

氮化硼纳米片对氧化铝胶黏陶瓷 涂层摩擦行为的影响

杨网, 陆小龙, 王永光, 赵栋, 管怀俊

(苏州大学, 苏州 215131)

摘要: **目的** 通过在氧化铝胶黏陶瓷涂层中添加氮化硼纳米片 (BNNP), 从而改善涂层的摩擦学性能。**方法** 利用均质机将混合粉末均匀分散, 并采用料浆法在 304 不锈钢表面制得不同含量的 BNNP 增强氧化铝胶黏陶瓷涂层 (BRPCC)。通过扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和球盘式摩擦磨损试验机, 分析了不同含量的 BNNP 增强氧化铝胶黏陶瓷涂层的显微组织、物相和摩擦学性能。**结果** 涂层的主要物相为氧化铝、磷酸铝、磷酸锌和氮化硼。BNNP 未参与涂层固化反应, 但作为黏结相的“成核剂”填补了孔隙或覆盖了孔洞。随着 BNNP 含量的增加, 涂层表面质量得到有效改善, 添加 1%BNNP 的涂层表面孔隙率最低, 为 4.33%, 相比不添加 BNNP 的涂层, 孔隙率下降了 55.27%。随着 BNNP 含量的增加, 涂层的摩擦因数和磨损率随之降低, 当 BNNP 添加量为 1% 时最低, 摩擦因数从 0.372 降到 0.242, 磨损率从 $1.512 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降到 $0.494 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。胶黏陶瓷涂层的磨损机理主要为磨粒磨损和粘着磨损。**结论** 氮化硼纳米片的添加可以有效地提升氧化铝胶黏陶瓷涂层的耐磨减摩性能。

关键词: 氮化硼纳米片; 陶瓷涂层; 料浆法; 孔隙率; 摩擦学性能

中图分类号: TG174.4; TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)08-0311-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.029

Effects of Boron Nitride Nanoplatelets on the Tribological Properties of Alumina Chemically Bonded Phosphate Ceramic Coatings

YANG Wang, LU Xiao-long, WANG Yong-guang, ZHAO Dong, GUAN Huai-jun

(Soochow University, Suzhou 215131)

ABSTRACT: The tribological properties of the alumina chemically bonded phosphate ceramic coatings were improved by adding boron nitride nanoplatelets (BNNP). In this paper, the powder with BNNP was uniformly dispersed by the homogenizer, and then the coatings with different contents of BNNP were fabricated on 304 stainless steel. The phase compositions, morphology and tribological properties of coatings with different content of BNNP were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and ball-and-disc tribometer. Results show that the main phases of the coatings are Al_2O_3 , AlPO_4 , $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ and BNNP, which indicates that the added BNNP does not participate in the coating curing reaction. The

收稿日期: 2020-11-03; 修订日期: 2020-12-10

Received: 2020-11-03; Revised: 2020-12-10

作者简介: 杨网 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为摩擦学与表面工程。

Biography: YANG Wang (1995—), Male, Master, Research focus: tribology and surface engineering.

通讯作者: 王永光 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学与表面工程。

Corresponding author: WANG Yong-guang (1981—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology and surface engineering.

引文格式: 杨网, 陆小龙, 王永光, 等. 氮化硼纳米片对氧化铝胶黏陶瓷涂层摩擦行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 311-317.

YANG Wang, LU Xiao-long, WANG Yong-guang, et al. Effects of boron nitride nanoplatelets on the tribological properties of alumina chemically bonded phosphate ceramic coatings[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 311-317.

added BNNP, as the nucleating agent of the bonding phase, could fill or cover the pores. With the increasing content of BNNP, the surface quality of the coating is improved. The surface porosity of the coating with 1wt% BNNP is the lowest (4.33%), 55.27% lower than the coating without BNNP. As the content of BNNP increases, the friction coefficient and wear rate of the coatings decrease. When the content of BNNP is 1wt%, the friction coefficient reduces from 0.372 to 0.242, and the wear rate decreases from $1.512 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ to $0.494 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The main wear mechanisms of coatings are abrasive wear and adhesive wear. These results conclude that the addition of BNNP can improve the friction and wear properties of the alumina chemically bonded phosphate ceramic coatings.

KEY WORDS: BNNP; ceramic coating; slurry method; porosity; tribological properties

