

颗粒增强铝基涂层的组织结构与摩擦学性能

易 祥, 王 铀, 勾俊峰

(哈尔滨工业大学 材料科学系, 哈尔滨 150001)

摘 要: 选用常规微米尺度 Al_2O_3 粉体和纳米结构 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 粉体作为硬质颗粒, 采用等离子喷涂方法在 45 钢基体上制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 颗粒增强铝基复合涂层, 采用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 和维氏硬度计观察和测试涂层的形貌、物相及显微硬度, 通过滑动摩擦磨损试验分析涂层的摩擦学性能。结果显示, $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层的表面形貌和纯铝涂层非常相似, $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层表面可以看到未熔、半熔和全熔的增强相存在。 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层的主要物相为 Al 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层的主要物相为 Al 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 TiO_2 。随着增强相加入量的提高, $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层和 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层的硬度不断提高; 当添加量为 30% 时, 硬度分别比未加增强相时提高了 67% 和 76%。加入增强相的涂层的平均摩擦因数都有较大幅度的减小, 加入 30% Al_2O_3 的 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层的磨损量比未加入增强相涂层的磨损量下降 85.6%, $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 涂层的磨损量比未加入增强相涂层的磨损量下降 74% 左右, 表明硬质颗粒 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 的加入, 可显著提高涂层的耐磨性。

关键词: 等离子喷涂; 铝基复合涂层; 滑动磨损

中图分类号: TG174.442; TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)01-0025-08

Microstructure and Tribological Properties of Particle Reinforced Aluminum-based Coatings

YI Xiang, WANG You, GOU Jun-feng

(Department of Materials Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Conventional micron Al_2O_3 powder and nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ powder were selected as strengthening particles for Al. Plasma spraying was used to deposit the Al_2O_3 and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ particle reinforced aluminum composite coatings on 45 steel substrate. Morphology, phase, and micro hardness of the coatings were measured by SEM, XRD and Vickers. Tribological properties of the coatings were analyzed by sliding friction and wear test. The results show that surface morphologies of $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and Al coatings are similar, but unmelted, half and full melted $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ particles can be seen on the coating surface. $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ consists of Al and $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, and $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ consists of Al, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and TiO_2 . With the increase of reinforcements, the hardness of both $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coatings were continuously improved; when the content of reinforcements were 30%, the hardness for $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ coatings were enhanced by 67% and 76%, respectively. The coefficient of friction decreases by adding reinforcements. The weight loss of the $\text{Al}/30\%\text{Al}_2\text{O}_3$ coating and $\text{Al}/30\%(\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2)$ coating is reduced by 85.6% and 74% respectively, compared with that of pure Al coating, indicating that the hard particles of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ and Al_2O_3 can significantly improve the wear resistance of Al-based coating.

Key words: plasma spraying; aluminum-based composite coatings; sliding wear

收稿日期: 2013-11-07; 修回日期: 2013-12-21

作者简介: 易祥(1988—), 男(汉), 湖南衡阳人, 硕士; 研究方向: 涂层与防护技术

网络出版日期: 2014-01-02 09:05; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140102.0905.002.html>

引文格式: 易祥, 王铀, 勾俊峰. 颗粒增强铝基涂层的组织结构与摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 25-32.

0 引言

传统的金属材料虽然能够满足基本的生产生活需求,但随着工农业生产生活对材料的性能和服役条件的要求越来越高,单纯的传统金属有时候无法满足应用需求^[1]。目前,大多数的机械零部件主要通过以下几种形式失效:断裂、磨损和腐蚀^[2-4],在材料实际应用中造成了非常大的经济损失。通常情况下,材料的磨损和腐蚀引起的破坏源于材料表面^[5-7]。因此,对材料表面进行改性以提高材料表面的耐磨和耐蚀等性能,可以明显延长材料的服役寿命^[8-9]。

热喷涂是一种重要的表面改性方法,通过在材料表面喷涂性能优异的涂层可提高材料的耐磨和耐蚀等性能^[10]。铝是最常见的金属材料,铝合金和铝基复合材料因其良好的塑性、高的比强度比刚度和经济实用价值。铝基复合涂层大量应用于表面防护中,尤其使用热喷涂技术可以在材料表面制备出具有优异性能的铝基复合涂层^[11-12]。颗粒增强铝基复合涂层不仅具备金属的高强度高塑性和良好的延展性能,同时还拥有陶瓷的高硬度和耐磨性能,是涂层材料设计中的一个重要组合。Yue 等^[13]根据 CuO 与 Al 发生铝热反应的原理,利用激光熔覆在 7075 铝合金表面制备了一层 Al₂O₃ 增强的铝基复合涂层。研究发现涂层为双层结构,表面层主要成分是 Al₂O₃,还存在一个 Al₂O₃ 和基体的过渡层。汪笑鹤等^[9]利用电刷镀的方法制备了纳米 Al₂O₃ 增强镍钴基镀层、普通镍镀层和高铬镀层。刘宏伟等^[14]利用 CuO 和 Al 的复合粉末,采用火焰喷涂的方法,制备了 Al₂O₃ 增强复合涂层。目前,研究主要集中在利用 Al₂O₃ 作为涂层的增强相,而对于 Al₂O₃ 和其它陶瓷相协同增强涂层性能的研究报道较少。另外,利用等离子喷涂的方法制备颗粒增强铝基复合涂层的研究也鲜有报道。

