

等离子喷涂 Cu-Al₂O₃ 复合涂层制备及摩擦学性能研究

杜三明^{a,b}, 刘超^{a,b}, 蔡宏章^a, 邹庆婷^a, 张永振^a

(河南科技大学 a.材料科学与工程学院,

b.高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室, 河南 洛阳 471023)

摘 要: **目的** 研究铜的添加对 Al₂O₃ 涂层摩擦磨损性能的影响。**方法** 采用等离子喷涂技术在 20 钢表面分别制备 Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃ 涂层。对两种涂层显微硬度、结合强度、摩擦磨损性能进行对比研究, 并分析涂层的相组成、组织结构、磨损形貌。**结果** Al₂O₃ 原始粉末含有 α -Al₂O₃ 相, 制成涂层后有 γ -Al₂O₃ 新相生成。Cu-Al₂O₃ 原始粉末主要由 Cu、 α -Al₂O₃ 相组成, 所制备 Cu-Al₂O₃ 涂层有 γ -Al₂O₃ 和 Cu₂O 新相生成。两种涂层均由基体、粘结层、涂层组成, 各层之间有明显的界面, 层与层之间结合良好。Cu-Al₂O₃ 涂层较 Al₂O₃ 涂层孔隙、微裂纹减少。添加铜后, 结合强度明显提高, Al₂O₃ 涂层的结合强度为 7.56 MPa, Cu-Al₂O₃ 涂层的结合强度为 15.96 MPa, 而显微硬度变化不大。Cu-Al₂O₃ 涂层的摩擦系数明显降低, 且波动幅度较小; 磨损率为 $5.93 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$, 比 Al₂O₃ 涂层降低了 14.68 %。与 Al₂O₃ 涂层相比, Cu-Al₂O₃ 涂层磨痕处剥落坑面积减小, 磨损表面比较平整, 剥落现象减轻, 主要磨损机制为剥落。**结论** 铜的添加改善了 Al₂O₃ 涂层的摩擦磨损性能。

关键词: 等离子喷涂; 摩擦系数; 磨损率; 耐磨性; Cu-Al₂O₃ 涂层

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0134-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.019

Preparation and Tribological Properties of Plasma Sprayed Cu-Al₂O₃ Composite Coatings

DU San-ming^{a,b}, LIU Chao^{a,b}, CAI Hong-zhang^a, HUAN Qing-ting^a, ZHANG Yong-zhen^a

(a.School of Materials Science and Engineering, b.National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology Technology and Application, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of copper on the friction and wear properties of Al₂O₃ coatings. Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃ coatings were prepared on the surface of 20 steel by plasma spraying. The microhardness, bond strength and friction and wear properties of the two coatings were compared and the phase composition, microstructure and wear morphology of the coatings were analyzed. The Al₂O₃ raw powder contained α -Al₂O₃ phase, and a new phase of γ -Al₂O₃ was formed after coating was prepared. The Cu-Al₂O₃ raw powder was mainly composed of Cu and α -Al₂O₃ phases. The Cu-Al₂O₃ coating had a new phase of γ -Al₂O₃ and Cu₂O. Both coatings consisted of a matrix, a tie layer, and a coating. There was a distinct interface between

收稿日期: 2018-10-10; 修订日期: 2018-11-30

Received: 2018-10-10; Revised: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51375146, 51705136)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51375146, 51705136)

作者简介: 杜三明(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料摩擦学及表面工程。邮箱: dsming@haust.edu.cn

Biography: DU San-ming(1970—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: material tribology and surface engineering. E-mail: dsming@haust.edu.cn

the layers, and the bond between the layers was good. The Cu-Al₂O₃ coating had fewer porosity and microcracks than the Al₂O₃ coating. After copper was added, the bonding strength was obviously improved. The bonding strength of Al₂O₃ coating was 7.56 MPa. The bonding strength of Cu-Al₂O₃ coating was 15.96 MPa. The microhardness did not change much. The friction coefficient of Cu-Al₂O₃ coating was significantly reduced and the fluctuation range was small. The wear rate was reduced, and the wear rate of Cu-Al₂O₃ coating was $5.93 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$, which was 14.68% lower than that of Al₂O₃ coating. Compared with the Al₂O₃ coating, the Cu-Al₂O₃ coating had smaller peeling pit, the wear surface was relatively flat, the peeling phenomenon was reduced, and the main wear mechanism was spalling. The addition of copper improves the friction and wear properties of the Al₂O₃ coating.