摩擦和磨损是机械系统能量损失和部件失效的两个主要原因。据估计,有约 1/3 的能源以各种形式消耗在摩擦上,约 80% 的零件是因摩擦副材料磨损而损坏^[1],摩擦磨损不仅会造成大量的资源浪费和经济损失,还会引起严重的安全事故,威胁人身安全。目前,涂覆陶瓷涂层已经成为改善上述问题的重要手段之一^[2-5]。陶瓷涂层的制备方法众多,如热喷涂技术、自蔓延高温合成技术、原位化学反应技术、气相沉积技术、激光熔融技术、溶胶凝胶技术、料浆法等^[6-8]。其中料浆法制备的胶黏陶瓷涂层,因其制备工艺简单、成本低、使用性能良好而广泛应用于工业领域^[9-11],但复杂工况下,胶黏陶瓷涂层的耐磨性仍有待提高^[12]。大量研究表明,在胶黏陶瓷涂层中添加具有润滑性能的材料作为添加剂,可有效提高涂层的耐磨减摩性能。如黄华栋等人^[13]在胶黏陶瓷涂层中添加石墨烯,使得磨痕表面形成石墨烯润滑膜,从而降低了摩擦因数及磨损量。徐晓燕等人^[14]通过在涂层中添加羧基化碳纳米管,使得涂层在被挤压时形成润滑膜,从而提升涂层耐磨性。六方氮化硼(Hexagonal Boron Nitride, h-BN)具有类似石墨的层状六方晶系结构,二维层状结构的层间滑移决定了氮化硼具备优良的摩擦学性质,因此常用作涂层的润滑添加剂。Bin Lee 等人^[15]通过热压固结法制备了 BNNP/Si₃N₄ 纳米复合材料,增强了陶瓷的摩擦学性能。张梦月等人^[16]将 Ni 包 BN 与 Ni60A、Ti 合金粉末混合,采用等离子熔覆技术,制备了自润滑耐磨复合涂层,发现添加氮化硼自润滑剂后,涂层的摩擦磨损性能良好。石皋莲等人^[17]采用激光熔覆技术在钛合金表面制备了以氮化硼纳米片作为固体润滑剂的自润滑耐磨复合涂层,发现润滑颗粒被挤出表面形成润滑膜,磨损后,表面光滑平整。宋英等人^[18]选择激光熔融技术制备 BNNP 增强 Ni₃Al 金属间化合物基复合材料,并研究其摩擦学性能。上述研究成果均表明,氮化硼可有效增强涂层的摩擦学性能,但是关于氮化硼纳米片对胶黏陶瓷涂层性能影响的研究相对较少。

为提高氧化铝胶黏陶瓷涂层的耐磨减摩性能,本文将六方氮化硼纳米片(Boron nitride nanoplatelet, BNNP)作为润滑剂材料添加到涂层中,通过摩擦磨损试验、物相及微观结构表征,探究氮化硼纳米片含

量对氧化铝胶黏陶瓷涂层微观形貌及摩擦学性能的影响,并揭示相关机理。

1 试验

1.1 涂层制备

选取直径为 15 mm、厚度为 3 mm 的 304 不锈钢作为金属基体。用 80#砂纸对 304 不锈钢圆片表面进行十字交叉打磨,去除表面锈斑和氧化皮,以增加涂层与基体的接触面积,提高结合强度。将打磨后的基体放置丙酮中超声清洗 20 min,然后用少量无水乙醇冲洗洁净,并用吹风机烘干。

陶瓷涂层材料设计如表 1 所示。骨料成分为氧化铝(耐博),固化剂成分为氧化锌(国药),添加剂成分为氮化硼纳米片(博诚冶金),胶黏剂成分为磷酸二氢铝(新乡伯马)。材料中未添加及添加质量分数为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1% 的 BNNP 制得的涂层,分别记为 BRPCC0、BRPCC2、BRPCC4、BRPCC6、BRPCC8、BRPCC10。

表 1 陶瓷涂层材料的组成
Tab.1 Composition of ceramic coatings

Samples	wt%			
	Al ₂ O ₃	ZnO	BNNP	Al(H ₂ PO ₄) ₃
BRPCC0	53.5	1.6	0	40
BRPCC2	53.3	1.6	0.2	40
BRPCC4	53.1	1.6	0.4	40
BRPCC6	52.9	1.6	0.6	40
BRPCC8	52.7	1.6	0.8	40
BRPCC10	52.5	1.6	1.0	40

将上述配比粉体加入无水乙醇中,用均质机以 5000 r/min 分散 3 h,并采用鼓风式干燥箱在 40 ℃ 环境下烘干。将干燥结块的粉体用玛瑙研钵研磨成粉末后,与磷酸二氢铝胶黏剂按比例混合成浆料,充分搅拌后,在室温下静置 24 h,待料浆充分反应后,用刷涂的方法涂在预处理后的 304 不锈钢基体表面,最后进行升温固化处理。为了防止升温过快造成涂层内部热应力不均匀,产生裂纹,对涂层进行阶段性加

