

膜层技术

# 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等离子喷涂涂层的制备及性能分析

杜三明<sup>1,2</sup>, 靳俊杰<sup>1,2</sup>, 肖宏滨<sup>1,2</sup>, 张永振<sup>1,2</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023;  
2. 河南科技大学 河南省材料摩擦学重点实验室, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** **目的** 对比研究微/纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等离子喷涂涂层的组织、力学及摩擦磨损行为。**方法** 以纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末为原料,利用喷雾干燥法制备出粒径分布在  $35 \sim 75 \mu\text{m}$  的喷涂喂料,采用等离子喷涂技术在 20 钢基体上制备纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。采用商用微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  喂料,以相同的喷涂工艺制备出微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。对粉末、涂层的显微结构及涂层的磨损形貌进行表征,对比分析两种涂层的组织、力学性能和摩擦磨损行为。**结果** 与微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层相比,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层粒子间结合更为致密,使得其结合强度和显微硬度得到大幅度提高。在载荷 750 g,转速 1000 r/min 的条件下,微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的摩擦系数为 0.41,而纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层仅为 0.34,并且摩擦系数值的波动幅度更为稳定。在不同转速下,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的磨损率均降低明显。**结论** 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等离子喷涂涂层组织致密,表现出了较好的力学性能和耐磨性。

**关键词:** 等离子喷涂; 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层; 磨损; 耐磨性

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)06-0001-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.06.001

## Preparation and Properties Analysis of Plasma Sprayed Nano Alumina Coatings

DU San-ming<sup>1,2</sup>, JIN Jun-jie<sup>1,2</sup>, XIAO Hong-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-zhen<sup>1,2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Key Laboratory for Material Tribology of Henan Province, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the microstructures, mechanical and tribological properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  micro-nano coatings. **Methods** Nanosized  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powders were deposited using atmospheric plasma spraying technique. Particle size distributed from 35 to 75  $\mu\text{m}$ , consisted of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , were obtained by spray drying. Micro-coatings of commercial  $\text{Al}_2\text{O}_3$  feedstocks were also prepared as control. Microstructure of powders and coatings, as well as the worn surface of coatings, were characterized. Moreover, microstructure, mechanical and tribological behaviors of both nano and micro coatings were analyzed, respectively. **Results**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano-coatings showed a better interface bonding between the layers compared with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  micro coatings which resulted in great improvement of adhesion strength and microhardness of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano coatings. The friction coefficient of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  micro coating is 0.41 while  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano coating 0.34 at the speed of 1000 r/min and 750 g load. **Conclusion**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nano coatings showed a better me-

收稿日期: 2015-02-09; 修订日期: 2015-03-24

Received: 2015-02-09; Revised: 2015-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51375146,51175149)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375146,51175149)

作者简介: 杜三明(1970—),男,河南人,博士,副教授,主要从事材料摩擦学及表面工程研究。

Biography: DU San-ming(1970—), Male, from Henan, Doctor, Associate professor, Research focus: material tribology and surface engineering.

chanical properties and wear resistance due to the excellent microstructure.

**KEY WORDS:** plasma spraying; nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings; wear; abrasion resistance

热喷涂氧化铝涂层具有优良的耐磨、耐蚀、绝缘等综合性能<sup>[1-2]</sup>,应用价值极高,因此关于氧化铝涂层的研究备受国内外学者青睐<sup>[3]</sup>。邓春明等<sup>[4-5]</sup>研究了不同方法对氧化铝涂层致密性的影响,发现低压喷涂的效果优于常压喷涂。毛杰等<sup>[6-7]</sup>通过优化超音速等离子喷涂工艺,改善了氧化铝涂层的力学性能。涂层与基体的良好结合是保证涂层优异性能得以有效应用的前提<sup>[8-9]</sup>,S Costil<sup>[10]</sup>发现基体经过脉冲激光后,涂层的结合性能得到大幅度提高。随着复合材料在各领域中的作用日渐凸显,氧化铝涂层的复合化研究也与日俱增<sup>[11-12]</sup>。He Long 等<sup>[13]</sup>制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$ 复合涂层,发现添加 $\text{CeO}_2$ 能够有效降低涂层的孔隙率,显著提高涂层的综合性能。以上研究主要为了解决氧化铝陶瓷涂层脆性大、对裂纹敏感和与基体结合弱等问题,而涂层性能的提高与喷涂材料有很大关系。随着纳米技术的发展,纳米材料与热喷涂技术的结合表现出了广阔的应用前景<sup>[14-15]</sup>。

