

Al-Mg₂Si 复合涂层在 3.5%NaCl 水溶液中的腐蚀 磨损性能研究

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** 研究 Al-Mg₂Si 复合涂层在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀-磨损性能。**方法** 用电化学工作站(CHI660 E)、腐蚀-磨损试验机测试试样的电化学行为及实时监测在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位、摩擦系数和干摩擦性能,并采用扫描电镜(SEM)、超景深三维显微镜对磨痕特征进行表征。**结果** 镁合金自腐蚀电位为-1.4888 V, 腐蚀电流密度为 $2.817 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 。与镁合金基体相比, Al-Mg₂Si 复合涂层的自腐蚀电位正移了 0.5288 V, 腐蚀电流密度降低了 3 个数量级。腐蚀磨损过程中, Al-Mg₂Si 复合涂层的开路电位(OCP)为-0.9202 V, 比镁合金基体高 0.5713 V。干摩擦过程中, 复合涂层的稳定摩擦系数为 0.28, 比镁合金低 0.07。复合涂层干、湿磨损率相差 $44.72 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 其值是镁合金基体干、湿磨损率相差值的 0.52 倍, 且均远远大于各自纯机械磨损率。**结论** 在腐蚀磨损过程中, 腐蚀是造成磨蚀损失的主要原因, 且 Al-Mg₂Si 复合涂层的耐磨蚀性能优于镁合金基体。

关键词: AZ31B 镁合金; Al-Mg₂Si 复合涂层; 腐蚀磨损; 干摩擦; 摩擦系数

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0260-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.038

Corrosion Wear Properties of Al-Mg₂Si Composite Coatings in 3.5wt.% NaCl Solution

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 work aims to study corrosive wear properties of Al-Mg₂Si composite coating in 3.5 wt.% NaCl solution. Electrochemical behavior of the samples was tested, and open circuit potential, friction coefficient and dry friction of the samples in 3.5%NaCl solution were monitored in real time with electrochemical workstation (CHI660 E) and corrosive wear tester. Characteristics of grinding cracks were characterized with scanning electron microscope (SEM) and ultra-depth three-dimensional microscope. Self-corrosion potential of magnesium alloy was -1.4888 V, and corrosion current density was $2.817 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$. Compared with the substrate magnesium alloy, self-corrosion potential of the Al-Mg₂Si composite coating shifted posi-

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2017-11-29

Received: 2017-10-17; Revised: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助(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.

tively by 0.5288 V, and corrosion current density of the composite coating decreased by 3 orders of magnitude. During the process of corrosive wear, open circuit potential (OCP) of the Al-Mg₂Si composite coating was -0.9202 V, 0.5713 V higher than that of the substrate magnesium alloy. During the process of dry friction, stability friction coefficient of the coating was 0.28, 0.07 lower than that of the magnesium alloy. Difference between dry and wet wear rate of the Al-Mg₂Si composite coating was $44.72 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 0.52 times as large as that of AZ31B magnesium alloy, and was far greater than corresponding pure mechanical wear rate. Corrosion is the main cause of abrasion loss during corrosive wear process, and the Al-Mg₂Si composite coating exhibits better corrosive wear properties than magnesium alloy.

KEY WORDS: AZ31B magnesium alloy; Al-Mg₂Si composite coating; corrosive wear; dry friction; friction coefficient

腐蚀磨损是指金属材料在承受摩擦力的同时还与周围环境发生化学或电化学反应的现象^[1]。它与力学、化学、材料、环境条件等多种因素相关,腐蚀的存在使材料摩擦学性能研究变得更加复杂^[2-4]。国内外学者对材料在腐蚀环境中的摩擦行为进行了大量研究。刘孟奇等人^[5]研究了海水环境下 CrN/CrAlSiN 涂层的摩擦学性能,指出 CrN/CrAlSiN 涂层在海水环境下的摩擦学性能优于干摩擦条件下。孙磊等人^[6]定量分析了 NiCrSiMo 激光熔覆层的腐蚀磨损交互作用,总结出腐蚀交互作用是导致材料损失的主要原因。高溥等人^[7]通过对氮化物基和碳基涂层的摩擦-腐蚀交互行为研究,深入探讨了摩擦-腐蚀的交互机制,提出粗大的晶体结构会减弱涂层的抗磨蚀性能。Code 等人^[8]研究 CrN 涂层在 NaCl 溶液中的磨蚀行为,得出致密的 CrN 涂层具有良好的抗磨蚀性能。多数情况下,腐蚀的存在会加速磨损,而磨损又会促进腐蚀,加速材料破坏^[9]。因此制备出抗磨蚀性能的材料具有非常深远的意义。