KEY WORDS: plasma spraying; friction coefficient; wear rate; wear resistance; Cu-Al₂O₃ coating

摩擦会使零件表面材料逐渐丧失或迁移,从而导致磨损,零部件几何尺寸变小,失去原有设计所规定的功能,同时具有严重安全隐患,继续使用会造成巨大的经济损失^[1]。为了解决磨损问题,通常采用的方法有制备新型耐磨材料、表面工程、添加润滑油或润滑剂等。其中表面工程技术无需改变整体材质,就能获得本体材料所不具备的某些特殊性能,因而得到国内外研究者的重视^[2]。等离子喷涂技术作为表面技术的重要分支之一,其具有喷射粒子速度高、涂层致密、热源温度高等优点^[3],因而可以喷制各种高熔点、耐磨、耐热的涂层,尤其适合陶瓷材料的喷涂。在已知的喷涂材料中,陶瓷材料具有高的硬度、熔点等优势。其中氧化铝陶瓷涂层由于具有高强度、高耐磨性和良好的绝缘性能,在航空航天、汽车、船舶等领域具有广泛的应用^[4-6]。氧化铝陶瓷涂层多孔的微观结构、低的结合强度和陶瓷固有的脆性等缺点结合到一起^[7],限制了氧化铝陶瓷涂层的应用。

近年来,为了提高氧化铝涂层的性能,国内外专家学者做了大量研究,主要从喷涂粉末选取、涂层后处理等方面进行了改善。An Yu-long 等^[4-5]制备的纳米氧化铝涂层较微米涂层组织致密,力学性能和耐磨性能增强。Balmukund Dhakar 等^[8-9]研究表明,适当的热处理可以提高涂层的硬度和耐磨性能。姜帆等^[10-12]研究表明,在氧化铝涂层中添加性能优良的第二相,可以提高涂层的综合性能。

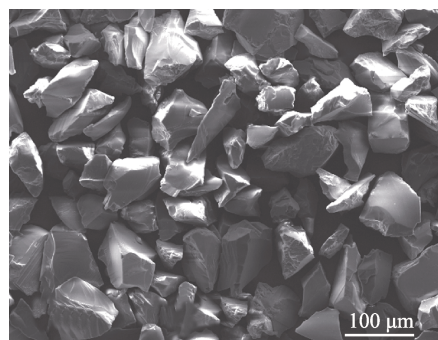
金属材料具有优良的导电性、塑韧性、导热性等性能,铜是面心立方结构,具有良好的延展性、塑性,是优良的固体润滑材料^[13-14],在工业上应用广泛。本文选用金属 Cu 和 Al₂O₃ 粉进行混合,将铜优良的导热性、塑韧性和 Al₂O₃ 的耐磨性相结合,采用大气等离子喷涂技术在 20 钢基体上制备出 Cu-Al₂O₃ 复合涂层。研究铜的加入对氧化铝涂层显微硬度、结合强度和摩擦学性能的影响,为改善氧化铝涂层摩擦磨损性能,拓展其使用领域提供参考。

1 试验

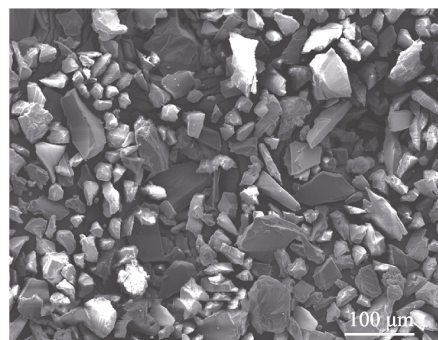
1.1 涂层原料

试验选用上海允复科技生产的商用微米级 Cu

粉,北京桑尧科技生产的 Al₂O₃ (粉纯度 $\geq 99\%$),铜和氧化铝按质量分数比为 1:9 配制 Cu-Al₂O₃ 复合混料,采用机械混合法在 V-100L 混料机上用氧化铝陶瓷球混料 60 min。Al₂O₃ 粉末呈现不规则的块状,颗粒大小分布均匀,平均粒径为 25~75 μm (见图 1a)。Cu-Al₂O₃ 复合粉末是将铜和氧化铝粉末均匀混合,在球磨过程中,氧化铝粉末发生破碎,粒径有所减小,平均粒径在 25~65 μm 之间 (见图 1b)。



a Al₂O₃原始粉末



b Cu-Al₂O₃原始粉末

图 1 喷涂原始粉末形貌

Fig.1 Morphology of sprayed raw powder:

a) Al₂O₃ original powder; b) Cu-Al₂O₃ original powder

1.2 涂层制备

基体材料为 20 钢,粘结层选用北京桑尧科技生产的铝包镍粉。喷涂前,将粉末在 100 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 1 h,并对基体进行除油除锈、超声波清洗、喷砂等预处理。基体尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,正式喷涂前用等离子焰流将基体预热。