美国 Inframat 公司开发了 AT13 纳米喂料,开启了热喷涂纳米氧化铝复合涂层的新纪元。这种涂层表现出了十分优异的强韧性、耐腐蚀磨损性和抗热震性<sup>[16]</sup>。随后,Agarwal 等<sup>[17-18]</sup>采用该制粉方法制备了纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CNTs 复合涂层,大幅提高了涂层的综合性能。田宗军<sup>[19]</sup>对等离子喷涂 AT13 纳米涂层进行了激光重熔,进一步提高了涂层的强韧性。总结国内外氧化铝陶瓷涂层的研究现状,所用的粉末由微米级向纳米级逐渐细化,涂层从成分单一向复合化发展。微/纳米氧化铝及其复合涂层在当今社会中发挥着举足轻重的作用,而等离子喷涂方法是最具经济效益和便于产业化推广的热喷涂技术之一<sup>[20]</sup>。文中采用大气等离子喷涂法制备了微米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层,并对比了两种陶瓷涂层的组织及性能,拟为完善氧化铝陶瓷涂层的应用和研究提供一定参考。

## 1 试验

### 1.1 粉体材料

采用 JEM-2100 型透射电镜(TEM)对所购 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米粉末(纯度 $\geq 99.99\%$ )进行了微观形貌表征,如图 1 所示,粉末尺寸大约为 $65 \sim 180 \text{ nm}$ ,主要呈球状和片状结构。然而,纳米粉体由于粒径小,质量轻,表

面活性高,因而易团聚,流动性不好,这使其在喷枪中送粉困难,在喷涂过程中烧损、气化现象严重,并且晶粒易长大,不易得到均匀、致密的高性能纳米结构涂层。喷雾干燥法是目前有效解决该问题的常用方法之一<sup>[21]</sup>。试验中利用 LGZ-8 型离心式喷雾干燥设备制备出具有纳米结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 喷涂喂料,如图 2a 所示,喂料球形度较好,尺寸分布在 $35 \sim 75 \mu\text{m}$ (经过筛处理),且每个球形喂料均由更为细小的结构组成(见图 2b)。

商用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 微米喂料(纯度 $\geq 99.4\%$ )通过熔融破碎法制得,可直接用于等离子喷涂。如图 3 所示,

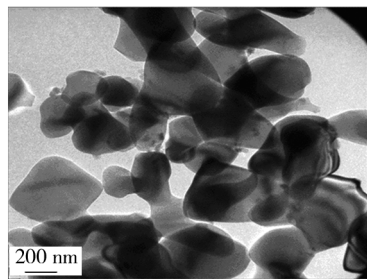
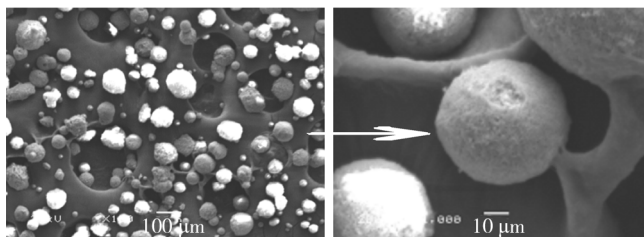


图 1 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末 TEM 照片

Fig. 1 TEM micrograph of Nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  powders



a 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 喂料

b 局部放大

图 2 纳米结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 喂料微观形貌(SEM)

Fig. 2 SEM micrographs of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  feedstocks: a) nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$  feedstocks; b) magnification of fig. a

