

Al 含量对 Al-Mg₂Si 复合涂层耐蚀耐磨性能的影响

范春, 龙威, 周小平

(湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: **目的** 在 AZ31B 镁合金表面火焰喷涂制备 Al-Mg₂Si 复合涂层, 研究其耐蚀和耐磨性能。**方法** 用 SEM、电化学测试仪、高速往复摩擦磨损测试仪和超景深三维显微镜检测分析不同成分配比的 Al-Mg₂Si 复合涂层的耐蚀和摩擦磨损性能。**结果** Al-Mg₂Si 复合涂层的电位较 AZ31B 镁合金基体正, 且 Al 含量越少, 电位正移越明显。Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的自腐蚀电位正移得最多, 正移了 0.5288 V; 自腐蚀电流密度最小, 为 3.298×10^{-6} A/cm²。Al 加入量越少, 复合涂层的磨损率和摩擦系数越小, 当 Al 质量分数为 20% 时, 两者均达到最小值, 分别为 2.48×10^{-4} mm³/(N·mm) 和 0.25。**结论** Al 含量越少, Al-Mg₂Si 复合涂层的耐蚀和耐磨性能越好。

关键词: AZ31B 镁合金; 火焰喷涂; Al-Mg₂Si 复合涂层; 耐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TG146.2; TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)02-0225-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.035

Influence of Al Content on Corrosion and Wear Resistance of Al-Mg₂Si Composite Coatings

FAN Chun, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping

(Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the corrosion and wear of Al-Mg₂Si composite coating by spraying it on AZ31B magnesium alloy surface. The corrosion resistance and wear resistance of coatings with different composition proportions were characterized by scanning electron microscopy, electrochemical testing, friction wear testing machine and ultra-depth three-dimensional Microscope. It showed that the corrosion resistance of Al-Mg₂Si composite coating sealed was much higher than that of AZ31B magnesium alloy, and the less the content of Al, the more obvious the potential shift was. The positive displacement of Al (20%)-Mg₂Si coating was the most, which was shifted 0.5288 V, and the corrosion current density was minimum 3.298×10^{-6} A/cm². Furthermore, the less the amount of Al addition, the smaller the wear rate and friction coefficient of the coating, and the wear rate that was 2.48×10^{-4} mm³/(N·mm) and friction coefficient which was 0.25 were lower when the content of Al was 20%. The less Al content of Al-Mg₂Si composite coating is, the better the corrosion and wear resistance are.

KEY WORDS: AZ31B magnesium alloy; flame spraying; Al-Mg₂Si composite coating; corrosion resistance; frictional wear

收稿日期: 2017-08-03; 修订日期: 2017-09-25

Received: 2017-08-03; Revised: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51171062)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51171062)

作者简介: 范春 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: FAN Chun (1988—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 周小平 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: ZHOU Xiao-ping (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering.

复合材料因其可以获得某些超越原材料的优良新性能而备受科学工作者的青睐,特别是金属间化合物的研究与开发越来越受到人们的关注^[1-2]。 Mg_2Si 具有密度低(1.99 g/cm^3)、熔点高($1080\text{ }^\circ\text{C}$)、室温热稳定性好、比强度高、耐腐蚀、无毒等多种优异性能,是一种非常有前途的轻质高温结构材料^[3-5]。

国内外许多学者对 Mg_2Si 及其复合材料进行了大量研究,目前研究最多的是将 Mg_2Si 嵌入 Al 中,制备出 Al- Mg_2Si 块体复合材料^[6,7]。秦庆东^[8]对 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Al}$ 块体复合材料的性能进行了研究,发现磷等微量元素的变质处理可以提高复合材料的综合性能。周琦等^[9]通过热爆反应制备出新型 Al/ Mg_2Si 块体复合材料,研究发现随着 Al 含量的增加,复合材料的硬度降低。付宇^[10]采用离心浇铸的方法制备出 $\text{Mg}_2\text{Si}-\text{Al}$ 梯度复合材料,研究发现半固态挤压可以提高 $\text{Mg}_2\text{Si}-\text{Al}$ 梯度复合抗摩擦性能。Takahashi 等^[11]用放电等离子烧结技术在镁合金表面制备出 Mg_2Si 涂层,研究了其耐蚀和耐磨性能后发现,镁合金表面的耐蚀耐磨性能得到了改善。阅读文献可知, $\text{Mg}_2\text{Si}-\text{Al}$ 复合材料同时兼有 Mg_2Si 和 Al 的性质,表现出优异的综合性能,但是 Mg_2Si 大多作为颗粒增强相镶嵌在 Al 基体中,加入量受到限制,不能很好地体现其实际价值。对 Al- Mg_2Si 复合材料性能的研究也主要停留在块体复合材料, Mg_2Si 基复合涂层的性能研究相对较少。

