

水环境中等离子喷涂纳米/微米喂料 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的摩擦学行为

赵晓琴^{1,2}, 周惠娣¹, 陈建敏¹

(1. 中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院北京研究生院, 北京 100084)

摘 要: 利用纳米结构和常规喂料用大气等离子喷涂方法制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层, 研究了水环境中两种涂层与不锈钢对磨时的摩擦磨损性能。结果表明: 水环境中, 两种涂层摩擦因数变化不大, 但是纳米喂料涂层耐磨性能明显优于常规涂层, 同时其对偶的磨损率仅为常规涂层对偶磨损率的 1/3~1/5, 磨损率随载荷的增加不断增加。讨论了水环境中两种涂层的磨损机制。

关键词: 摩擦磨损; 等离子喷涂; 纳米结构; 水环境; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2005)05-0035-04

Tribological Behaviour of Plasma Sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ Coatings From Nanoscale and Conventional Powders Under Water Environment

ZHAO Xiao-qin^{1,2}, ZHOU Hui-di¹, Chen Jian-min¹

(State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Two types of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coating with nano-scale and conventional powders were deposited by plasma spraying. Their wear mechanism against stainless steel as the counterpart of rubbing pair under water environment was discussed. The results showed that the friction coefficients of both coatings are similar at all test loads and exhibit no great difference. However, the coating with nanoscale powders improved wear resistance compared with coating with conventional powders, and also reduced wear rate of the counterpart material.

Key words: tribology; plasma spraying; water environment; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coating

0 引 言

近二三十年来,随着节约能源、减少环境污染的社会呼声不断提高,以及现代机械设备的不断发展,用水作为工作介质的材料摩擦学的研究成为材料环境失效研究的一个重要方面。由于水的粘度很低(通常为油的 1/20 以下),难以形成有效的流体润滑,摩擦磨损比较严重,容易造成磨损失效。为了提高水介质中摩擦副的工作可靠性,延长元件的使用寿命,在元件接触面进行陶瓷耐磨涂层的研究就成为重点^[1,2]。陶瓷涂层不仅具有陶瓷自身的优良特性如耐腐蚀、耐磨损、耐高温等,又保持了金属基体的可加工性能,还能开发新的功能。热喷涂 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷涂层具有很好的抗磨损、抗腐蚀以

及热绝缘等优异性能,是耐磨涂层中研究较多的一种。已有的研究表明,喷涂纳米喂料的陶瓷涂层比常规喂料的涂层具有更好的摩擦学性能^[3~7],也就是说采用纳米喂料制备的涂层能够在一定程度上减轻磨损,有可能应用于水介质中的耐磨部件。文中通过水环境中常规和纳米喂料制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层(以下简称常规涂层及纳米涂层)的摩擦学试验以及磨损表面形貌的观察和分析,研究和比较了 2 类陶瓷涂层的摩擦学性能的异同,分别探讨了水中 2 种涂层的磨损形态及其机理并对其摩擦磨损机理进行了分析,为陶瓷涂层在耐磨领域的应用、特别是在以水作为工作介质的耐磨工业领域的应用提供基础数据。

1 试验部分

1.1 涂层的制备

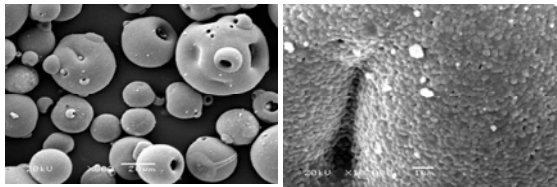
收稿日期: 2005-07-01; 修回日期: 2005-09-27

作者简介: 赵晓琴(1981-),女(汉),甘肃临洮人,硕士生。

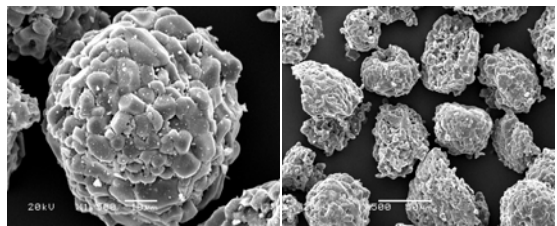
试验选用纳米和常规粉末在相同工艺条件下制备涂层样品。等离子致密化后的纳米颗粒成为平均尺寸为 30 μm 的球状颗粒, 常规粉末形状不规则, 尺寸为-53±10 μm。其形貌和组成见表 1 和图 1。

