

Si 含量对镁合金表面铝基涂层摩擦学性能的影响^{*}

时小军, 姜海波, 王晓明, 姚巨坤, 张 康, 孟祥民

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘 要: 为提高镁合金的耐磨性能, 采用超音速微粒沉积技术在 ZM5 镁合金表面喷涂, 完成 Al-12Si 与 Al-15Si 耐磨防护涂层的制备。利用扫描电镜(SEM)与三维形貌显微镜对抛光后涂层的微观形貌与成分进行观察, 通过 X 射线衍射仪(XRD)、金相显微镜与显微硬度仪对两种涂层的组织与显微硬度分析, 用摩擦磨损试验机对涂层进行摩擦试验, 并对两种涂层摩擦磨损试验产生的磨痕微观形貌进行对比。结果表明: Al-12Si 涂层与 Al-15Si 涂层中主要为 α -Al 相和共晶组织, Al-15Si 涂层的硬度为 135.9 HV_{0.05}, 高于 Al-12Si 的硬度(113.2 HV_{0.05}); 且两种涂层均以粘着磨损为主要磨损失效形式。Al-15Si 涂层在 3 种载荷下(10、20 和 30 N)的磨损体积均小于 Al-12Si 涂层, Al-15Si 涂层具有较强的耐磨性能, 可以更好地为镁合金基材提供长效耐磨防护。

关键词: 镁合金; 超音速微粒沉积; 铝; 硅; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG174.442; TG115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)04-0037-06

Impact of Silicon Content on Wear Behavior of Al-based Coating on the Surface of Magnesium Alloy

SHI Xiao-jun, JIANG Hai-bo, WANG Xiao-ming, YAO Ju-kun, ZHANG Kang, MENG Xiang-min
(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: To improve the wear resistant properties of ZM5 alloy, Al-12Si, and Al-15Si coatings were prepared by supersonic particles deposition. The microstructure and chemical composition of the coatings after polishing were investigated and analyzed by scanning electron microscope (SEM). Their structure and microhardness were studied by the X-ray diffraction (XRD), optical microscope (OM) and the microhardness tester. Their wear scar morphologies that were made by the friction and abrasion testing machine were researched by SEM and three-dimensional microscope. The results show the main phases of Al-12Si coating and Al-15Si coating are α -Al and eutectic structure. The microhardness of Al-15Si coating and Al-12Si coating is 135.9 HV_{0.05} and 113.2 HV_{0.05}. In addition, the main abrasion failure mechanism of the two coatings is adhesive wear, and Al-15Si coating has the less volumes and the better anti-friction properties in the conditions of 10, 20, and 30 N. All those indicate that Al-15Si coating has the better anti-wear properties, which can provide long-time protection for ZM5 magnesium alloy substrate.

Key words: magnesium alloy; supersonic particles deposition; aluminum; silicon; friction; wear

0 引 言

镁合金不仅密度小, 铸造性能与再循环性好, 而且具有比强度、比刚度高等诸多优点, 是一

种综合性能优良的轻质工程金属材料, 应用前景广阔^[1]。但是镁合金的硬度低, 在实际工程应用中易划伤, 一定程度上限制了镁合金的推广应

收稿日期: 2014-03-31; **修回日期:** 2014-06-18; **基金项目:** * 军队基金项目(9140A27030312JB3501); 军队计划项目(51327040301)

作者简介: 时小军(1968—), 男(汉), 江苏宿迁人, 副教授, 硕士; **研究方向:** 装备维修工程

网络出版日期: 2014-07-02 16:40; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140702.1640.006.html>

引文格式: 时小军, 姜海波, 王晓明, 等. Si 含量对镁合金表面铝基涂层摩擦学性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 37-42.

