

文章编号: 1673-9981(2009)01-0055-05

等离子喷涂 Al_2O_3 涂层/GCr15 干摩擦磨损性能研究

郑志刚^{1,2}, 刘敏², 邓春明²

(1. 广东工业大学, 广东 广州 510006; 2. 广州有色金属研究院, 广东 广州 510650)

摘要:氧化铝陶瓷涂层因具有良好的耐磨、耐蚀性能而得到广泛的应用。本文利用销-盘式摩擦磨损试验机研究了大气等离子喷涂 Al_2O_3 涂层与 GCr15 摩擦副的室温干滑动摩擦磨损特性, 用扫描电镜和能谱仪对磨损区域进行了分析。结果表明: 在室温干摩擦条件下, Al_2O_3 陶瓷涂层的磨损量随载荷的增加而增加, 当载荷大于 50 N 时, 涂层的磨损量随载荷的增加而降低, 随线速度的提高而增加。在摩擦过程中, 陶瓷涂层表面产生的表面膜, 使涂层的磨损量减小。 Al_2O_3 涂层的磨损机理是脆性微剥落和粘着磨损共同作用。

关键词: Al_2O_3 涂层; 干摩擦磨损; 等离子喷涂

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A

Al_2O_3 陶瓷材料具有高的强度和硬度, 良好的耐高温、抗腐蚀、耐磨损性能和较低的摩擦系数, 是较适于用作摩擦副的一种材料^[1-2]。采用大气等离子喷涂 (Air Plasma Spray, APS) 技术, 可在大面积基体上快速沉积 Al_2O_3 陶瓷涂层, 把 Al_2O_3 陶瓷材料和金属材料的优点有机地结合起来, 改善材料的使用性能。由于许多实际应用都涉及到 Al_2O_3 涂层的摩擦磨损行为, 因此, 研究涂层的摩擦磨损特性和机理十分重要。目前, 关于 Al_2O_3 陶瓷涂层材料的制备及性能有不少报道^[3-6], 但有关 Al_2O_3 陶瓷涂层与金属摩擦副的研究还远远不够, 特别是对等离子喷涂陶瓷涂层与金属偶件的摩擦研究则更显不足^[7]。本文着重研究了大气等离子喷涂 Al_2O_3 涂层与 GCr15 摩擦副的室温干滑动摩擦磨损特性和机理。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

以 $\Phi 31.7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 45 号钢为基体, 将其采用超声除油后用 25 号刚玉砂进行表面粗化处理, 粗化后表面粗糙度为 $Ra 3.0 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 。等离子喷涂

涂层的粘结层材料采用北京矿冶研究院产不锈钢 316L 粉, 粒径为 $15 \sim 45 \mu\text{m}$ 。涂层材料采用 H. C. Starck 公司产 Al_2O_3 粉, 粒径 $5.6 \sim 22.5 \mu\text{m}$ 。大气等离子喷涂采用德国产 MF-P-1500 型高能等离子喷涂设备, 喷枪为 F6 喷枪。喷涂后涂层粘接层的厚度约为 $100 \mu\text{m}$, 涂层总厚度约为 $350 \mu\text{m}$ 。

1.2 磨损试验

磨损试验在 MMW-1A 销-盘摩擦磨损试验机上进行。对磨件为淬火态 GCr15, 硬度 HRC58-62, 尺寸 $\Phi 4.8 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 。试验在室温干滑动摩擦条件下进行, 摩擦副 GCr15 旋转圈数为 6000 r。

耐磨性试验用称重法来评定: $\Delta W = W_1 - W_2$ 。式中 ΔW 为试块磨损前后的质量差, W_1 为试块磨损前的质量, W_2 为试块磨损后的质量。采用 Sartorius BS224S 电子天平 (精度 0.1 mg) 测试盘试块磨损前后的质量, 并求其质量差 ΔW 。每组试验测试 3 次, 取 3 次数据的平均值 ΔW_{AV} 来评价涂层的耐磨性能。

采用 Leica DMIRM 金相显微镜观察涂层的金相组织; 采用 JEOL JSM-5910 型扫描电镜 (SEM) 对涂层磨损表面进行微观形貌观察, 并用其附带的能

收稿日期: 2008-12-31

作者简介: 郑志刚 (1977-), 男, 陕西人, 硕士。

谱仪(EDS)进行化学成分的半定量分析。

2 试验结果和分析

2.1 涂层显微结构

图1为氧化铝涂层截面的金相图。由图1可见,基体与粘结层的结合面呈锯齿形,这是基材表面经粗化处理后的反映。喷涂时,高速飞行的熔融粒子碰撞基材表面后,顺其表面流散铺展,冷却凝固后将基材的表面形貌复制,由此可见,涂层与基体形成的主要是机械的锚固结合。