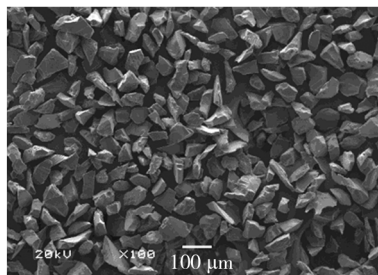


图 3 微米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粉末 SEM 照片

Fig. 3 SEM micrographs of micro- $\text{Al}_2\text{O}_3$  feedstocks

微米喂料呈形状不规则的块状,粒度分布均匀,平均粒径分布在 35 ~ 75 μm。

1.2 涂层制备

基体采用 20 钢,过渡层原料为 Ni/Al 粉末。喷涂前先对基体进行预处理,包括除油去锈、喷砂粗化、超声波清洗等。在喷涂过渡层和陶瓷涂层前,均采用

等离子焰流对基体进行预热。  
利用 ZB-80 型等离子喷涂设备制备涂层,具体工艺参数见表 1。等离子喷涂后,目测检查涂层与基体间无剥离、翘皮现象。用游标卡尺对涂层厚度进行测量,涂层厚度均匀,且各试样的涂层厚度差异不大。过渡层厚度控制在 100 μm 左右,陶瓷涂层厚度大约为 500 μm。

表 1 等离子喷涂参数  
Tab.1 Plasma spraying parameters

Coating	Input power /kW	Current /A	Voltage /V	Ar /(L·min <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> / (L·min <sup>-1</sup> )	Feed rate / (r·min <sup>-1</sup> )	Spray distance/ cm
Micro-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.8	480	62	43	12.8	13.2	10
Nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27	450	60	42	12	13.2	10

1.3 相关性能测试

- 1) 采用 JSM-5610LV 扫描电镜 (SEM) 对涂层微观组织及磨损形貌进行分析表征。
- 2) 采用 MH-3 显微硬度计测试涂层硬度,载荷为 300 g,加载时间为 15 s。测试时对金相试样进行抛光,之后在横截面上随机测试 10 个点,取平均值。
- 3) 采用 AG-I 250 万能拉伸试验机测试涂层与基材的结合强度,加载速率为 0.1 mm/min,每组 5 个试样。
- 4) 涂层的摩擦磨损试验在 QG-700 型摩擦磨损试验机上进行,摩擦副接触方式为球盘式。试验在室温下进行,对磨球为 φ6.4 mm 的 YG8 硬质合金球,其硬度为 89.5HRC。载荷为 7.5 N,转速分别为 200, 400, 600, 800, 1000 r/min。采用 Nanofocus AG 获得磨痕数据,计算磨损面积 A,从而算出磨损体积 ΔV = 2πrA,再按照公式 (1) [22] 计算涂层磨损率 (其物理意义是消耗单位摩擦功造成的体积损失):

$$V = \frac{\Delta V}{2\pi r n t \mu N} \tag{1}$$

式中:V 为磨损率,单位为 mm<sup>3</sup>/(N·m);n 为转速;t 为摩擦时间;μ 为摩擦系数;N 为载荷。

2 结果与分析

2.1 涂层组织及性能

图 4 为微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的微观形貌。由图 4a,b 可以看出,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷粒子经喷涂后熔融良好,与基体的碰撞作用使其主要呈现扁平“薄饼”状和飞溅“花瓣”状形态。喷涂过程中,由于气体卷入及熔融或半

熔融粒子依次堆积并随机搭接,造成涂层中存在空隙及微裂纹,如图 4b 所示。由图 4c 可知,涂层与基体及涂层的层与层之间结合良好,涂层中存在较多孔洞。由于熔滴在最外侧表面不断沉积,使得涂层表面呈现出堆砌的凹凸不平的“锯齿状”结合状态,证明层/层界面间的主要结合方式为机械锚固结合。

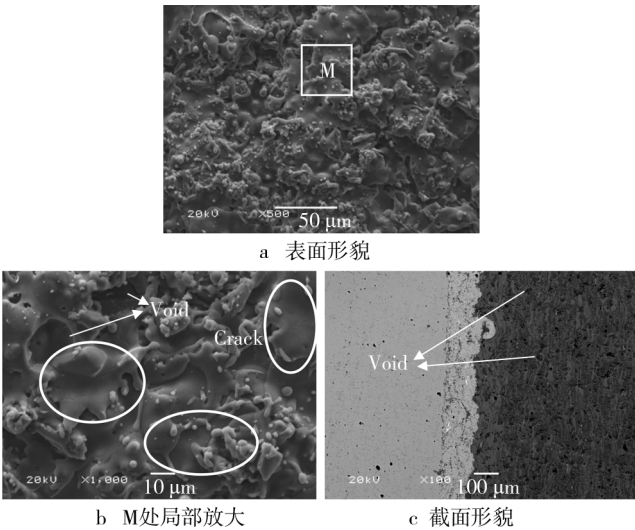


图 4 微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层微观形貌 (SEM)

