

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160830002

AZ31B镁合金表面火焰喷涂Al-Mg₂Si涂层的耐腐蚀性能

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: 为提高AZ31B镁合金表面的耐腐蚀性能, 用火焰喷涂方法在镁合金表面制备Al-Mg₂Si复合涂层。采用XRD、SEM和EDS分析涂层的物相组成、微观组织及元素分布; 通过电化学试验测试样品在3.5%NaCl溶液中的腐蚀电位、腐蚀电流密度; 通过3.5%NaCl溶液浸泡试验测试样品的腐蚀速率; 并测试涂层的显微硬度。结果表明: 涂层中的主要物相有Mg₂Si、Al, 组织比较致密, 元素分布均匀。Tafel极化曲线测试表明, Al-Mg₂Si涂层样品与AZ31B镁合金样品相比腐蚀电位从-1.489 V正移到-1.366 V, 腐蚀电流密度从 2.817×10^{-3} A/cm²降低到 1.198×10^{-3} A/cm²。浸泡试验结果表明, 喷涂Al-Mg₂Si的镁合金的腐蚀速率明显低于没有喷涂的镁合金。显微硬度测试表明, 涂层的显微硬度集中分布在259~308 HV_{0.05}之间, 镁合金为50~60 HV_{0.05}。因此在AZ31B镁合金表面火焰喷涂Al-Mg₂Si涂层可以提高其耐腐蚀性能, 表面硬度显著提高。

关键词: AZ31B镁合金; 火焰喷涂; Al-Mg₂Si涂层; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG174.442; TG174.36

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)02-0113-06

Corrosion Resistance of Al-Mg₂Si Composite Coating on AZ31B Magnesium Alloy by Flame Spraying

FAN Chun, LONG Wei, ZHOU Xiao-ping

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

Abstract: Al-Mg₂Si coating was prepared on the AZ31B magnesium alloy by flame spraying to improve the corrosion resistance of the magnesium alloy. XRD, SEM and EDS were used to analyze the phase composition, microstructure and elements distribution. The potential corrosion and corrosion current density of the samples in 3.5 % NaCl solution were investigated by electrochemical experiment, and the corrosion rates were investigated by immersing experiment in the same solution. And the micro-hardness of the coating was tested. The results show that the coating is composed of Al and Mg₂Si phases with a dense microstructure and uniform element distribution. Tafel polarization curves indicate that the potential corrosion of the coating is increased from -1.489 V to -1.366 V and the corrosion current density is decreased from 2.817×10^{-3} A/cm² to 1.198×10^{-3} A/cm², compared with that of the magnesium alloy. Corrosion rate of the coating is significantly decreased compared with that of magnesium alloy according to immersing experiment. Micro hardness of the coating is chiefly concentrated between 259-308 HV_{0.05} and that of the magnesium alloy is 50-60 HV_{0.05}. Thus, the corrosion resistance and micro-hardness of the magnesium alloy are improved by flame spraying of Al-Mg₂Si composite coating.

Keywords: AZ31B magnesium alloy; flame spraying; Al-Mg₂Si coating; corrosion resistance

收稿日期: 2016-08-30; 修回日期: 2016-12-05

网络出版日期: 2017-03-10 08:33; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170310.0833.020.html>

通讯作者: 周小平(1963—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料表面喷涂; E-mail: zxp_zhn@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51171062)

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

引文格式: 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 C, LONG W, ZHOU X P. Corrosion resistance of Al-Mg₂Si composite coating on AZ31B magnesium alloy by flame spraying[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(2): 113-118.

0 引言

镁合金因其具有较高的熔点、较低的密度、较高的比强度等多种优良性能,被人们誉为“21世纪绿色工程材料”^[1-3]。但是,镁合金的电负性强,具有较高的电化学活性,易于被腐蚀,这极大限制了镁合金在工程领域中的应用范围^[4-5]。因此,适当的对镁合金进行表面处理不论从理论还是从实际应用都具有非常现实的意义。

