

AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的 组织和性能研究

黄杰, 李俊峰, 张守杰, 胡定科, 张明

(中广核研究院有限公司, 广东深圳 518026)

摘 要: **目的** 在铝镁涂层中加入微量的 Zr 元素, 对 AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的组织和性能进行对比研究。**方法** 采用体视显微镜观察涂层的表面形貌, 采用拉伸试验机、维氏显微硬度计测量涂层的结合强度及表面硬度。通过海水浸泡试验和中性盐雾试验研究涂层的耐腐蚀性能, 采用电位仪测量涂层在海水腐蚀过程中的腐蚀电位, 采用 SEM 观察涂层经中性盐雾腐蚀后的表面微观形貌, 采用失重法计算涂层的中性盐雾腐蚀速率。**结果** 微量 Zr 元素的加入, 改善了铝镁涂层的组织结构, 降低了涂层的孔隙率。相比于 AlMg5 涂层, AlMg5-Zr 涂层的结合强度及表面硬度分别提高了 13.8% 和 10.8%。海水浸泡腐蚀过程中, AlMg5-Zr 涂层的自腐蚀电位表现较正, 发生腐蚀较难, 浸泡 2880 h 后, AlMg5-Zr 涂层表面失光变色较少。中性盐雾腐蚀过程中, AlMg5-Zr 涂层的腐蚀速率较小, 腐蚀 1920 h 后, AlMg5 涂层的微观腐蚀痕迹较明显, 表面疏松, 且出现连续的白色腐蚀产物。**结论** AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的组织结构、与基体的结合强度、表面显微硬度及耐腐蚀性能均优于 AlMg5 涂层。

关键词: Zr 元素; 组织; 结合强度; 显微硬度; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0195-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.027

Microstructures and Properties of AlMg5 and AlMg5-Zr Arc Spraying Coatings

HUANG Jie, LI Jun-feng, ZHANG Shou-jie, HU Ding-ke, ZHANG Ming

(China Nuclear Power Research Institute Co., Ltd, Shenzhen 518026, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the microstructures and properties of AlMg5 and AlMg5-Zr arc spraying coatings by adding a few Zr elements in AlMg coating. The surface morphologies of AlMg5 and AlMg5-Zr coatings were observed with a stereomicroscope. The adhesion strength and surface microhardness of the coatings were measured by a tensile tester and a Vickers hardness tester respectively. Corrosion resistance of the coatings was studied by seawater immersion test and salt spray test. SEM was utilized to investigate the corrosion morphologies of the coatings and a potentiometer was utilized to measure corrosion potential of the coatings. The microstructures of AlMg5 coating were improved and the porosity of AlMg5 coating was decreased by adding Zr. The adhesion strength and surface microhardness of AlMg5-Zr coating were 13.8% and 10.8% higher respectively than that of AlMg5 coating. Self-corrosion potential of AlMg5-Zr coating in seawater was higher than that of AlMg5 coating, and after immersion in seawater for 2880 hours, the surface morphologies of AlMg5-Zr coating changed a little.

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-09-27

Received: 2018-06-10; Revised: 2018-09-27

作者简介: 黄杰 (1989—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为新材料的设计与制备。邮箱: 18122062560@163.com

Biography: HUANG Jie (1989—), Male, Master graduate, Engineer, Research focus: design and preparation of new materials. E-mail: 18122062560@163.com

Salt spray corrosion rate of AlMg5-Zr coating was slower than that of AlMg5 coating, and after salt spray corrosion for 1920 hours, the corrosion marks on AlMg5 coating were more obvious than that on AlMg5-Zr coating, and there were continuous corrosion products appearing on AlMg5 coating surfaces. The microstructures and properties of AlMg5-Zr arcspraying coating, such as the adhesion between coating and substrate, surface microhardness and corrosion resistance are superior to that of AlMg5 coating.

