

不同成分 Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层的组织和性能

韩婷婷, 龙威, 周小平

(湖北工业大学 材料与化学工程学院, 武汉 430068)

摘要: **目的** 研究 Mg₃Sb₂ 含量对 Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层组织、耐蚀性和硬度的影响, 对比纯 Al 涂层和添加不同含量 Mg₃Sb₂ 涂层性能的差异。**方法** 采用氧乙炔火焰喷涂技术和自制的 Mg₃Sb₂ 粉末, 在 AZ31B 镁合金表面制备不同成分的 Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层。采用扫描电镜 (SEM) 观察了涂层的微观组织, 利用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析了球磨粉末和涂层的物相组成, 通过电化学工作站 (CHI660e) 对试样在 3.5%NaCl 溶液中进行电化学腐蚀性能测试, 并用显微硬度计测试了涂层的硬度。**结果** 经火焰喷涂之后, 获得了不同成分的 Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层, 涂层中的物相主要为 Al 和 Mg₃Sb₂。当 Mg₃Sb₂ 的质量分数为 40% 和 60% 时, 涂层组织致密, 气孔、裂纹等组织缺陷较少。Tafel 极化曲线测试中, 随着第二相 Mg₃Sb₂ 质量分数的增加, 涂层的腐蚀电位逐渐正移。当质量分数达到 80% 时, 其腐蚀电位为 -0.9819 V, 比纯 Al 涂层正移 417.3 mV, 腐蚀电流密度为 $0.048 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$, 约是纯 Al 涂层的 1/2。显微硬度结果显示随着 Mg₃Sb₂ 含量的增加, 涂层的硬度逐渐提高, 当质量分数达到 80% 时, 涂层的平均硬度达到 334.2HV, 是纯 Al 涂层的 6.79 倍。**结论** Mg₃Sb₂ 的加入可以获得组织较好的涂层, 随着其含量的增加, 涂层的耐蚀性和显微硬度逐渐提高。

关键词: 火焰喷涂; AZ31B 镁合金; Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层; Mg₃Sb₂ 含量; 耐蚀性; 显微硬度

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0013-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.003

Structure and Properties of Al-Mg₃Sb₂ Multi-phase Coatings with Different Composition

HAN Ting-ting, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping

(School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of Mg₃Sb₂ on structure, corrosion resistance and hardness of Al-Mg₃Sb₂ multi-phase coatings, and compare properties differences between pure Al coating and those with different contents of Mg₃Sb₂. The Al-Mg₃Sb₂ multi-phase coatings with different compositions were prepared on the surface of AZ31B magnesium alloy by using oxy acetylene flame spraying and homemade Mg₃Sb₂ powder. Microstructure of the coatings was observed by using SEM; phase composition of ball milling powder and coatings was analyzed by using XRD; electrochemical corrosion performance test was performed to the samples in 3.5% NaCl solution through electrochemical workstation (CHI660e); and hardness of the coatings was tested by microhardness tester. The Al-Mg₃Sb₂ multi-phase coatings with different composition were obtained after

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-06-10

Received: 2017-05-24; Revised: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51171062)

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

作者简介: 韩婷婷 (1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为金属表面工程。

Biography: HAN Ting-ting (1991—), Female, Master graduate student, Research focus: metal surface engineering.

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

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

flame spraying. The coatings had dense structure, and were subject to a few structural defects including pores and cracks when mass fraction of Mg_3Sb_2 was 40% and 60%, respectively. The phases in the coatings were mainly Al and Mg_3Sb_2 . Tafel polarization curve test showed that corrosion potential of the coatings gradually shifted positively with the increase of second phase Mg_3Sb_2 . As the mass fraction of Mg_3Sb_2 reached 80%, the corrosion potential was -0.9819 V , which was 417.3 mV higher than that of pure Al coating, and corrosion current density of the coatings was $0.048 \times 10^{-3}\text{ A/cm}^2$, which was approximately 1/2 of that of the pure Al coating. Microhardness test showed that hardness of the coatings gradually increased with the increase of Mg_3Sb_2 content. When the content of Mg_3Sb_2 was 80%, the average hardness of the coatings reached 334.2HV , which was 6.79 times of that of the pure Al coating. The addition of Mg_3Sb_2 can contribute to better coatings. The corrosion resistance and microhardness of the coatings gradually increase with the increase of Mg_3Sb_2 content.