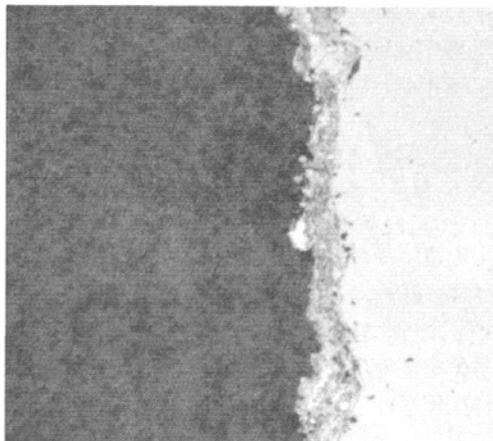


图1 涂层截面金相图,200×

Fig. 1 Metallographic structure of the cross-section of the coating

2.2 载荷对 Al₂O₃ 涂层磨损性能的影响

不同载荷下 Al₂O₃ 涂层磨损试验结果如图3所示。从图3可以看出,在摩擦副转速分别为400 r/min和600 r/min时,随着载荷的增大,Al₂O₃ 涂层的磨损量也随之增加;但当载荷超过50 N时涂层的磨损量开始下降,并且两条曲线有相同的趋势。可见载荷对 Al₂O₃ 涂层磨损量的影响存在临界值。

图4(a)是载荷为50 N,转速400 r/min时涂层的磨痕,由图4(a)可见,涂层表面有黑色表面膜。这主要是由于Fe在摩擦热的作用下形成的氧化铁沉淀,这层黑色表面膜可起降低摩擦系数的作用。图4(b)是载荷为80 N,转速600 r/min时销的磨痕,由图4(b)可见,销的表面发生了灼伤,说明由于摩擦热及闪温的作用,在销与 Al₂O₃ 涂层摩擦时,销的表面有熔融现

象,因此,摩擦系数会有较大幅度的降低。图2为氧化铝涂层的剖面形貌。由图2可见,涂层呈层状流线型分布,其中有少量未熔 Al₂O₃ 颗粒以及孔隙。等离子喷涂时,熔融颗粒以一定的速度撞击基材,从碰撞到展开、平铺、凝固成准圆状薄片的时间很短,每个颗粒都是经历了这一整个过程之后才发生第二个颗粒与基材的碰撞,不会出现第二个颗粒撞击到前一个已与基材碰撞却没有凝固的颗粒上的情形。这样就形成了由小薄片叠加而成的层状结构的涂层。由于从碰撞到凝固的时间很短,熔化的颗粒无法达到前一个已铺开的小薄片的边角处,所以涂层中必然会出现孔隙。

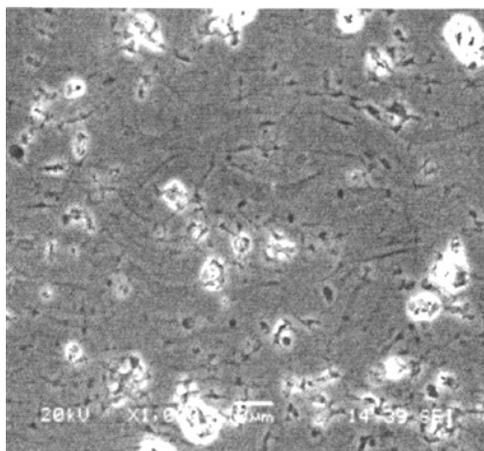


图2 涂层剖面形貌,1000×

Fig. 2 Morphology of the cross-profile of the coating

象,因此,摩擦系数会有较大幅度的降低。

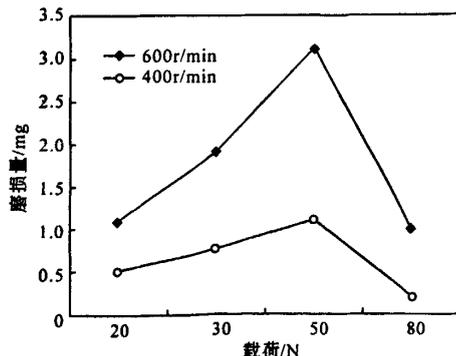


图3 Al₂O₃ 涂层的磨损量与载荷的关系

Fig. 3 The relationship between coating wear mass loss and load

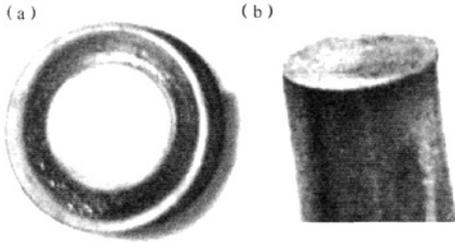


图 4 Al₂O₃ 涂层和 GCr15 销磨痕
Fig.4 Wear scars pictures of Al₂O₃-coating and pin
(a) 涂层磨痕; (b) 销磨痕