Table1 Details of feedstock powders			
类别	组 成	尺寸范围	来 源
纳米	Al ₂ O-13%TiO ₂	(ave.)30μm	*注 1
常规	Al ₂ O-13%TiO ₂	-53±10μm	*注 2

*注: 1-美国 Inframat 公司 2-先导热喷涂有限公司



(a)(b)纳米结构粉末



(c)(d)普通粉末

图 1 原始粉末形貌

Fig.1 SEM photographs of feedstock powders

两种涂层均采用 Sulzer-Metco 大气等离子喷涂系统及 F4-MB 喷枪制备, 喷涂工艺参数见表 2。底材是尺寸为 24×7 mm 的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。

Table2 Prameters for the plasma spraying		
	n-Al ₂ O ₃ /TiO ₂	c-Al ₂ O ₃ /TiO ₂
Ar/H ₂	40/10	40/14
电流/A	650	600
电压/V	78	78
送粉率 r/min	24	24
喷涂距离/mm	120	120

1.2 摩擦学性能试验

在 Optimol SRV 型摩擦磨损试验机上测试 Al₂O₃/TiO₂涂层的摩擦学性能。采用球-盘接触和往复的运动形式进行抗磨性能评价, 上试球为不锈钢球, 下试样为被测试样, 摩擦试验前将试样表面抛光至表面平均粗糙度R_a= 0.3 μm, 选用频率为 25 Hz、振幅 1.0 mm、试验时间为 20 min; 施加载荷分别为 20、40、60、80 N; 所有的磨损试验均在室温条件下进行。涂层试样的磨损体积损失是由表面轮廓仪测定磨损截面积后经计算得出, 而不锈钢对偶的磨损体积损失是由读数显微镜测定磨斑直径后计算得出。

1.3 磨损表面分析

在 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 上观察涂层摩擦试样及其对偶的磨损表面形貌及成分。

2 结果分析与讨论

2.1 摩擦因数和磨损率

图 2 给出了水介质中常规和纳米 Al₂O₃/TiO₂ 涂层与不锈钢配副摩擦因数随载荷变化的关系图。可以看出, 随着载荷的增大, 摩擦因数有减小的趋势, 但是减小幅度不大, 摩擦因数基本保持在 0.37~0.36 之间。图 3 是载荷为 20 N 时涂层的摩擦因数随时间变化的关系曲线。从图中可以看到, 在跑合期之后纳米结构涂层的摩擦因数低于常规涂层, 比常规涂层优先达到稳定阶段。

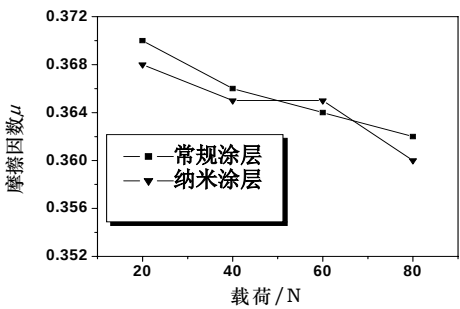


图 2 摩擦因数随载荷变化曲线

Fig.2 Friction coefficient of coatings as a fuction of load

图 4 是 2 种涂层的磨损率随载荷变化的关系曲线。结果显示, 在相同的试验条件下, 2 种涂层磨损率都随载荷的增大逐渐增加。在同一载荷下, 纳米涂层的磨损率小于常规涂层, 可以看出, 纳米涂

层的耐磨性能优于常规涂层。

图5为不锈钢对偶的磨损率随载荷变化关系图。从图中可以看到,不锈钢对偶的磨损率变化趋势与涂层磨损率变化趋势一致,即随着载荷的增加,磨损率逐渐增大,并且对偶的磨损率较小时对应于涂层的磨损率也较小;从图中结果还可以看到与纳米涂层配副的不锈钢的磨损率为与常规涂层配副的1/3~1/5。