作者前期在 AZ31B 镁合金基体上制备出 Al-Mg₂Si 复合涂层,并分析了涂层的组织结构、物相组成、耐蚀性能和显微硬度,研究结果表明 Al-Mg₂Si 复合涂层的耐蚀性能和显微硬度均优于镁合金基体^[10]。本文通过涂层的极化曲线及实时监测摩擦试验前后涂层的开路电位 (OCP)、摩擦系数、腐蚀磨损磨痕特征、干摩擦磨损特性,研究 Al-Mg₂Si 复合涂层的抗磨蚀性能,探讨其在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀-磨损交互作用。

1 实验材料和方法

1.1 试验设备及工艺参数

在国产 MFT-EC 4000 电化学腐蚀-摩擦试验机上进行腐蚀磨损试验。采用球-盘往复滑动模式,图 1^[11]为试验机原理示意图。试验中所用的电解质为 3.5%NaCl 溶液,摩擦对副为 $\phi 6 \text{ mm}$ 的 Al₂O₃ 磨球。

工作过程为: Al₂O₃ 磨球固定在圆柱销 (材质为有机物) 上,试样固定在磨盘上并随磨盘往复运动,

始终使试样上表面浸泡在 3.5%NaCl 溶液中,其余部位用环氧树脂密封。实验过程中,试样为工作电极,石墨为辅助电极,饱和 KCl 溶液为参比电极。试验参数设定:载荷为 14.3 N,频率为 1 Hz,行驶距离为 5 mm,温度为室温。磨蚀试验前先将试样在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 min,使其腐蚀电位达到稳定值。然后在 3.5%NaCl 溶液中进行滑动摩擦测试,持续时间为 15 min。测试完后去掉砝码,空载静置 10 min。

在同一台试验机上测试干摩擦性能,把磨盘换成干摩擦磨盘,摩擦持续时间为 15 min,其余参数不变。

采用 SU8010 型扫描电镜 (SEM) 对磨痕表面形貌进行表征。利用 CHI660 E 电化学工作站测试封孔后试样的电化学性能 (扫描速度为 0.005 V/s,灵敏度为自动灵敏度),采用标准三电极体系,面积为 1 cm² 的 Pt 电极为辅助电极,甘汞电极为参比电极,试样为工作电极,试样有效工作面积为 1 cm²,溶液为 3.5%NaCl 溶液。测试后在 CHI660 E 软件中拟合极化曲线,求出试样的自腐蚀电位 E_{corr} 和自腐蚀电流密度 J_{corr} 。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。

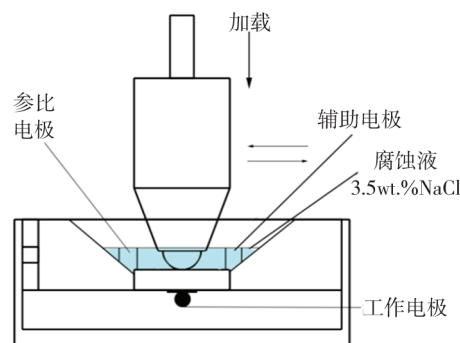


图 1 腐蚀磨损试验机示意图
Fig.1 Schematic diagram of corrosive wear tester

1.2 试样处理

基体材料为 25 mm×25 mm×7 mm AZ31B 镁合金。采用氧气-乙炔火焰喷涂设备制备 Al-Mg₂Si 复合涂层,具体制备过程详见参考文献[10]。

2 结果与分析

2.1 极化曲线测试

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。封孔试样在 3.5%NaCl 溶液中所测得的塔菲尔极化曲线如图 2 所示,试样的腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 如表 1 所示。从图 2 可以看出:与镁合金基体相比,复合涂层的极化曲线向右下角方向偏移,存在钝化区间。结合表 1 可知,镁合金基体的腐蚀电位为 -1.4888 V ,复合材料的腐蚀电位为 -0.9600 V ,较镁合金基体正移了 0.5288 V 。基体试样的腐蚀电流密度为 $2.817 \times 10^{-3}\text{ A/cm}^2$,复合涂层材料的腐蚀电流密度为 $3.298 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$,与镁合金相比,复合涂层的自腐蚀电流密度降低了 3 个数量级。材料的腐蚀电位越正,腐蚀电流密度越小,材料的耐腐蚀性能越好^[12-13]。可以得出复合涂层材料的耐腐蚀性远远优于 AZ31B 镁合金基体。