用。ZM5 合金的突出特点是强度较高,主要用于制造航空装备、动力系统等受力较大或形状复杂的轻质零件^[2]。但是,在实际的应用过程中存在耐磨性能差的缺陷^[3],因此必须采取有效的防护措施,提高镁合金表面的耐磨性能。一些常用的防护措施,如微弧氧化、等离子喷涂、气相沉积、阳极氧化、金属镀层等,虽然其中一些方法制备的涂层防护性能优异,但是存在污染环境、经济效益差、程序繁琐、热输入大等缺点^[4-7],限制了其推广与应用。而 Al-Si 系合金具有良好的耐磨、耐蚀能力,并且 Al、Si 与 Mg 3 种元素之间可以形成 Mg_2Si 、 $Mg_{17}Al_{12}$ 、 $Al_{3.21}Si_{0.47}$ 等多种金属间化合物,均有助于镁合金耐磨性的提高^[8-11]。

基于冷喷涂技术发展起来的超音速微粒沉积(Supersonic particles deposition)技术借助丙烷、氢气、氮气等完成涂层的制备,其中氮气作为送粉气体,丙烷与压缩空气用作燃气,氢气主要作为助燃气体,同时防止喷涂中的氧化^[12-13]。该方法可避免喷涂粉体与基材的氧化、相变等热影响,因此适用于对相变与氧化敏感的材料^[14]。而且该技术的喷涂温度比冷喷涂温度稍高,对喷涂粉体的加热加速效果更加显著,使得粒子沉积效率更高、涂层致密度更高,进而对镁合金表面的保护作用更加显著。为此,文中采用超音速微粒沉积技术,在 ZM5 镁合金表面制备 Al-12Si 与 Al-15Si 耐磨防护涂层,并通过对两种涂层的结合强度、显微硬度、物相结构、耐磨性能和磨痕微观形貌等进行比较分析,以期得到综合耐磨性能较优的涂层,为镁合金的涂层防护提供理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 材料

采用的喷涂基材为 ZM5 镁合金,化学成分如表 1 所示。喷涂用的铝硅粉体为 Al-12Si 合金粉末与合金粉末(成分见表 1),颗粒为均匀球形,粒径为 41~106 μm 。

表 1 合金与粉体的化学成分

Table 1 Chemical composition of the alloy and powders (w/%)

Species	Si	Fe	Zn	Ni	Cu	Mg	Mn	Al
ZM5	0.3	0.05	0.5	0.01	0.2	Bal.	0.35	8.5
Al-12Si	11.8	0.16			0.02	<0.01	<0.01	Bal.
Al-15Si	15.2	0.20						Bal.

1.2 涂层制备

采用棕刚玉对 ZM5 基材进行喷砂处理,以利于粉体沉积,提高制备 Al-Si 涂层与基体的结合强度。喷涂设备采用美制 AK-02M 型超音速微粒沉积系统,自制喷涂转台频率为 0~45 Hz,由机器人按照编程路径进行喷涂。具体工艺参数如下:入口压力 0.65 MPa,喷涂距离 280 mm,喷枪移动线速度 1 000 mm/s,送粉速率 10 r/s,进行约 300 μm 耐磨防护涂层的制备。

1.3 性能测试

取尺寸 10 mm×15 mm×30 mm 的 Al-12Si 涂层与 Al-15Si 涂层的试样,将喷涂表面用砂纸打磨至 1 500 号后抛光处理,并用扫描电镜对抛光试样的表面微观形貌与化学成分进行观察分析。

采用奥林巴斯金相显微镜和 D8 型 X 射线衍射仪(布鲁克公司)对 Al-12Si 与 Al-15Si 两种涂层的组织结构进行分析。

采用手动转塔数显显微硬度仪(研润光机科技有限公司)对抛光涂层进行硬度测试,每种涂层测试 10 个点,其中载荷 0.49 N,加载时间 20 s,两硬度点间距 0.05 mm。