Mg_2Si 室温本征脆性大^[12],制取纯 Mg_2Si 涂层比较困难且经济成本较高,因此可以在 Mg_2Si 中加入其他金属作为粘结剂来提高 Mg_2Si 颗粒间的粘着性,以达到制备出性能较好涂层的目的。Al 塑韧性好,且与 Mg_2Si 的熔点相差较大,喷涂过程中熔融状态的 Al 会包裹在固态或半熔融状态的 Mg_2Si 颗粒周围,增加 Mg_2Si 颗粒间的粘着度。作者^[13]在 AZ31B 镁合金表面制备了不同成分的 Al- Mg_2Si 复合涂层,并对其进行了电化学测试、浸泡试验和显微硬度测试,研究发现 Al 可以改善复合涂层的组织性能,且耐蚀性能和显微硬度均优于镁合金基体。此外还发现有少量的 MgO 生成,这是因为在喷涂过程中少量的 Mg_2Si 发生分解生成 Mg ,分解生成的 Mg 会与氧结合使 Al 周围局部区域氧含量降低,避免 Al 发生氧化而失去粘结剂的作用,故不会改变 Mg_2Si 颗粒间、涂层与基体间的结合能力。本文通过比较涂层的极化曲线,观察摩擦系数、摩擦磨痕特征,研究 Al 含量对 Al- Mg_2Si 复合涂层的耐蚀和耐摩擦磨损性能的影响。

1 试验材料和方法

1.1 试样制备及处理

基体材料为 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 的 AZ31B 镁合

金。采用氧气-乙炔火焰喷涂设备制备 Al 含量(质量分数,下同)分别为 20%、40%、60%和 80%的 Al- Mg_2Si 复合涂层,具体制备过程见文献[13]。采用热喷涂工艺所制备的涂层通常为层状结构,涂层中不可避免地会存在孔隙、孔洞等工艺缺陷,降低涂层的性能^[14],而封孔处理可以改善孔隙缺陷^[15],因此本实验采用淋涂封孔法对涂层进行封孔处理,封孔剂为有机硅玻璃树脂。

1.2 试验方法

利用 CHI660E 电化学工作站测试封孔后试样的塔菲尔极化曲线(扫描速度为 0.005 V/s ,灵敏度 S 为自动灵敏度),采用标准的三电极体系(Pt 为辅助电极,甘汞为参比电极,试样为工作电极),试样的有效工作面积为 1 cm^2 ,测试温度为室温,溶液为 3.5%NaCl 溶液,测试后在 CHI660 E 软件中拟合极化曲线,求出腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 。用 MFT-EC 4000 高速往复摩擦磨损试验机测定复合涂层的干摩擦磨损性能,摩擦方式为磨头固定,磨盘往复运动,摩擦副为 $\phi 6\text{ mm}$ 的 Al_2O_3 陶瓷球,载荷为 14.3 N ,频率为 1 Hz ,行驶距离为 5 mm ,测定时间为 15 min 。用扫描电镜(SEM)观察分析磨痕表面形貌。用 DSX 510 型超景深三维显微镜测定磨痕体积、磨痕深度和磨痕宽度,并根据磨痕来计算体积磨损率。