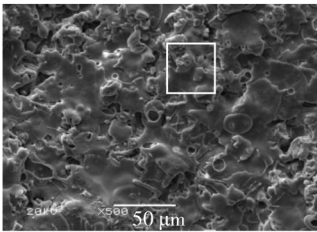
Fig.4 Micrographs of micro Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings: a) surface morphology; b) magnification of M; c) cross-section morphology (SEM)

图 5 为纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的微观形貌。在纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷涂层的形成过程中,熔滴依次堆砌,随机在表面铺展,使得涂层表面呈现出粗糙不平的形貌,但纳米熔滴铺展效果较好,且各粒子间结合更加紧密,涂层中的微裂纹明显减少,见图 5b。如图 5c 所示,涂层的截面形貌中未出现明显的粒子间界面,从而片层状结构并不明显。对比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米、微米涂层的显微

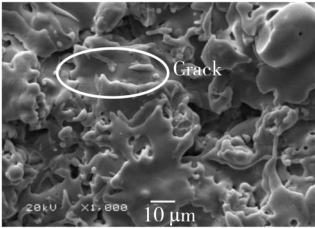


组织可知,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的层间结合更为紧密,宏观上表现为涂层表面较为致密,这与后文中涂层结合强度与显微硬度的测试结果一致。

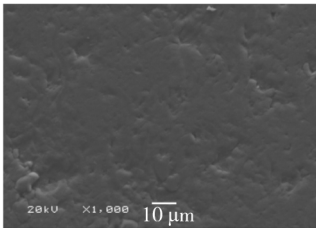
涂层在喷涂过程中产生的气孔及由于热应力而产生的裂纹是造成涂层失效的直接原因<sup>[23]</sup>。综上所述,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层微观组织的变化改善了致密性,从而使其显微硬度和结合强度均明显优于微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层(见表 2)。此外,纳米粒子的“细晶强化”作用也有助于硬度和强度的提高。晶粒越细小,涂层在外力作用下发生变形时,受到晶界的阻碍就越大;并且,晶粒越细小,在一定体积内的晶粒数目就越多,相同的外力则能分散到更多的晶粒内,使得晶粒受力更为均匀,不至于产生集中应力;因此,纳米涂层表现出较高的硬度和强度<sup>[24]</sup>。通过计算可知,微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的显微硬度值标准差分别为 59.95,27.72,表明纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层均匀性较好,也证明了纳米涂层较为致密。



a 表面形貌



b M处局部放大



c 截面形貌

图 5 纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层微观形貌 (SEM)

Fig. 5 Micrographs of nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings: a) surface morphology; b) magnification of M; c) cross-section morphology (SEM)

表 2 涂层的结合强度与显微硬度

Tab.2 Adhesive strength and microhardness of coatings

涂层	结合强度/MPa				显微硬度 (HV)										
	1	2	3	均值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值
微米 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.38	18.69	25.31	20.46	724	632	672	710	754	615	719	598	737	602	676.3
纳米 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30.81	36.47	35.08	34.12	910	868	871	869	907	836	854	862	917	849	874.3

2.2 摩擦磨损行为

图 6 为室温干滑动摩擦条件下,微米、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层及 20 钢基体的摩擦系数随时间的变化曲线。摩擦条件为:载荷 750 g,转速 1000 r/min。从图 6 可以看出,20 钢、微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的平均摩擦系数分别约为 0.59,0.41,0.34。涂层及基体的

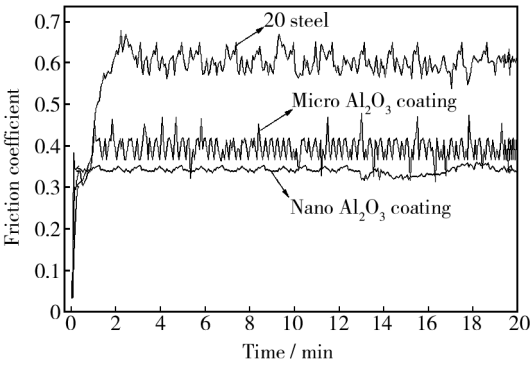


图 6 涂层与 20 钢基体的摩擦系数随时间的变化

Fig.6 Friction coefficient curves with time of coatings and 20 steel

摩擦系数总体变化趋势大体一致,均为先增大,随后在一定范围内达到动态平衡。涂层的摩擦系数均低于 20 钢的摩擦系数。与微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层相比,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的摩擦系数明显降低,且波动幅度较小。纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的摩擦系数更为稳定,表现出了较好的摩擦性能。