采用 CETR-3 型多功能摩擦磨损试验机(美国 CETR 公司,型号 UMT-3)进行摩擦磨损试验,选择硬度为 770 HV, Φ 4 mm 的 GCr15 圆球为摩擦副;下试样为涂层厚度为 300 μm 的 ZM5 镁合金试样。当频率为 5 Hz 时,选定载荷分别为 10、20 和 30 N,预载时间为 10 s,摩擦时间为 15 min,研究 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层在不同载荷下摩擦因数的变化情况。

采用 Quanta200 型环境扫描电子显微镜(美国 FEI 公司)与 OLS 激光 3D 显微镜(日本 OLYMPUS 公司)测量 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层的磨痕形貌与磨痕三维尺寸进行测试,并且对比两种涂层的耐磨性能差异。

2 结果与分析

2.1 涂层的微观形貌

图 1 为 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层经过抛光处理之后的微观形貌与能谱分析。从图中可以看出,两种涂层的表层结构均匀致密,无裂纹产生。且对比图 1(a)与 1(c)表明,Si 质量分数(以下简

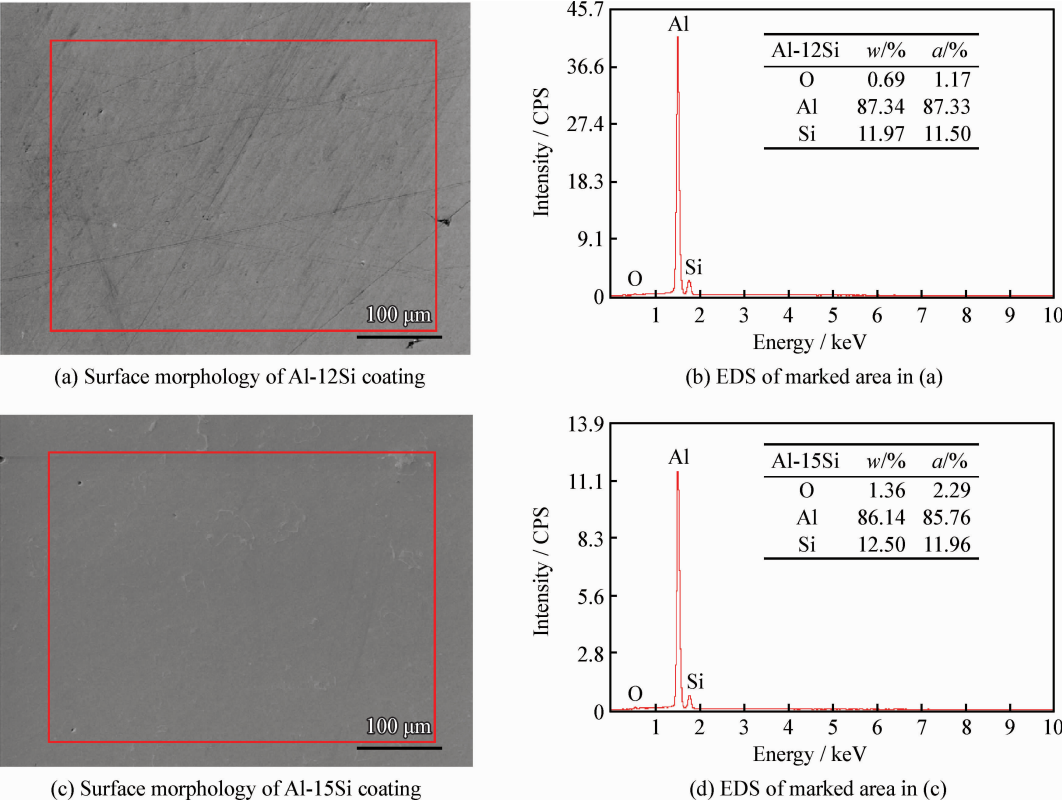


图 1 Al-Si 涂层抛光后的表面形貌和能谱分析

Fig. 1 Surface morphologies and EDS analysis of the Al-Si coatings after polishing