KEY WORDS: Zr element; microstructure; adhesion strength; microhardness; corrosion resistance

热喷涂技术作为表面工程研究的重要分支之一,广泛应用于工程材料的磨损及腐蚀防护^[1-2]。铝镁合金涂层具有优良的综合力学性能,且耐腐蚀性能好、价格适中,是重要的耐磨损及耐腐蚀涂层之一^[3-4]。AlMg5合金作为一种通用型涂层材料,已被列入国家标准,主要用于钢铁基体的表面防护^[5]。目前,国内高端制造业配用的AlMg5热喷涂材料90%以上依赖进口,国产热喷涂材料制备的涂层在组织和性能方面均存在一定的问题。为改善AlMg5涂层的组织及性能,相关研究者对铝镁涂层进行了合金化改性研究,目前研究最多的是稀土元素对铝镁涂层的改性。江苏中矿大正公司发明了“一种热喷涂用稀土铝镁合金丝材”,相对于传统铝镁合金,用其制备的涂层的耐腐蚀性能更好^[6]。李承宇等人^[3]采用电弧喷涂技术,在Q235钢表面分别制备铝镁和稀土铝镁涂层,试验结果同样表明,稀土铝镁涂层的耐腐蚀性能要明显优于铝镁涂层。研究发现,由于稀土元素具有脱氧及合金化作用,降低了铝镁熔滴的表面张力,增加了流动性,降低了涂层的孔隙率,从而使涂层表面表现出稳定的自封闭性及较好的耐腐蚀性能。目前稀土元素对铝镁涂层的改性主要集中在耐腐蚀性能领域,对铝镁涂层的综合力学性能,尤其是涂层与基体间的结合能力及耐磨损能力的提升却有限。同时,稀土添加剂在热喷涂材料冶炼添加及热喷涂过程中极易烧损,这就决定了稀土铝镁涂层不宜大规模工程应用。

Zr元素是铝镁合金重要的变质剂,已有大量研究表明,在铝镁合金中添加微量的Zr元素可细化合金晶粒,有效改善铝镁合金的组织和性能^[7-10]。当前国内外有关微量Zr元素的添加对铝镁合金涂层组织和性能影响的研究还未见报道。本文通过对比试验分析AlMg5及AlMg5-Zr电弧喷涂涂层的组织和性能,旨在研究Zr元素的添加对铝镁电弧喷涂涂层组织和性能的影响。

1 试验

1.1 涂层制备

试验基材选用P265GH碳钢(执行EN 10216-2标准),基材尺寸为80 mm×60 mm×3 mm,按照GB/T 9793—2012《热喷涂金属和其他无机覆盖层锌、铝及其合金》的要求进行电弧喷涂涂层的制备。热喷涂前

预先对基材表面进行处理,采用喷砂方式使待喷涂基材表面充分清洁和粗化,达到ISO 8501-1中Sa3级要求。热喷涂前必须保证基材试件表面干燥、无灰尘、无油脂、无氧化皮及其他杂质。

热喷涂丝材选用 $\phi 2.0$ mm的AlMg5丝材和AlMg5-Zr丝材,其化学成分见表1。电弧喷涂设备选用XDP-5型,由喷枪、电源、送丝机构及控制箱等构成。电弧喷涂的工艺参数:工作电流为150 A,工作电压为32 V,喷涂距离为150 mm,雾化气压0.6 MPa。采用电弧喷涂技术在预处理过的P265GH碳钢试件的表面制备厚度为200~350 μm 的涂层,涂层不做封孔处理,直接进行组织和性能测试。

表1 试验用热喷涂丝材化学成分

Tab.1 Chemical compositions of the hot sprayed alloy wires %

Alloy wire	Zr	Ti	Cr	Mn	Mg	Al
AlMg5		0.10	0.11	0.12	5.00	Remainder
AlMg5-Zr	0.10	0.10	0.11	0.12	5.00	Remainder

1.2 涂层组织观察及性能测试

1) 涂层组织及孔隙率。采用XTL-3400型体视显微镜,对试验涂层的表面进行组织观察。采用直接称重法测量试验涂层的孔隙率,孔隙率公式^[11]为:

$$A = \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_m} \right) \times 100\%, \text{ 其中 } \rho_c \text{ 为涂层密度, } \text{g/cm}^3; \rho_m \text{ 为涂层材料的实际密度, } \text{g/cm}^3.$$

2) 结合强度及显微硬度。依据GB/T 8642—2002《热喷涂抗拉结合强度的测定》中规定的方法测量涂层与基体之间的结合强度。采用WDW-20E万能试验机进行拉伸试验,试样为 $\phi 25$ mm的圆柱体,使用E-7胶将试样的涂层面与非涂层面分别粘在直径相等的304不锈钢圆柱上,在100℃下固化3h。待试样粘结固化后,将其插入拉伸机夹钳中,以0.03 mm/s的速度进行加载。只有当断裂发生在涂层与基体的结合面或涂层本身发生断裂的试样才可用于结合强度的计算。采用维氏显微硬度计测量涂层表面的显微硬度,试验载荷为0.245 N,保荷时间为10 s。