2 结果与分析

2.1 涂层塔菲尔极化曲线

4 种 Al- Mg_2Si 复合涂层的塔菲尔极化曲线见图 1,相应的自腐蚀电位 E_{corr} 和自腐蚀电流密度 J_{corr} 如表 1 所示。由图 1 可知,相对于镁合金基体,4 种涂层的极化曲线均向右下方偏移,并且 Al 含量越少,曲线偏移越多。结合表 1 可知,AZ31B 镁合金基体的自腐蚀电位为 -1.4888 V ,自腐蚀电流密度为 $2.817\times 10^{-3}\text{ A/cm}^2$,而 4 种复合涂层的自腐蚀电流密度均远小于 AZ31B 镁合金基体,降低了 3 个数量级,其中 Al 含量为 20%时,自腐蚀电流密度降低最多。从电化学腐蚀动力学来说,自腐蚀电流密度越小,材料的耐腐蚀性能越好^[16],故 Al(20%)- Mg_2Si 复合涂层的耐腐蚀性最好。从电化学热力学来说,自腐蚀电位越正,反应平衡常数就会越小,电化学反应的阻值就越大,反应越难发生,材料的耐腐蚀性就会越好^[17]。Al(20%)- Mg_2Si 复合涂层的自腐蚀电位正移得最多(正移了 0.5288 V),Al(80%)- Mg_2Si 复合涂层正移得最少(正移了 0.3055 V),说明 Al- Mg_2Si 复合涂层的耐腐蚀性优于镁合金基体,并且涂层的 Al 含量越少,其耐腐蚀特性越好。

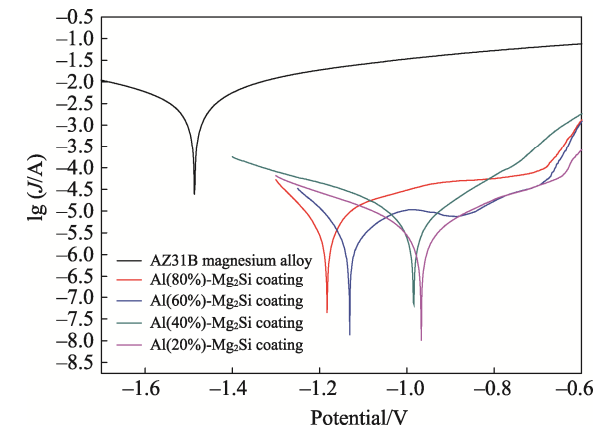


图 1 Al-Mg₂Si 复合涂层与镁合金的极化曲线
Fig.1 Polarization curves of Al-Mg₂Si coating and AZ31B magnesium alloy

表 1 试样的腐蚀电位和腐蚀电流密度
Tab.1 The corrosion potential and corrosion current of the sample

Sample	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
AZ31B magnesium alloy	-1.4888	2.817×10^{-3}
Al(20%)-Mg ₂ Si coating	-0.9600	3.298×10^{-6}
Al(40%)-Mg ₂ Si coating	-0.9863	5.381×10^{-6}
Al(60%)-Mg ₂ Si coating	-1.1334	3.543×10^{-6}
Al(80%)-Mg ₂ Si coating	-1.1833	4.773×10^{-6}

2.2 摩擦磨损性能

2.2.1 摩擦系数

图 2 所示的是 4 种涂层与 Al₂O₃ 磨球对磨时摩擦系数随时间的变化曲线。由图 2 可知,随着 Al 含量

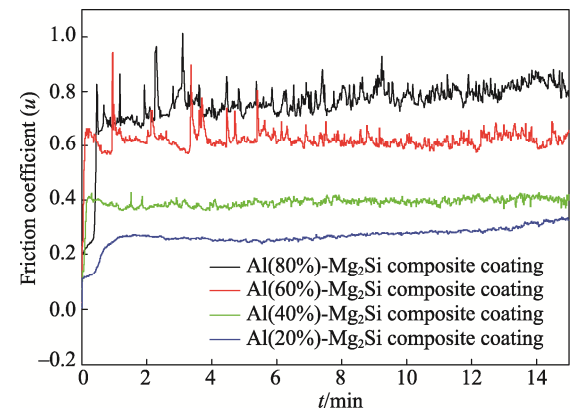


图 2 摩擦系数随摩擦时间的变化
Fig.2 Variations of friction coefficient with tribocorrosion time