采用北京航天振邦精密机械有限公司生产的 ZB-80S 型等离子喷涂设备分别制备 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$

涂层, 等离子喷涂工艺参数见表 1, 涂层厚度为 0.5 mm 左右。

表 1 等离子喷涂工艺参数
Tab.1 Plasma spraying process parameters

Parameters	Voltage/V	Current/A	Ar traffic/(L·min ⁻¹)	H ₂ traffic/(L·min ⁻¹)	Spray distance/mm	Spray angle/(°)
Ni/Al	60	530	40	0.64	100	90
Al_2O_3	66	575	40	1.2	100	90
$\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$	65	550	40	1.2	100	90

1.3 组织结构和物相分析

采用 JSM-5610LV 型扫描电镜观察涂层截面组织、磨痕形貌。用 D8-advanced 型 X 射线衍射仪对喷涂粉末和涂层进行物相分析, 扫描范围为 15°~90°。孔隙率由 Image-Pro Plus 软件分析计算。

1.4 涂层力学性能表征

涂层的显微硬度采用 MH-3 型数字显微硬度仪进行测试, 载荷为 300 g, 加载时间为 15 s, 每个金相试样随机选取 10 个点, 然后取其平均值。结合强度按照 GB/T 8642—2002 制备试样, 使用 E7 胶粘结对偶件。在 AG-I250 万能拉伸试验机上测试涂层的结合强度, 加载速率为 1 mm/min。

1.5 涂层摩擦磨损性能

涂层的摩擦磨损试验在 UMT-2 多功能摩擦磨损试验机上进行, 选用球-盘式接触方式, 对磨球选用 YG8 硬质合金球, 其直径为 $\phi 6.35$ mm。转速为 500 r/min, 时间为 30 min, 总转数为 15 000 r, 载荷为 10 N。

以 $\Delta V = 2\pi r A$ 计算磨损体积, A (mm²) 为三维形貌仪表征涂层的磨痕截面积。按照式 (1) 计算涂层磨损率:

$$w = \frac{\Delta V}{2\pi r n} \quad (1)$$

式中: w 为磨损率, mm³/m; r 为摩擦半径, mm; n 为总转数。

2 结果与分析

2.1 涂层物相分析

图 2 为原始粉末和涂层的 XRD 图谱。可以看出, Al_2O_3 原始粉末含有 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相, 制成涂层后有 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 新相生成。 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 原始粉末主要由 Cu、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相组成, 所制备 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层有 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 Cu_2O 新相生成。等离子喷涂过程中, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉在等离子焰流中快速熔化, 由于冷却时间非常短, 冷却速率极快, Al_2O_3 液相与固相界面处, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 具有的界面能比

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 更低, 因此 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相优先形核并长大, 所以在涂层中生成了 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [15]。因为涂层是在大气环境下制备, 有少量氧气混入等离子焰流中, 铜喷涂粉末在加速熔融过程中少部分被氧化, 生成了 Cu_2O 相 [13]。