热, 通过前期研究, 确立了如图 1 所示的升温固化工艺^[9-10]。

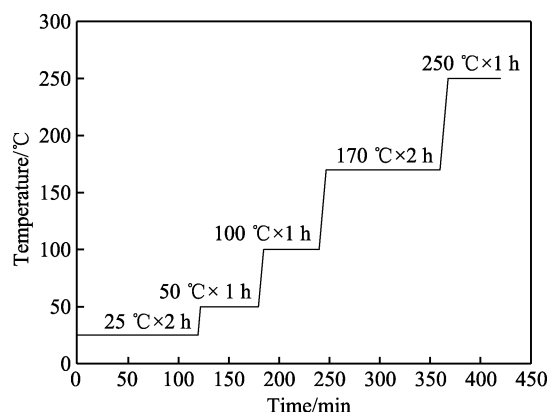


图 1 固化工艺
Fig.1 Process of curing

1.2 性能测试及组织观察

采用德国布鲁克公司 D8 Advance 型 X 射线衍射仪 (XRD) 检测涂层中的物相组成, 实验参数为: Cu 靶 Ka 波段, 扫描速度 $2 (^{\circ})/\text{min}$, 2θ 范围 $20^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。通过日立公司 S-4700 冷场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察涂层的微观形貌, 并利用 ImageJ 软件对 SEM 图像进行分析, 得到涂层表面孔隙率。使用兰州中科凯华公司 HT-1000 球盘式高温摩擦磨损试验机对陶瓷涂层进行滑动摩擦学试验, 每组试样重复实验 3 次并取平均值, 试验载荷为 6.5 N, 电机转速为 560 r/min, 摩擦半径为 2 mm, 测试时间为 15 min, 对磨球是直径为 4 mm 的 Si_3N_4 陶瓷球。涂层磨痕截面二维形貌利用思显光电技术公司 SM-1000 型共聚焦三维轮廓测量仪进行测试。

2 结果及分析

2.1 涂层形貌

图 2 是 BRPCC0、BRPCC6 及 BRPCC10 涂层放大 2000 倍的表面微观形貌及其孔隙灰度图像。从图 2 中可以看出, BRPCC0 涂层中氧化铝骨料为不规则形状且粒径较大, 黏结相无法完全填补颗粒之间较大的空隙, 因此涂层表面存在较多的孔隙。BRPCC6 涂层表面孔隙相对 BRPCC0 涂层有所减少。BRPCC10 涂层表面最致密, 表面的骨料颗粒很好地被胶黏剂包裹着, 大部分都是表层的凹坑, 并非通孔。

不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层的孔隙率及其变化幅度如表 2 所示。随着 BNNP 含量的增加, 涂层表面的孔隙率逐渐减小, 涂层表面结构越来越致密。其中, BRPCC10 孔隙率最小, 相比于 BRPCC0, 下降了约 55%。这是因为在涂层中添加纳米材料, 有助于改善涂层表面的致密性^[19]。BNNP 在涂层中的封孔形式如图 3 所示。从图 3a 中可发现, BNNP 穿插在氧化铝颗粒之间的空隙中, 胶黏剂以 BNNP 为“形核”, 在其周围形成凝胶与其他氧化铝颗粒相互连接, 有效填补了氧化铝颗粒之间较大的孔隙, 从而提高涂层的致密度。从图 3b 可看到, 具有特殊二维片状结构的 BNNP 可以在一定程度上覆盖住表面孔隙, 起到表面封孔的效果。因此, BNNP 的添加能有效提高涂层的致密度, 降低涂层的孔隙率, 提高对基体材料的保护作用。此外, 从孔隙率的变化幅度可发现, 当 BNNP 质量分数从 0% 增加到 0.8% 时, 每增加 0.2% 的 BNNP, 孔隙率会下降 1.2% 左右, 但当 BNNP 质量分数从 0.8% 增加到 1% 时, 孔隙率仅下降 0.5%, 下降量开始大幅度减小, 这是由于 BNNP 的含量上升到一定程度后会开始趋向团聚引起的^[20]。