目前,热喷涂铝及其复合材料是镁合金表面喷涂技术中最常见的方法。钱建刚^[6]等在镁合金表面等离子喷涂Al涂层,并用激光对涂层重熔处理,研究发现重熔处理可以提高涂层与基体的结合强度,但涂层的耐腐蚀性明显降低。陈燕^[7]等人在镁合金表面制备Ni-Al-陶瓷涂层,研究结果表明复合涂层的强度、抗热震性显著提高。Pardo A^[8]等研究了经冷压处理和不处理的Al涂层的耐腐蚀性,发现经冷压处理后涂层耐腐蚀性得到改善。Carboners M^[9]等利用火焰喷涂方法在镁合金表面制备Al-SiC复合涂层,研究发现涂层与基体之间的结合能力较差,易被腐蚀,经热压处理后涂层的耐腐蚀性能得到明显提高。总结发现通过热喷涂方法得到的Al涂层硬度较低,耐磨性较差,因此寻找一种既可以改善镁合金的耐腐蚀性又可以提高其力学性能的涂层材料具有非常现实的意义。

金属间化合物 Mg_2Si 具有密度低(1.99 g/cm^3)、熔点高($1\ 080\text{ }^\circ\text{C}$)、室温热稳定性好、比强度高、耐腐蚀、无毒等多种优异性能,是一种非常具有前途的轻质高温结构材料^[10-11]。因此在镁合金表面制备 Mg_2Si 涂层是一种即经济又环保的手段,具有广阔的应用前景。但是 Mg_2Si 具有很强的晶间脆裂倾向,具有室温本征脆性^[12]。此外由于 Mg_2Si 的室温韧性差,很难在镁合金表面喷涂纯 Mg_2Si 。因此通过在 Mg_2Si 中加入其他金属作为粘结剂来提高 Mg_2Si 颗粒之间的粘着性,改善 Mg_2Si 涂层与基体之间的结合能力。Al的熔点为 $580\text{ }^\circ\text{C}$, Mg_2Si 的熔点为 $1\ 080\text{ }^\circ\text{C}$,在火焰喷涂过程中 Mg_2Si 处于固态或半熔融状态时Al还处于熔融态,这些熔融态的Al会包裹在 Mg_2Si 颗粒周围使 Mg_2Si 颗粒之间的粘着性升高,更容易获得致密性较好的涂层,因此可以在 Mg_2Si 喷涂材料中加入适当的Al制备Al- Mg_2Si 复合涂层。

文中以Al、 Mg_2Si 混合粉末为喷涂材料,采用

氧气-乙炔火焰喷涂方法在AZ31B镁合金表面制备Al- Mg_2Si 复合涂层,研究涂层的耐腐蚀性能。

1 材料与方法

喷涂材料的制备过程:配料→机械搅拌混合→聚乙烯醇(PVA)造粒→团聚粉末破碎→过筛→合金复合粉末。粉末配比按照80% Mg_2Si -20%Al(质量分数)混合,并进行机械搅拌,使粉末充分混合均匀。粘结剂为质量分数7%的聚乙烯醇水溶液,粘结剂与混合粉末的配比为1:2(质量比),待其呈胶泥状时放入烘干箱内烘干,烘干温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 。聚乙烯醇水溶液可以使不同物理性质的Al粉和 Mg_2Si 粉末颗粒粘结在一起,使粉末混合更加均匀^[13]。用榨汁机将团聚粉末破碎后过筛,最后制取的粉末粒度为 $74\sim 150\text{ }\mu\text{m}$ (100目~200目)。

试样制备过程:基体打磨→喷砂→火焰喷涂→涂层后处理。基材材料为AZ31B镁合金,尺寸为 $27\text{ mm}\times 27\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 。先将AZ31B镁合金打磨处理,打磨掉镁合金的棱角、边缘,再对镁合金表面进行喷砂处理,最后火焰热喷涂Al- Mg_2Si 涂层,涂层的厚度为 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$,喷涂后立即进行冷压处理,载荷为 10 MPa ,加载时间为 2 min 。

涂层制备完毕后,用D8 FOCUS型X射线衍射仪(XRD)分析涂层的物相组成;用SU8010型扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)对涂层进行组织观察和成分分析;用HVS-1000型显微硬度计测试涂层的显微硬度,载荷为 0.49 N ,加载时间为 20 s ;使用CHI600e型电化学工作站对试样进行电化学性能测试,测试所用的溶液为3.5%NaCl溶液;浸泡腐蚀试验采用3.5%NaCl溶液浸泡法,测试前测量试样的尺寸和质量,然后将其浸入到3.5%NaCl溶液中浸泡,每隔 1 h 将试样取出,用去离子水冲洗,冷风吹干,采用电子天平称重,计算其腐蚀速率。