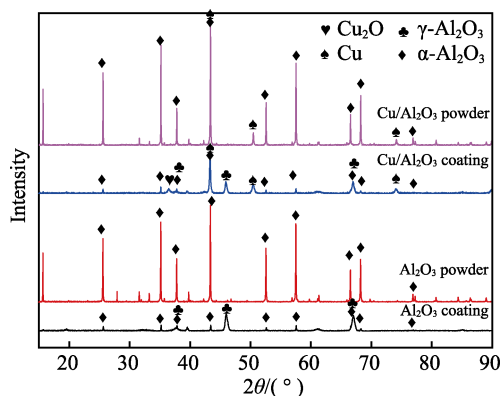


图 2 原始粉末和涂层的 XRD 图谱
Fig.2 XRD pattern of the original powder and coating

2.2 涂层微观组织

图 3 为 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的截面形貌。由图 3a 和 c 可以看出, 所制备的两种陶瓷涂层均由基体、粘结层、涂层组成, 各层之间有明显的界面, 层与层之间结合良好。铜在 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 复合涂层中呈带状分布 (图 3c 中白色区域)。由图 3b 和 d 可以看出, $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层较 Al_2O_3 涂层内部微裂纹减少, 孔隙率由 7.64% 减小到 3.23%, 铜在氧化铝中分布较为均匀, 铜的添加提高了 Al_2O_3 涂层的致密度。这是由于 Al_2O_3 熔融的颗粒凝固时间非常短, 凝固速率特别快, 熔滴的迅速冷却和凝固收缩, 相关的体积变化使得微观结构形成了应力。当应力达到一定程度时, 涂层中便形成了微裂纹。添加金属铜后, 铜具有面心立方结构, 其良好的塑性和相对较低的熔点, 使得它具有良好的润湿性 [16]。在制备涂层时, 铜均匀地分布在氧化铝涂层内部, 可以弥合氧化铝涂层中的孔隙, 同时由于其良好的导热性和塑韧性, 在熔滴凝固过程中可以更好地释放相关热应力, 从而减小裂纹产生的可能性。因此 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层孔隙、微裂纹减少。

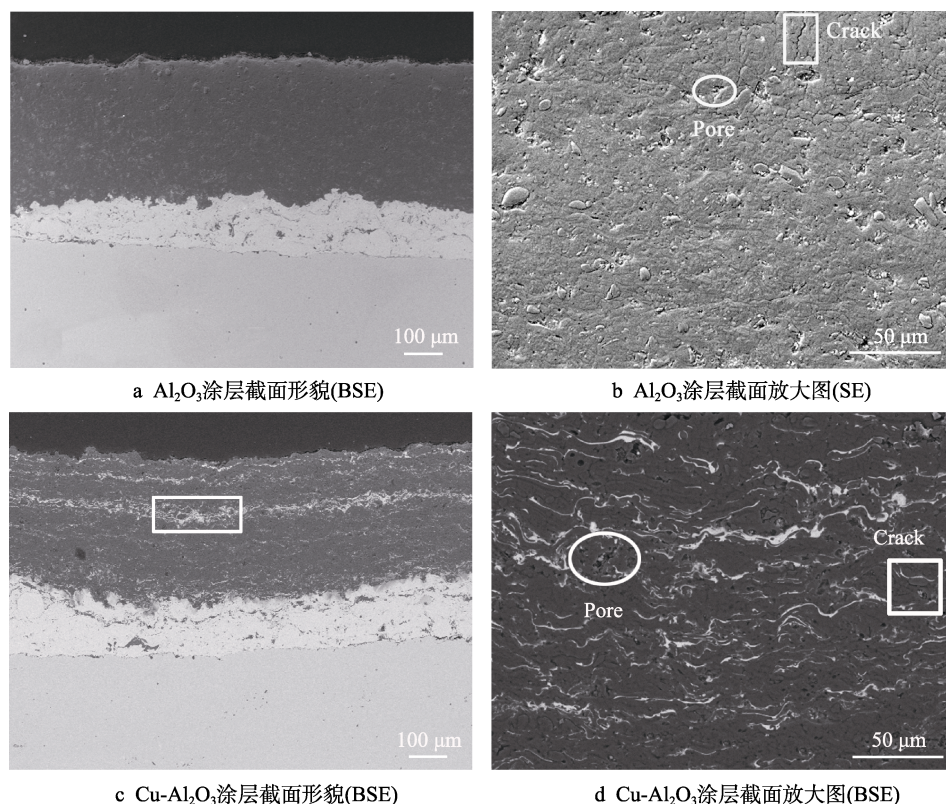
图 3 Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃ 涂层的截面形貌图

Fig.3 Sectional profile of Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃ coatings: a) Al₂O₃ coating cross-section (BSE); b) enlarged section of Al₂O₃ coating (SE); c) Cu-Al₂O₃ coating cross-section (BSE); d) enlarged section of Cu-Al₂O₃ coating (BSE)

2.3 涂层显微硬度和结合强度

Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃ 涂层的显微硬度和结合强度对比如图 4 所示。Al₂O₃ 涂层的结合强度为 7.56 MPa, Cu-Al₂O₃ 涂层的结合强度为 15.96 MPa (图 4a), 铜的添加明显提高了 Al₂O₃ 涂层的结合强度, 显微硬度变化不大 (图 4b)。这是因为铜具有较低的熔点, 熔融的铜在 Al₂O₃ 涂层内具有良好的润湿性, 在喷涂过程中, 熔融铜能有效地填充 Al₂O₃ 颗粒之间的间隙, 提高涂层在制备过程中的粘结强度^[16]。同时铜具有良好的塑性, 在涂层冷却过程中, 容易发生塑性变形, 释放熔滴凝固产生的热应力, 减少由于体积收缩引起