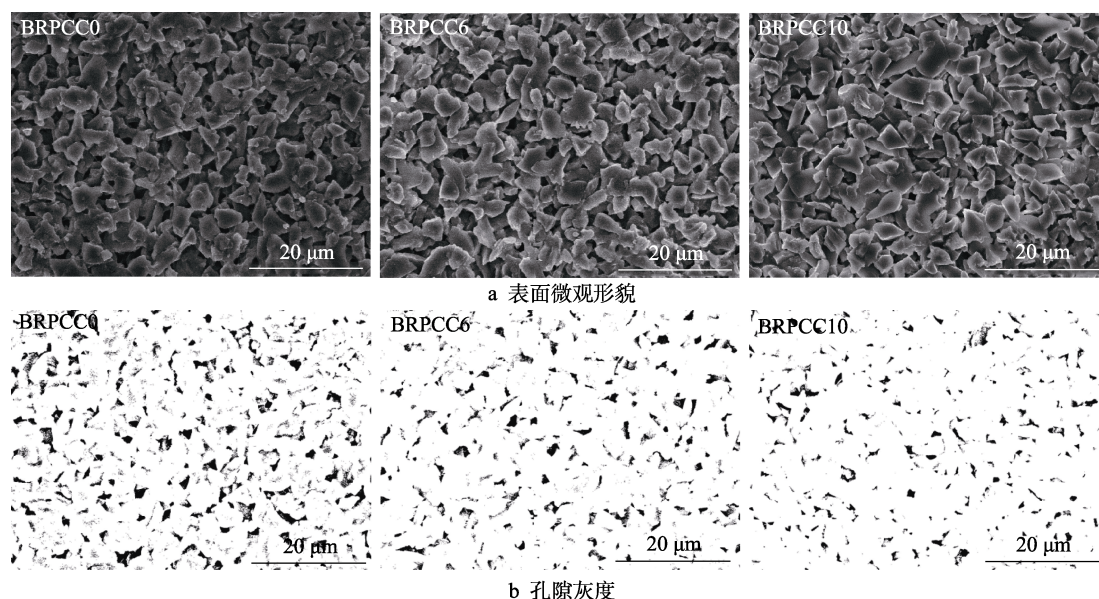


图 2 添加不同含量 BNNP 涂层的表面微观形貌及孔隙灰度
Fig.2 Microstructure and pore gray of coatings with different BNNP content

表 2 不同 BNNP 含量的陶瓷涂层表面孔隙率及其变化幅度
Tab.2 Surface porosity and variation range of ceramic coatings with different BNNP content

Samples	BRPCC0	BRPCC2	BRPCC4	BRPCC6	BRPCC8	BRPCC10
Porosity	9.68	8.65	7.16	6.09	4.83	4.33
Variation		1.03	1.49	1.07	1.26	0.5

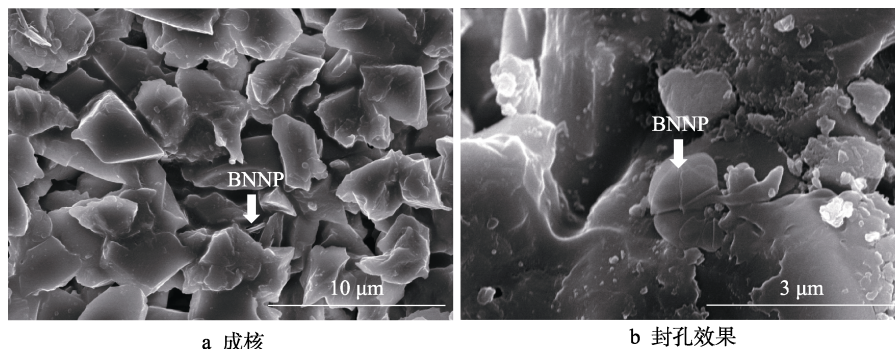


图 3 BNNP 封孔形式
Fig.3 BNNP sealing form: a) nucleation, b) covering effect

2.2 涂层物相

BRPCC0、BRPCC6、BRPCC10 的 XRD 图谱如图 4 所示。从图 4 中可知，BRPCC0 的物相中除了有 Al_2O_3 外，还有新的物相磷酸铝 (AlPO_4) 和磷酸锌 ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$)。由此可知，氧化铝和氧化锌与胶黏剂反应生成磷酸铝以及磷酸锌，但由于 ZnO 活性较高且在涂层浆料中的含量少，在与胶黏剂迅速反应后，生成的 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 含量也相对较少，X 射线较难分辨，导致未出现 ZnO 衍射峰，且 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ 相衍射峰不明显。因此，涂层是以磷酸铝作为主要黏结相，将未反应的氧化铝颗粒作为“形核”，在其周围形成凝胶，并与其他氧化铝颗粒相互连接，形成图 2 所示的空间网状结构。BRPCC6、BRPCC10 的 XRD 图谱较 BRPCC0 多出了 BN 的特征峰，且随着 BNNP 含量的增加，BN 的衍射峰越发明显，但其余衍射峰并未有明显变化，且在涂层固化过程中，BNNP 并未与其他物质发生固化反应，因此出现了图 3a 所示的 BNNP

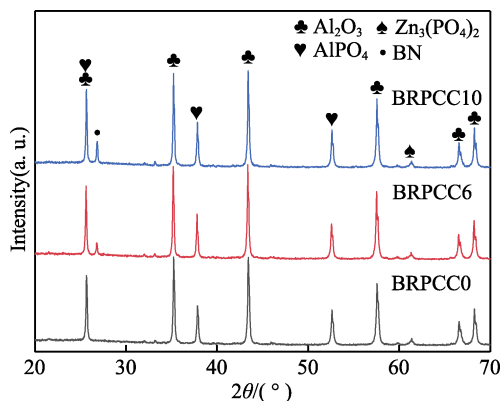


图 4 BRPCC0、BRPCC6 及 BRPCC10 的 XRD 图谱
Fig.4 XRD patterns of BRPCC0, BRPCC6 and BRPCC10

穿插在氧化铝颗粒之间的空隙中并作为胶黏剂的“成核剂”的情况。

2.3 涂层摩擦因数及磨损率

图 5 为不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层的摩擦因数随摩擦时间的变化曲线。随着 BNNP 含量的增加，涂层的摩擦因数逐渐下降，从 0.372 下降到 0.242，BRPCC10 的摩擦因数比不含 BNNP 的 BRPCC0 下降了 34.95%，说明 BNNP 可起到减小胶黏陶瓷涂层摩擦因数的作用。