的增加,涂层稳定摩擦系数依次增大。Al 含量为 80% 时,摩擦系数稳定在 0.8 左右;Al 含量为 60%、40% 和 20% 的摩擦系数分别大致稳定在 0.6、0.4、0.25。在摩擦刚开始阶段,Al 含量为 80% 和 60% 的复合涂层摩擦系数变化区间较大,摩擦 6 min 后摩擦系数才趋于稳定。涂层的磨损实际是金属材料的剥落-碾碎的重复过程,刚剥落的磨屑尺寸较大且不规则,分布在摩擦副周围,使涂层局部粗糙度增加。有研究表明试样表面越粗糙,其相应的摩擦系数也会增加^[15],故出现摩擦系数突变情况。相比较而言,Al 含量为 20% 时,摩擦系数曲线比较光滑,说明在滑动摩擦的过程中,磨痕表面粗糙度较小,表现出较好的耐摩擦性能。

2.2.2 磨痕形貌

图 3 是不同 Al 含量的复合涂层的磨痕形貌。由

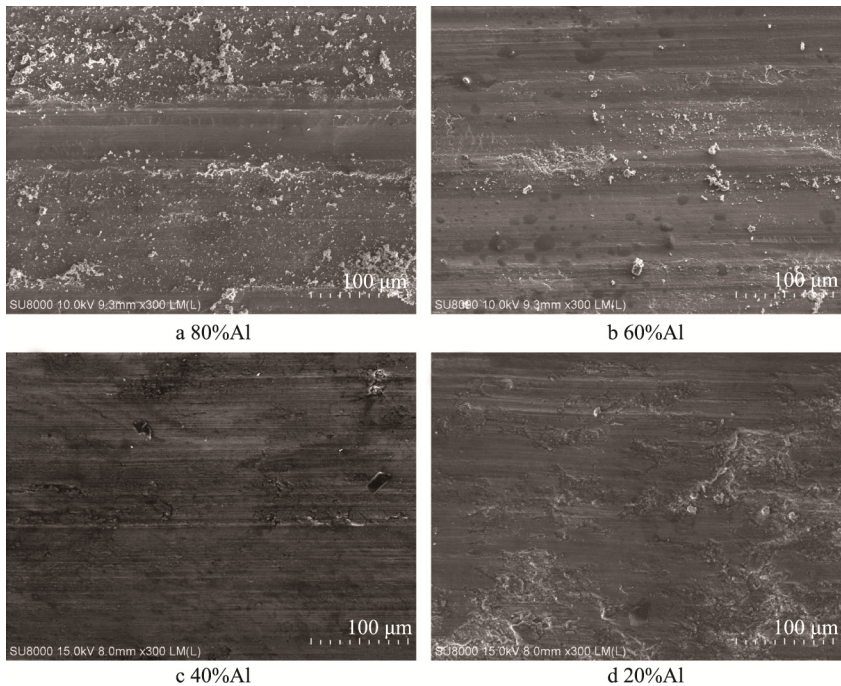


图 3 不同 Al 含量的 Al-Mg₂Si 复合涂层的磨痕形貌
Fig.3 SEM micrographs of Al-Mg₂Si composite coating

图 3 可知,随着 Al 含量的减少,磨痕表面犁沟的宽度和深度逐渐降低,磨屑数量和尺寸逐渐减少。图 3a 显示的 Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的磨痕表面比较粗糙,存在大量不规则颗粒磨屑,且尺寸较大,犁沟较深、较宽。一般而言,涂层中 Al 含量越多,涂层性能越接近 Al,而 Al 属于软质相,不耐磨损,在剧烈磨损情况下,摩擦界面温度升高会导致磨痕表面物质软化,在摩擦力的作用下易被切削剥落,涂层很快遭到破坏^[18]。此外,高温下表层会发生氧化生成 Al₂O₃ 膜层,磨屑表层硬度提高,被切削掉的磨屑颗粒不规则,在摩擦球的推动作用磨屑会嵌入涂层滑行,加速涂层破坏。

图 3b 所示的犁沟深度和宽度较图 3a 都有所降低,磨屑尺寸和数量也有所减小。这是因为 Al 含量减少时,硬质相 Mg₂Si 含量会增多,且均匀分布在 Al 中,在剧烈磨损过程中,表面膜层被磨掉形成磨屑,而内部 Mg₂Si 则裸露出来,起到保护软质相的作用,故出现如图 3b 所示的磨痕形貌。

