 钛合金表面超音速火焰喷涂防护涂层及其摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2024, 53(5): 69-77.  
LIU C, ZHANG C H, DU P C, et al. Tribological Properties of HVOF-Sprayed Protective Coatings on TC4 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2024, 53(5): 69-77.
- [22] HOPKINS, Noel Paul. Abradable Coatings - from Black Art to Materials Science[D]. Wales: Swansea University, 2007: 175-179.
- [23] 矿冶科技集团有限公司. 封严涂层可磨耗性能试验及评价方法: Q/BK908—2014[S]. 北京: 北京矿冶研究总院, 2014.  
Bgrimm Technology Group. Test and Evaluation Methods for Wear Resistance of Sealing Coatings: Q/BK908-2014[S]. Beijing: Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, 2014.
- [24] PAKDEL A, BANDO Y, GOLBERG D. Nano Boron Nitride Flatland[J]. Chemical Society Reviews, 2014, 43(3): 934-959.
- [25] GAO Z, ZHI C, GOLBERG D et al. Noncovalent Functionalization of Boron Nitride Nanotubes in Aqueous Media[J]. Nanobiomedicine, 2014, 20(8): 1575-1581.
- [26] 闫希彦, 杨焜, 曾克里, 等. 大气等离子喷涂 CuAl/hBN 涂层的高温磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(12): 844-851.

- YAN X Y, YANG K, ZENG K L, et al. High-Temperature Wear Property of CuAl/hBN Coating Prepared by Atmospheric Plasma Spraying[J]. *Electroplating & Finishing*, 2022, 41(12): 844-851.
- [27] 杨焜, 曾克里, 闫希彦, 等. 一种铜铝氮化硼复合粉末及其制备方法和应用: 中国, 113333741A[P]. 2021-09-03.
- YANG K, ZENG K L, YAN X Y, et al. Copper-Aluminum Boron Nitride Composite Powder and Preparation Method and Application Thereof: China, 113333741A[P]. 2021-09-03.
- [28] DESHPANDE S, KULKARNI A, SAMPATH S, et al. Application of Image Analysis for Characterization of Porosity in Thermal Spray Coatings and Correlation with Small Angle Neutron Scattering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 187(1): 6-16.
- [29] 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.
- [30] ENFERAD S, PETIT J, GAIANI C, et al. Effect of Particle Size and Formulation on Powder Rheology[J]. *Particulate Science and Technology*, 2021, 39(3): 362-370.
- [31] VEINTHAL R, KULU P, KAERDI H. Microstructural Aspects of Abrasive Wear of Composite Powder Materials and Coatings[J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2011, 40(1/2): 92.
- [32] 黄继波, 王卫泽. 粉末粒径对等离子喷涂 YSZ 涂层孔隙结构的影响[J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 29-34.
- HUANG J B, WANG W Z. Effects of Particle Size on Pore Structure of Plasma-Sprayed YSZ Coatings[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(4): 29-34.
- [33] 闫希彦, 杨焜, 曾克里, 等. hBN 含量对 CuAl/hBN 封严涂层高温磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2023, 52(4): 192-201.
- YAN X Y, YANG K, ZENG K L, et al. The Influence of hBN Content on High Temperature Wear Properties of CuAl/hBN Abradable Seal Coating[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(4): 192-201.
- [34] WU S P, CAI X L, CHENG Y C, et al. Evolution of Intermetallic Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> during the Mechanical Alloying of Cu-Al Mixtures in High-Energy Ball Milling[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2021, 50(8): 4549-4556.
- 
- (上接第 246 页)
- [30] 张勇, 郭龙龙, 鞠录岩, 等. 大气等离子喷涂流场与粒子特性分析[J]. *粉末冶金工业*, 2024, 34(2): 49-55.
- ZHANG Y, GUO L L, JU L Y, et al. Analysis of Flow Field and Particle Characteristics of Atmospheric Plasma Spraying[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2024, 34(2): 49-55.
- [31] 曹凯博. 等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷涂层的机理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 22-29.
- CAO K B. Study on the Mechanism of Plasma Spraying Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Coating[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006: 22-29.
- [32] 杨焜, 邓畅光, 刘敏, 等. 大气等离子喷涂不同粉末在不锈钢基体上沉积行为的研究[J]. *材料研究与应用*, 2013, 7(3): 162-167.
- YANG K, DENG C G, LIU M, et al. Splat Formation Process of Different Powders on Stainless Steel Substrate in Atmospheric Plasma Spraying[J]. *Materials Research and Application*, 2013, 7(3): 162-167.
- [33] 高硕洪, 刘建武, 刘敏, 等. APS 制备 PFA/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合陶瓷疏水涂层的性能及沉积机制[J]. *表面技术*, 2018, 47(4): 64-72.
- GAO S H, LIU J W, LIU M, et al. Properties and Deposition Mechanism of PFA/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Ceramic Hydrophobic Coating Prepared by APS[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(4): 64-72.
- [34] 罗兴, 贺定勇, 周正, 等. AlMg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉芯丝材电弧喷涂的粒子和涂层特征[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 191-196.
- LUO X, HE D Y, ZHOU Z, et al. Particle and Coating Formation Characteristics during Arc Spraying with AlMg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cored Wires[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(7): 191-196.
- [35] 苏暄博, 李龙博, 魏大岭, 等. 喷涂角度对等离子喷涂氧化铝钛陶瓷涂层性能影响研究[J]. *材料开发与应用*, 2023, 38(2): 57-62.
- SU X B, LI L B, WEI D L, et al. Influence of Spraying Angle on the Properties of Plasma Sprayed AT13 Ceramic Coatings[J]. *Development and Application of Materials*, 2023, 38(2): 57-62.