为了充分发挥 Al 基体的良好韧性、耐蚀和抗氧化特性及 Al₂O₃ 和 Al₂O₃-TiO₂ 硬质颗粒的良好抗磨粒磨损、粘着磨损性能,文中设计了 Al/Al₂O₃ 和 Al/Al₂O₃-TiO₂ 2 种复合涂层。采用机械混粉法制备热喷涂用 Al₂O₃/Al₂O₃-TiO₂ 和 Al 基复合粉体喂料,尝试运用等离子喷涂方法制备复合涂层。本研究一方面可拓展复合涂层的制备工艺,另一方面可丰富和发展 Al₂O₃ 和 TiO₂ 协同增强 Al 基涂层体系。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用的粉体为 Al 粉、Al₂O₃ 粉和 Al₂O₃-13%TiO₂ 粉。Al 粉(北京高冶科技有限公司)和 Al₂O₃ 粉(东莞大江研磨材料有限公司)粒径分别为 58、75 μm,化学成分如表 1、2 所示。Al₂O₃-13%TiO₂ 是课题组利用纳米级 Al₂O₃ 和 TiO₂ 粉体,通过喷雾造粒和烧结制备出的具有纳米结构的微米尺度团聚体粉体。

表 1 Al 粉的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of the Al powders(w/%)

Element	Al	Fe	Cu	SiC	Water	Other
Content	99.90	0.008 3	0.003 5	0.007 5	0.007 5	Bal.

表 2 Al₂O₃ 粉的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Composition of the Al₂O₃ powders(w/%)

Element	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Water	Other
Content	99.2	0.02	0.17	0.03	0.05	0.18	0.24	Bal.

用纯 Al 粉作为对比,制备了 6 种复合粉体,复合粉体中的增强相的质量分数从 10%至 30%,粉体的配比如表 3 所示。采用机械混粉法进行混粉,具体的工艺为:球料比为 10:3,转速 30 r/min,混粉时间 24 h,介质为 99.7%的酒精。

表 3 喷涂粉体的配比(质量分数/%)

Table 3 Composition ratio of the Al-based composite powders(w/%)

Powder	0	1	2	3	4	5	6
Al	100	90	80	70	90	80	70
Al ₂ O ₃	0	10	20	30			
Al ₂ O ₃ -13%TiO ₂					10	20	30

机械混粉后在恒温箱内对粉体进行干燥,温度设定为 60 ℃,干燥时间 48 h。干燥后,利用筛子对磨球和粉体进行分离,把分离出的粉体放在恒温箱内继续干燥 24 h。最后,把得到的混合均匀的干燥粉体进行过筛,获得粒径在 75 μm 以下的粉体,用于等离子喷涂。

试验用基体为 45 钢,尺寸 Φ 25 mm×6 mm。

将基体浸入盛有酒精溶液的容器中进行超声清洗,以除去不锈钢表面的油污。清洗干净后吹干,然后通过喷砂处理,使钢的表面粗糙化,以增强涂层与基体的结合强度。喷砂完毕,对基体进行预热,温度为 150 ℃,利用喷枪在钢基体表面

进行喷涂,先喷涂一层约 100 μm 厚的纯 Al 作为打底层,然后喷涂约 200 μm 厚复合粉体涂层,涂层的总厚度控制在 300 μm 左右。采用 Metco 9MC 等离子喷涂系统制备涂层。等离子喷涂工艺参数见表 4。

表 4 等离子喷涂工艺参数
Table 4 Parameters of plasma spraying

Substrate	Current/ A	Voltage/ V	Ar flow/ (L · min ⁻¹)	H ₂ flow/ (L · min ⁻¹)	Feed rate/ (g · h ⁻¹)	Spray distance/ mm	Spray angle/ (°)
45 steel	450	50	47.2	23.6	1 000—1 500	100	90

1.2 滑动摩擦磨损试验

涂层样品的干滑动摩擦磨损试验在销-盘式磨损试验机(型号:PIN ON DESK TESTER,亚特梯尔镀层科技有限公司)上进行。试验过程中样品台的转速为 200 r/min,磨损圆环的直径为 6 mm,对磨件采用直径为 5 mm 的 GCr15 钢球。采用的载荷为 10 N,每个样品的磨损时间均设定为 20 min。摩擦磨损实验过程中记录的样品温度为(18±2) ℃,环境湿度为(30%±2%)。通过安装的传感器记录磨损过程中摩擦因数与摩擦力的变化。试验前后将每个样品在 0.1 mg 精度