在图 3c 和图 3d 中,磨痕表面比较光滑,磨痕细小整齐,基本不存在磨屑,说明 Al 含量较低时,涂

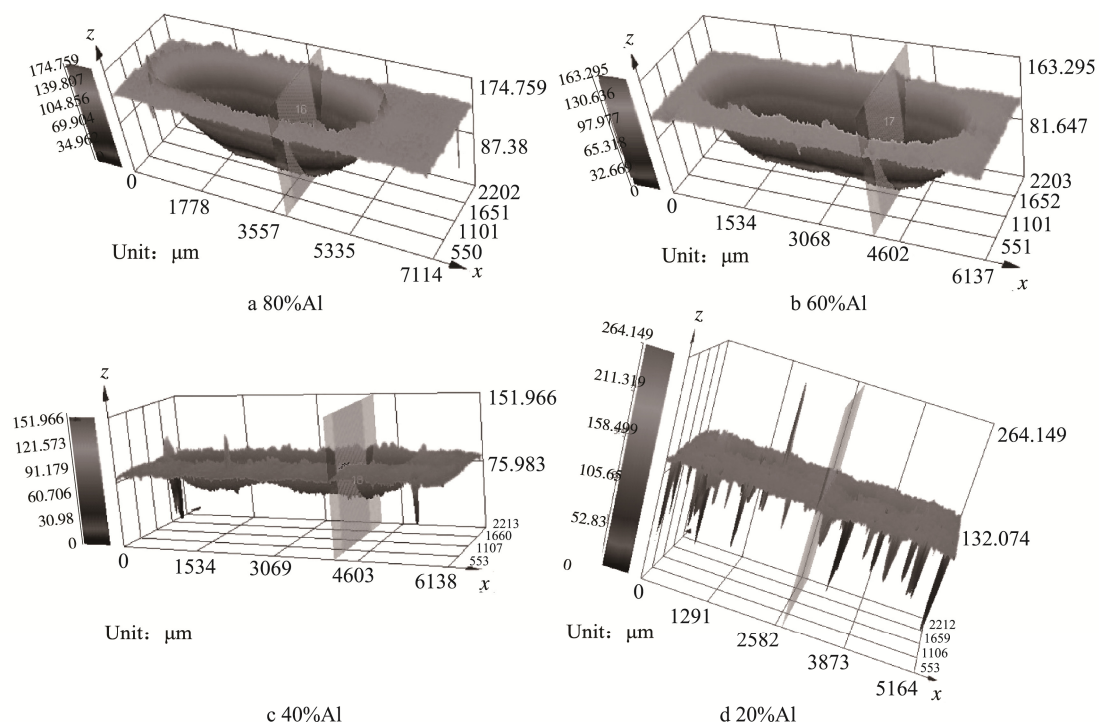
层的耐摩擦磨损性能较好。观察图 3c 发现,磨痕表面除了存在细小的犁沟外,还有少量的黑色块体嵌入到涂层内部,而图 3d 所示的磨痕表面则相对比较平整,划痕更细且浅。这是由于在摩擦过程中,被磨掉的硬质颗粒一部分随着摩擦副运动,使磨损加剧;一部分被反复碾压嵌入到涂层较软的地方,从而在一定程度上提高了涂层的耐摩擦性能。Mg₂Si 属于硬质相,硬度高、脆性大,其含量越高的涂层耐磨性能也就越好,但脆性大的材料在切应力的反复作用下易发生脆断,就会形成图 3d 中所示的断口。综合考虑,Al 含量越少,涂层的耐摩擦磨损性能越好。

用超景深三维显微镜测绘磨痕,得到 4 种涂层的磨痕最深处截面轮廓曲线见图 4,磨损体积等具体数值如表 2 所示。由图 4 可知,磨痕呈现出不规则的橄榄球形状,且随着 Al 含量的减少,磨损体积逐渐减少,但涂层中孔隙数量逐渐增加。由表 2 可知,涂层磨损体积数值按 Al 含量从高到低依次为 5.58×10^8 、 4.21×10^8 、 1.12×10^8 和 $1.77 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ 。Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的磨损体积最大,Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的磨损体积最小,前者磨损体积是后者的 5 倍。