3) 腐蚀试验。依据JB/T 7901—1999《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》,对试验涂层进行海

水浸泡试验, 试验溶液选用广东大亚湾海域天然海水, 腐蚀时间为 2880 h。采用 M273 型电位仪测量涂层在海水浸泡腐蚀过程中的自腐蚀电位。依据 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验—盐雾腐蚀》, 对试验涂层进行中性盐雾腐蚀试验, 以 50 g/L 的 NaCl 中性水溶液作为腐蚀介质, 箱内温度控制在 35 ℃, 腐蚀时间为 1920 h。采用 Hitachi S-4800 型扫描电镜对盐雾腐蚀后涂层的微观腐蚀形貌进行观察。采用失重法计算涂层在中性盐雾腐蚀 240、480、720、960、1440、1920 h 时的腐蚀速率, 腐蚀速率公式为: $v = \Delta m / (S \times t)$, 其中 Δm 为涂层腐蚀前后质量变化, g; S 为腐蚀面积, m^2 ; t 为腐蚀时间, h。

2 试验结果及分析

2.1 表面组织及孔隙率分析

AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的表面组织如图 1 所示, 可以看出, 两种铝镁合金涂层的表面形貌均匀一致, 没有基材裸露的斑点以及不牢固未熔融颗粒的附着, 未发现明显的孔隙及微裂纹。比较来看, AlMg5-Zr 涂层的表面组织更加致密, 涂层金属颗粒的尺寸更加细小, 颗粒之间的结合也更加紧密。AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的孔隙率见表 2,

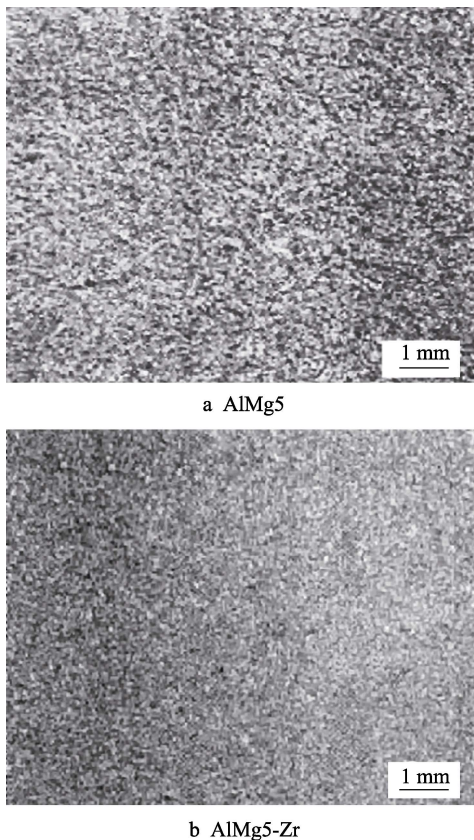


图 1 AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的表面组织形貌
Fig.1 Surface microstructures of AlMg5 and AlMg5-Zr arc spraying coatings

表 2 AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的孔隙率
Tab.2 Porosity of AlMg5 and AlMg5-Zr arc spraying coatings

Sample	Measure 1	Measure 2	Measure 3	Average
AlMg5 coating	3.40	3.52	3.73	3.55
AlMg5-Zr coating	2.48	2.21	2.26	2.32

可以看出, AlMg5-Zr 涂层的孔隙率明显低于 AlMg5 涂层, 降低了约 34.6%, 且 AlMg5-Zr 涂层的孔隙分布较均匀, 尺寸较小。这主要是因为铝镁涂层中, 添加的微量 Zr 元素与 Ti 元素联合变质作用, 形成的 Al_3Zr 、 Al_3Ti 及 $Al_3(Zr,Ti)$ 颗粒可以作为异质形核的核心, 细化了热喷涂过程中的雾化颗粒, 增加了涂层颗粒之间以及涂层与基体之间的有效接触面积^[12]。同时, 铝镁丝材制备阶段, 由于 Zr 元素对铝镁丝材合金同样具有变质作用, 可细化铝镁丝材的晶粒组织, 一定程度上有利于其制备的电弧喷涂涂层组织的细化以及孔隙率的降低。