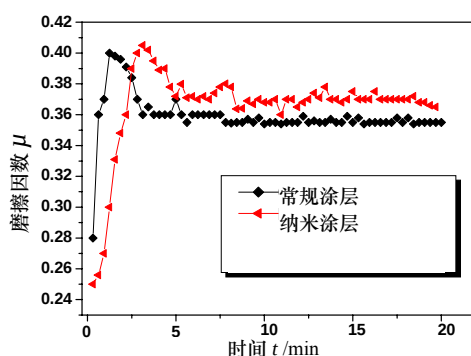


图3 20 N时摩擦因数随时间变化曲线

Fig.3 Friction coefficient of coatings as a function of time at 20 N

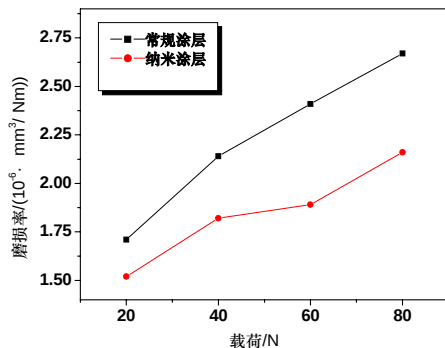


图4 涂层磨损率随载荷变化曲线

Fig.4 Wear rate of coatings as a function of load

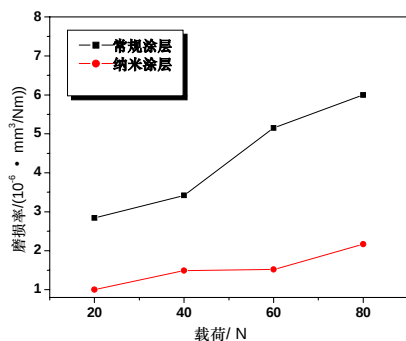


图5 不锈钢对偶磨损率随载荷变化曲线

Fig.5 Wear rate of stainless steel counterpart as a function of load

上述结果表明,采用纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层可以较好的改善其抗磨损能力,并且能够降低其配副的磨损。

2.2 磨损表面形貌及磨损机理分析

图6为水环境中纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的磨损表面SEM形貌。从磨痕形貌上可以看到,水环境中纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的磨损状态因载荷的不同而变化。20 N时磨损表面分布有1 μm 左右的游离颗粒或碎屑,称之为“自由磨屑”^[8],这些磨屑是由于在摩擦过程中陶瓷涂层表面对不锈钢偶件有较强的切削作用,从而使得偶件表面的铁脱落并向涂层摩擦表面转移所致。载荷为80 N时,“自由磨屑”聚集,并在较高压力下局部摩擦表面被一层涂抹物所覆盖,EDS分析(图8a)结果表明,其主要成分是Fe,涂层中不含铁,因此是由不锈钢对偶转移而来的。因为摩擦过程中产生的磨屑主要是粘着造成的材料的转移和剥落而形成的,在微动磨损条件下,摩擦副接触非常紧密,载荷较大时开始形成的磨屑难以逸出,聚积在接触面之间在压力的作用下形成转移膜,将摩擦副局部分离,使摩擦副之间的粘着减弱。由以上分析可以看出 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的磨损机制在较低载荷下是涂层对不锈钢对偶的微切削,较高载荷下是不锈钢对偶对涂层的涂抹即粘着磨损为主。

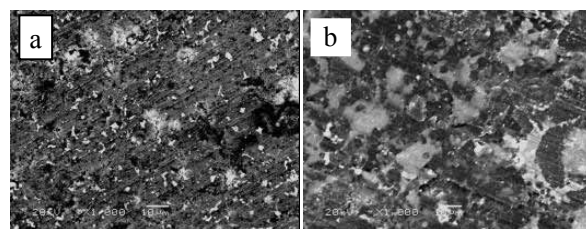


图6 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 喂料涂层磨损表面SEM照片 (a) 20 N; (b) 80 N

Fig.6 SEM morphologies of the worn surfaces sprayed by nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ powders(a) 20 N; (b) 80 N

图7为常规 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的磨损表面SEM形貌图。可以看到,20 N时磨损表面仍然存在“自由磨屑”,但是磨屑较大,而80 N时同样出现了不锈钢对偶的涂抹和转移(图8b)。从磨损形貌看,常规涂层与纳米涂层具有相似的磨损机制。但是常规涂层磨损率大(图4),这是因为纳米涂层较致密,层与层之间的结合强度较高,层间的结合强度越

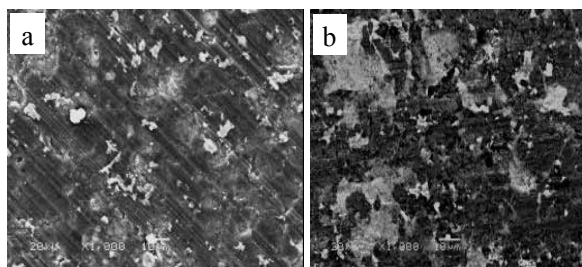


图 7 常规 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 喂料涂层磨损表面SEM照片:(a) 20N; (b) 80N