图 7 为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层与 20 钢基体在不同转速下的磨损率。由图 7 可以看出,20 钢基体的磨损率在低速时,随着速度的增加而增大;在高速时,随着速度的增加而减小,并且磨损率变化波动减小。这可能是因为在干滑动摩擦条件下,由于摩擦热的作用,20 钢表面易形成氧化膜,而氧化膜的润滑作用使其在高速时的磨损量减小。从微米、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的磨损率曲线可以看出,二者相比之下,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的磨损率较小。这是因为微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层在喷涂过程中堆叠疏松,内部存在的空隙等微缺陷导致涂层的连续性下降<sup>[25]</sup>,内聚结合强度降低,从而耐磨性降低。从磨损率的角度来看,纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层的耐磨性较微米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层得到了明显改善。

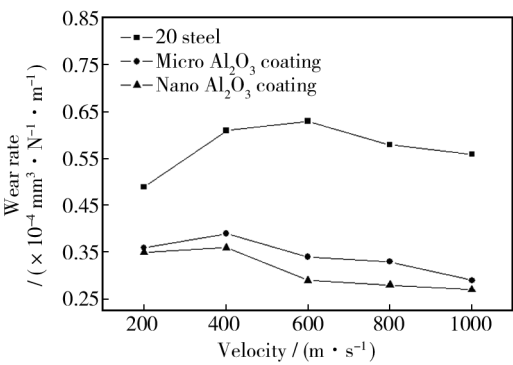


图 7 不同转速下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层与 20 钢基体的磨损率  
Fig. 7 Wear rate of 20 steel and coatings at different velocity

图 8 为微米、纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的磨损形貌。从图 8a,b 可以看出,微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的主要磨损方式为层片状剥落。这是由于涂层在热喷涂过程中,熔融粒子的堆叠疏松,涂层内部存在的微缺陷(空隙、裂纹等)构成裂纹源,在外力的作用下,这些裂纹源沿着缺陷或晶界逐渐扩展,而不同方向的裂纹相互连接,造成涂层在磨损过程中的剥落<sup>[26]</sup>。由图 8c,d 可知,纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层磨损表面的裂纹较少,磨痕较为平整光滑,磨损表面附着有较多的细小磨屑。这是因为纳米涂层由于细晶强化作用,表现出较高的强度,在磨损试验中出现轻微剥落后,残留在磨痕中的部分磨屑因继续参与磨损行为,而被研磨成更为细小的磨屑,这将有利于减弱涂层与摩擦副的直接接触,从而减轻涂层的磨损。因此,与微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷涂层相比,纳米

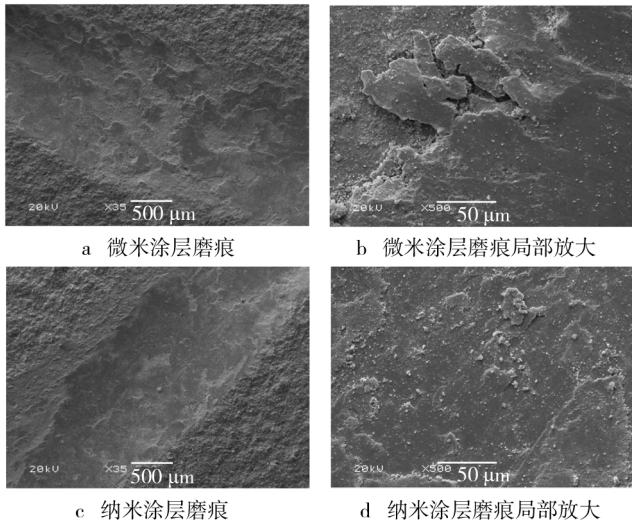


图 8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层磨损形貌

Fig. 8 The worn surface of the coatings: a) wear crack of micro coating; b) magnification of fig. 8a; c) wear crack of nano coating; d) magnification of fig. 8c