2 结果与分析

2.1 显微组织

图1是AZ31B镁合金经火焰喷涂Al- Mg_2Si 后试样的截面形貌图。图中上部分为Al- Mg_2Si 涂层,下部为AZ31B镁合金基体。从图中可以看出,所获得的涂层比较致密,内部存在少量的孔洞和裂纹。涂层与基体的衔接面存在少量的松散的小颗粒,因为刚开始喷涂时基体的温度比较低,喷涂的颗粒遇到温度低的合金基体迅速冷凝并产生收

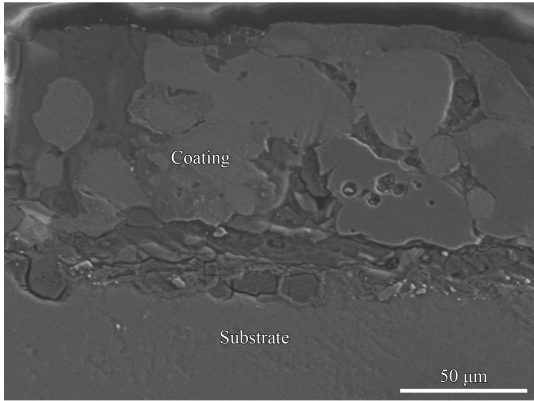


图1 Al-Mg₂Si涂层截面形貌

Fig.1 Cross section morphology of Al-Mg₂Si coating

缩,颗粒之间黏着度较小,所以会存在些许松散小颗粒。

用XRD分析了AZ31B镁合金表面喷涂Al-Mg₂Si涂层后的相组成,如图2所示。可以看出,涂层中含有正常价化合物Mg₂Si、Al。根据物相在XRD图谱中衍射峰的强度高低可知,涂层中的主要成分是Mg₂Si,此外涂层中还存在少量的Mg、Si和Al₁₂Mg₁₇。火焰喷涂焰流的温度远远高于Mg₂Si的熔点,在喷涂加速阶段会存在少量的Mg₂Si分解生成Mg和Si。由于喷涂粉末混合不均匀,致使某个局部Al含量比较高,高含量的Al会与喷涂过程中分解的Mg结合生成Al₁₂Mg₁₇。

图3为涂层元素分布。从涂层区域面扫描能谱分析中可以看出,从涂层表面到与基体交界处,Mg、Si元素的分布整体来说比较均匀、有连续性。但是,在涂层的某些局部会发生Si元素富集,而在相应位置Mg元素含量很少,如图3(a)(b)的左上角。因为Mg的蒸气压比较高,在高温下很容易挥发,故在涂层局部出现单一Si富集现象。

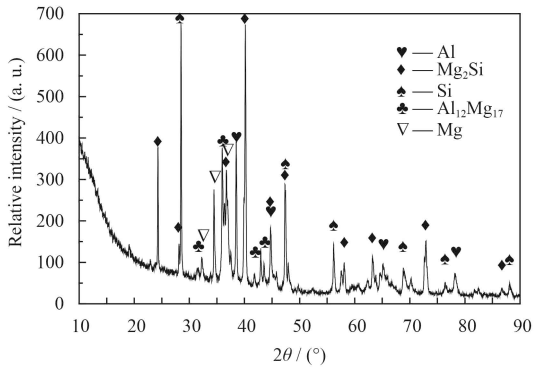
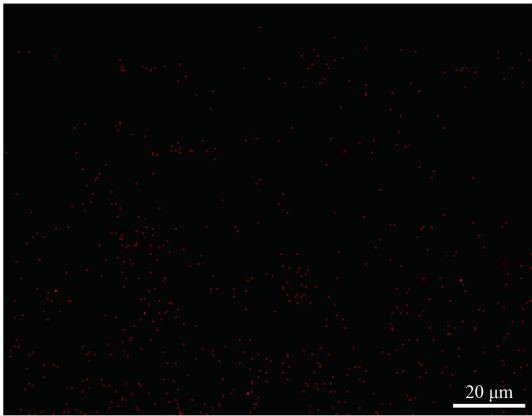
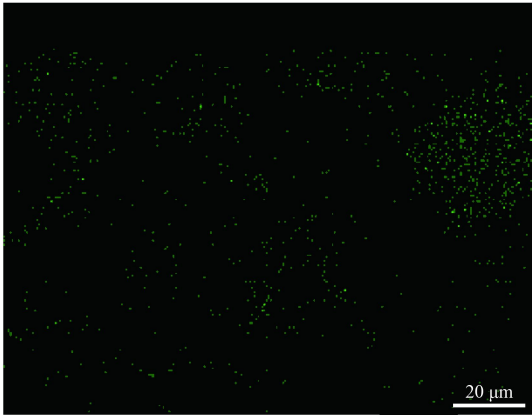