的电子天平上进行称重,记录磨损失重。
涂层的表面和截面形貌采用扫描电镜(SEM)进行观察,用能谱仪(EDS)对涂层进行成分分析,用 X 射线衍射仪(XRD)进行物相分析,采用维氏硬度计测试复合涂层的显微硬度。

2 结果与分析

2.1 涂层的物相及形貌分析

图 1 给出了各复合涂层的物相组成。Al/Al₂O₃ 涂层的主要物相为 Al 和 α-Al₂O₃, Al/Al₂O₃-TiO₂ 主要为 Al、α-Al₂O₃ 和 TiO₂。

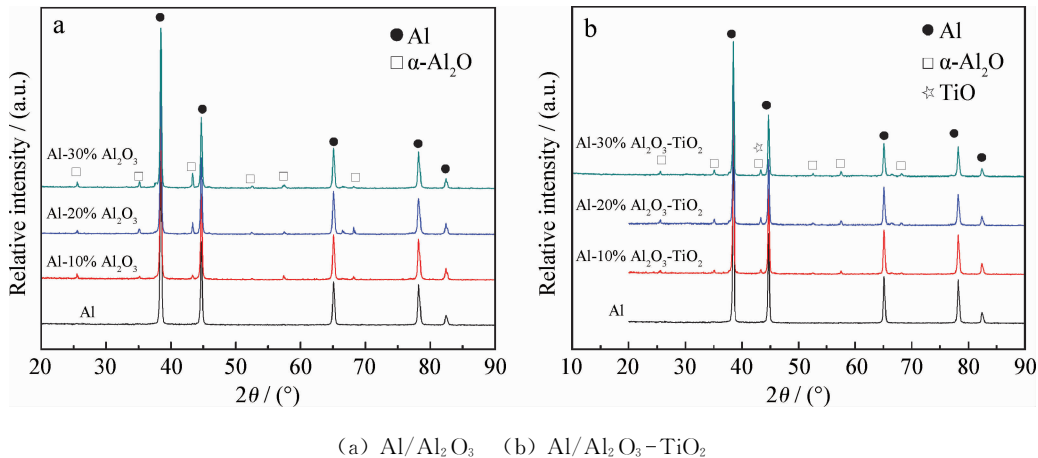
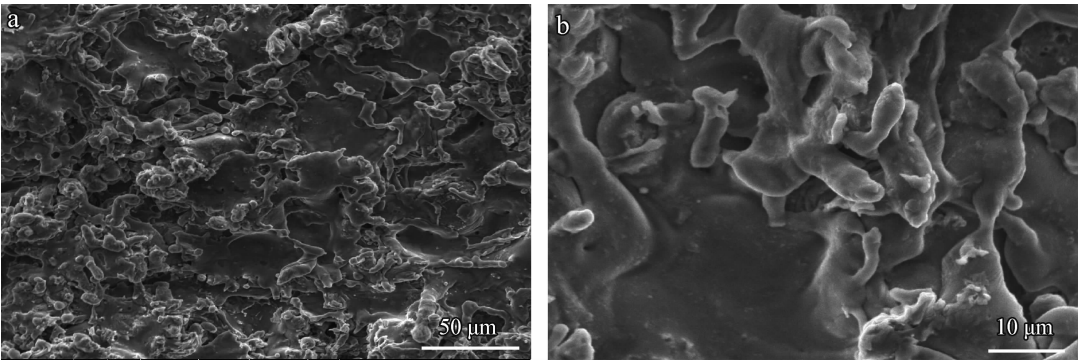


图 1 复合涂层的物相组成

Fig. 1 Phase composition of the composite coatings

用等离子喷涂的方法制备涂层,雾化熔滴与基体(或已沉积的涂层)接触时发生了机械碰撞、机械咬合或颗粒的反弹。熔滴与基体碰撞,在冲量的作用下转变成为扁平状粒子,其主要形态是薄饼状和花瓣状,整个阶段涉及熔滴的变形和凝固两个过程。熔滴在最外侧的表面不断堆积,所

以在涂层的表面呈现出堆砌的凹凸不平的浪花状,如图 2 所示。当雾化的铝熔体在高速气体的带动下,碰撞到基体或者前面已经沉积的涂层,迅速铺展并冷却凝固成薄饼状片层,不同的液滴铺展位置是随机的,片层堆砌形成浪花状的表面形貌。