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷涂层的磨损面积明显减少,磨损形貌更为光滑平整。相关研究表明<sup>[26—27]</sup>,多晶氧化物陶瓷涂层的平均晶粒尺寸越小,耐磨性能越好,原因是在磨损过程中形成的裂纹主要沿晶界扩展,晶粒越细小,晶界体积就越大,从而使得磨损过程中裂纹扩展的路径更长,裂纹扩展将需要更多的能量,最终表现出磨损率的降低。综合分析认为,纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层较微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层表现出了更好的耐磨性能。

3 结论

- 1) 与微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层相比,纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层粒子间结合更为紧密,内部微裂纹和空洞明显减少。纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层显微结构的改善及更好的均匀性使得其结合强度和显微硬度均明显优于微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层。
- 2) 与微米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层相比,纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层摩擦系数较低,且波动幅度更为稳定,表面磨损形貌光滑平整,磨损率较低,表现出了更好的耐磨性能。

参考文献

[1] 李德元,胡广旭,王赫莹,等. 氧化铝涂层在熔融锌液中的腐蚀及热震行为[J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(4):361—364.  
LI De-yuan, HU Guang-xu, WANG He-ying, et al. Corrosion and Thermal Shock Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Coating in Molten Zinc[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(4): 361—364.

[2] 曾威,邓春明,刘敏,等. 等离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层的介电性能[J]. 材料研究与应用,2011,5(4):275—278.  
ZENG Wei, DENG Chun-ming, LIU Min, et al. Dielectric Properties for Plasma Sprayed Alumina Coating[J]. Materials Research and Application, 2011, 5(4): 275—278.

[3] AMSELLEM O, PAUCHET F, JEANDIN M, et al. Interconnected Porosity Modification of Plasma Sprayed Alumina Coating Using Excimer Laser Surface Treatment[C]//Proceedings of the International Thermal Spray Conference. US: ASM International (Houston, ASM Thermal Spray Society, the German Welding Society and the International Institute of Welding), 2012:521—528.

[4] 邓春明,周克崧,刘敏,等. 低压等离子喷涂氧化铝涂层的特性[J]. 无机材料学报,2009,24(1):117—121.  
DENG Chun-ming, ZHOU Ke-song, LIU Min, et al. Characteristics of Low Pressure Plasma Sprayed Alumina Coating [J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(1): 117—121.