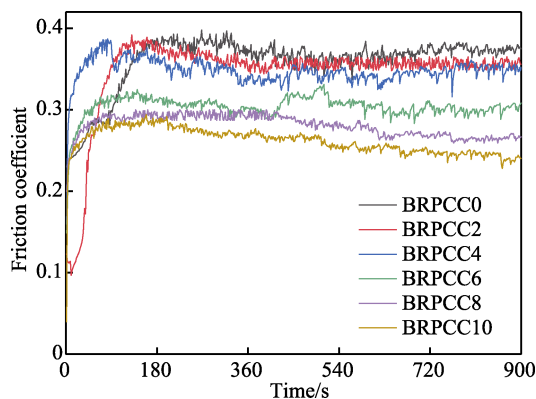


图 5 不同 BNNP 含量涂层的摩擦因数
Fig.5 Friction coefficient of ceramic coatings with different BNNP content

图 6 是不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层的磨痕截面二维轮廓图。表 3 是不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层磨损相关参数。由图 6 及表 3 可知，随着 BNNP 含量的增加，涂层的磨痕宽度、磨痕深度、磨损面积、磨损量都下降。因此可知，在涂层中植入 BNNP 可以同时宽度和深度方向有效降低涂层的磨损。图 7 是不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层的磨损率。由图 7

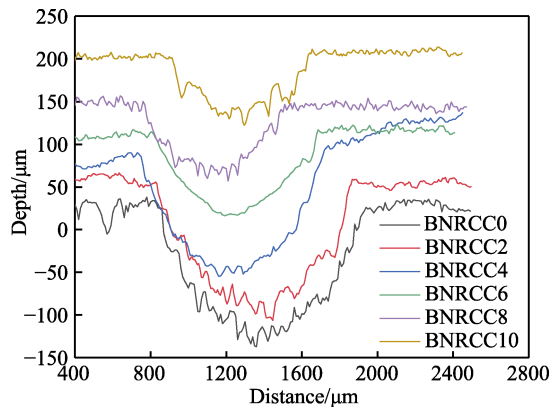


图 6 磨痕截面的二维堆叠图
Fig.6 Two-dimensional stacking diagram of a worn cross section

表 3 不同 BNNP 含量的涂层磨损参数
Tab.3 Wear resistance of coating with different BNNP content

Samples	Width/ μm	Depth/ μm	Area/ mm^2	Volume/ mm^3
BRPCC0	1120	170	0.083	1.036
BRPCC2	1050	161	0.076	0.956
BRPCC4	991	140	0.069	0.867
BRPCC6	879	99	0.042	0.529
BRPCC8	745	91	0.031	0.391
BRPCC10	743	77	0.027	0.339

可知，涂层磨损率随着氮化硼含量的增加而减小，从 $1.512\times 10^{-3}\text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 降到 $0.494\times 10^{-3}\text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，BRPCC10 的磨损率比 BRPCC0 降低了约 66.89%。综上，氮化硼的加入可有效降低胶黏陶瓷涂层的磨损率。

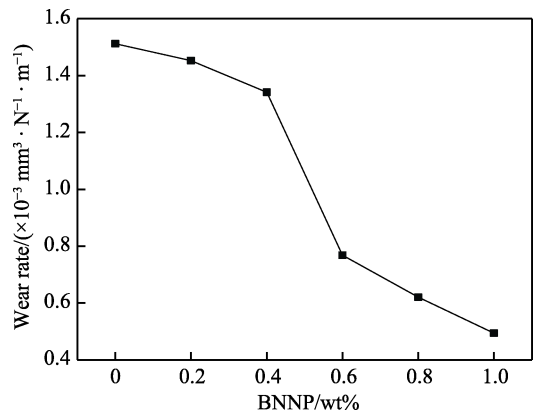


图 7 不同 BNNP 含量涂层的磨损率
Fig.7 Wear rate graph of coatings with different BNNP content

2.4 涂层耐磨机理

图 8 是不同 BNNP 含量的胶黏陶瓷涂层磨痕表面 SEM 微观形貌图。由图 8a 可发现，不含 BNNP 的 BRPCC0 涂层的磨痕表面非常粗糙。这是因为 BRPCC0 孔隙率较高，氧化铝颗粒之间并没有较好地连接在一起，达不到胶黏剂的理想粘结强度^[21]，在剪切力的作用下，表面涂层产生少量的剥落，剥落的碎屑又会直接参与到磨损过程中，导致磨损情况进一步恶化，涂层的磨损机制主要是粘着磨损和磨粒磨损。由图 8b—f 可以看出，随着 BNNP 含量的增加，涂层磨痕表面光滑区域的面积逐渐增大。这是因为添加的 BNNP，其层与层之间为较弱的范德华力作用，剪切强度较低，在摩擦力的作用下，BNNP 在接触表面形成润滑转移膜^[22-23]。BNNP 形成的润滑膜减少了磨球