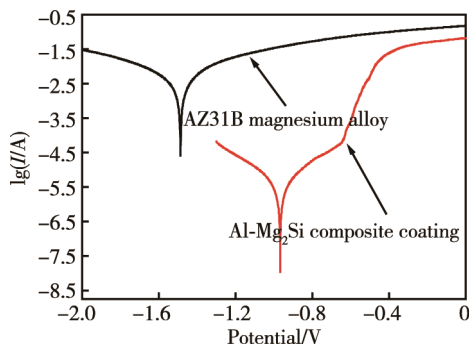


图 2 Al-Mg₂Si 涂层与镁合金的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of Al-Mg₂Si coating and AZ31B magnesium alloy

表 1 试样的腐蚀电位和腐蚀电流
Tab.1 Corrosion potential and corrosion current of samples

Samples	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	b_c	b_a
AZ31B magnesium alloy	-1.4888	2.817×10^{-3}	-4.371	5.073
Al-Mg ₂ Si composite coating	-0.9600	3.298×10^{-6}	-5.324	5.625

2.2 腐蚀-摩擦性能测试

图 3 为涂层材料和镁合金基体在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位 (OCP) 曲线。每个试样的 OCP 曲线都分为三个时间段: t_1 为空载浸泡阶段,使试样表面开路电位达到稳定值; t_2 为磨蚀阶段; t_3 为卸载阶段。

在 t_1 时间段未加载荷,试样处于稳态腐蚀阶段,表面会形成一层钝化膜或保护层。随着时间的推移,试样的稳态开路电极电位 (OCP) 均达到稳定值,说明试样表面均达到局部电化学动态平衡状态。其中

Al-Mg₂Si 复合涂层的稳态开路电极电位 (OCP) 值为 -0.7706 V ,镁合金基体的稳态开路电极电位 (OCP) 值为 -1.4915 V ,远远低于 Al-Mg₂Si 复合涂层,两者相差 0.7209 V 。根据文献[10]可知, $\Delta G_{(\text{AZ31B 镁合金})} = -618.4\text{ kJ/mol}$, $\Delta G_{(\text{涂层})} = -336.533\text{ kJ/mol}$, $\Delta G_{(T,P)}$ 值越负表示金属越不稳定,越容易发生腐蚀,故开始阶段复合涂层的开路电位高于 AZ31B 镁合金基体。

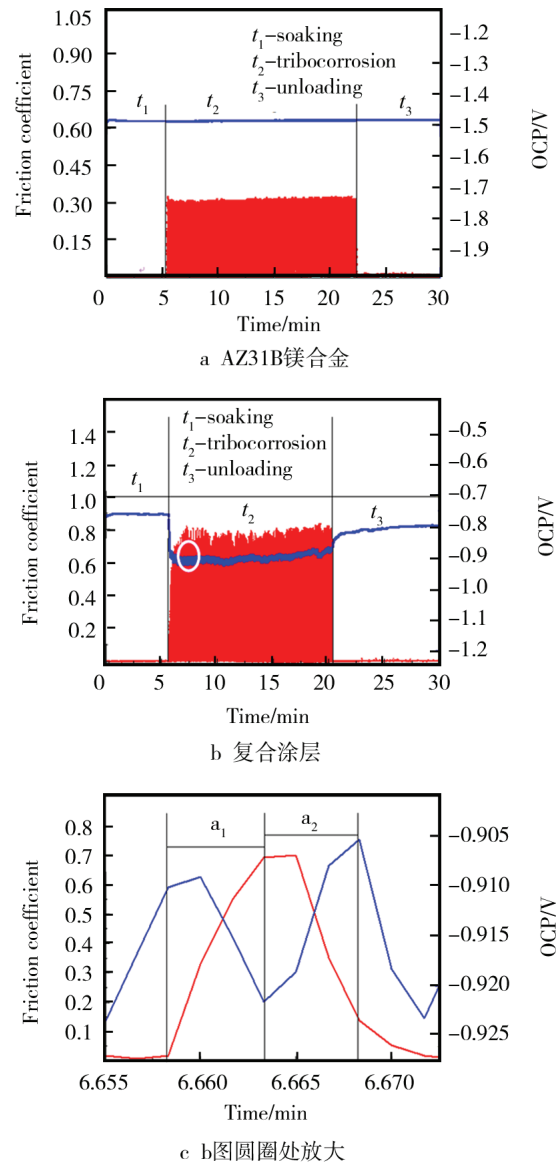


图 3 试样在摩擦-腐蚀中的开路电位变化
Fig.3 OCP Variation of all samples during corrosive wear: a) AZ31B magnesium alloy, b) composite coating, c) partial enlarged detail