图 5 是干摩擦条件下载荷 80 N, 转速 600 r/min 时, Al₂O₃ 涂层试样表面磨痕的 SEM 和能谱照片。从图 5(a) 可以看出, 涂层表面存在微裂纹和氧化铝脱落痕迹。图 5(c) 为图 5(a) 箭头所示部位磨痕的能谱图, 图 5(d) 为图 5(b) 箭头所示部位的能谱图。能谱分析表明, 表面膜有 Fe 和 Cr 元素, 说明在摩擦过程中存在材料的转移。

由于 Al₂O₃ 涂层比摩擦副 GCr15 硬, GCr15 的磨屑相对容易脱落, 随着摩擦时间的延长, 磨屑增多, 堆积在粗糙表面上, 在法向压应力的作用下, 小部分微凸体的顶峰应力集中, 压应力较大, 再加上摩擦过程中的闪温作用, 堆积的磨屑易产生塑性变形, 粘附在涂层表面^[8]。由此可以得出, Al₂O₃ 涂层的磨损机理为脆性微剥落和粘着磨损共同作用。而粘着磨损又与摩擦界面的正压力成正比, 正压力增大, 粘着点和粘着面积随之增大, 裂纹扩展加剧, 摩擦力和磨损随之增加^[9]。当载荷达到 80 N 时, 热量蓄积到了一定程度, 界面接触点处材料发生软化熔融, 并在摩擦面上形成一层金属膜, 一方面材料软化后, 抵抗塑性变形能力急剧降低, 造成接触面间增大, 实际应力降低; 另一方面, 摩擦副接触面间的熔融金属起到润滑作用, 使摩擦副的摩擦系数有较大降低。如图 6 所示, 摩擦系数从图 6(a) 中 50 N 时的 0.5 左右, 降到图 6(b) 中 80 N 时的 0.4 左右。说明在某一速度与压力下, 塑性变形和摩擦热会导致材料磨损性能发生突变。