KEY WORDS: flame spraying; AZ31B magnesium alloy; Al- Mg_3Sb_2 multi-phase coating; Mg_3Sb_2 content; corrosion resistance; microhardness

镁合金具有质轻、比强度高、比刚度高、比弹性模量高、可回收利用的特点,是最具发展潜力的轻金属结构材料。但镁合金的电极电位和硬度都较低,导致其耐腐蚀性和耐磨性较差。为改善镁合金的使用性能,扩大镁合金的使用范围,在镁合金表面制备耐蚀耐磨的涂层,是一条很有发展潜力的工艺途径^[1-2]。

目前,研究者在镁合金表面制备的涂层多为 Al 涂层和 Al-陶瓷复合涂层。Pardo A 等^[3]采用火焰喷涂技术在镁合金表面制备的纯 Al 涂层中存在较多孔隙,经冷压处理后,涂层致密性增加,孔隙率降低,耐蚀性明显提高。王丹等^[4]在 AZ31B 镁合金表面采用火焰喷涂技术制备了纯 Al 涂层,研究发现涂层与基体之间的结合较弱,经热压处理后,缝隙消失,耐蚀性有所提高。李于朋等^[5]在 AZ31 镁合金表面采用等离子喷涂技术制备了纯 Al 涂层,涂层较致密,但表面粗糙,封孔之后的耐蚀性较好。Campo M 等^[6]采用火焰喷涂技术制备了 Al/SiC 复合涂层,孔隙率较高,耐腐蚀性较差,经冷压或热压处理后,涂层致密性提高,耐腐蚀性也有所提高。孟君晟等^[7]采用氩弧熔覆的方法在 AZ31B 表面制备了 10%SiC+Al-Si 合金粉末的复合涂层,研究发现涂层与基体结合良好,耐磨性提高。由上可知,纯 Al 涂层可使镁合金的耐蚀性提高,但其硬度和耐磨性较差;Al-陶瓷复合涂层可使镁合金的耐磨性提高,但制备工艺较复杂。在考虑工艺成本和操作工艺的前提下,如何在镁合金表面制备既可以提高其耐蚀性,又可以提高其硬度和耐磨性的涂层,具有重要的现实意义。

Mg_3Sb_2 作为一种金属间化合物,熔点为 $1245\text{ }^\circ\text{C}$,具有延展性良好、强度高、硬度高的特点^[8],适合作为热喷涂材料,可将其喷涂在镁合金表面以提高表面性能。本文采用氧乙炔火焰喷涂技术,在 AZ31B 镁合金基体表面制备了不同成分的 Al- Mg_3Sb_2 复相涂层,并将其与纯 Al 涂层进行对比,来研究 Mg_3Sb_2 含量对其组织和性能的影响。

1 试验

1.1 试验材料

试验基材为 AZ31B 镁合金,尺寸 $26\text{ mm} \times 26\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 。喷涂材料为自制 Mg_3Sb_2 粉末及商用 Al 粉。

采用行星式球磨机(QM-3SP2)制取 Mg_3Sb_2 粉末, $n(\text{Mg}):n(\text{Sb})=3:2$,球磨机转速为 500 r/min ,球料比为 $15:1$,球磨时间 8 h 。

试验用喷涂材料的配比(质量分数)有以下五种:100%Al、80%Al+20% Mg_3Sb_2 、60%Al+40% Mg_3Sb_2 、40%Al+60% Mg_3Sb_2 、20%Al+80% Mg_3Sb_2 。