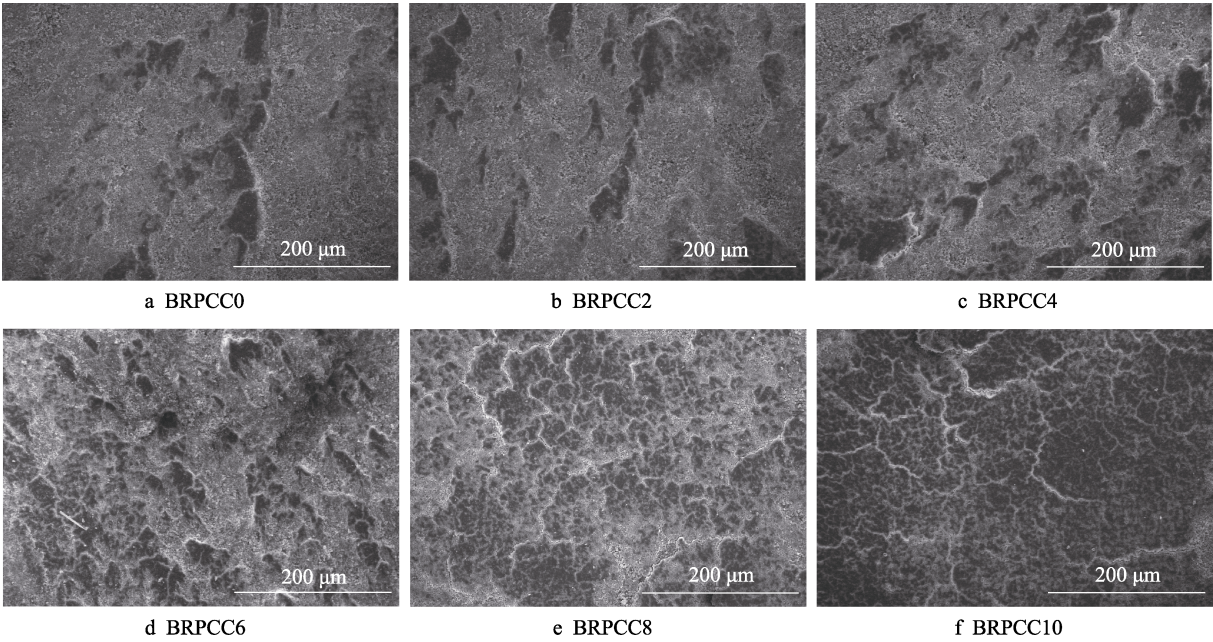


图 8 不同 BNNP 含量的涂层磨痕形貌
Fig.8 Wear scar morphology graph of ceramic coatings with different BNNP content

与氧化铝颗粒的直接接触,有效减轻了涂层大块剥落的程度,所以磨痕表面变得光滑,有效减少了涂层的磨损量。此外,光滑的磨痕表面可以显著降低摩擦副之间的摩擦因数^[24-25],磨痕中光滑区域面积的变化与本文摩擦因数的变化趋势一致。

BNNP 增强氧化铝胶黏陶瓷涂层的耐磨减摩作用机制如下:首先,如图 9a 和图 9b 所示,涂层表面的 BNNP 半悬挂在涂层表面或较为均匀地覆盖在涂层表面,其中悬空的 BNNP 有望作为能量吸收源,以减轻滑动表面在重复研磨和轧制的影响下变形,悬空的 BNNP 在周期性施加的接触应力下从磨损表面弯曲或断开,且能够转移并粘附到涂层表面上,

与均匀覆盖在涂层表面的 BNNP 一样,逐渐形成润滑膜,且二维片状结构的 BNNP 能较大范围地铺展在涂层表面,起到隔离小球与涂层直接接触的效果,有效减轻了粘着磨损的程度。随着涂层表层颗粒的剥落和磨球的挤压,起初被周围骨料包裹的 BNNP 逐渐被暴露出来,粘附在磨痕表面,这与图 9c 所示的情况一致,即在非光滑磨痕区域表面也有较多的 BNNP 碎屑。暴露出来的 BNNP 又会重复上述过程发生弯曲或断裂,粘附在涂层表面,形成小块区域的润滑膜,随着涂层表面 BNNP 的增多,润滑膜覆盖面积逐渐扩大,最终形成如图 9d 所示层叠状的光滑磨痕形貌。