2.2 结合强度及显微硬度分析

AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的结合强度及显微硬度如图 2 所示, 可以看出, AlMg5-Zr 涂层与碳钢基体的结合强度高于 AlMg5 涂层, 提升了约 13.8%。这主要因为 Zr 元素的添加细化了电弧喷涂过程中的雾化微粒, 增大了微粒之间以及微粒与碳钢基体之间的有效接触面积。铝镁微粒的抗氧化性能也随着 Zr 元素的添加而提高, 这会增强微粒撞击基体表面后产生的范德华力结合, 同时也会增加熔融微粒与基体间形成微区冶金结合的可能性, 从而改善了涂层颗粒与基体之间的结合状况, 提高铝镁涂层的结合强度^[13-14]。从图 2 中可知, AlMg5-Zr 涂层表面显微硬度值也略高于 AlMg5 涂层, 提升了约 10.8%。这主要与涂层组织颗粒的细化有关, 涂层颗粒越细小, 其表面硬度值越高, 其耐磨损性能也越好^[15]。

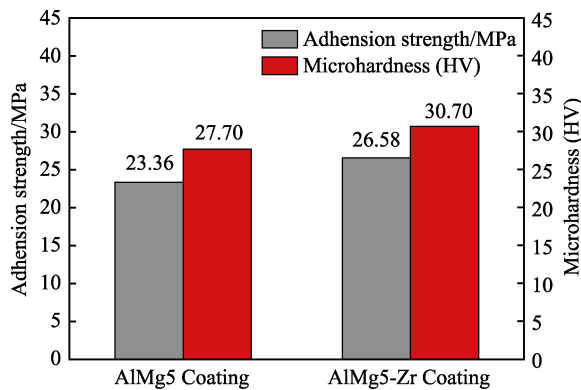
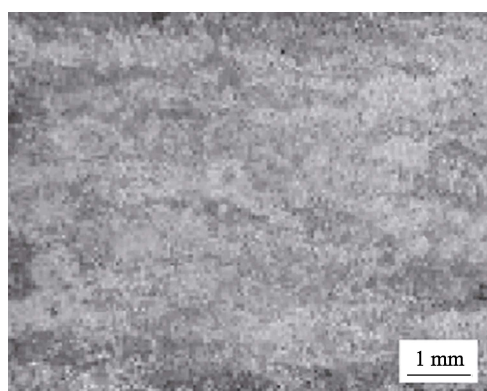


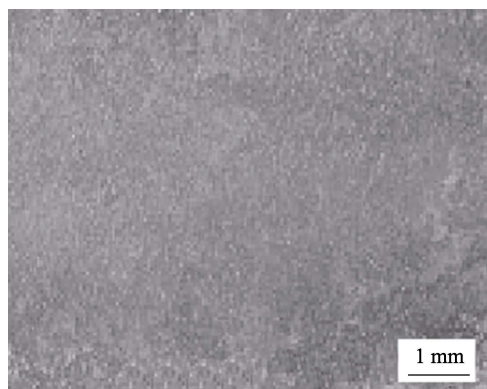
图 2 AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的结合强度及显微硬度
Fig.2 Adhesion strength and microhardness of AlMg5 and AlMg5-Zr arc spraying coatings

2.3 耐腐蚀性能分析

AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层经海水浸泡腐蚀 2880 h 后的腐蚀形貌如图 3 所示,可以看出,两种涂层均没有出现红锈现象,说明碳钢基体未受到海水腐蚀,涂层起到了良好的腐蚀保护作用。通过对比两种涂层表面腐蚀形貌,可以看出,经 2880h 的海水浸泡腐蚀后,AlMg5 涂层表面大部分失去金属光泽,变为暗灰色,而 AlMg5-Zr 涂层仅少部分失光变色,大部分表面未变化,仍有金属光泽。海水浸泡腐蚀 2880 h 后,AlMg5-Zr 涂层表面产生的白色腐蚀产物(白锈)也明显少于 AlMg5 涂层。图 4 为两种涂层在海水浸泡腐蚀过程中的自腐蚀电位变化曲线,由图 4 可知,AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层在海水浸泡初期自腐蚀电位均逐渐升高,这主要因为铝镁涂层金属与海水发生了电化学反应,涂层金属在海水浸泡过程中逐渐阳极极化,使得电位逐渐正移。浸泡 400 h 后,逐渐趋于平缓,这主要是因为铝镁涂层在海水浸泡腐蚀过程中逐渐形成了致密的钝化膜,阻碍了电位正移^[16]。通过对比两种涂层的自腐蚀电位曲线可以看出,相较于 AlMg5 涂层,AlMg5-Zr 涂层的自腐蚀电位表现较正,因此在海水浸泡腐蚀过程中,AlMg5-Zr 涂层发生腐蚀较难。