在磨蚀阶段 (t_2 阶段),如图 3a 所示,镁合金基体的摩擦系数突然增大而开路电位 (OCP) 没有发生变化,摩擦系数稳定在 0.30,开路电位为 -1.4915 V 。因为镁合金基体的腐蚀产物 $\text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 致密性较差,故镁合金基体在整个腐蚀摩擦磨损过程中不具有自

我保护作用, 始终处于腐蚀-磨损单向促进状态。在磨蚀开始阶段, Al-Mg₂Si 复合涂层材料的摩擦系数迅速上升并在磨蚀后期达到稳定, 稳定时摩擦系数为 0.757。此外开路电位急剧下降, 下降了 0.1496 V, 如图 3b 所示。涂层中存在 Al 单质, 空载浸泡过程中, 涂层表面会形成一层 Al₂O₃ 钝化膜或保护层, 使涂层在 t_1 阶段表现出较高的开路电位。腐蚀摩擦开始后, 在加载力的作用下, 球和涂层表面的接触面会产生一个切应力。腐蚀产物在切应力的作用下易从涂层表面剥离而被流体带走, 裸露出新鲜的金属表面, 使涂层腐蚀加剧, 故 OCP 值急剧下降^[14]。此外由于摩擦副由球面点接触转变为球沟槽的面接触, 导致摩擦面增大, 也会加剧涂层腐蚀。在磨蚀过程中, 电位的变化实际上是涂层保护层破坏-修复的动态过程。在一次摩擦过程中, 如图 3b 中的局部放大图 3c, 摩擦刚开始时, 保护层被破坏速度大于涂层自我修复速度, 电位不断下降, 摩擦系数不断增加, 如 a_1 阶段所示。当涂层保护层的破坏速度等于涂层自我修复速度时, 两者达到动态平衡, 此时摩擦系数达到最大值。随着摩擦时间的推移, 涂层的自我修复速度大于保护膜的破坏速度, 电位会逐渐上升, 摩擦系数逐渐下降, 如 a_2 阶段。在稳定磨蚀阶段, 宏观电位趋于稳定。

在卸载阶段 (t_3 阶段), 摩擦副之间脱离, 滑动摩擦停止, 磨痕内的涂层会再次钝化, 复合涂层的 OCP 值会迅速上升并基本回到最初的稳定状态。这表明 Al-Mg₂Si 复合涂层在 3.5%NaCl 溶液中没有发生严重的腐蚀磨损, 并且涂层结构也没有遭到破坏, 表现出良好的耐腐蚀磨损性能。而镁合金的电位还处于不变状态, 没有表现出自我修复能力。

2.3 干摩擦磨损性能测试

图 4 为在干摩擦条件下试样与 Al₂O₃ 磨球对磨的摩擦行为测试结果。由图 4 可知, 复合涂层的摩擦系数变化区间比较小, 稳定在 0.28 左右。而 AZ31B 镁合金基体的摩擦系数变化区间比较大, 其值稳定在 0.35 左右, 并且基体材料的摩擦系数高于复合涂层,

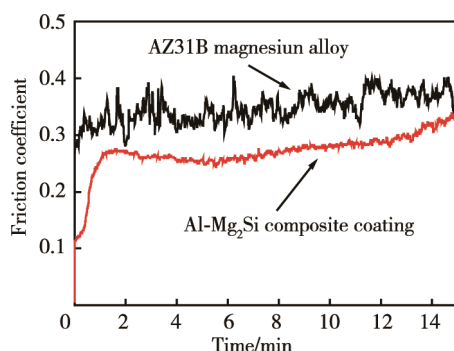


图 4 摩擦系数随时间的变化

Fig.4 Variations of friction coefficient as a function of time

两者相差 0.07。材料的摩擦系数不是一个定值, 与材料、试样加工精度、工作环境等方面都密切相关^[15]。在干摩擦过程中, 磨屑处于剥落-碾碎的重复过程, 刚剥落的磨屑尺寸较大, 粘附在摩擦副之间加速材料磨损, 摩擦系数较大。随着磨损的进行, 磨屑尺寸减小, 具有一定的减磨作用^[16], 摩擦系数会减小, 故所测得的摩擦系数在一定范围内变化。镁合金的韧性好、硬度低, 在摩擦过程中发生塑变磨损, 磨屑剥落较多, 故摩擦系数较高, 波动区间较大。