- [5] 邓畅光,邓春明,刘敏,等. 大气和低压等离子喷涂氧化铝涂层[J]. 材料工程,2008(5):48—51,56.  
DENG Chang-guang, DENG Chun-ming, LIU Min, et al. Air Plasma and Low Pressure Plasma Sprayed Alumina Coatings [J]. Journal of Materials Engineering, 2008(5):48—51, 56.
- [6] 毛杰,邓春明,邝子奇,等. 超音速等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层制备及工艺优化[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):143—146.  
MAO Jie, DENG Chun-ming, KUANG Zi-qi, et al. Preparation and Process Optimization of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings Deposited by Supersonic Plasma Spraying Technique[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015,36(1):143—146.
- [7] 毛杰,宋进兵,邓畅光,等. 氧化铝涂层的超音速等离子喷涂参数影响及硬度分析[J]. 表面技术,2014,43(4):110—114,141.  
MAO Jie, SONG Jin-bing, DENG Chang-guang, et al. Parameter Effect and Microhardness Analysis of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coatings Prepared by the Supersonic Plasma Spraying Technique[J]. Surface Technology, 2014, 43(4):110—114, 141.
- [8] 刘扬,赵建国,姚瑶,等. H13 钢火焰喷涂氧化铝涂层结合强度[J]. 焊接技术,2011,40(4):18—20.  
LIU Yang, ZHAO Jian-guo, YAO Yao, et al. Research on Bonding Strength of Aluminum Oxide Coatings on H13 Steel by Flame Spraying[J]. Welding Technology, 2011,40(4):18—20.
- [9] 王国阳,李利,武笑宇,等. 等离子喷涂氧化铝涂层界面状态和结合性能的研究[J]. 材料开发与应用,2012,27(3):23—27.  
WANG Guo-yang, LI Li, WU Xiao-yu, et al. Research on Interface State and Bonding Strength of Plasma Sprayed Alumina Oxide Coating [J]. Development and Application of Materials, 2012,27(3):23—27.
- [10] COSTIL S, LUKAT S, VERDY C, et al. Influence of the Surface State on the Adherence of the Coating: Case of an Alumina Coating Plasma Sprayed on SiC Composites[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011,20(1/2):68—75.
- [11] 张小锋,周克崧,宋进兵,等. 大气等离子喷涂 7% 氧化钇稳定氧化锆粒子沉积形貌分析[J]. 硅酸盐学报,2015,43(1):21—27.  
ZHANG Xiao-feng, ZHOU Ke-song, SONG Jin-bing, et al. Morphology Analysis of Air Plasma Sprayed 7%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Splat[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015,43(1):21—27.
- [12] 徐心洁,贺毅,马东林,等. 等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  复合陶瓷涂层的组织及热氧化性能的研究[J]. 表面技术,2010,39(1):15—19.  
XU Xin-jie, HE Yi, MA Dong-lin, et al. Study on the Structure and Thermal Oxidization Properties of Plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  Composite Ceramic Coatings [J]. Surface Technology, 2010,39(1):15—19.
- [13] HE Long, TAN Ye-fa, WANG Xiao-long, et al. Microstructure and Wear Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$ /Ni-base Alloy Composite Coatings on Aluminum Alloys by Plasma Spray[J]. Applied Surface Science, 2014,314(30):760—767.
- [14] 王铀. 纳米结构涂层与纳米改性材料[J]. 金属热处理, 2010,35(1):9—14.  
WANG You. Nano-structured Coatings and Nano-modified Materials[J]. Heat Treatment of Metals, 2010,35(1):9—14.
- [15] 马建龙,李国禄,王海斗,等. 超音速等离子喷涂工艺对纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  涂层的影响[J]. 材料热处理学报, 2014,35(2):126—130.  
MA Jian-long, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Influence of Supersonic Plasma Spraying Process on Nanostructure  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014,35(2):126—130.
- [16] 王铀,杨勇. 热喷涂纳米结构涂层的研究进展及在外军舰艇上的应用[J]. 中国表面工程,2008(1):6—15.  
WANG You, YANG Yong. Research Progress of Thermal Sprayed Nanostructured Coatings and Their Application in Foreign Warships [J]. China Surface Engineering, 2008(1):6—15.
- [17] CHEN Yao, BALANI Kantesh, AGARWAL Arvind. Analytical Model to Evaluate Interface Characteristics of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Oxide Nanocomposites[J]. Applied Physics Letters, 2008,92:1—3.
- [18] BAKSHI Srinivasa R, AGARWAL Arvind. An Analysis of the Factors Affecting Strengthening in Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Composites [J]. Carbon, 2011, 49:533—544.
- [19] 田宗军,王东生,沈理达,等. TiAl 合金表面激光重熔纳米陶瓷涂层[J]. 材料热处理学报,2010(2):128—132.  
TIAN Zong-jun, WANG Dong-sheng, SHEN Li-da, et al. Laser Remelting of Nanostructured Ceramic Coatings on TiAl Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010(2):128—132.
- [20] 王刚,焦孟旺,李贺,等. 热喷涂新技术在发动机减摩性能方面的应用和研究[J]. 表面技术,2014,43(1):103—108.  
WANG Gang, JIAO Meng-wang, LI He, et al. Application and Reasearch of New Thermal Spraying Technology in Engine Friction-reduction Performance [J]. Surface Technology, 2014,43(1):103—108.