称“含量”)的增加对涂层的表面形貌没有明显影响,两种涂层的氧含量较少,未发生明显氧化,说明超音速微粒沉积技术适用于喷涂对氧化敏感的材料。

2.2 涂层的相组成

由图 2 中 Al-12Si 与 Al-15Si 的粉末与涂层表面的 XRD 图谱可知,两种 Al-Si 粉末与涂层中的主要物相均为 α-Al 相与 Si 相,可以认为,在喷涂过程中涂层没有新相生成。

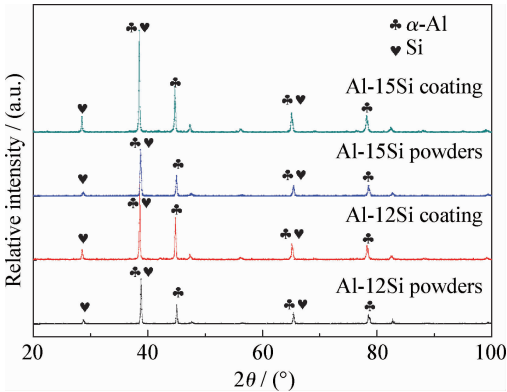


图 2 Al-Si 粉末与涂层表面的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the Al-Si coatings and powders

2.3 金相组织

图 3 为 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层表面的金相组织,图中白色部分为 α-Al 相,其余灰色部分为铝硅共晶组织,两种涂层其组织与铸态合金相同。

2.4 显微硬度

图 4 为两种铝硅涂层的显微硬度,由图可知,Al-12Si 和 Al-15Si 涂层的硬度平均值分别为 113.2 HV_{0.05} 和 135.9 HV_{0.05},Al-15Si 涂层的硬度值较大。这是因为 Al-15Si 涂层中的 Si 含量较多,形成硬度较大的铝硅共晶组织,从而使 Al-15Si 涂层显微硬度较大。而对于同种涂层,因为多种组织的存在,导致了同种涂层不同部位的硬度值不同。

2.5 摩擦磨损性能

2.5.1 摩擦因数

图 5 给出了在不同摩擦载荷下镁合金表面 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层的摩擦因数。从图中可以看出,这两种涂层在摩擦初期的摩擦因数都相对较大,随后在短时间内降低,进入相对稳定阶段。

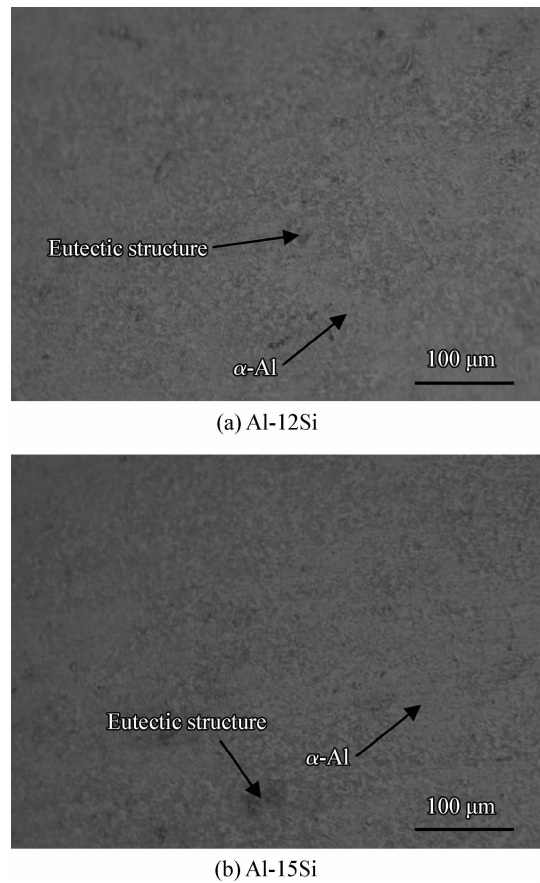


图 3 Al-12Si 和 Al-15Si 涂层金相组织
Fig. 3 Microstructure of the Al-12Si and Al-15Si coatings