Al- Mg_3Sb_2 喷涂材料制备过程:按以上五种配比将 Al 粉和 Mg_3Sb_2 粉混合均匀 $\rightarrow 7\%$ (质量分数)的聚乙烯醇(PVA)造粒 \rightarrow 团聚粉末破碎后过筛 \rightarrow 喷涂用粉末($100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$)。

1.2 涂层制备

涂层制备过程:AZ31B 镁合金基体打磨 \rightarrow 喷砂粗化 \rightarrow 将喷涂用粉末放置在干燥箱中干燥(增加粉体的流动性) \rightarrow 喷涂纯 Al 及 Al- Mg_3Sb_2 复相涂层 \rightarrow 立即冷压处理(载荷 10 MPa ,加载时间 2 min)。

1.3 性能检测

采用 SU8010 型扫描电镜对涂层横截面的微观组织进行观察。采用 D8-FOCUS 型 X 射线衍射仪进行物相分析,扫描角度 $10^\circ \sim 80^\circ$,扫描速率 $2^\circ/\text{min}$ 。采用 CHI660e 电化学工作站进行 Tafel 极化曲线测试,采用 3.5%NaCl 溶液,试样被测面积为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$,测试前先将试样浸泡在 3.5%NaCl 溶液中 1 h ,待开路电位稳定后开始测量极化曲线,扫描区间为 $-2\sim 0\text{ V}$,扫描速率为 0.01 V/s 。采用 THVS-1MDX-AXY 型半自动显微维氏硬度计测试硬度,载荷 0.49 N ,加载时间 20 s ,在涂层区域随机选取 5 个点进行测试。

2 结果及分析

2.1 涂层微观组织

图 1 为五种成分配比的涂层微观组织。图中上部分为涂层，下部分为基体。由图 1a—1d 可以看出，涂层都非常致密，且经冷压处理后涂层与基体的结合程度较好，五种成分配比涂层的平均厚度均可达 0.12 mm 左右。其中，在图 1a、1b 的涂层与基体结合处，基体发生了部分熔化。这是因为在喷涂的过程中，高

熔点的 Mg₃Sb₂ 较少，低熔点的 Al 较多，使得喷涂粒子在与 AZ31B 镁合金表面撞击的过程中发生较多热量传递和能量转换，基材发生部分熔化。图 1c、1d 的涂层较致密，气孔、裂纹等组织缺陷较少，主要是由于涂层中的 Al 含量有所降低，高熔点的 Mg₃Sb₂ 含量相对较多，两者的相互作用使涂层质量较好。而图 1e 的涂层内部存在少量气孔和裂纹，这主要是由于起液相传质作用的 Al 较少，高熔点的 Mg₃Sb₂ 含量为 80%，使喷涂粉末之间的黏着度较小，结合程度较弱，经冷压处理后，喷涂粉末之间产生少量裂纹。