表 2 涂层磨痕参数

Tab.2 The parameters of coating abrasion mark

Sample	Al(80%)-Mg ₂ Si	Al(60%)-Mg ₂ Si	Al(40%)-Mg ₂ Si	Al(20%)-Mg ₂ Si
The wear volume/ μm^3	5.58×10^8	4.21×10^8	1.12×10^8	1.77×10^7
The wear depth/ μm	98.254	61.772	40.66	33.083
The wear width/ μm	1294.964	1295.578	1301.718	586.666

图 4 不同 Al 含量的 Al-Mg₂Si 复合涂层的三维轮廓图Fig.4 3D-morphologies of Al-Mg₂Si composite coating with different Al content

为了更加直观地比较 4 种涂层的磨损情况,分别绘制磨痕最深处横截面轮廓,如图 5 所示(数据参数见表 2)。由图 5 可知,随着 Al 含量的降低,涂层磨痕深度逐渐减小,磨痕宽度逐渐变窄,其中 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的磨痕曲线最高且窄,曲线比较光滑,说明 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层具有较好的耐摩擦性能。相比而言,Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的磨痕曲线最深且宽,曲线内部有较大的锯齿状凹陷,这与磨痕表面存在深且宽的犁沟相对应,说明 Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层磨损得较为严重。结合表 2 知,涂层中 Al 含量为 20%时,涂层磨痕深度为 33.083 μm ,宽度为 586.666 μm ; Al 含量为 80%时,磨痕深度为 98.254 μm ,宽度为 1294.964 μm ,其深度和宽度分别是 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的 3 倍和 2 倍。再次验证了 Al 含量越低,Al-Mg₂Si 复合涂层的抗摩擦磨损性能越好这一结论。

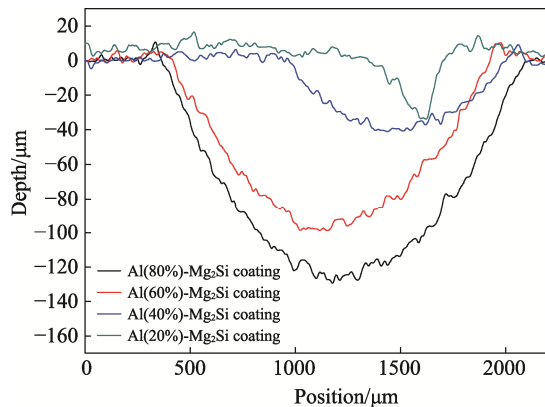


图 5 磨痕的截面轮廓

Fig.5 Sectional profile of wear track on coating

2.2.3 磨损率计算

磨损量化精度直接关系到磨损的可靠性测量,应用最多的磨损量化方法为失重法和体积磨损法^[19]。由于试样失重很小,低于天平分辨率,量化误差较大,而通过超景深三维显微镜可以比较准确地测量出磨痕体积,故本文主要采用体积磨损法对磨损进行量化。根据阿查德方程^[20,21] $K \approx \frac{V}{SP}$ ($b \ll R$ (b 为磨痕直径, R 为对磨球半径) 时,式中 K 为磨损率, P 为法向载荷, S 为滑动距离, V 为磨痕体积) 计算出磨损率并绘制柱状图,如图 6 所示。

由图 6 可知,在相同摩擦环境下,随着 Al 含量的减少,复合涂层的体积磨损率逐渐降低。在 4 种涂层中,Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的体积磨损率最高,达到 $78.04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$,而 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的最小,为 $2.48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 。比较而言,Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的体积磨损率是 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层体积磨损率的 36 倍,说明 4 种涂层