图2 Al-Mg₂Si涂层的X射线衍射图谱

Fig.2 XRD patterns of Al-Mg₂Si coating



(a) Mg element



(b) Si element

图3 Al-Mg₂Si涂层元素分布

Fig.3 Element distribution of Al-Mg₂Si composite coating

2.2 耐腐蚀性能

2.2.1 极化曲线

图4是AZ31B镁合金试样喷涂之前和喷涂之后在3.5%NaCl溶液中所测得的Tafel极化曲线。在进行测试极化曲线前所有试样均在3.5%NaCl溶液中浸泡1 h。腐蚀电流密度 I_{corr} 值根据Tafel方程,用chi660e分析软件在 E -log*i*图的直线区间进行直线拟合求得,腐蚀电位 E_{corr} 由软件根据极化曲线的转折点求出,即极化曲线上阴极极化曲线和阳极极化曲线的转折点所对应的电位即为材料所对应的腐蚀电位。自腐蚀电流越小、腐蚀电位越正的材料耐腐蚀性越好^[14]。表1是试样经过不同处理后所对应的腐蚀电位和腐蚀电流。

由表1可知,涂层的耐腐蚀性能大于AZ31B镁合金的耐腐蚀性。AZ31B镁合金的腐蚀电位为-1.489 V, Al-Mg₂Si涂层的腐蚀电位为-1.366 V,两者相比较,火焰喷涂Al-Mg₂Si涂层后试样的腐蚀电位正移了122.85 mV。AZ31B镁合金的腐蚀电

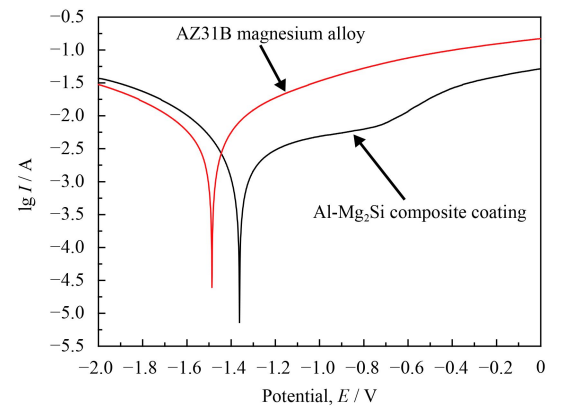


图4 Al-Mg₂Si涂层与镁合金的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of Al-Mg₂Si coating and AZ31B magnesium alloy

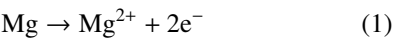
表1 Al-Mg₂Si涂层与镁合金的腐蚀电位和腐蚀电流

Table 1 Corrosion potential and corrosion current of l-Mg₂Si coating and AZ31B magnesium alloy

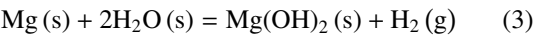
Samples	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (10^{-3} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
AZ31B magnesium alloy	-1.489	2.817
Al-Mg ₂ Si composite coating	-1.366	1.198

流密度为 $2.817 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ，经喷涂Al-Mg₂Si并冷压处理后，试样腐蚀电流密度为 $1.198 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ ，与AZ31B镁合金基体相比，喷涂Al-Mg₂Si涂层的试样的电流密度降低为镁合金的0.4倍。

电化学测试时间较短，为10 min，腐蚀主要发生在金属表面，为面腐蚀。对于AZ31B镁合金来说，在电化学测试过程中发生的化学反应为：



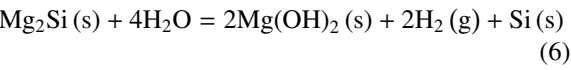
合并(1)和(2)得：



对于Al-Mg₂Si涂层来说，在电化学测试过程中发生的化学反应为：



合并(4)和(5)得：



根据热力学知识^[15]计算上述反应的吉布斯自由能 $\Delta G_{\text{AZ31B镁合金}} = -618.4 \text{ kJ/mol}$ ， $\Delta G_{\text{涂层}} = -336.534 \text{ kJ/mol}$ 。根据热力学判据 $\Delta G_{(\text{T}, \text{P})} \leq 0$ 时腐