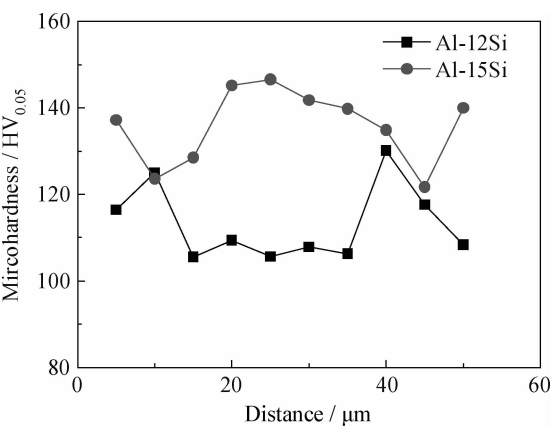


图 4 铝硅涂层显微硬度
Fig. 4 Microhardness of the Al-Si coatings

不同载荷下的平均摩擦因数如图 6 所示, Al-12Si 在 10 N 与 20 N 时摩擦因数稍大, 在 30 N 时较小。综合图 5 与图 6, 当载荷为 10 N 时, Al-12Si 涂层的摩擦因数较大, 且在第 150 s 附近出现了一个峰值; 当载荷为 20 N 时, Al-12Si 涂层

的摩擦因数较大, 且 Al-12Si 涂层在第 100 s 附近出现了两个峰值, Al-15Si 涂层在 70 s 附近出现一个峰值; 在载荷 30 N 时无明显差别。