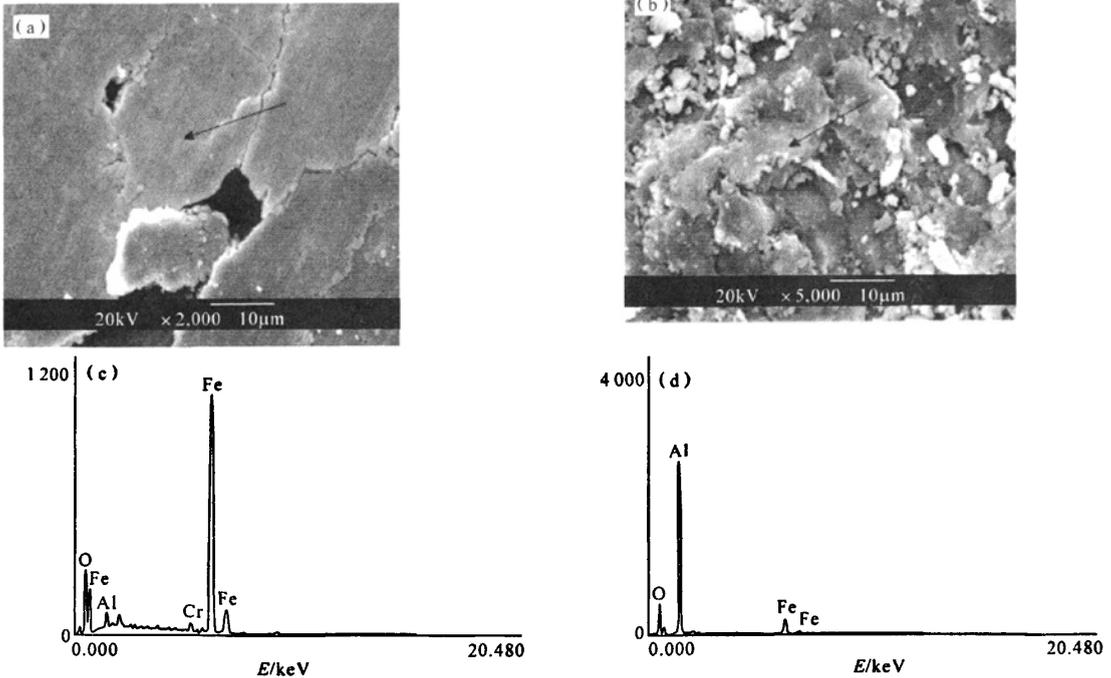


图 5 在 80 N, 600 r/min 下 Al₂O₃ 磨痕的 SEM 图和能谱
Fig.5 SEM and EDS patterns of wear scars under 80N, 600 r/min

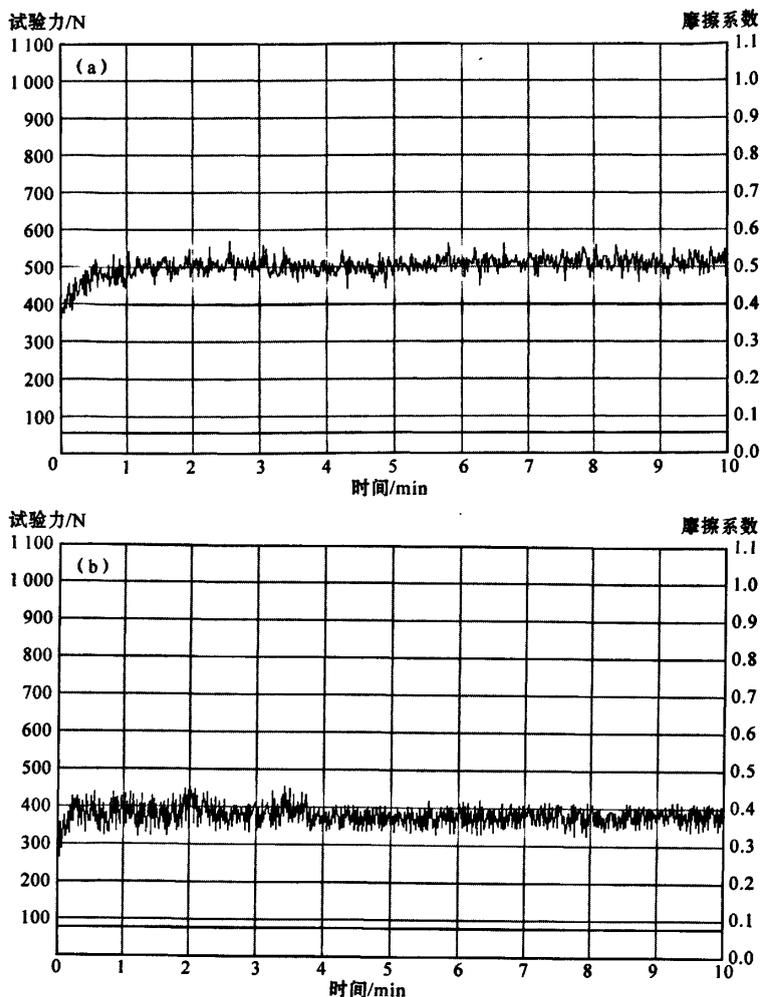


图6 试验力-时间-摩擦系数曲线

(a) 载荷 50 N; (b) 载荷 80 N

Fig.6 The relationship among load, time and friction coefficient

2.3 滑动速度对 Al_2O_3 涂层磨损性能影响

图7为不同载荷下,转速分别为200,400和600 r/min时 Al_2O_3 涂层的磨损曲线.从图7中可以看出,几条曲线的变化趋势相似,即 Al_2O_3 涂层磨损量都是随转速的增大而增加的.这主要是由于转速增大,摩擦表面的温度升高, Al_2O_3 涂层与 GCr15 摩擦副的粘着加剧,磨损量增大.

2.4 磨损特性

等离子喷涂 Al_2O_3 涂层主要是以亚稳相 γ - Al_2O_3 的形式存在,呈层状结构,层内具有较高的孔隙率,因而层间结合力小,易脱落,机械强度低.界面

上存在的较大的残余应力,也会使涂层容易脱落^[10].而在等离子喷涂 Al_2O_3 涂层与 GCr15 摩擦副干滑动摩擦过程中,粘着金属材料转移到陶瓷表面后形成了金属表面膜,在压应力和剪切应力的作用下,金属转移膜发生断裂,从陶瓷表面剥落,同时将陶瓷颗粒拔出,在随后的摩擦过程中,新的陶瓷表面又重新被转移膜所覆盖,在这种重复和连续的过程中,涂层被磨损.