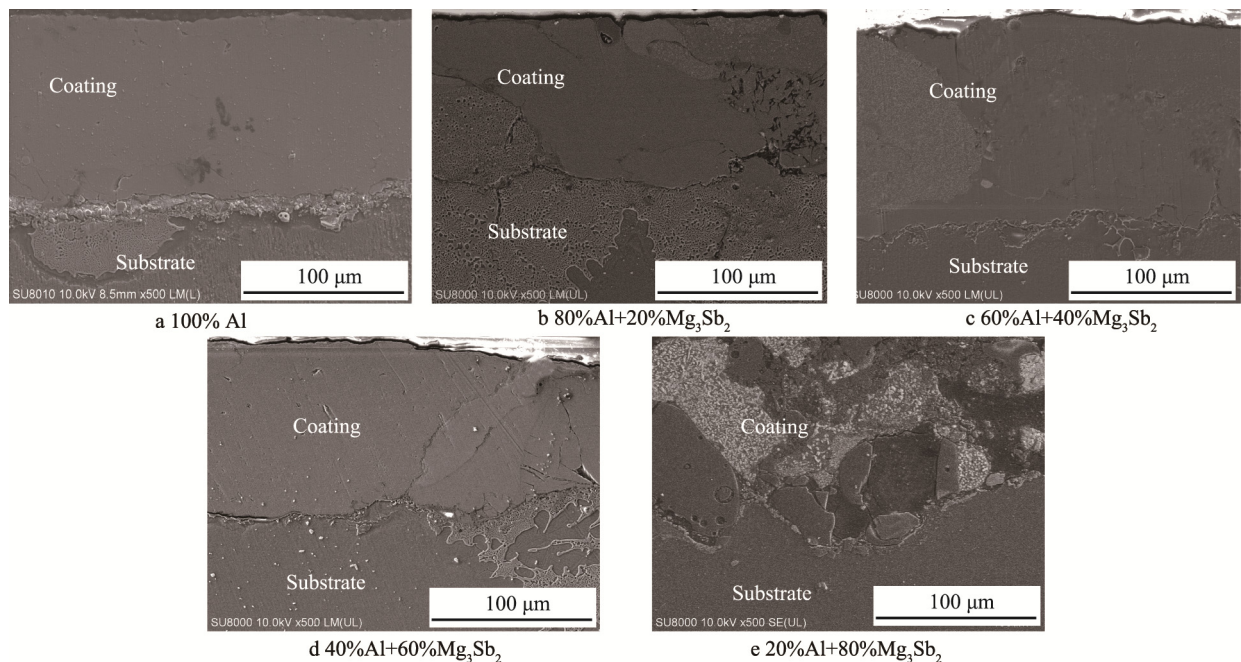


图 1 五种成分涂层的微观形貌

Fig.1 Microstructure of five component coatings

2.2 球磨粉末及涂层 XRD

图 2 为球磨前和球磨 8 h 后的 Mg₃Sb₂ 粉末 XRD 对比图。由图可以看出，经 8 h 球磨后，Mg 原子的晶体衍射峰消失，Sb 原子的晶体衍射峰强度明显降低，并有宽化现象。说明 Mg 原子已扩散进入到 Sb 原子晶格中，形成新物质 Mg₃Sb₂。

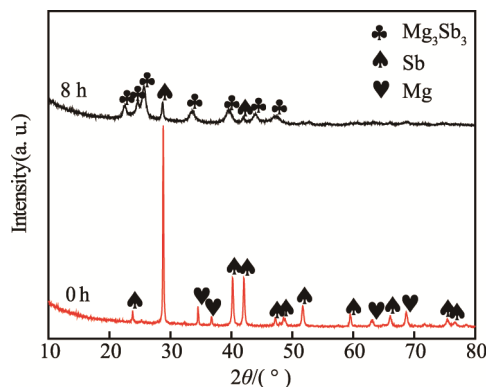


图 2 球磨粉末 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of powders with ball-milling

图 3 为四种成分 Al-Mg₃Sb₂ 涂层的 XRD 图。由图可以看出，涂层中的主要物相为 Mg₃Sb₂ 和 Al，此外还有少量的 Mg 和 Sb。

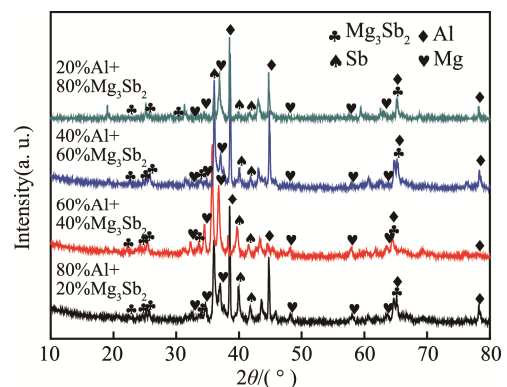


图 3 不同成分 Al-Mg₃Sb₂ 涂层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of Al-Mg₃Sb₂ coatings with different proportions