的微裂纹, 因此 Cu-Al₂O₃ 涂层的结合强度较 Al₂O₃ 涂层提高了。

2.4 涂层的摩擦磨损性能

在室温干摩擦条件下, Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃ 涂层摩擦系数随时间的变化曲线如图 5 所示。可以看出, 两种涂层的摩擦系数曲线变化趋势大体相同, 均表现为开始阶段先快速增大, 经过一段时间的磨合, 摩擦系数在一定范围内达到动态平衡。与 Al₂O₃ 涂层相比, Cu-Al₂O₃ 涂层的摩擦系数明显降低, 且波动幅度较小。这是因为铜是很好的固体润滑材料, 铜的加入减小了涂层的摩擦系数, 有利于涂层的摩擦磨损性能^[18-19]。

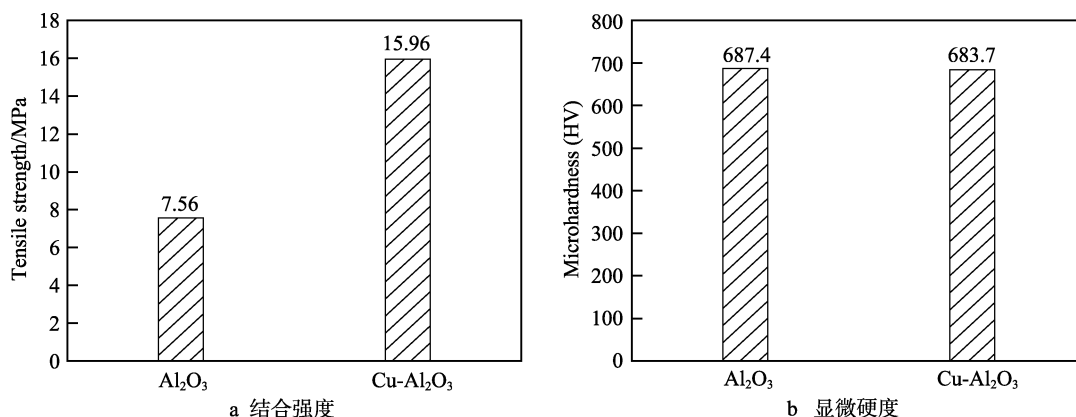
图 4 Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃ 涂层的显微硬度和结合强度对比

Fig.4 Comparison of microhardness and bonding strength of Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃ coatings: a) Bonding strength; b) Microhardness

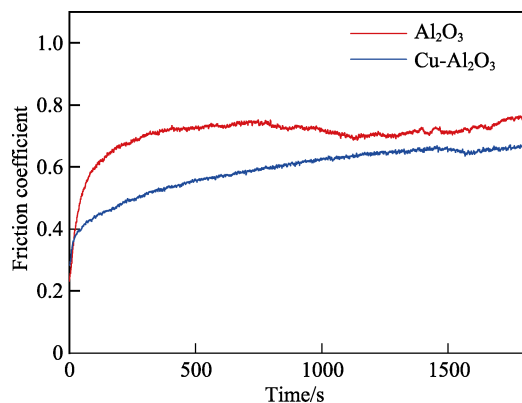


图5 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层摩擦系数随时间的变化
Fig.5 Curve of friction coefficient of Al_2O_3 and $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ coatings with time

Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损率如图6所示。可以看出, $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损率为 $5.93 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{m}$, 比氧化铝涂层降低了 14.68%。铜的加入减小了 Al_2O_3 涂层的磨损率, 有利于涂层摩擦磨损性能的提高。一方面, 在制备过程中, Al_2O_3 涂层的熔滴堆叠疏松, 内部存在微裂纹和孔隙等微缺陷, 使得涂层的连续性下降, 内聚结合强度降低, 因此耐磨性降低^[5]。 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层由于加入铜后, 填充了部分孔隙, 减小了涂层内部的微裂纹等缺陷, 提高了涂层的结合强度, 从而耐磨性提高。另一方面, 铜是面心立方结构, 具有良好的塑性, 当摩擦磨损试验进行一段时间后,

摩擦表面间形成连续覆盖的塑性变形层, 塑性变形层的表面上有连续的铜润滑薄膜和抗咬合的氧化物 Cu_2O 颗粒分布^[17], 减弱了对磨球对涂层表面结构的破坏。因此, 铜的加入减小了涂层的磨损率, 提高了涂层的耐磨性。