蚀反应能够自发进行， $\Delta G_{(\text{T}, \text{P})}$ 值越负表示金属越不稳定，越容易发生腐蚀。由于 $\Delta G_{\text{涂层}} = -336.534 \text{ kJ/mol} > \Delta G_{\text{AZ31B镁合金}} = -618.4 \text{ kJ/mol}$ ，因此涂层的耐腐蚀性比镁合金强。在极化曲线中，影响材料自腐蚀电位的因素主要是材料热力学，又因为 $0 > \Delta G_{\text{涂层}} > \Delta G_{\text{AZ31B镁合金}}$ ，因此涂层的极化曲线正移。

2.2.2 浸泡腐蚀试验

图5是腐蚀增重速率与时间的关系曲线。从图中可以看出，随着时间的增加，镁合金试样的增重速率呈现出增长的趋势，并且到240 min时曲线突然下降，腐蚀产物剥落；而经火焰喷涂Al-Mg₂Si处理后的试样前1 h增重速率增加明显，但随着时间的延长增重速率基本趋于稳定，但是浸泡到7 h后曲线突然下降，涂层剥落。整体来说镁合金的腐蚀速率明显大于Al-Mg₂Si涂层的腐蚀速率。

反应初期两种试样所处的环境基本相同，都为析氢腐蚀，腐蚀产物为Mg(OH)₂沉淀和H₂，故腐蚀速率基本相同。随着时间的增加，镁合金试样所处的溶液中，由于消耗大量的OH⁻会使局部H⁺浓度升高，H⁺与溶液中的Cl⁻结合形成HCl，镁合金局部区域会发生酸腐蚀形成腐蚀坑，酸腐蚀的速率大于盐腐蚀的速率。当大量的腐蚀坑相互连接时就会形成腐蚀通道，会进一步加快镁合金腐蚀，腐蚀进行到一定程度时腐蚀产物剥落。

在涂层表面和内部存在细小的孔洞和裂纹，由于腐蚀反应初期腐蚀产物Mg(OH)₂沉淀的覆盖，腐蚀介质会被封闭在这些孔洞和裂纹中形成局部原电池。在局部原电池内发生溶解Mg₂Si的阳极反应，反应式如公式(4)(5)。可以看出，在孔洞和裂纹所形成的局部原电池内存在高浓度的H⁺，

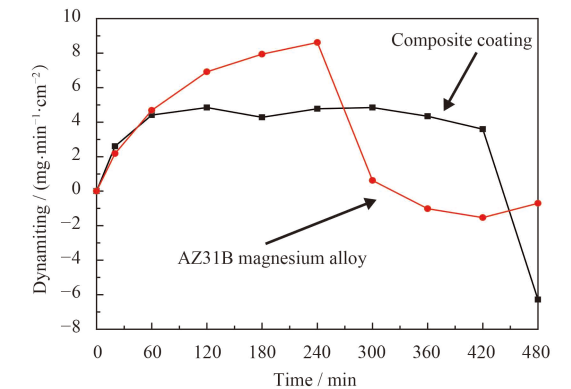
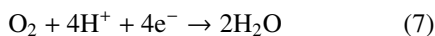


图5 增重速率与时间的关系

Fig.5 Relationship between weight gain and time

根据溶液成电中性原理,外部溶液中的Cl⁻会进入到局部原电池内与H⁺结合形成HCl,则在局部原电池内又会形成盐酸腐蚀,形成的Mg(OH)₂沉淀再次被溶解,空隙处滞留下纯的Si颗粒,由于Si的耐腐蚀性极强,会阻碍涂层中腐蚀通道的形成。此外涂层表面与电解质直接相接处,腐蚀介质中存在大量O₂,初生成的Mg(OH)₂沉淀覆盖在涂层表面成为大面积阴极,发生阴极反应,反应式为:



由于阴极反应消耗了H⁺,使溶液中OH⁻含量升高,电解质呈弱碱性,溶液中的OH⁻与二次溶解的Mg²⁺结合形成Mg(OH)₂沉淀覆盖在涂层表面,进一步阻碍了涂层的腐蚀。但是,Mg(OH)₂疏松多孔,阻碍涂层被腐蚀只是短暂性的,再加上涂层中存在孔隙,所以浸泡到一定时间时涂层剥落,如图5中涂层的曲线突然下降。

2.3 显微硬度

AZ31B镁合金、和Al-Mg₂Si涂层的显微硬度如图6所示。从图中可以看出,AZ31B镁合金的显微硬度值大致分布在50~60 HV_{0.05}之间,而Al-Mg₂Si涂层的显微硬度值集中分布在259~308 HV_{0.05}之间,与AZ31B镁合金基体相比,经过火焰喷涂Al-Mg₂Si试样的显微硬度提高了将近5倍。因为涂层的硬度与涂层本身的物相组成、组织结构、涂层的致密性等密切相关^[13]。喷涂粉末中的Mg₂Si具有很高的力学性能,硬度值为350~450 HV_{0.05},即使在大载荷下仍然表现出很高的力学性能^[16-17]。有研究^[18]表明,在Al-Mg-Si合金中起强化作用的是

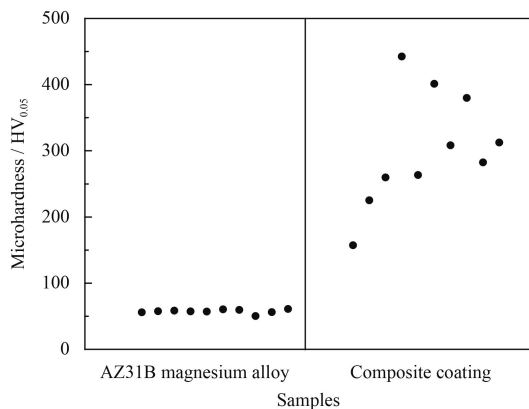


图6 Al-Mg₂Si涂层与镁合金的显微硬度

Fig.6 Microhardness of Al-Mg₂Si composite coating and magnesium alloy

Mg₂Si相。而涂层的主要成分为Mg₂Si,有大量的强化相存在,因此在涂层中某些地方的显微硬度值可达442 HV_{0.05}。并且喷涂过程中,由于Al的熔点低,Mg₂Si的熔点很高,当Mg₂Si凝固时熔融态的Al会包裹在Mg₂Si的周围,起到粘结的作用,使得到的涂层比较致密。因此Al-Mg₂Si涂层具有较高的硬度值。

3 结论

(1) 经火焰喷涂后,在AZ31B镁合金表面获得比较均匀的Al-Mg₂Si涂层,涂层中的主要成分为Al、Mg₂Si。涂层中的孔洞和裂纹少,致密性较高。

(2) 火焰喷涂Al-Mg₂Si涂层的耐腐蚀性明显高于AZ31B镁合金。Al-Mg₂Si涂层与AZ31B镁合金样品相比,电位从-1.489 V正移到-1.366 V,腐蚀电流密度从2.817×10⁻³ A/cm²降低到1.198×10⁻³ A/cm²。

(3) 镁合金的显微硬度值为50~60 HV_{0.05},涂层的显微硬度值集中分布在259~308 HV_{0.05}之间,Al-Mg₂Si涂层的显微硬度明显高于AZ31B镁合金。

参考文献

- [1] 孙方红,马壮,董世知,等. AZ91镁合金表面金属陶瓷涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(18): 497-500.
SUN F H, MA Z, DONG S Z, et al. Progress in research on metal ceramic coatings for AZ91 magnesium alloy[J]. Materials Review, 2011, 25(18): 497-500 (in Chinese).
- [2] 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 Y, LIU C H, WANG F, et al. Development of corrosion surface modification technology for magnesium alloys[J]. Surface Technology, 2016, 45(4): 124-131 (in Chinese).
- [3] 李元元,田文峰,胡侨丹,等. Si及变质处理对Mg₂Si/Mg复合材料的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(4): 294-296, 244.
LI Y Y, TIAN W F, HU Q D, et al. Effects of Si content and modification on microstructure and properties of in situ Mg₂Si/Mg composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(4): 294-296, 244 (in Chinese).
- [4] 张志彬,梁秀兵,陈永雄,等. 镁合金表面热喷涂铝基涂层研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(2): 41-44.
ZHANG Z B, LIANG X B, CHEN Y X, et al. Research progress on thermal sprayed Al-based coating used on surface protection of magnesium alloys[J]. Materials Review, 2013, 27(2): 41-44 (in Chinese).
- [5] 孟模,张治民,徐宏妍. 热喷涂铝涂层与镁合金基体结合强度的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(3):