2.3 极化曲线

图 4 为 AZ31B、纯 Al 及四种成分 Al-Mg₃Sb₂ 涂

层试样的 Tafel 极化曲线, 由 Tafel 极化曲线经外推法计算出的腐蚀电位和腐蚀电流如表 1 所示。

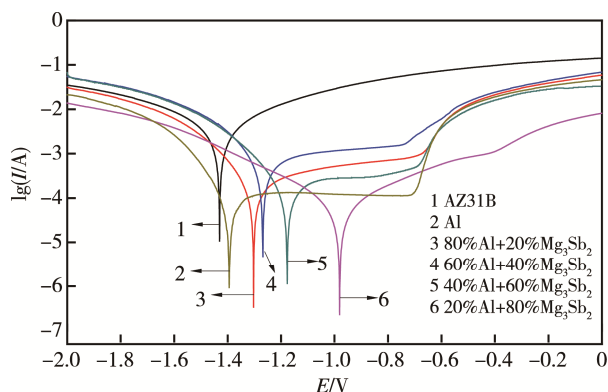


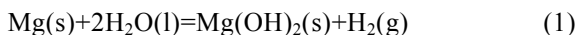
图4 涂层与AZ31B的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of coatings and AZ31B

表1 AZ31B 镁合金与涂层的腐蚀电位和腐蚀电流
Tab.1 Corrosion potential and corrosion current of coatings and AZ31B

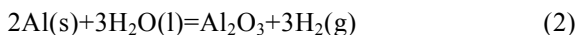
Samples	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
AZ31B	-1.4325	2.309
Al	-1.3992	0.083
80%Al+20% Mg_3Sb_2	-1.3056	0.167
60%Al+40% Mg_3Sb_2	-1.2723	0.531
40%Al+60% Mg_3Sb_2	-1.1821	0.153
20%Al+80% Mg_3Sb_2	-0.9819	0.048

AZ31B 发生电化学腐蚀时, 其反应主要为析氢反应, 其总反应式为式(1)。



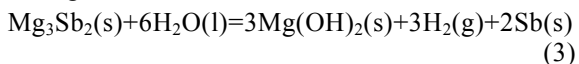
根据热力学知识^[9-10]计算得到此反应的吉布斯自由能 $\Delta G_{\text{AZ31B}} = -498.31 \text{ kJ/mol}$ 。反应生成的 Mg(OH)_2 膜, 厚度薄且疏松, 很容易被 Cl^- 穿透, 破坏基体, 产生腐蚀, 失去保护作用^[11]。

对于纯 Al 涂层, 其发生的总反应式为式(2)。



计算得到此反应的吉布斯自由能 $\Delta G_{\text{Al}} = -489.42 \text{ kJ/mol}$ 。纯 Al 涂层在腐蚀过程中产生的 Al_2O_3 膜很致密, 可阻止腐蚀液的侵蚀, 使其进入钝化状态^[11]。由图4知, 纯 Al 涂层的腐蚀电位比 AZ31B 正移了约 33.3 mV, 但腐蚀电流密度大大降低。其在 $-1.284 \sim -0.713 \text{ V}$ 发生钝化, 之后发生过钝化^[12], 表面的钝化膜被破坏, 腐蚀电流密度急剧上升。

对于 Al- Mg_3Sb_2 涂层, 其发生电化学腐蚀时, 涂层中的 Mg_3Sb_2 相发生腐蚀的总反应为式(3)。



计算得到此反应的吉布斯自由能 $\Delta G_{\text{Mg}_3\text{Sb}_2} =$

-265.08 kJ/mol 。腐蚀过程中生成的 Sb, 在没有氧和氧化物的酸性介质、中性介质中是稳定的, 其标准电极电位为 $0.24 \text{ V}^{[13]}$ 。另外, 在涂层与电解质直接相接处, 腐蚀介质中可能会存在一定的 O_2 , Sb 又可以发生 $2\text{Sb(s)} + 3\text{H}_2\text{O(l)} = 3\text{H}_2\text{(g)} + \text{Sb}_2\text{O}_3\text{(s)}$ 的反应, 生成的 Sb_2O_3 沉淀可以阻碍腐蚀液的入侵, 进而保护基体。