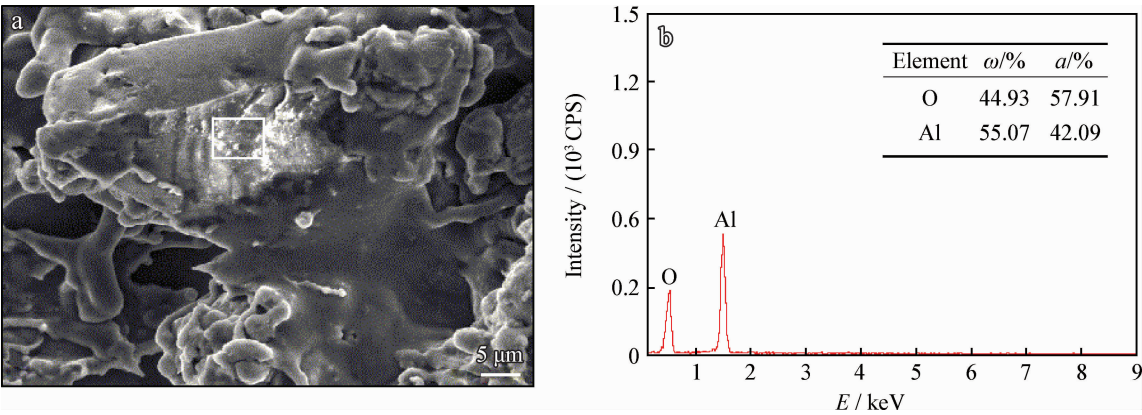
(a)SEM (b) Enlargement of (a)

图 2 纯铝涂层的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of the pure Al coating

Al/Al₂O₃ 涂层的表面形貌和纯铝涂层形貌非常相似, Al₂O₃ 在喷涂过程中没有熔化或者部分熔化。图 3 是 Al-10%Al₂O₃ (No. 1)涂层的表面形貌和 EDS 分析结果。可以观察到涂层表面存在的较亮区域, O 和 Al 的原子数比为 1.4, 说明主要是熔化的 Al₂O₃。其它铝基涂层的表面形貌如图 4 所示。从图 4(b)中可以看到表面存在未熔化的粒子, 但是数量很少, 说明涂层中的增

强相主要是以熔化后凝固的 Al₂O₃ 形式存在, 而未熔的颗粒状的增强相较少。从图 4(e)中可以看到 Al/Al₂O₃-TiO₂ 涂层表面上同样存在部分未熔颗粒物, 说明涂层中的增强相可能以颗粒物形式存在但较少。从图中还可以发现增强相的加入量越大, 在涂层表面观察到颗粒物的可能性就越大。在 30% Al₂O₃-TiO₂ 的涂层表面, 可以看到未熔、半熔和全熔的增强相的存在。



(a)SEM (b) EDS

图 3 Al/10%Al₂O₃ (No. 1)涂层表面的颗粒状 Al₂O₃ 及能谱分析

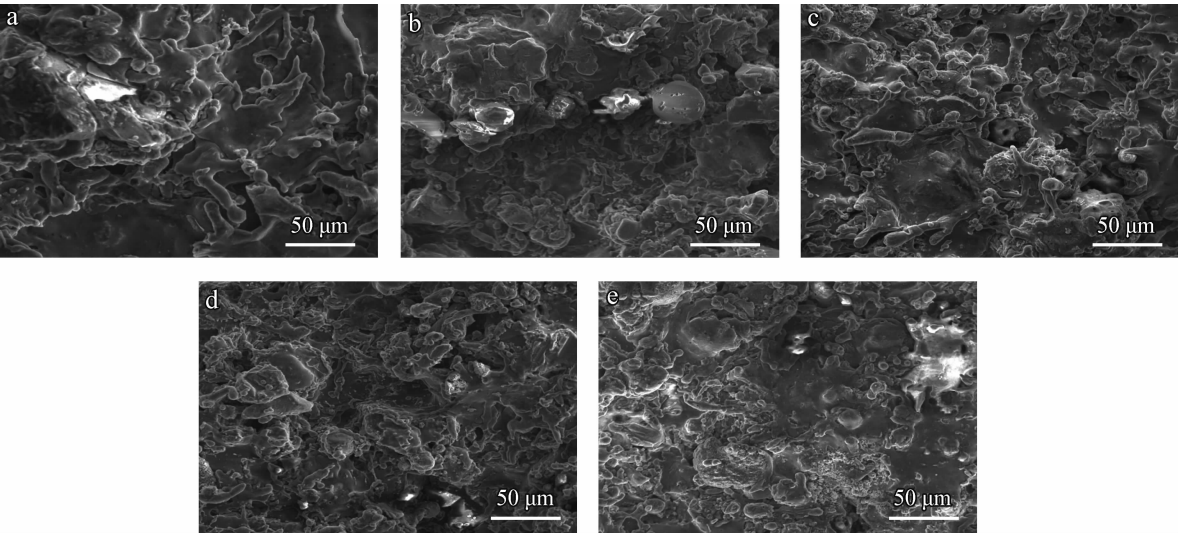
Fig. 3 Morphology and EDS result of grainy Al₂O₃ on the surface of Al/10%Al₂O₃ coating (No. 1)