- 240.
- [6] 蔡川雄,刘洪喜,张晓伟,等. 送粉角度对激光熔覆铁基复合涂层形状特征的影响[J]. 强激光与粒子束,2013,25(6):1359—1364.
- CAI Chuan-xiong, LIU Hong-xi, ZHANG Xiao-wei, et al. Influence of Powder Feeding Angle on Geometric Parameters of Laser-clad Fe-based Composite Coating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1359—1364.
- [7] WANG D, HU Q, ZENG X. Microstructures and Performances of Cr13Ni5Si2 Based Composite Coatings Deposited by Laser Cladding and Laser-induction Hybrid Cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 588: 502—508.
- [8] 汪新衡,蒋冬青,张蓉,等. 激光熔覆纳米 SiC 增强 Ni 基合金涂层的组织与高温抗氧化性能[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 30—34.
- WANG Xin-heng, JIANG Dong-qing, ZHANG Rong, et al. Reinforced Microstructure and High Temperature Oxidation Resistance of Ni-based Alloy Coating by Laser Cladding of SiC Nanometer Powder[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 30—34.
- [9] 刘发兰,赵树森,高文焱,等. 基材属性对 Ni60A-WC 激光熔覆涂层性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1319—1326.
- LIU Fa-lan, ZHAO Shu-sen, GAO Wen-yan, et al. Effect of Substrate on Ni60A-WC Laser Cladding Coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1319—1326.
- [10] 张维平,郎志华,马海波. 激光熔覆 SiC/Co 复合涂层的组织与性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 8—10.
- ZHANG Wei-ping, LANG Zhi-hua, MA Hai-bo. Microstructure and Performance of Laser Cladding SiC/Co Coating[J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 8—10, 33.
- [11] 丁阳喜,郭哲. 35CrMo 钢表面激光熔覆 Ni/WC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔覆层性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 32—34, 96.
- DING Yang-xi, GUO Zhe. Research of Properties of Laser Cladding on Ni/WC-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Surface of 35CrMo Steel[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 32—34, 96.
- [12] ALIMARDANI M, FALLAH V, KHAJEPOUR A, et al. The Effect of Localized Dynamic Surface Preheating in Laser Cladding of Stellite 1[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(23): 3911—3919.
- [13] SUN G F, WANG K, ZHOU R, et al. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Deposited Co-285+WC Coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 66: 98—105.
- [14] ZAFAR S, SHARMA A K. Development and Characterisations of WC-12Co Microwave Clad[J]. Materials Characterization, 2014, 96: 241—248.
- [15] OBADELE B A, OLUBAMBI P A, JOHNSON O T. Effects of TiC Addition on Properties of Laser Particle Deposited WC-Co-Cr and WC-Ni Coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3634—3642.
- [16] MONTGOMERY D C. Design and Analysis of Experiments[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [17] KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of Solidification[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1984.
- [18] BOETTINGER W J, BANERJEE D K. 7-Solidification-Physical Metallurgy[M]. Fifth Edition. Oxford: Elsevier, 2014.
- (上接第6页)
- [21] 路学成,阎殿然. 等离子喷涂纳米陶瓷涂层研究[J]. 热处理, 2009, 24(4): 1—6.
- LU Xue-cheng, YAN Dian-ran. Review on Plasma-sprayed Nano-ceramic Coatings[J]. Heat Treatment, 2009, 24(4): 1—6.
- [22] 杜三明,张永振,刘维民,等. 氧气气氛中 CrNiMo 钢的高温高速干滑动摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(4): 362.
- DU San-ming, ZHANG Yong-zhen, LIU Wei-min, et al. Tribological Behavior of CrNiMo Steel at Very High Speed and Elevated Temperature in Oxygen Atmosphere[J]. Tribology, 2008, 28(4): 362.
- [23] CARPIO Pablo, BORRELL Amparo, SALVADOR Maria Dolores, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Spraying Coatings from YSZ Feedstocks Comparising Nano- and Submicron- Sized Particles[J]. Ceramics International, 2015, 41(3): 4108—4117.
- [24] 张瑞珠,李静瑞,肖明,等. 电火花微纳米涂层的研究与应用[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 108—111, 115.
- ZHANG Rui-zhu, LI Jing-rui, XIAO Ming, et al. Research and Application of Micro Nanostructured Coating by Electro-spark[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 108—111, 115.
- [25] SUN You-bei, ZHOU Chun-gen. Effect of Spraying Power on Microstructure and Property of Nanostructured Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(9): 1275—1278.
- [26] FANG Yuan, KAZUO Hayashi. Influence of the Grain Size of the Alumina Coating on Crack Initiation in Indentation[J]. Wear, 1999, 225—229: 83—89.
- [27] ROY R Singha, GUCHHAIT H, CHANDA A, et al. Improved Sliding Wear-resistance of Alumina with Sub-micron Grain Size: A Comparison with Coarser Grained Material[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(16): 4737—4743.