2.4 干、湿磨痕分析

图 5 为磨痕表面 SEM 形态, 可以看出, 相对于干摩擦磨痕, 腐蚀磨痕剥落比较严重, 表面存在大量的腐蚀产物, 说明腐蚀-磨损相互促进作用比较明显。比较图 5a 和 5c 发现, 镁合金磨痕表面存在大量大尺寸尖锐磨屑, 磨痕犁沟深且宽, 边沿存在撕裂现象(如图 5a 白框所示), 为典型的粘着磨损形貌。在切应力作用下, 粘着点处发生剪切作用使金属剥落形成磨屑。剪切掉的磨屑分布在金属摩擦副之间会产生磨粒磨损, 导致金属发生塑性变形而产生犁沟, 加速试样磨损。与镁合金磨痕表面不同, Al-Mg₂Si 涂层磨痕表面没有大块磨屑出现, 但局部区域出现薄层剥落现象, 这主要是由于热喷涂过程中形成的界面微缺陷所致, 影响不大。文献^[17]表明, 在摩擦参数一致的情况下, 材料本身的硬度越高, 耐磨性越好。Al-Mg₂Si 涂层的显微硬度明显高于镁合金基体, 具体数据见文献^[10], 磨痕表面犁沟较细且浅, 说明复合涂层的耐磨性优于镁合金基体。

比较图 5b 和 5d 发现, 镁合金磨痕表面的腐蚀产物呈条状分布在犁沟处, 并且局部存在剥落坑和裂纹。这说明湿摩擦过程中, 金属发生塑性变形并粘附在磨球表面, 在切应力作用下, 粘附金属被撕裂形成磨屑和翘起的撕裂边, 部分磨屑会被溶液冲走, 但仍有少量的磨屑被溶液腐蚀形成腐蚀小颗粒, 并粘附在摩擦副之间加剧涂层磨损, 撕裂边沿被腐蚀产生局部裂纹, 如图 5b 放大图所示, 表明腐蚀环境下镁合金发生严重的腐蚀降解。与镁合金基体相比, 复合涂层的磨痕表面相对较光滑, 剥落坑数量相对较少, 没有大块撕裂现象出现, 磨损机理主要为磨粒磨损。从磨痕形貌可知, 复合涂层的耐磨性能优于镁合金基体。

图 6 为试样磨痕三维轮廓, 可知 AZ31B 镁合金的磨痕较深且宽, 磨痕边缘有少量的粘着凸起, 说明在磨蚀过程中发生了塑性变形。而 Al-Mg₂Si 复合涂层的磨痕较浅且窄, 涂层中存在较多的孔洞。为了更直观地比较两种试样的磨损情况, 绘制磨痕最深处的横截面轮廓, 如图 7 所示, 数据参数如表 2 所示。由图 7 可知, 复合涂层的磨痕深度和宽度均小于镁合金

基体,说明复合涂层的抗磨蚀性能优于镁合金。由表 2 可知, AZ31B 镁合金的干、湿磨痕参数变化为:宽度增加了 $1068.28\ \mu\text{m}$, 深度加深了 $80.144\ \mu\text{m}$, 磨痕体积增大了 $6.15 \times 10^8\ \mu\text{m}^3$ 。Al-Mg₂Si 复合涂层的磨痕

参数变化为:宽度增加了 $1001.27\ \mu\text{m}$, 深度加深了 $73.339\ \mu\text{m}$, 磨痕体积增大了 $3.373 \times 10^8\ \mu\text{m}^3$ 。比较发现, Al-Mg₂Si 复合涂层的湿摩擦磨痕参数变化幅度小于 AZ31B 镁合金基体。