图 5 为涂层的截面形貌, 可以看到, 铝基涂层中没有明显的等离子喷涂所特有的层片状结构。采用图像处理软件 Image-Pro Plus 测定涂层的气孔率, 发现铝基涂层的气孔率均低于 1%, 说明涂层的致密度很高。从图 4 中可以观察到较多的孔隙, 但是从涂层的横截面观察, 涂层中的孔隙明显减少。这与铝的低熔点和良好的流动性有关。铝的熔点低, 喷涂过程中熔滴撞到基

体上, 由于其流动性好, 可以充分占据熔滴粒子叠加产生的孔隙, 降低气孔率。

2.2 涂层的硬度

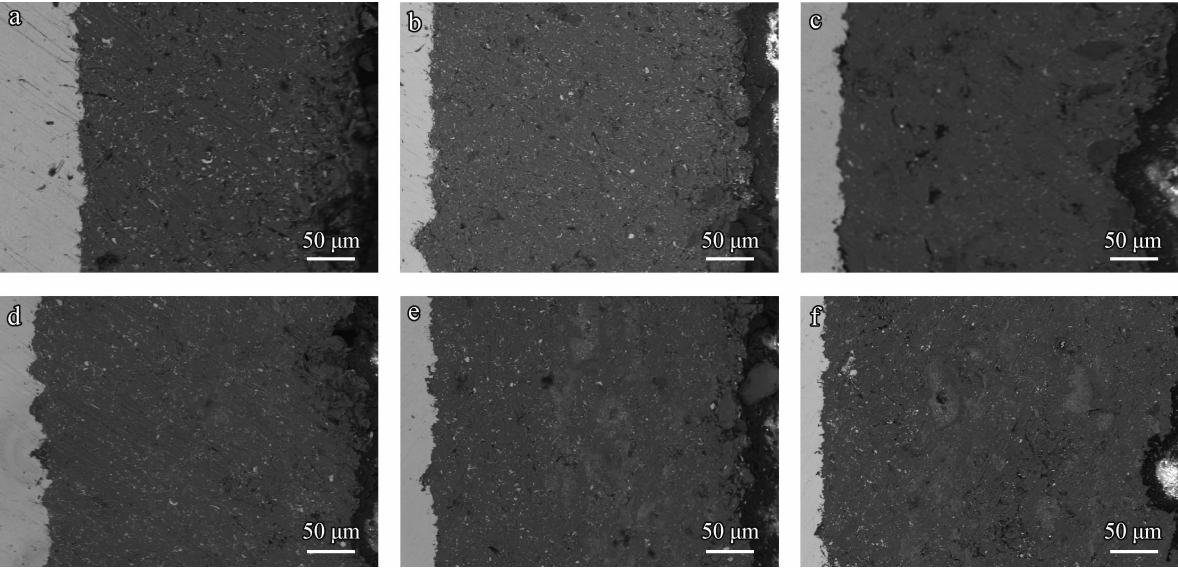
涂层硬度的变化趋势如图 6 所示, 随着增强相的加入, 涂层的平均硬度大幅提高。加入增强相后, 涂层的硬度呈递增趋势, Al-30%Al₂O₃ 涂层比纯 Al 涂层提高了 67%, Al-30%Al₂O₃-TiO₂ 涂层比纯 Al 涂层提高了 76%。



(a) No. 2 (b) No. 3 (c) No. 4 (d) No. 5 (e) No. 6

图 4 铝基涂层的表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of the Al-based coatings



(a) No. 0 (b)No. 2 (c) No. 3 (d) No. 4 (e) No. 5 (f) No. 6

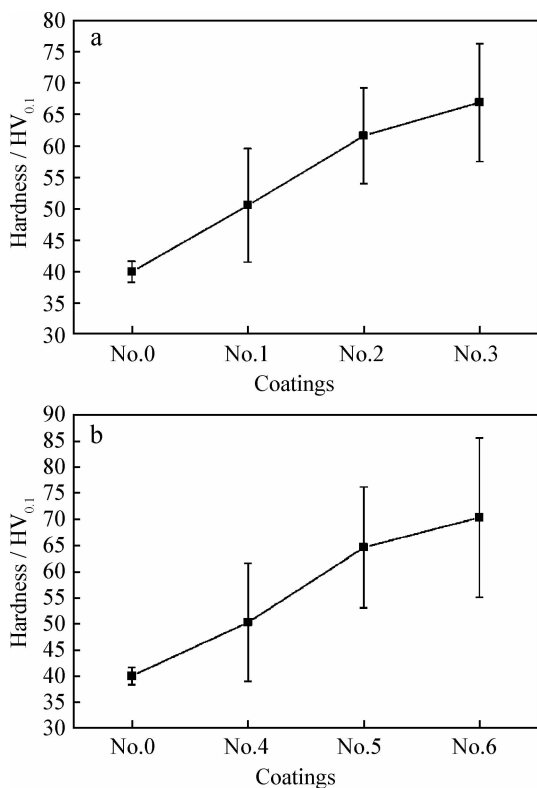
图 5 Al 基涂层的截面形貌

Fig. 5 Cross section morphologies of the Al-based coatings

2.3 涂层的滑动摩擦磨损性能

涂层的滑动摩擦因数如图 7 所示。加入 Al_2O_3 增强相的涂层的摩擦因数与纯铝涂层的摩擦因数有明显不同。10 N 载荷下,纯铝涂层的平均摩擦因数为 0.582,而加入 10%、20%和 30% Al_2O_3 的涂层的平均摩擦因数分别为 0.423、0.351和 0.371。可见,加入 Al_2O_3 增强相后,涂层的平均摩擦因数明显降低,最大降低幅度为