几条曲线均有一定幅度的波动, 原因是超音速微粒沉积技术制备的两种 Al-Si 涂层以机械嵌合为主, 两种 Al-Si 粉体主要为 α-Al 相与

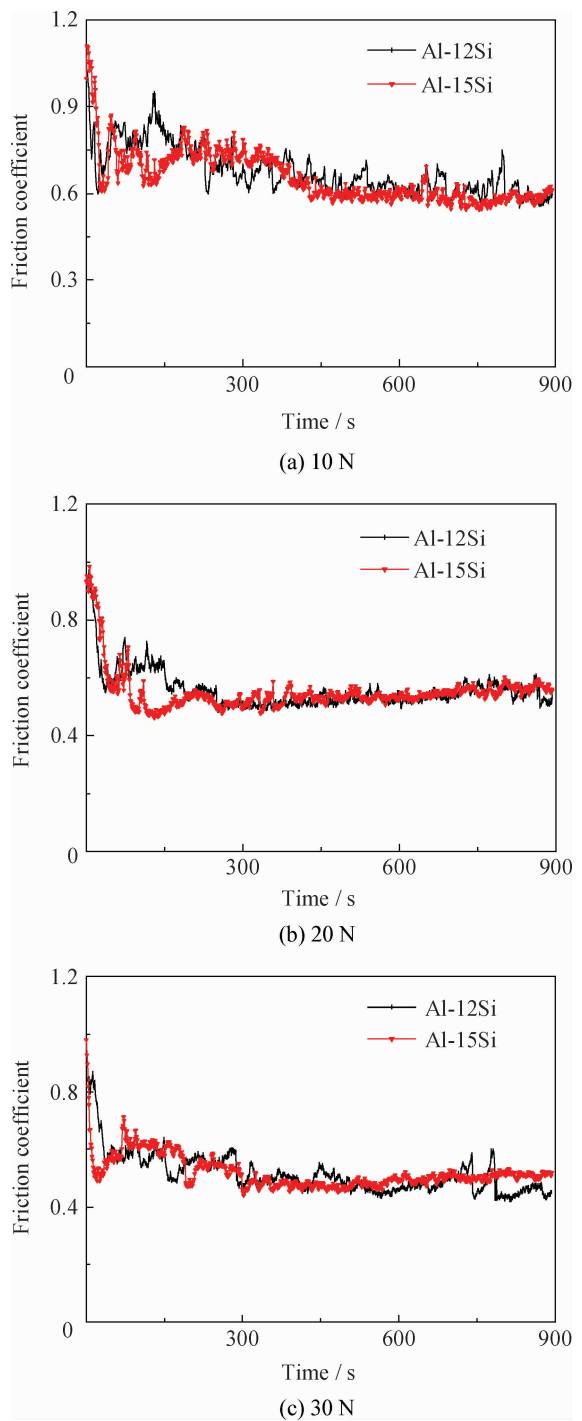


图 5 不同载荷下 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层摩擦因数
Fig. 5 Friction coefficient of the Al-12Si and Al-15Si coatings under different loads

共晶组织,喷涂过程中基本不变,硬度仪接触到不同的组织进行检测,进而引起表面硬度的不同。在摩擦磨损试验过程中,摩擦副在压力作用下与两种涂层接触并发生相对摩擦,造成涂层表面的形变不同,引起摩擦相对运动所需的犁耕力不同,最终引起摩擦因数的波动。

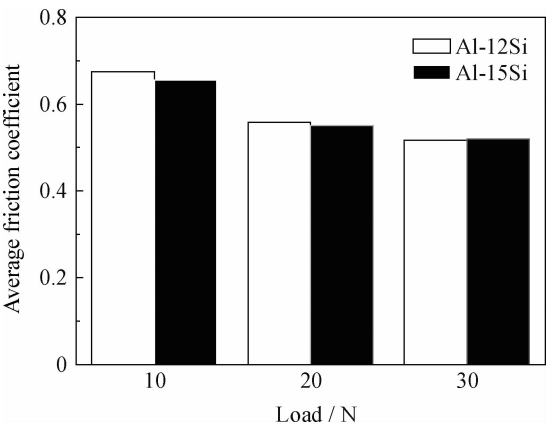


图 6 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层的平均摩擦因数
Fig.6 Average friction coefficient of the Al-12Si and Al-15Si coatings

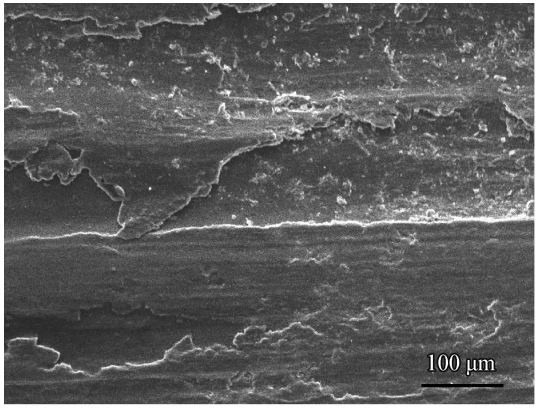
2.5.2 磨痕形貌

图 7 为 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层在 30 N 载荷下干摩擦的摩擦磨损形貌。可见,在干摩擦条件下,两种涂层的磨痕表面差别不大,均显示为明显的撕裂与擦伤,可以认为超音速微粒沉积技术制备的 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层的主要失效形式均为粘着磨损。