Fig.7 SEM morphologies of the worn surfaces sprayed by conventional $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ powders(a) 20N; (b) 80N

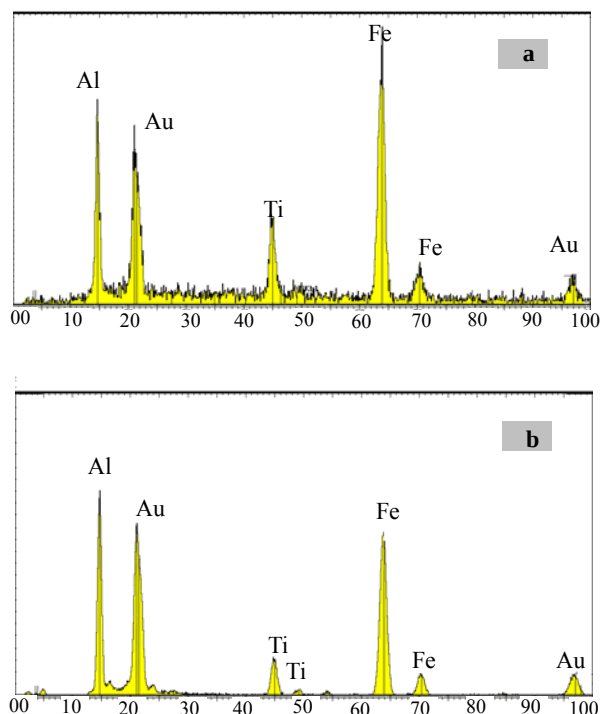


图 8 磨损表面 EDS 分析结果

Fig.8 EDS analysis of wear surface

高,材料越不容易被剥落,就越耐磨^[9]。

3 结 论

(1) 水环境下载荷对等离子喷涂常规和纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层的摩擦因数影响不大,摩擦因数基本保持在 0.37~0.36 之间,较低载荷下,纳米涂层较先达到稳定阶段。

(2) 水环境下两种涂层的及其对偶的磨损率都随载荷的加大而增加,但是纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 涂层在

的抗磨性能明显优于常规涂层,同时能够有效的较少其对偶的磨损。

(3) 水环境下两种涂层具有相似的磨损机制,但是磨损程度不同,常规涂层磨损较严重。

(4) 纳米涂层与不锈钢组成的摩擦副在水环境下比常规涂层表现出更好的摩擦学性能,该材料可作为水环境中摩擦副部件的配副材料。

参考文献:

- [1] 刘文艳, 胡国清. 陶瓷液压系统综述 [J]. 机床与液压, 1998,156(6):3-6.
- [2] 李剑锋, 黄静琪, 张叶方, 等. 几种等离子涂层在蒸馏水润滑下的摩擦学特性 [J]. 无机材料学报, 1998, 13(4): 514-520.
- [3] Gell M, Jordan E H, Sohn YH, et al. Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2001 (146-147):48-54.
- [4] Chen Huang, Ding Chuanxian, Zhang Pingyu, et al. Wear of plasma-sprayed zirconia coatings against stainless steel under distilled-water conditions [J]. Surface and Coatings Technology, 2003(173):144-149.
- [5] Lin Xinhua, Zenga Yi, Ding Chuanxian, et al. Effects of temperature on tribological properties of nanostructured and conventional Al_2O_3 -3 wt.% TiO_2 coatings [J]. Wear 2004 (256):1018-1025.
- [6] Jordan E H, Gell M, Sohn Y H, et al. Fabrication and evaluation of plasma sprayed nanostructured alumina-titania coatings with superior properties [J]. Mater. Sci. Eng. 2001,A (301):80-89.
- [7] Wang You, Jiang Stephen, Wang Meidong. Abrasive wear characteristics of plasma sprayed nanostructured alumina/titania coatings [J]. Wear 2000,237:176-185.
- [8] 马红玉, 张嗣伟. 金属基复合材料涂层摩擦学的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2005, 70(1):8-13.
- [9] Holmberg K, Ronkainen H, Matthews. Tribology of thin coatings I [J]. Ceramics International 2000,26: 787-795.

作者地址: 兰州市天水路342号

730000

中科院兰化所固体润滑实验室

Tel: (0391) 4968085 13919116197

E-mail:xq_zhao22@sina.com