39.7%。从曲线的波动情况来看,纯铝涂层的摩擦因数的起伏较大,在 20 min 的滑动摩擦过程中,始终没有达到稳定,而加入了 Al_2O_3 增强相的铝基涂层,初始的摩擦因数很高,随着试验进行,逐渐降低,然后逐渐达到一平衡值,仅有小幅波动。加入 10% Al_2O_3 的涂层在磨损约 8 min 后,摩擦因数下降到 0.4 左右,并趋于稳定。加入 20%和 30% Al_2O_3 的涂层在磨损约 3 min 后,



(a) Al/Al₂O₃ (b) Al/Al₂O₃-TiO₂

图 6 铝基复合涂层的硬度

Fig. 6 Hardness of the Al-based coatings

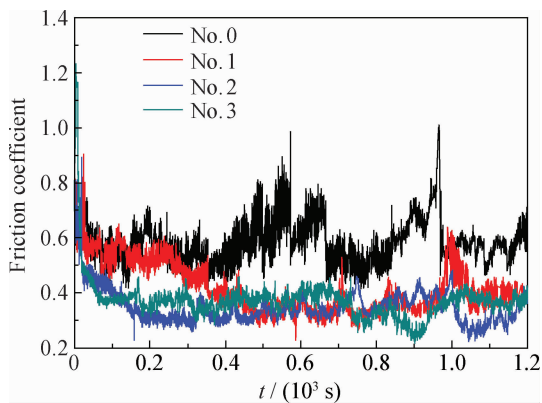


图 7 Al 和 Al/Al₂O₃ 涂层在 10 N 载荷下的摩擦因数—时间曲线

Fig. 7 Coefficients of friction versus time for Al and Al/Al₂O₃ coatings under the load of 10 N

摩擦因数下降到 0.35 左右,并趋于稳定。

图 8 为加入 Al₂O₃-TiO₂ 的涂层的摩擦因数变化。在 10 N 载荷下,加入 10%、20% 和 30% Al₂O₃-TiO₂ 的涂层的平均摩擦因数分别为 0.391、0.409 和 0.370,较纯铝涂层的摩擦因数

均有大幅度下降,Al₂O₃-TiO₂ 加入量为 30% 时下降幅度为 36.4%。从图 7 和图 8 中可以看到,随着滑动磨损的进行,纯铝涂层的摩擦因数并不稳定,随时间呈波浪起伏,说明其摩擦磨损过程需要很长的磨合期才能进入到稳定阶段。而加入了 Al₂O₃ 或 Al₂O₃-TiO₂ 的涂层的摩擦因数随时间的变化则比纯铝涂层要平稳得多,仅在平均值上下作小幅波动。

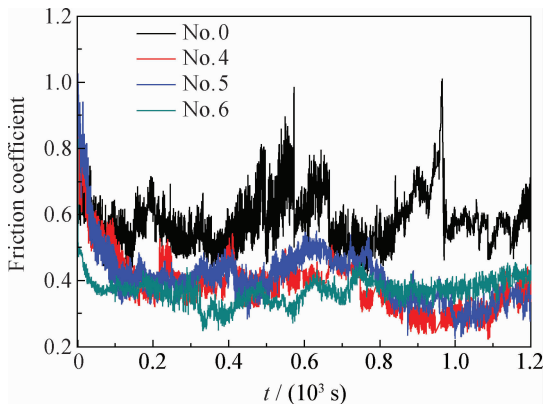


图 8 Al 和 Al/Al₂O₃-TiO₂ 涂层的摩擦因数—时间曲线

Fig. 8 Coefficients of friction versus time for Al and Al/Al₂O₃-TiO₂ coatings

各涂层在 10 N 载荷、对磨件为 $\Phi 5$ mm 的 GCr15 淬火钢球的滑动磨损条件下的磨损量如图 9 所示。可以发现,对于铝基涂层,Al₂O₃ 和 Al₂O₃-TiO₂ 的加入使涂层的磨损量大幅下降。对于只加入 Al₂O₃ 的涂层,随着其含量的增加,涂层的磨损量呈下降趋势,磨损量较未加入增强相涂层的磨损量下降了 60.2%、65.9%、85.6%,可见 Al₂O₃ 增强相明显提高了涂层的耐磨性。对加入 Al₂O₃-TiO₂ 的涂层而言,增强相使涂层的磨损量大幅下降,但是增强相含量对磨损量的影响较小,其磨损量较未加增强相涂层的磨损量下降了 74% 左右。综上分析,Al₂O₃-TiO₂ 颗粒提高了 Al 基涂层的耐磨性,但耐磨性随着增强相含量的变化幅度较小。