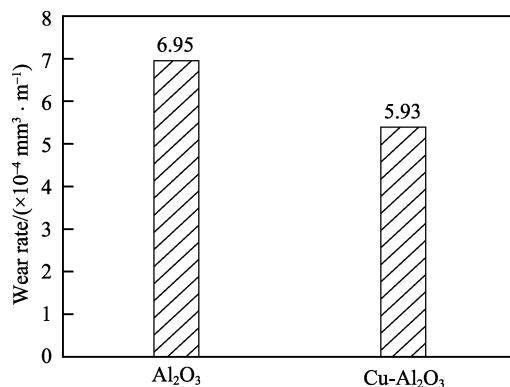
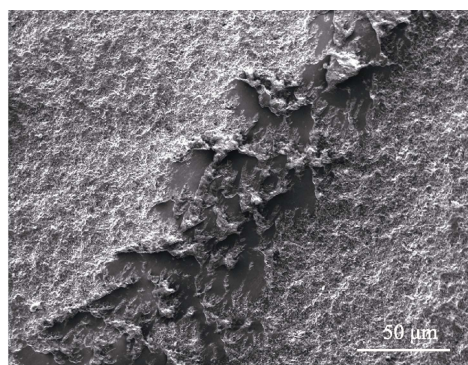


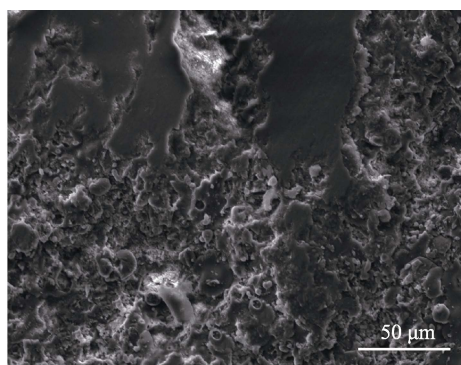
图6 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损率
Fig.6 Wear rate of Al_2O_3 and $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ coatings

2.5 涂层的磨损机制分析

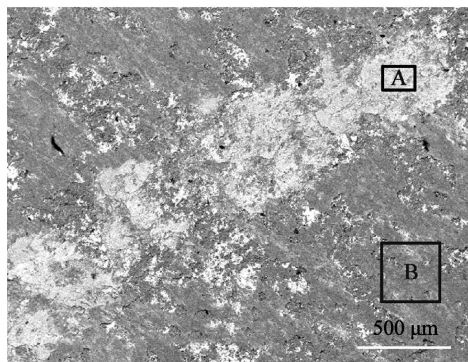
图7为 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损形貌。图8为A区和B区能谱分析(A区是图7c中磨痕处, B区是图7c中非磨痕处)。从图7a、b可以看出, Al_2O_3 涂层磨痕表面存在剥落坑、磨屑, 磨痕区域凹凸不



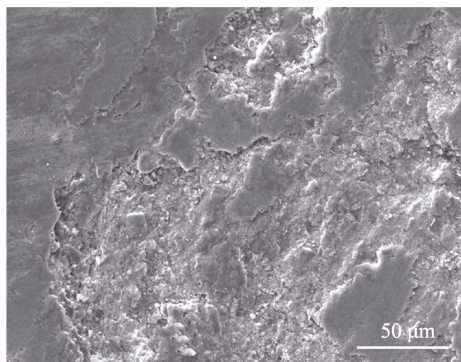
a Al_2O_3 涂层磨痕



b Al_2O_3 涂层磨痕局部放大



c $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层磨痕



d $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层磨痕局部放大

图7 Al_2O_3 和 $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损形貌

Fig.7 Wear morphology of Al_2O_3 and $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ coatings: a) Al_2O_3 coating wear scar; b) partial enlargement of Al_2O_3 coating wear scar; c) $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ coating wear scar; d) partial enlargement of $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ coating wear scar

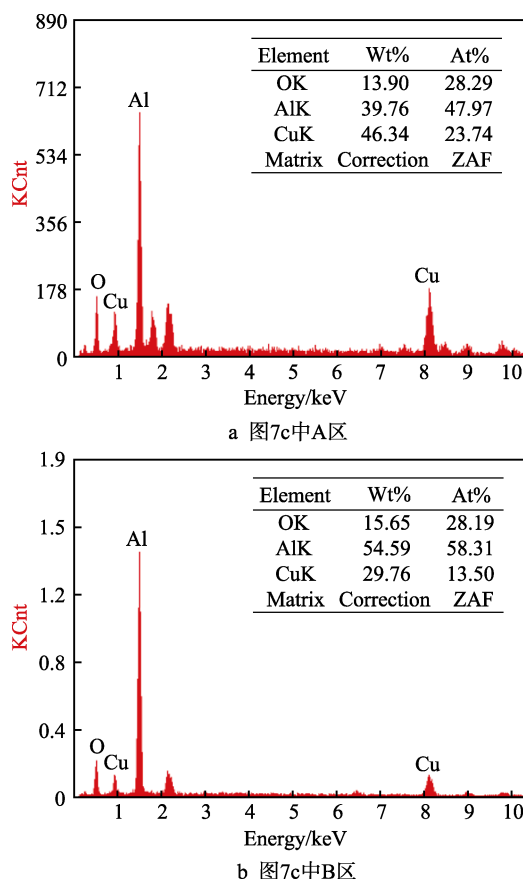


图 8 A 区和 B 区能谱分析

Fig.8 EDS analysis of part A and part B:

a) Area A in Fig.7c; b) Area B in Fig.7c

平, 部分剥落后的表面露出氧化铝熔滴沉积的形貌, 而 Cu-Al₂O₃ 涂层磨损较为光滑平整, 只有少许的剥落坑。这是由于在等离子喷涂过程中, Al₂O₃ 熔融颗粒和未熔融颗粒, 主要靠在等离子焰流中获得一定的速度, 不断在基体堆叠, 内部结合强度较低, 且涂层不够致密, 使得涂层内部存在微裂纹、孔隙等缺陷。摩擦磨损过程中, 在循环载荷的作用下, 微缺陷处易萌生裂纹, 并且裂纹不断扩展、连通, 最终使得磨损表面部分区域出现剥落坑。由图 7c、d 可知, Cu-Al₂O₃ 涂层磨损表面剥落坑面积减小, 磨屑较少, 磨损表面比较平整, 剥落现象有所减轻, 磨损率减小, 对磨面接触比较稳定, 摩擦系数曲线更为平稳。一方面是因为, 磨痕处铜含量较非磨痕处明显增加 (见图 8), 铜本身是一种很好的固体润滑材料, 存在涂层的磨痕处可以有效地降低摩擦系数。等离子喷涂氧化铝陶瓷是以扁平粒子逐层堆积形成层状多孔结构, 这种涂层主要的失效机制在于扁平粒子边界连接处及孔隙周围的解理断裂^[20]。铜的加入可以弥合涂层的部分孔隙, 增加涂层的致密度, 提高氧化铝涂层的结合强度, 降低涂层的摩擦系数, 从而起到了减摩的效果, 减小了涂层的磨损率。另一方面, 在循环载荷作用下, 铜弥散分布在摩擦表面, 与氧化铝共同压实磨痕处, 对压实处的磨痕起到了强化作用, 阻止裂纹扩展。

同时能够有效地阻止氧化铝涂层在循环载荷或摩擦切应力下的剥落, 从而减轻了涂层的磨损。因此, 与 Al₂O₃ 涂层相比, Cu-Al₂O₃ 复合涂层磨损的剥落面积减小, 磨痕表面较为平整, 主要磨损机制为剥落。综合分析认为, Cu-Al₂O₃ 复合涂层较 Al₂O₃ 涂层表现出更好的摩擦磨损性能。

3 结论

1) 两种涂层喷涂过程中均有 α -Al₂O₃ 相转变为 γ -Al₂O₃, Cu-Al₂O₃ 涂层有 Cu₂O 生成。

2) 与 Al₂O₃ 涂层相比, Cu-Al₂O₃ 涂层孔隙、内部微裂纹减少, 结合强度明显提高, 显微硬度变化不大。

3) 与 Al₂O₃ 涂层相比, Cu-Al₂O₃ 涂层摩擦系数减小, 且摩擦系数曲线波动更为稳定, 磨损率降低了 14.68%, 磨损机制均为剥落。综合分析认为, 铜的添加改善了 Al₂O₃ 涂层的摩擦磨损性能。

参考文献:

- [1] 税国红, 杨屹, 吴明霞, 等. 铁基金属摩擦副表面自修复层分析[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 139-146.
SHUI Guo-hong, YANG Yi, WU Ming-xia, et al. Self-repairing layers analysis on the surface of iron-based metal friction pairs[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 139-146.
- [2] 刘新田. 表面工程[M]. 开封: 河南大学出版社, 2000.
LIU Xin-tian. Surface engineering[M]. Kaifeng: Henan University Press, 2000.
- [3] 曹玉霞, 杜令忠, 张伟刚, 等. 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 涂层的制备及摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 62-66.
CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Study on preparation and tribological properties of atmospheric plasma-sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ wear-resistant coatings[J]. Surface technology, 2015, 44(5): 62-66.
- [4] AN Yu-long, LI Shuang-jian, HOU Guo-liang, et al. Mechanical and tribological properties of nano/micro composite alumina coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. Ceramics international, 2017, 43(6): 5319-5328.
- [5] 杜三明, 靳俊杰, 肖宏滨, 等. 纳米 Al₂O₃ 等离子喷涂涂层的制备及性能分析[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 1-6.
DU San-ming, JIN Jun-jie, XIAO Hong-bin et al. Preparation and properties analysis of plasma sprayed nano alumina coatings[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 1-6.
- [6] FERVEL V, NORMAND B, LIAO H, et al. Friction and wear mechanisms of thermally sprayed ceramic and cermet coatings[J]. Surface & coatings technology, 1999, 111(2-3): 255-262.
- [7] YIN Z, TAO S, ZHOU X, et al. Tribological properties of