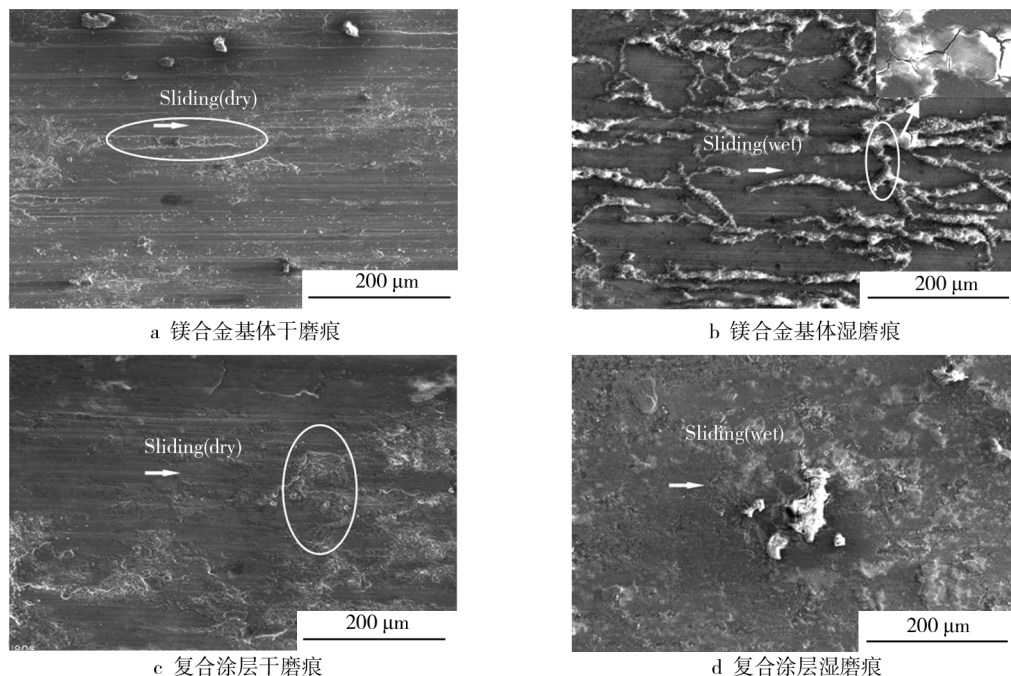


图 5 试样磨痕形貌

Fig.5 Morphology of grinding cracks on all samples: (a) AZ31B magnesium alloy (dry), (b) AZ31B magnesium alloy (wet), (c) Al-Mg₂Si composite coating (dry), (d) Al-Mg₂Si composite coating (wet)

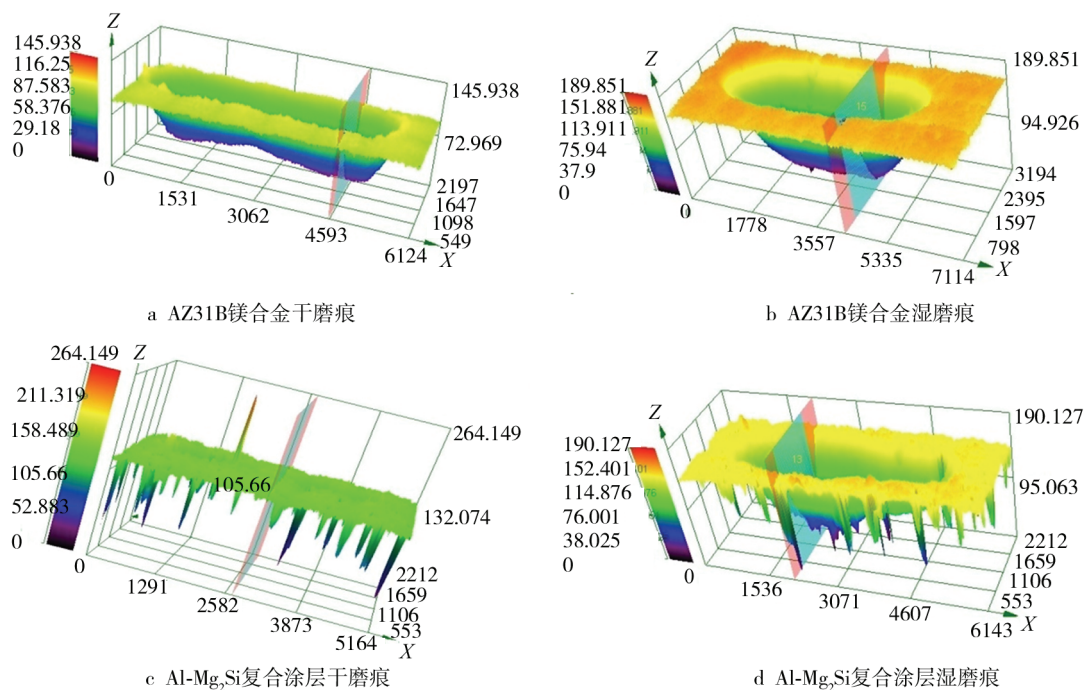


图 6 试样磨损后的三维轮廓

Fig.6 3D profile of all worn samples: (a) AZ31B magnesium alloy (dry), (b) AZ31B magnesium alloy (wet), (c) Al-Mg₂Si composite coating (dry), (d) Al-Mg₂Si composite coating (wet)