图 10 为磨痕形貌及磨痕处的 EDS 分析结果。对于纯铝涂层,经过 10 N 载荷下 20 min 的磨损,表面的磨损量很大,磨痕最深,磨痕处出现大量的 Fe 元素,Fe 原子分数达到 11.52%,远远超过了涂层中的 Fe 含量,说明纯铝涂层的耐磨性较差,已经被磨穿到基体处。

图 11 为含 20% 增强相的铝基复合涂层的磨

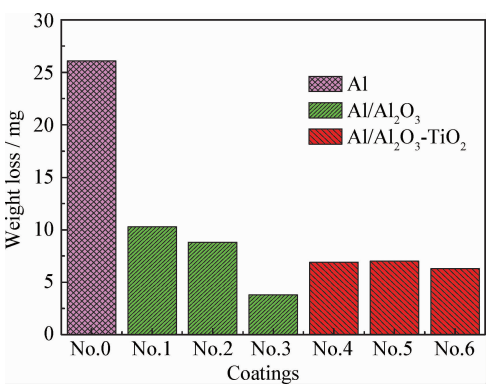
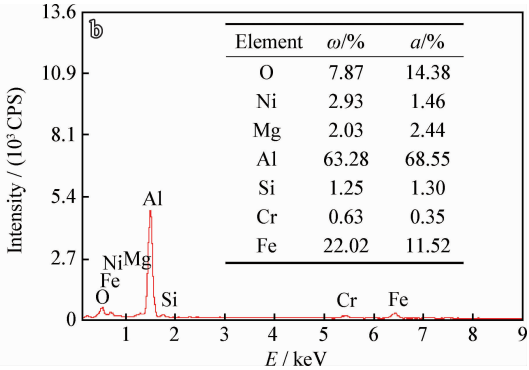
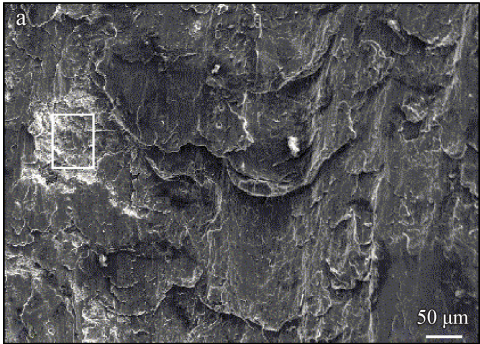


图 9 各涂层在 10 N 载荷下的磨损量

Fig. 9 Wear loss of various coatings under the load of 10 N

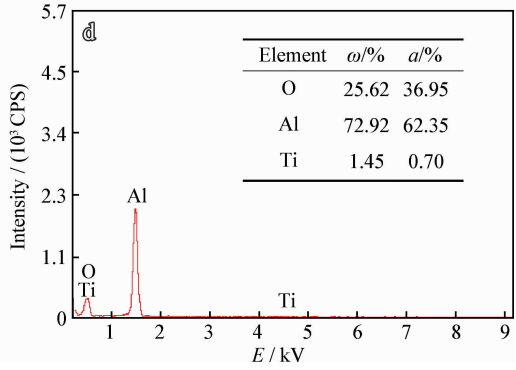
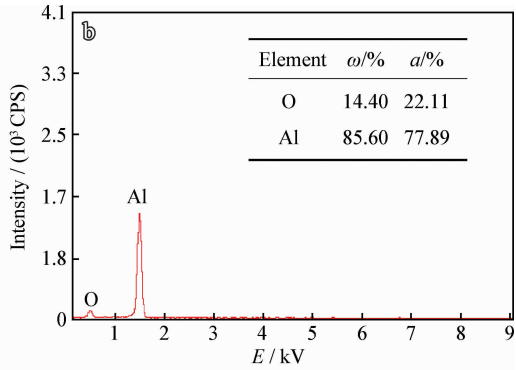
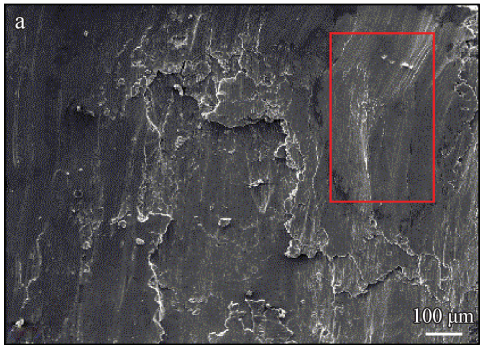
痕及磨痕处的 EDS 结果。从图 11(a)(b)中可以看到,复合涂层的磨损相对纯铝涂层的磨损减弱,Al 的原子分数较大,主要是由于涂层中含有大量的 Al,从 O 的原子分数可以看出涂层中存在 Al_2O_3 ,XRD 分析结果同样说明涂层中存在 Al_2O_3 。增强相硬度高,增强相的加入使涂层的磨损量大幅下降,说明 Al_2O_3 增强相增强了涂层的耐磨性。从图 11(c)(d)中可以看出,复合涂层的磨损同样减弱,涂层中存在一定量的 Ti 和较多的 O,说明涂层中存在增强相,Ti 以氧化物的形式存在,Al 以氧化物和单质相存在。