此外,在干滑动摩擦过程中,摩擦力和滑动速度的共同作用改变了氧化铝陶瓷涂层表面晶粒间的机械强度,促进了裂纹的萌生和扩展,表面接触压力促

进晶界微裂纹形成和扩展,最后裂纹相互连接,当微裂纹的密度足够大时,微裂纹结合在一起形成大裂纹,导致晶粒的拔出或断裂。

等离子喷涂 Al_2O_3 涂层/GCr15 摩擦副磨损机理是脆性微剥落和粘着磨损共同作用。

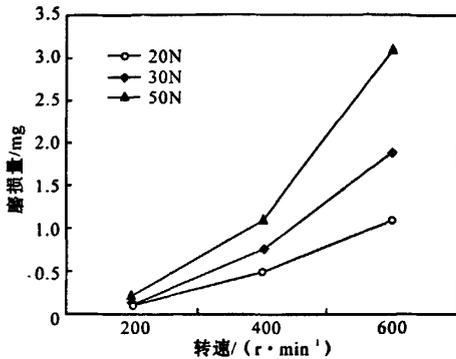


图7 Al_2O_3 涂层的磨损量与转速的关系

Fig.7 The relationship between coating wear mass loss and linear velocity

3 结论

在室温干滑动摩擦条件下,大气等离子喷涂 Al_2O_3 涂层与 GCr15 摩擦副进行摩擦时有以下结论:(1)涂层表面存在表面膜,可使磨损量减小;(2)随载荷的增加,涂层磨损量增加,当载荷达到一定值时,涂层磨损量出现拐点;涂层磨损量随着摩擦速度

的增加而增加;(3)等离子喷涂 Al_2O_3 涂层/GCr15 摩擦副磨损机理是脆性微剥落和粘着磨损共同作用。

参考文献:

- [1] 张清纯. 陶瓷材料的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] DUGGAN A J. 耐磨陶瓷涂层[C]//第九届国际热喷涂年会论文选编. 长沙: 长沙科技增刊, 1984, 171-177.
- [3] 冯拉俊, 曹凯博, 雷阿利, 等. 等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层的工艺研究[J]. 中国表面工程, 2005, 18(6): 45-48.
- [4] 杨元政, 刘正义, 庄育智. 等离子喷涂陶瓷 Al_2O_3 涂层的结构与组织特征[J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(3): 7-11.
- [5] 何继宁, 李香芝, 阎殿然, 等. 等离子涂层摩擦磨损性能与机制探讨[J]. 天津理工学院学报, 2002, 18(4): 66-68.
- [6] CHANG Jiu-li, WANG Wei-ze. Dependency of fracture toughness of plasma sprayed Al_2O_3 coatings on lamellar structure[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004(3): 425-431.
- [7] 魏建军, 薛群基. 陶瓷摩擦学研究的发展现状[J]. 摩擦学学报, 1993(3): 268-275.
- [8] AHN H S, KWON O K. Tribological behavior of plasma-sprayed chromium oxide coating[J]. Wear, 1999, 225: 814-824.
- [9] 谭美田. 金属切削微观研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 104-121.
- [10] 徐秋红, 王志, 史国普, 等. 钢基体涂覆 Al_2O_3 陶瓷层的研究现状与展望[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(12): 1-5.

Dry wear behavior of plasma sprayed alumina coating against GCr15

ZHENG Zhi-gang^{1,2}, LIU Min², DENG Chun-ming²

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Alumina coating has been widely used due to its good wear and corrosion resistance. The characteristics of dry wear behavior for air plasma spray alumina coating against GCr15 steel was investigated using pin-tray tribometer at the ambient temperature in this paper, and the worn scars were examined by scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy. The experimental results indicated that the mass loss of alumina coating was increased with the rise of load while the mass loss of coating was decreased with the increase of load when the load was higher than 50N, the mass loss for alumina coating was increased monotonically when the linear velocity was increased. A layer of metal film was observed on the surface of alumina coating during the procedure of friction, which can prevent from mass loss of coating. The dry wear mechanism of alumina coating against GCr15 was dominated by brittle spalling and adhesive wear.

Key words: alumina coating; dry wear behavior; plasma spray