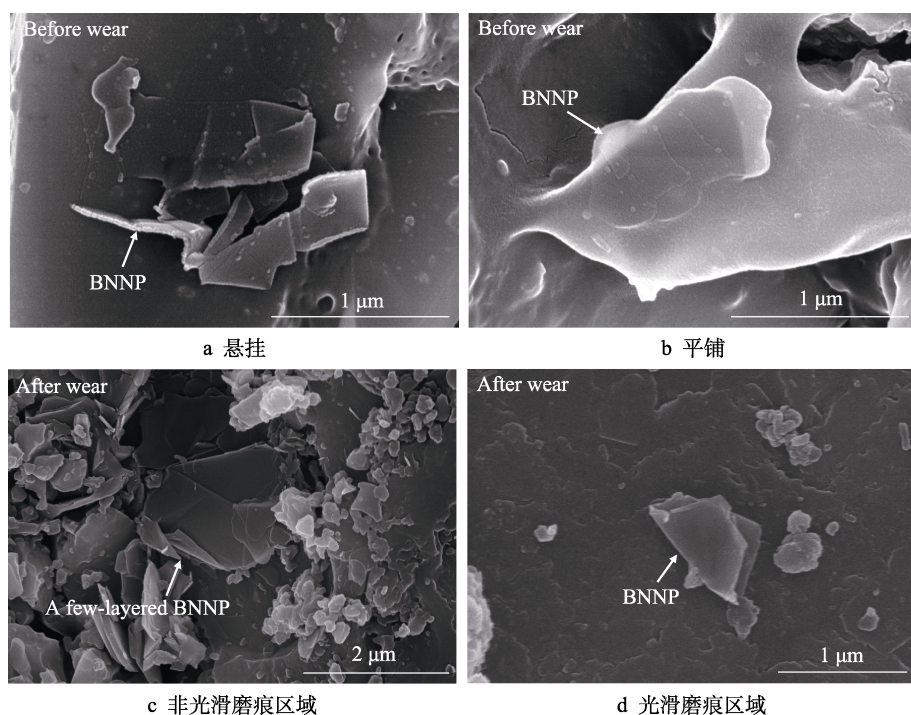


图 9 涂层表面 BNNP 形貌

Fig.9 The morphology of BNNP on the coating surface: a) hanging BNNP, b) tiled BNNP, c) BNNP in non-smooth area, d) BNNP in smooth area

3 结论

1) 加入氮化硼纳米片可以有效改善胶黏陶瓷涂层的微观结构,加入质量分数为 1% 的氮化硼纳米片,可使胶黏陶瓷涂层的表面孔隙率从之前的 10.3% 降到 4.33%。

2) 随着氮化硼纳米片含量的增加,涂层摩擦因数和磨损率逐步降低。加入氮化硼纳米片可以有效改善胶黏陶瓷涂层的摩擦学性能,加入质量分数为 1% 的氮化硼纳米片可使胶黏陶瓷涂层的摩擦因数从 0.372 降到 0.242 左右,磨损率从 $1.512 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降到 $0.494 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

3) 氮化硼纳米片增强胶黏陶瓷涂层的耐磨减摩影响机制主要为,氮化硼纳米片在涂层磨损过程中形

成润滑膜,减少了对磨小球与涂层的直接接触,从而降低了摩擦因数和磨损量。

参考文献:

- [1] 雒建斌. 超滑与摩擦起源的探索[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 2967-2978.
LUO Jian-bin. Investigation on the origin of friction and superlubricity[J]. Chinese science bulletin, 2020, 65(27): 2967-2978.
- [2] Muthukumar M, YADAV A, BOBJI M S. Wear characteristics of nanoporous alumina and copper filled nanocomposite coatings[J]. Wear, 2020, 462-463: 203496.
- [3] MOTRU S, HUSSAIN N, KHAN Z A, et al. Tribological studies of high surface finish ceramic coatings for low friction and adhesive wear resistant applications[J]. Mate-