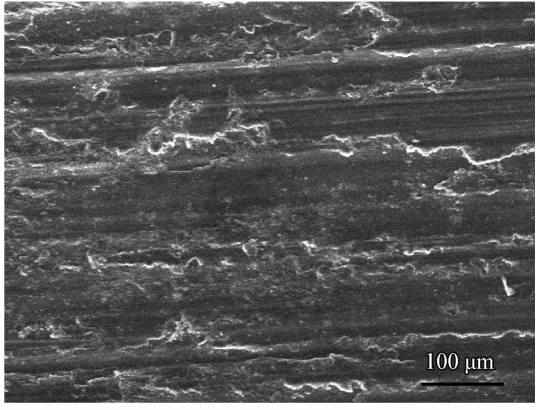
干摩擦时,表面压力使滚球压紧涂层,之后的相对运动导致温度急剧升高,引起局部区域硬化、软化、相变乃至熔化^[15]。一种金属表层在摩擦过程中被软化,转移到另一金属表面,从而形成裂口等。磨损面的高温使铝形成氧化铝薄膜,附在磨损表面上,从而提高了合金的耐磨性。

2.5.3 磨损体积

图 8 为 Al-12Si 与 Al-15Si 涂层在 10、20 和 30 N 载荷下的磨损体积,图 9 为两种涂层的三维磨痕形貌。由图可得,随着摩擦试验载荷的增加,两种涂层的磨损体积呈现增大趋势,而且在 3 种载荷下,Al-12Si 涂层的磨损体积均大于 Al-15Si 涂层的磨损体积。这是因为 Al-15Si 涂层中较多的 Si 元素形成了较多的共晶组织,可以相对较大程度的阻碍摩擦副对 Al-15Si 涂层的磨损,使得 Al-15Si 涂层的耐磨性能较优。



(a) Al-12Si, 30 N



(b) Al-15Si, 30 N

图 7 Al-Si 涂层摩擦磨损形貌
Fig.7 Wear scar morphologies of the Al-Si coatings

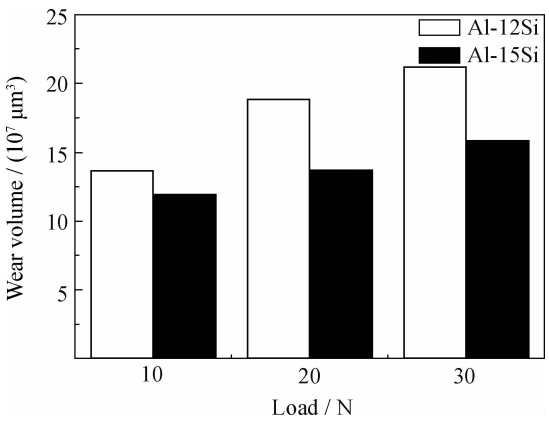


图 8 Al-Si 涂层的磨损体积
Fig.8 Wear volumes of the Al-Si coatings

3 结 论

(1) 采用超音速微粒沉积技术制备的 Al-15Si 涂层的显微硬度为 135.9 HV_{0.05}, Al-12Si 涂层的显微硬度为 113.2 HV_{0.05}。Al-15Si 涂层