- plasma sprayed Al/Al₂O₃, composite coatings[J]. Wear, 2007, 263(7): 1430-1437.
- [8] MATTHEWS S, TALIANA F, JAMES B. Heat treatment of plasma-sprayed Al₂O₃ and Al₂O₃-WO₃ coatings between 500 and 1000 °C[J]. Surface & coatings technology, 2012, 212: 109-118.
- [9] DHAKAR B, NAMDEO A, CHATTERJEE S, et al. Heat treatment of plasma sprayed alumina-chromia composite coatings[J]. Surface engineering, 2018, 34(10): 737-746.
- [10] KLYATSKINA E, RAYÓN E, DARUT G, et al. A study of the influence of TiO₂ addition in Al₂O₃ coatings sprayed by suspension plasma spray[J]. Surface & coatings technology, 2015, 278(s1-2): 25-29.
- [11] 姜帆, 宫文彪, 孙枫乔. 等离子喷涂 Ni₅Al-Al₂O₃ 复合涂层的组织结构与性能[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2015, 36(6): 613-616.
- JIANG Fan, GONG Wen-biao, SUN Feng-qiao. Study on microstructure and properties of Ni₅Al-Al₂O₃ coating by plasma spraying[J]. Journal of Changchun University of Technology: natural science edition, 2015, 36(6): 613-616.
- [12] SONG B, DONG S, LIAO H, et al. Microstructure and wear resistance of FeAl/Al₂O₃, intermetallic composite coating prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Surface & coatings technology, 2015, 268: 24-29.
- [13] 云海涛, 梁波, 季珩, 等. 等离子喷涂铜-石墨复合涂层结构与干摩擦磨损性能研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(5): 60-65.
- YUN Hai-tao, LIANG Bo, JI Heng, et al. Structure and dry tribology performance of plasma sprayed copper-graphite composite coating[J]. Journal of aeronautical materials, 2012, 32(5): 60-65.
- [14] 杜平, 张伟, 刘志兰, 等. 铜基自润滑材料及其摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2018(6).
- DU Ping, ZHANG Wei, LIU Zhi-lan, et al. Copper-based self-lubricating materials and relevant tribological properties[J]. Surface technology, 2018(6).
- [15] MCPHERSON R. The relationship between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma-sprayed coatings[J]. Thin solid films, 1981, 83(3): 297-310.
- [16] LEI A-li, DONG Nan, FENG La-jun. Preparation and properties of plasma spraying Cu-Al₂O₃ gradient coatings[J]. Journal of materials science & technology, 2007, 23(3): 383-386.
- [17] 甄文柱, 梁波. 等离子喷涂 MoS₂/Cu 基复合涂层真空摩擦磨损性能[J]. 材料工程, 2013(8): 16-22.
- ZHEN Wen-zhu, LIANG Bo. Tribological behavior of plasma sprayed MoS₂/Cu composite coating under vacuum atmosphere[J]. Journal of materials engineering, 2013(8): 16-22.
- [18] YIN Zhi-jian, TAO Shun-yan, ZHOU Xia-ming, et al. Preparation and characterization of plasma-sprayed Al/Al₂O₃, composite coating[J]. Materials science & engineering A, 2008, 480(1-2): 580-584.
- [19] 钟国明, 曾鹏, 李东强, 等. 热处理对 Cu-10Al-X 热喷涂涂层组织与性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2016(14): 759-764.
- ZHONG Guo-ming, ZENG Peng, LI Dong-qiang, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of thermally sprayed Cu-10Al-X coating[J]. Electroplating & finishing, 2016(14): 759-764.
- [20] 赵岩, 吴志生, 李华. 等离子喷涂氧化铝-碳纤维复合涂层的结构及耐磨性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 29-34.
- ZHAO Yan, WU Zhi-sheng, LI Hua. Microstructure and anti-wear properties plasma sprayed alumina-carbon fiber coatings[J]. China surface engineering, 2013, 26(2): 29-34.