- 377-381.
- MENG M, ZHANG Z M, XU H Y. Study on bond strength of aluminum coating formed by thermal spraying on AZ80 magnesium alloys surface[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2011, 32(3): 377-381 (in Chinese).
- [6] 钱建刚, 张家祥, 李淑青, 等. 镁合金表面等离子喷涂Al涂层及激光重熔研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 360-363.
- QIAN J G, ZHANG J X, LI S Q, et al. Study of plasma-Sprayed Al coating on Mg alloy and laser-remelting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 360-363 (in Chinese).
- [7] 陈燕, 芦笙, 陈静, 等. AZ91D镁合金等离子喷涂Ni-Al/陶瓷涂层的组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(4): 1094-1101.
- CHEN Y, LU S, CHEN J, et al. Microstructure and properties of Ni/Al/ceramic coatings plasma-sprayed on AZ91D magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4): 1094-1101 (in Chinese).
- [8] PARDO A, CASAJUS P, MOHEDANO M, et al. Corrosion protection of Mg/Al alloys by thermal sprayed aluminium coatings[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(17): 6968-6977.
- [9] CARBONERAS M, LOPEZ M D, RODRIGO P, et al. Corrosion behaviour of thermally sprayed Al/SiCp composite coatings on ZE41 magnesium alloy in chloride medium[J]. Corrosion Science, 2010, 52(10): 761-768.
- [10] 臧树俊, 周琦, 马勤, 等. 金属间化合物 Mg_2Si 研究进展[J]. 铸造技术, 2006, 27(8): 866-870.
- ZHANG S J, ZHOU Q, MA Q, et al. Progress in study on Mg_2Si intermetallic compound[J]. Materials Review, 2006, 27(8): 866-870 (in Chinese).
- [11] 熊伟, 秦晓英, 王莉. 金属间化合物 Mg_2Si 的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(6): 4-7.
- XIONG W, QIN X Y, WANG L. Progress in study on Mg_2Si intermetallic compound[J]. Materials Review, 2005, 19(6): 4-7 (in Chinese).
- [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, 213.
- JI Z P, ZHOU S C, AI W J, et al. Microwave direct synthesis of Mg_2Si intermetallic compound by solid state phase reaction[J]. Powder Metallurgy Technology, 2011, 29(3): 206-209, 213 (in Chinese).
- [13] 马壮, 邹积峰, 王伟, 等. AZ31B合金热化学反应热喷涂复相陶瓷涂层制备及性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 46-50, 115.
- MA Z, ZHOU J F, WANG W, et al. Preparation and properties of composite ceramic coating on AZ31B alloy by thermo-chemical reaction spraying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 46-50, 115 (in Chinese).
- [14] 常森, 张宝红, 徐宏妍. 镁合金表面热喷涂铝的防腐蚀研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(14): 124-127.
- CHANG S, ZHANG B H, XU H Y. Study on anti-corrosion of Al coating prepared by thermal spray on Mg alloy surface[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(14): 124-127 (in Chinese).
- [15] 江伯鸿. 材料热力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 41-47.
- JIANG B H. Thermodynamics of Materials[M]. Shanghai: Shanghai University Press, 1999: 41-47 (in Chinese).
- [16] KONDOH K, YAMAGUCHI T, SERIKAWA T, et al. Surface modification of magnesium alloy by Mg_2Si coating technology[J]. JSME International Journal, 2005, 48(4): 264-268.
- [17] 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, 12.
- LIU X B. Study on microstructures, mechanical properties and wear behaviors of Mg_2Si /Al composites[D]. Jilin: Jilin University, 2014, 12 (in Chinese).
- [18] 王庆松. Al-Mg-Si合金强化机理的电子理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006, 4.
- WANG Q S. The study of electronic theory of strengthening mechanism of Al-Mg-Si alloy[D]. Nanning: Guangxi University, 2006, 4 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)