- rials today: proceedings, 2020, 27: 2208-2212.
- [4] CHINNUSAMY S, RAMASAMY V, VENKATAJALAPATHY S, et al. Experimental investigation on the effect of ceramic coating on the wear resistance of Al6061 substrate[J]. Journal of materials research and technology, 2019, 8(6): 6125-6133.
 - [5] YUAN Shuo, LIN Nai-ming, ZOU Jiao-juan, et al. *In-situ* fabrication of gradient titanium oxide ceramic coating on laser surface textured Ti6Al4V alloy with improved mechanical property and wear performance[J]. Vacuum, 2020, 176: 109327.
 - [6] 刘乃强, 吴修德, 魏世忠, 等. 陶瓷复合涂层的制备方法[J]. 现代制造技术与装备, 2016(6): 108-109.
LIU Nai-qiang, WU Xiu-de, WEI Shi-zhong, et al. Method for preparing ceramic composite coating[J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2016(6): 108-109.
 - [7] 魏金栋, 张宇, 周燕琴, 等. 耐磨陶瓷涂层制备方法的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(20): 14-18.
WEI Jin-dong, ZHANG Yu, ZHOU Yan-qin, et al. Research progress of wear resistant ceramic coating preparation methods[J]. Hot working technology, 2015, 44(20): 14-18.
 - [8] 燕晓涛, 吕耀辉, 林建军, 等. 高性能陶瓷涂层材料制备技术的综述[J]. 信息系统工程, 2017(12): 94-96.
YAN Xiao-tao, LYU Yao-hui, LIN Jian-jun, et al. Overview of the preparation technology of high-performance ceramic coating materials[J]. Information system engineering, 2017(12): 94-96.
 - [9] 卞达. 石墨烯增强耐磨减摩氧化铝陶瓷涂层基础研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
BIAN Da. Fundamental research on the chemically bonded ceramic coatings reinforced by graphene[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
 - [10] 梁海聪. 改性磷酸盐陶瓷涂层的制备及其在高温锅炉中的应用[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
LIANG Hai-cong. Preparation of modified phosphate ceramic coating and its application in high temperature boiler[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018.
 - [11] XIAO Kui, XUE Wei, LI Zhao-liang, et al. Effect of sintering temperature on the microstructure and performance of a ceramic coating obtained by the slurry method[J]. Ceramics international, 2018, 44(10): 11180-11186.
 - [12] DU Y J, DAMRON M, TANG G, et al. Inorganic/organic hybrid coatings for aircraft aluminum alloy substrates[J]. Progress in organic coatings, 2001, 41(4): 226-232.
 - [13] 黄华栋, 卞达, 黄国栋, 等. 石墨烯对氧化铝胶黏陶瓷涂层摩擦行为的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(10): 127-132.
HUANG Hua-dong, BIAN Da, HUANG Guo-dong, et al. Effect of graphene on friction behavior of alumina chemically bonded phosphate ceramic coating[J]. Hot working technology, 2018, 47(10): 127-132.
 - [14] 徐晓燕, 赵永武, 秦卢梦, 等. 碳纳米管增强胶黏陶瓷涂层的制备及性能表征[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(10): 3516-3520.
XU Xiao-yan, ZHAO Yong-wu, QIN Lu-meng, et al. Preparation of ceramic coatings reinforced by carbon nanotubes and performance research[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(10): 3516-3520.
 - [15] LEE Bin, LEE Dong-ju, LEE J H, et al. Enhancement of toughness and wear resistance in boron nitride nanoplatelet (BNNP) reinforced Si_3N_4 nanocomposites[J]. Scientific reports, 2016, 6: 27609.
 - [16] 张梦月. 等离子熔覆自润滑耐磨复合涂层组织及摩擦学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
ZHANG Meng-yue. Study on microstructure and tribological properties of plasma cladding self-lubricating wear resistant composite coatings[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
 - [17] 石皋莲, 吴少华, 任佳, 等. 含 h-BN 的钛合金激光熔覆自润滑耐磨涂层的摩擦学行为[J]. 润滑与密封, 2015, 40(11): 89-93.
SHI Gao-lian, WU Shao-hua, REN Jia, et al. Tribological properties of self-lubricating anti-wear composite coating with 10% h-BN on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. Lubrication engineering, 2015, 40(11): 89-93.
 - [18] SONG Ying, HE Guang-yu, WANG Yong-guang, et al. Tribological behavior of boron nitride nanoplatelet reinforced Ni_3Al intermetallic matrix composite fabricated by selective laser melting[J]. Materials & design, 2019, 165: 107579.
 - [19] 徐荣礼, 卞达, 赵永武. A4 钢表面碳纳米管增强胶黏陶瓷涂层的制备与耐磨性能[J]. 材料保护, 2019, 52(2): 1-4.
XU Rong-li, BIAN Da, ZHAO Yong-wu. Preparation and wear resistance of carbon nanotubes enhanced ceramic coatings on A4 steel[J]. Materials protection, 2019, 52(2): 1-4.
 - [20] 王楠. 改性片层氮化硼增强玄武岩纤维/环氧树脂复合材料的制备与性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
WANG Nan. Investigation on fabrication and properties of modified lamellar boron nitride reinforced basalt fiber/epoxy resin composites[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
 - [21] 郝瑞华. 磷酸盐基高温粘结剂的制备及其粘结性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
HAO Rui-hua. The preparation and properties discussion of the phosphate adhesives[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
 - [22] 牛伟, 孙荣禄. h-BN 含量对激光熔覆自润滑涂层微观组织和磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803011.
NIU Wei, SUN Rong-lu. Effect of h-BN content on microstructures and wear resistance of laser cladding self-lubricant coatings[J]. Chinese journal of lasers, 2011, 38(8): 0803011.
 - [23] ZHAI Wen-zheng, SRIKANTH N, KONG Ling-bing, et al. Carbon nanomaterials in tribology[J]. Carbon, 2017, 119: 150-171.
 - [24] 赵永武, 吕彦明, 蒋建忠. 新的粗糙表面弹塑性接触模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 95-101.
ZHAO Yong-wu, LYU Yan-ming, JIANG Jian-zhong. New elastic-plastic model for the contact of rough surfaces[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2007, 43(3): 95-101.
 - [25] BIAN Da, ARADHYULA T V, GUO Yong-xin, et al. Improving tribological performance of chemically bonded phosphate ceramic coatings reinforced by graphene nanoplatelets[J]. Ceramics international, 2017, 43(15): 12466-12471.