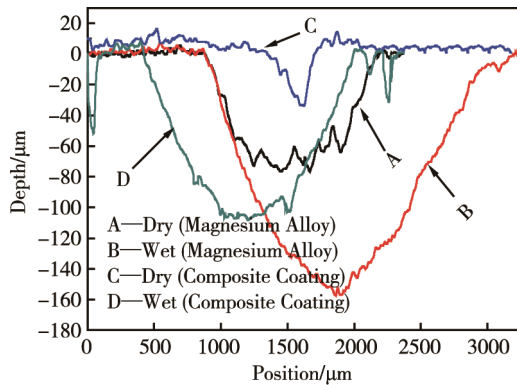


图 7 磨痕的截面轮廓

Fig.7 Sectional profile of grinding cracks

表 2 涂层磨痕参数

Tab.2 Parameters of coating grinding cracks

Samples	AZ31B magnesium alloy		Al-Mg ₂ Si composite coating	
	Dry	Wet	Dry	Wet
The wear volume/ μm^3	1.48×10^8	7.63×10^8	1.772×10^7	3.55×10^8
The wear depth/ μm	77.211	157.355	33.083	106.422
The wear width/ μm	1284.68	2352.96	586.66	1587.93

2.5 腐蚀-磨损交互作用

根据阿查德方程计算出磨损率并绘制柱状图,如图 8 所示。阿查德方程为^[18-20]:

$$K \approx V/(s \cdot p) \quad (b \ll R) \quad (1)$$

式中: K 为磨损率; p 为法向载荷; s 为滑动距离; b 为磨痕直径; R 为对磨球半径; V 为磨痕体积。由图 8 可知,湿摩擦的体积磨损率远远高于干摩擦,比较发现 Al-Mg₂Si 复合涂层的干、湿磨损率相差 $4.472 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$,而 AZ31B 镁合金基体的干、湿磨损率相差 $8.60 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$,是复合涂层磨损率变化的 2 倍。两种试样的干、湿磨损率差值均大于单一机械磨损,说明在磨蚀过程中腐蚀作用大于磨损作用,腐蚀因素是造成磨蚀损失的主要原因,且复合涂层的腐蚀和摩擦之间的促进作用小于 AZ31B 镁合金基体,具有优良的耐磨蚀性能。

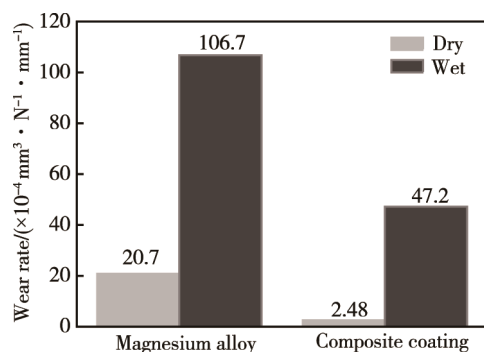


图 8 不同环境下试样体积磨损率

Fig.8 Volume abrasion rate of all samples in different environment

3 结论

1) Al-Mg₂Si 涂层的耐腐蚀性高于 AZ31B 镁合金。与 AZ31B 镁合金基体相比, Al-Mg₂Si 涂层的腐蚀电位从 -1.4888 V 正移到 -0.9600 V, 腐蚀电流密度从 $2.817 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 降低到 $3.298 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 电位正移了 0.5288 V, 腐蚀电流密度降低了 3 个数量级。

2) Al-Mg₂Si 涂层的干摩擦、湿耐磨性高于 AZ31B 镁合金。在磨蚀过程中, Al-Mg₂Si 复合涂层的开路电位高于 AZ31B 镁合金基体, 两者相差 0.5704 V; 镁合金基体和 Al-Mg₂Si 涂层的干摩擦磨损率分别为 $2.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 和 $2.48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 复合涂层的干摩擦体积磨损率仅是镁合金基体的 0.12 倍。此外, 两者的湿摩擦磨损率分别为 $1.067 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 和 $4.72 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 复合涂层的湿摩擦体积磨损率仅是镁合金基体的 0.44 倍, 耐磨蚀性能好。

3) Al-Mg₂Si 涂层在 3.5%NaCl 溶液环境下的腐蚀磨损过程中, 腐蚀起主要促进作用, 腐蚀因素是造成磨蚀损失的主要原因。镁合金干、湿摩擦体积磨损率差值为 $8.6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 单一机械体积磨损率为 $2.07 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 。复合涂层的干、湿摩擦体积磨损率差值为 $4.472 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 单一机械体积磨损率为 $2.48 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 。Al-Mg₂Si 涂层干、湿体积磨损率差值是镁合金的 0.52 倍, 且两种试样的干、湿摩擦体积磨损率差值均大于单一机械磨损率。

参考文献:

- [1] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-7.
JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo, LI Shu. Corrosive Wear of Metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-7.
- [2] 陈君, 李全安, 张清, 等. 海水腐蚀对几种金属材料耐磨性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 166-171.
CHEN Jun, LI Quan-an, ZHANG Qing, et al. Effect of Corrosion on Wear Resistance of Several Metals in Seawater[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(12): 166-171.
- [3] HENRY P, TAKADOUM J, BEROT P. Tribocorrosion of 316L Stainless Steel and TA6V4 Alloy in H₂SO₄ Media[J]. Corrosion Science, 2009, 51(6): 1308-1314.
- [4] DING H, DAI Z, ZHOU F, et al. Sliding Friction and Wear Behavior of TC11 in Aqueous Condition[J]. Wear, 2007, 263(1/6): 117-124.
- [5] 刘孟奇, 郭惠霞, 王永欣, 等. CrN/CrAlSiN 涂层海水环境下的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 63-70.

- LIU Meng-qi, GUO Hui-xia, WANG Yong-xin, et al. Tribological Behaviors of Cr/CrAlSiN Coatings in Seawater[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 63-70.
- [6] 孙磊, 原津萍, 赵军军, 等. NiCrBSiMo 激光熔覆层腐蚀磨损交互作用的定量分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(9): 105-108.
- SUN Lei, YUAN Jin-ping, ZHAO Jun-jun, et al. Quantitative Analysis on Interaction between Corrosion and Wear of NiCrBSiMo Laser Cladded Coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33 (9): 105-108.
- [7] 高溥, 何东青, 郑韶先, 等. 碳基和氮化物基涂层的摩擦-腐蚀交互行为的原位研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(2): 138-146.
- GAO Pu, HE Dong-qing, ZHENG Shao-xian, et al. In-situ Study of Tribocorrosion Behavior of Carbon-based and Nitride-based Coatings[J]. Tribology, 2015, 35(2): 138-146.
- [8] RUDEN A, ESTREPO E R, PALADINES A U, et al. Corrosion Resistance of CrN Thin Films Produced by DC magnetron Sputtering[J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 150-156.
- [9] 陈君, 阎逢元, 王建章. 海水环境下 TC4 钛合金腐蚀磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1): 1-6.
- CHEN Jun, YAN Feng-yuan, WANG Jian-zhang. Corrosion Wear Properties of TC4 Titanium Alloy in Artificial Seawater[J]. Tribology, 2012, 32(1): 1-6.
- [10] 范春, 龙威, 周小平. AZ31B 镁合金表面火焰喷涂 Al-Mg₂Si 涂层的耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2): 113-118.
- FAN Chun, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping. Corrosion Resistance of Al-Mg₂Si Composite Coating on AZ31B Magnesium Alloy by Flame Spraying[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 113-118.
- [11] CHEN Qiang, XIE Zhi-wen, CHEN Tian, et al. Tribocorrosion Failure Mechanism of TiN/SiO_x Duplex Coating Deposited on AISI304 Stainless Steel[J]. Materials, 2016, 9(6): 1-12.
- [12] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 1-47.
- CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 1-47.
- [13] 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.
- [14] 张宝宏, 丛文博, 杨萍. 金属电化学腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 93-97.
- ZHANG Bao-hong, CONG Wen-bo, YANG Ping. Metal Electrochemical Corrosion and Protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 93-97.
- [15] 刘赵森, 逢燕. 不同压力差下微通道尺寸和表面粗糙度对摩擦系数的影响[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 200-205.
- LIU Zhao-miao, PANG Yan. Influences of Size and Roughness of Microchannels on Friction Factors under Different Pressures[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 200-205.
- [16] 李爽, 陈士浩, 何西娟, 等. 两种热作模具钢高温耐磨性对比研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(1): 59-67.
- LI Shuang, CHEN Shi-hao, HE Xi-juan, et al. A Comparison of Wear Resistance of Two Types Hot-work Die Steels at High Temperature[J]. Tribology, 2017, 37 (1): 59-67.
- [17] 杨君宝, 王超远, 曲家惠, 等. CrNi₃MoVA 钢表面电火花沉积 NiCrAlY 涂层的高速摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2017, 31(1): 51-54.
- YANG Jun-bao, WANG Chao-yuan, QU Jia-hui, et al. High-speed Friction and Wear Performance of NiCrAlY Electrospark Deposited on CrNi₃MoVA Steel [J]. Materials Review, 2017, 31(1): 51-54.
- [18] 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.
- [19] 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. Microwear Test of Soft Materials(I)—Wear Scar Measurement and Wear Rate Calculation[J]. Treatment of Metals, 2009, 34(8): 94-98.
- [20] 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]. Treatment of Metals, 2009, 34 (11): 96-100.