根据腐蚀倾向的热力学判据^[11]可知, $\Delta G(T, P) \leq 0$ 时, 腐蚀反应能够自发进行。 $\Delta G(T, P)$ 的负值越大, 表示金属越不稳定, 发生腐蚀的倾向性越大。比较(1)、(2)、(3)式的吉布斯自由能可知, $\Delta G_{\text{Mg}_3\text{Sb}_2} > \Delta G_{\text{Al}} > \Delta G_{\text{AZ31B}}$ 。因此, AZ31B 最容易发生腐蚀, Al 涂层次之, 而 Al- Mg_3Sb_2 涂层发生腐蚀时, 涂层中的 Al 相先溶解, 生成 Al_2O_3 沉淀, 并产生钝化效应, 之后 Mg_3Sb_2 相发生腐蚀。由于 Mg_3Sb_2 发生腐蚀的倾向性低于 Al, 因此随着 Mg_3Sb_2 含量的增加, 涂层的腐蚀电位逐渐正移, 腐蚀倾向性^[14-15]逐渐降低。而随着 Al 含量的减少, 涂层发生腐蚀时生成的 Al_2O_3 沉淀越少, 钝化效应越弱。

由表1知, 80%Al+20% Mg_3Sb_2 涂层、60%Al+40% Mg_3Sb_2 涂层、40%Al+60% Mg_3Sb_2 涂层的腐蚀电流密度均比 AZ31B 降低一个数量级, 而纯 Al 和 20%Al+80% Mg_3Sb_2 涂层的腐蚀电流密度比 AZ31B 降低两个数量级。虽然 20%Al+80% Mg_3Sb_2 涂层的钝化区不如纯 Al 涂层的明显, 但腐蚀电流密度却是纯 Al 涂层的 1/2, 其腐蚀速度最慢。

2.4 显微硬度

表2为纯 Al 及四种成分 Al- Mg_3Sb_2 涂层试样的显微硬度。由表可知, 随着硬质相 Mg_3Sb_2 含量的增加, 涂层的显微硬度逐渐增加。而且, Mg_3Sb_2 对硬度的提高作用很明显: 加入 20% Mg_3Sb_2 , 其硬度是纯 Al 涂层的 3.36 倍, 而加入 80% Mg_3Sb_2 , 其硬度则是纯 Al 涂层的 6.79 倍。从 20%Al+80% Mg_3Sb_2 涂层的微观组织来看, 涂层中的 Mg_3Sb_2 较多, 喷涂时的温度较高, 涂层中有部分 Al 发生了熔化, Al 和 Mg_3Sb_2 有效地结合在一起, 成为一个整体, 涂层的显微硬度显著提高。

表2 涂层的显微硬度(HV)

Tab.2 Microhardness of coatings

Samples	1	2	3	4	5	Average
Al	56	55	43	50	42	49.2
80%Al+20% Mg_3Sb_2	126	152	188	168	192	165.2
60%Al+40% Mg_3Sb_2	168	192	184	201	180	185.0
40%Al+60% Mg_3Sb_2	205	215	256	244	232	230.4
20%Al+80% Mg_3Sb_2	293	321	451	263	343	334.2

3 结论

1) 在 AZ31B 镁合金表面火焰喷涂 Al-Mg₃Sb₂ 混合粉末, 可获得较致密的 Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层。

2) 在 3.5%NaCl 溶液中, 随着 Mg₃Sb₂ 含量的增加, Al-Mg₃Sb₂ 复相涂层的耐腐蚀性逐渐提高。随着 Al 含量的减少, 涂层的钝化作用逐渐减弱, 20%Al+80%Mg₃Sb₂ 涂层耐蚀性最好。

3) 涂层的显微硬度随着硬质相 Mg₃Sb₂ 的增加而增加, 当 Mg₃Sb₂ 的质量分数达到 80% 时, 其显微硬度比纯 Al 涂层提高了近 5.79 倍。

参考文献:

- [1] 林锐, 刘朝辉, 王飞, 等. 镁合金表面改性技术现状研究[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 124-131.
LIN Rui, LIU Zhao-hui, WANG Fei, et al. Development of Corrosion Surface Modification Technology for Magnesium Alloys[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 124-131.
- [2] 王福会, 杜克勤, 张伟. 镁合金的腐蚀与防护研究进展[J]. 中国材料进展, 2011, 30(2): 29-34.
WANG Fu-hui, DU Ke-qin, ZHANG Wei. Progress in Research of Corrosion and Protection of Magnesium Alloys[J]. Materials China, 2011, 30(2): 29-34.
- [3] PARDO A, CASAJUS P, MOHEDANO M, et al. Corrosion Protection of Mg/Al Alloys by Thermal Sprayed Aluminum Coatings[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(17): 6968-6977.
- [4] 王丹, 周小平. AZ31B 镁合金表面 Al 涂层热压后的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(8): 881-884.
WANG Dan, ZHOU Xiao-ping. Microstructure and Properties of Al Coating on AZ31B Magnesium Alloy after Hot Pressing[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2016, 36(8): 881-884.
- [5] 李于朋, 刘鑫, 宫文彪, 等. 镁合金表面等离子喷涂 Al 涂层的耐腐蚀性能[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 511-517.
LI Yu-peng, LIU Xin, GONG Wen-biao, et al. Study on the Corrosion Resistance of Plasma Spraying Al Coated on the Surface of Magnesium Alloy[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 31(5): 511-517.
- [6] CAMPO M, CARBONERAS M, LÓPEZ M D, et al. Corrosion Resistance of Thermally Sprayed Al and Al/SiC Coatings on Mg[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203(20-21): 3224-3230.
- [7] 孟君晟, 齐兴权, 周志文, 等. 镁合金表面氩弧熔覆 Al-Si 基 SiC 复合涂层组织及耐磨性[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(2): 196-200.
MENG Jun-sheng, QI Xing-quan, ZHOU Zhi-wen, et al. Microstructure and Wear Resistance of Magnesium-Alloy by Argon Arc Cladding with Al-Si-based SiC Composite Coating[J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2015, 25(2): 196-200.
- [8] 余伟阳, 唐璧玉, 彭立明, 等. α -Mg₃Sb₂ 的电子结构和力学性能[J]. 物理学报, 2009, 58(f06): 216-223.
YU Wei-yang, TANG Bi-yu, PENG Li-ming, et al. Electronic Structure and Mechanical Properties of α -Mg₃Sb₂[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(f06): 216-223.
- [9] 江伯鸿. 材料热力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 41-47.
JIANG Bo-hong. Thermodynamics of Materials[M]. Shanghai: Shanghai University Press, 1999: 41-47.
- [10] 梁英教, 车荫昌. 无机物热力学手册[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
LIANG Ying-jiao, CHE Yin-chang. Handbook of Inorganic Thermodynamics[M]. Shenyang: NEU Press, 1993.
- [11] 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: 25-26.
WANG Feng-ping, KANG Wan-li, JING He-min, et al. Principle, Method and Application of Corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 25-26.
- [12] 任素贞, 王旭珍, 施维. 物理化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 280-282.
REN Su-zhen, WANG Xu-zhen, SHI Wei. Physical Chemistry[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013: 280-282.
- [13] 陈国华, 王光信. 电化学方法应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 241.
CHEN Guo-hua, WANG Guang-xin. Application of Electrochemical Methods[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 241.
- [14] 李凌杰, 于生海, 雷惊雷, 等. NaCl 介质中 AZ31 镁合金的动态电化学腐蚀行为研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(6): 8-11.
LI Ling-jie, YU Sheng-hai, LEI Jing-lei, et al. Study on Time-dependent Electrochemical Corrosion Behavior of AZ31 Magnesium Alloy in NaCl Medium[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(6): 8-11.
- [15] 陈文, 龙安平, 向锦涛, 等. 超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层在 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3373-3378.
CHEN Wen, LONG An-ping, XIANG Jin-tao, et al. Corrosion Resistance of WC-10Co4Cr HVOF Coating in NaCl Solution[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (10): 3373-3378.