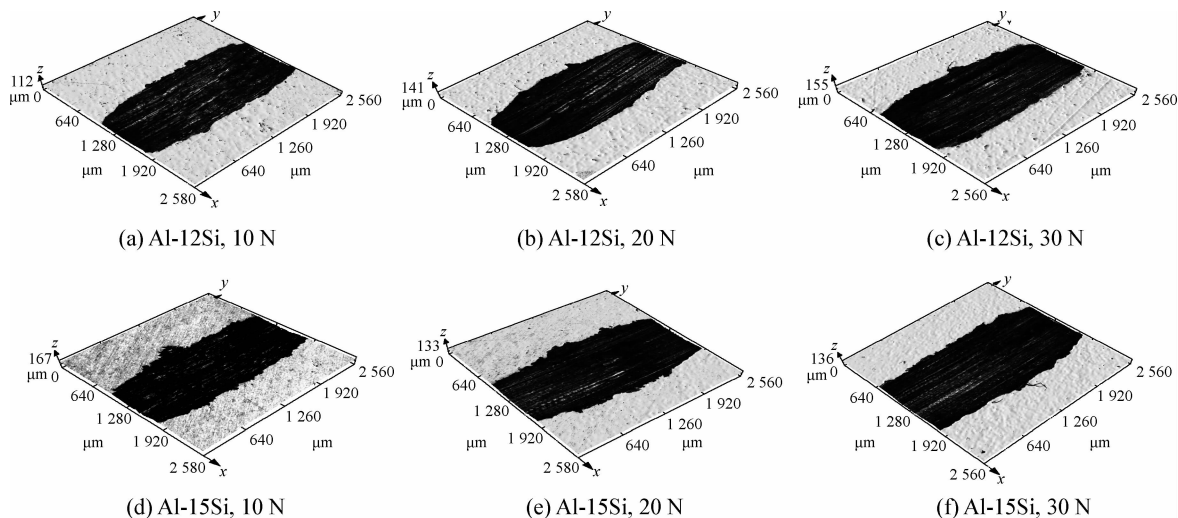


图9 Al-12Si与Al-15Si涂层的三维磨痕形貌

Fig. 9 Three-dimensional morphologies of wear abrasion of the Al-12Si and Al-15Si coatings

中较多的Si元素形成了较多的共晶组织,使涂层显微硬度增大。

(2) Al-12Si与Al-15Si涂层的摩擦磨损程度相近,主要失效形式均为粘着磨损。

(3) Al-12Si涂层在10、20与30N的磨损体积均大于Al-15Si涂层,表明Al-15Si涂层中较多的共晶组织可以较好的阻碍摩擦副对涂层的摩擦磨损,更好的延长镁合金基体的服役寿命。

参考文献

- [1] 梁春林,刘宜宣,韩变华,等. 镁合金表面处理研究现状及发展趋势[J]. 表面技术, 2006, 35(6): 57-60.
- [2] 康鸿跃,陈善化,马永平,等. 镁合金在军事装备中的应用[J]. 金属世界, 2008(1): 61-64.
- [3] 慕伟意,李争显,杜继红,等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 86-91.
- [4] 周婉秋. 镁合金在大气中的腐蚀行为及其表面防护技术[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(1): 1-6.
- [5] 李思思,王维,吴玉峰,等. 镁合金表面微弧氧化-溶胶凝胶复合膜层的结构及耐蚀性[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 40-44.
- [6] 姜巍巍,李俊青,张密林,等. 镁合金表面防护涂层的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(11): 42-45.
- [7] 李思思,马捷,贾平平,等. AZ31镁合金表面表面化学气

相沉积钨涂层工艺及其耐蚀性和耐磨性[J]. 中国表面工程, 2014, 27(1): 40-44.

- [8] 张凤巍. 过共晶Al-Si合金对Al-Si合金的变质作用[D]. 湘潭:湘潭大学, 2009.
- [9] 袁晓光,刘彦学,吕楠,等. 镁合金表面冷喷涂锌铝快凝粉末的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(4): 204-207.
- [10] 冯辉,崔泽琴,王文先,等. 镁合金表面激光熔覆Al-Si基纳米SiC复合涂层的组织和性能[J]. 2012, 32(1): 13-17.
- [11] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社, 2004: 29-31.
- [12] Choi H S, Yoon S H, Uhm S H, et al. Characterization of the spraying beads deposited by the kinetic spraying process[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 192(2/3): 374-381.
- [13] 刘玉项. 镁合金表面超音速微粒沉积Al-Si涂层的制备过程模拟与实验研究[D]. 北京:装甲兵工程学院, 2013.
- [14] 卜恒勇,卢晨. 冷喷涂技术的研究现状及进展[J]. 材料工程, 2010(1): 94-98.
- [15] 刘彦学. 镁合金表面冷喷涂技术及涂层性能的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2007, 12: 87-88.

作者地址:北京市丰台区杜家坎21号

100072

装甲兵工程学院装备维修与再制造工程系

Tel: (010) 6671 9215

E-mail: jianghaibogucheng@126.com

(责任编辑:常青)