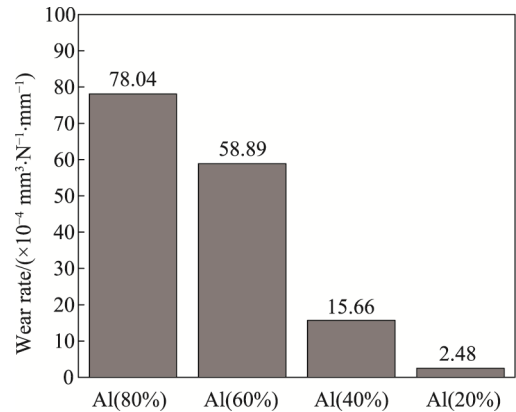


图 6 试样磨损率

Fig.6 Wear rates of all samples

中,Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层抗磨损性能最佳。

3 结论

1) Al-Mg₂Si 涂层的耐腐蚀性明显高于 AZ31B 镁合金,并且 Al 含量越少,涂层的耐腐蚀性能越好。与 AZ31B 镁合金基体相比,Al-Mg₂Si 复合涂层的自腐蚀电位整体正移,自腐蚀电流密度均减小。其中 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的自腐蚀电位正移得最多,从镁合金的 -1.4888 V 正移到 -0.9600 V ,正移了 0.5288 V ;自腐蚀电流密度也从镁合金基体的 $2.817 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 降低到 $3.298 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,降低了 3 个数量级。4 种涂层相比,Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的电位最正,Al(40%)-Mg₂Si 次之,两者电位相差 0.0263 V ;Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的自腐蚀电位最负,为 -1.1833 V 。综合来看,Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的耐腐蚀性最好。

2) Al 含量越少,Al-Mg₂Si 复合涂层的耐磨损性能越好。随着 Al 含量的减少,复合涂层的摩擦系数逐渐降低。Al(80%)-Mg₂Si 涂层的摩擦系数最高,为 0.8;Al(20%)-Mg₂Si 涂层的摩擦系数最低,为 0.25,比含 Al20%的涂层低 0.55。磨痕体积磨损率也随 Al 含量的减少逐渐降低,Al(80%)-Mg₂Si 复合涂层的体积磨损率是 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层体积磨损率的 36 倍,其值分别为 $78.04 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 和 $2.48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$,故降低 Al-Mg₂Si 复合涂层中 Al 的含量可以改善其抗摩擦磨损性能。4 种涂层中 Al(20%)-Mg₂Si 复合涂层的耐磨损性能最佳。

参考文献:

- [1] 廖仲尼. 原位自生 Mg₂Si/Al 复合材料组织及力学性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
LIAO Zhong-ni. Study on Microstructures and Properties of In Situ Mg₂Si/Al Composites[D]. Lanzhou:

- Lanzhou University of Technology, 2014.
- [2] 任波. 原位合成 Mg_2Si/Al 复合材料微观组织及力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
REN Bo. Study on Microstructure and Properties of In Situ Mg_2Si/Al Composites[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.
- [3] 李英民, 于跃, 任玉燕. Mg_2Si 金属间化合物研究概述[J]. 铸造工程, 2009, 33(3): 27-31.
LI Ying-min, YU Yue, REN Yu-yan. Summarization of Research on Intermetallic Compound Mg_2Si [J]. Foundry Engineering, 2009, 33(3): 27-31.
- [4] 李延荣. 金属间化合物 Mg_2Si 基合金的制备与性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2015.
LI Yan-rong. Research on Preparation and Properties of Intermetallic Compound Mg_2Si -based Alloys[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015.
- [5] TANG Shou-qiu, ZHOU Ji-xue, TIAN Chang-wen, et al. Morphology Modification of Mg_2Si by Sr Addition in Mg-4%Si Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(9): 1932-1936.
- [6] 任玉燕. 原位 Mg_2Si/Al 复合材料强韧化及其机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
REN Yu-yan. Study on Strengthening and Toughening Mechanisms of In-situ Mg_2Si/Al Composite[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [7] 白光珠. 复合处理对原位自生 Mg_2Si/Al 基复合材料凝固组织及性能的影响[D]. 南昌: 江西理工大学, 2016.
BAI Guang-zhu. Effect of Composite Processing on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Mg_2Si/Al Composites[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [8] 秦庆东. Mg_2Si/Al 复合材料组织与性能的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
QIN Qing-dong. Study on Microstructures and Properties of Mg_2Si/Al Composites[D]. Jilin: Jilin University, 2008.
- [9] 周琦, 臧树俊, 马勤, 等. 新型 Al/Mg_2Si 复合材料的制备与性能[J]. 有色金属, 2007, 59(2): 6-13.
ZHOU Qi, ZANG Shu-jun, MA Qin, et al. Research on Electroplastic Drawing of Mg-alloy Wire[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(2): 6-13.
- [10] 付宇. Mg_2Si/Al 梯度复合材料的制备及其显微组织和耐磨性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010.
FU Yu. Research on Microstructure and Friction Performance of Mg_2Si/Al Gradient Composite Materials by Centrifugal Casting[D]. Jilin: Jilin University, 2010.
- [11] YAMAGUCHI T, SERIKAWA T, HENMI M, et al. Mg_2Si Coating Technology on Magnesium Alloys to Improve Corrosion and Wear Resistance[J]. Materials Transactions, 2006, 47(4): 1026-1030.
- [12] 纪振鹏, 周书才, 艾文杰, 等. Mg_2Si 金属间化合物微波固相合成研究[J]. 粉末冶金技术, 2011, 29(3): 206-209.
JI Zhen-peng, ZHOU Shu-cai, AI Wen-jie, et al. Microwave Direct Synthesis of Mg_2Si Intermetallic Compound by Solid State Phase Reaction[J]. Powder Metallurgy Technology, 2011, 29(3): 206-209.
- [13] 范春, 龙威, 周小平. Al 含量对 $Al-Mg_2Si$ 复合涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(8): 914-918.
FAN Chun, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping. Influence of Al Content on Microstructure and Corrosion Resistance of $Al-Mg_2Si$ Composite Coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(8): 914-918.
- [14] LI C J, OHMORI A. Relationships between the Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Deposits[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2002, 11(3): 365-374.
- [15] 侯岩枫, 许立坤, 沈承金, 等. 封孔处理等离子喷涂 Cr_2O_3 涂层耐蚀性的电化学表征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 32(6): 473-477.
HOU Yan-feng, XU Li-kun, SHEN Cheng-jin, et al. Electrochemical Characterization for Corrosion Resistance of Plasma-sprayed Cr_2O_3 Coating with Sealing[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 32(6): 473-477.
- [16] 王凤平, 康万利, 敬和民, 等. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 38-68.
WANG Feng-ping, KANG Wan-li, JING He-min, et al. Principles, Method and Application of Electrochemistry of Corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 38-68.
- [17] 王丹, 龙威, 周小平. AZ31B 镁合金 $Al-AlB_{12}-Al_2O_3$ 涂层的耐蚀和耐磨性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 148-153.
WANG Dan, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping. Corrosion and Wear Resistance of $Al-AlB_{12}-Al_2O_3$ Coating on AZ31B Magnesium Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(3): 148-153.
- [18] 刘晓波. Mg_2Si/Al 复合材料的组织、性能及其摩擦磨损行为的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
LIU Xiao-bo. Study on Microstructures, Mechanical Properties and Wear Behaviors of Mg_2Si/Al Composites[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- [19] 陈平, 陈华辉, 李国华, 等. 微磨损性能测试方法的研究与发展[J]. 金属热处理, 2007, 32(11): 69-73.
CHEN Ping, CHEN Hua-hui, LI Guo-hua, et al. Development of Measuring Technique for Micro-scale Wear Performance[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(11): 69-73.
- [20] 陈平, 陈华辉, 李文博. 软材料的微磨损测试研究 (I)——磨痕测量与磨损率计算[J]. 金属热处理, 2009, 34(8): 94-98.
CHEN Ping, CHEN Hua-hui, LI Wen-bo. Micro-wear Test of Soft Materials (I)—Wear Scar Measurement and Wear Rate Calculation[J]. Treatment of Metals, 2009, 34(8): 94-98.
- [21] 陈平, 陈华辉, 李国华. 软材料的微磨损测试研究 (II)——有脊磨痕的形成及其影响因素[J]. 金属热处理, 2009, 34(11): 96-100.
CHEN Ping, CHEN Hua-hui, LI Guo-hua. Micro-wear Test of Soft Materials (II)—Ridge Formation and Influencing Factors[J]. 2009, 34(11): 96-100.