(a)SEM (b) EDS

图 10 纯铝涂层(No. 0)磨痕的形貌和能谱分析

Fig. 10 Morphology and EDS result of pure Al coating(No. 0)



(a) No. 2, SEM (b) No. 2, EDS (c) No. 5, SEM (d) No. 5, EDS

图 11 铝基复合涂层磨痕的形貌和能谱分析

Fig. 11 Morphologies and EDS results of wear tracks on Al-based composite coatings

增强相 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 的加入降低了涂层的磨损量,提高了涂层的耐磨性。增强相 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 颗粒均匀镶嵌在涂层中,使涂层的硬度大幅提高,因而在滑动摩擦的过程中,起到骨架支撑作用。当基体金属被磨掉一层后,摩擦的主要对象为镶嵌在其中的 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 颗粒,因而加入 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 增强相使涂层的耐磨性能大幅提高。

对图 4 的分析得出涂层中存在未熔化和熔化的颗粒状或非颗粒状增强物。利用 XRD 分析发现涂层中存在金属氧化物,当增强相为 Al_2O_3 时,涂层中存在 Al_2O_3 相,当增强相为 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 时,涂层中存在 Al_2O_3 和 TiO_2 ,极有可能是图 4 中观察到的未熔化和熔化的增强物。 Ti 的化合价降低可能是在喷涂过程中和 Al 粉发生了氧化还原反应。涂层中的增强相最终提高了涂层的耐磨性。

3 结 论

(1) 等离子喷涂制备的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 增强铝基涂层表面呈现堆砌的浪花状形貌,涂层气孔率不到 1%。

(2) Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 增强相的加入,使涂层的平均硬度大幅提高;当增强相加入 30% 时,两种复合涂层的硬度分别提高了 67% 和 76%。

(3) 增强相 Al_2O_3 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 颗粒均匀镶嵌在涂层中,使涂层的硬度大幅提高,在滑动摩擦过程中,起到骨架支撑作用,从而使涂层的耐磨性能大幅提高。

参考文献

- [1] 邓世均. 热喷涂高性能陶瓷涂层 [J]. 材料保护, 1999, 32(1): 1-8.
- [2] Daemi N, Mahboubi F, Alimadadi H. Effect of plasma nitriding on electrodeposited Ni-Al composite coating [J].

Materials & Design, 2011, 32(2): 971-975.

- [3] Zhu X L, Yao Z J, Gu X D, et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-Al intermetallic coating on 45 steel synthesized by double glow plasma surface alloying technology [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 143-148.
- [4] 徐尊平, 程南璞, 强华. 几何特征对 SiC 颗粒增强 Al 基复合材料力学行为的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(11): 1974-7.
- [5] Liu J B, Wang L M, Li H Q. Reactive plasma cladding of TiC/Fe cermet coating using asphalt as a carbonaceous precursor [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(9): 4921-5.
- [6] Lotfi B. Elevated temperature oxidation behavior of HVOF sprayed TiB_2 cermet coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(2): 243-247.
- [7] Terajima T, Takeuchi F, Nakata K, et al. Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 504: S288-S291.
- [8] 蒋斌, 徐滨士, 董世运. $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 复合镀层的组织与滑动磨损性能研究 [J]. 材料工程, 2002(9): 33-36.
- [9] 汪笑鹤, 徐滨士, 胡振峰. 电刷镀 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-Co}$ 镀层组织与性能的研究 [J]. 电镀与环保, 2010, 30(6): 12-16.
- [10] 杨震晓, 刘敏, 邓春明, 等. 热喷涂基体表面预处理技术的研究进展 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14.
- [11] 范文超, 谭俊, 王海军, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 $\text{AlSi-20\%Al/Ni}$ 涂层结合强度的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 71-75.
- [12] 吕志军, 贺文雄, 赵健, 等. Ti-Al 球磨粉反应等离子喷涂工艺 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 56-62.
- [13] Yue T M, Huang K J, Man H C. Laser cladding of Al_2O_3 coating on aluminium alloy by thermite reactions [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 194(2/3): 232-237.
- [14] 刘宏伟, 张龙, 王建江, 等. Al 对反应火焰喷涂 Al_2O_3 基复相涂层性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S2): 565-567.

作者地址: 哈尔滨市南岗区西大直街 92 号 150001
哈尔滨工业大学材料科学系 433 信箱
Tel: (0451) 8640 2752
E-mail: wangyou@hit.edu.cn(王铀)

(责任编辑:王文字)