a AlMg5



b AlMg5-Zr

图 3 AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层经海水浸泡腐蚀 2880 h 后的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of AlMg5 and AlMg5-Zr coatings after immersion corrosion in seawater for 2880 hours

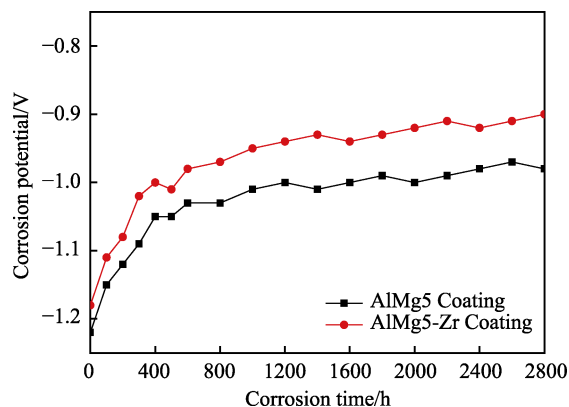
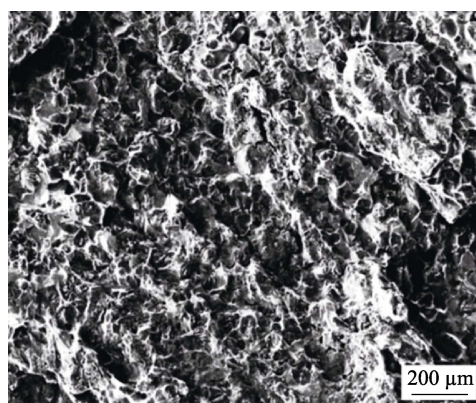


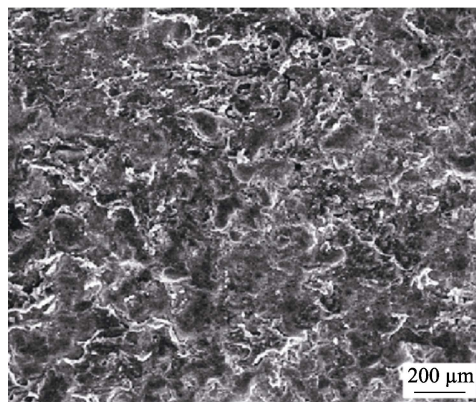
图 4 AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层在海水浸泡腐蚀过程中自腐蚀电位变化曲线

Fig.4 Self-corrosion potential curves of AlMg5 and AlMg5-Zr coatings for immersion corrosion in seawater

AlMg5 及 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层经中性盐雾腐蚀 1920 h 后的表面微观形貌如图 5 所示,可以看出,铝镁涂层的微观组织由相互重叠、镶嵌的颗粒结合而成,颗粒之间的叠合并不紧密,存在孔隙。比较而言,AlMg5 涂层经中性盐雾腐蚀后的腐蚀痕迹更加明显,表面疏松,且有连续结构的白色腐蚀产物出现;AlMg5-Zr 涂层的表面孔隙细小均匀、数量较少,颗粒



a AlMg5 coating



b AlMg5-Zr coating

图 5 AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层经中性盐雾腐蚀 1920 h 后表面微观形貌

Fig.5 SEM of AlMg5 and AlMg5-Zr coatings after salt spray corrosion for 1920 hours

粒铺展状况较好,氧化膜更致密,涂层的耐腐蚀性能更好。图 6 为两种涂层经不同时间中性盐雾腐蚀的腐蚀速率,可以看出,AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层的腐蚀速率在腐蚀初期均逐渐下降,腐蚀 960h 后逐渐趋于平缓,这与涂层表面形成钝化膜有关。总体来说,中性盐雾腐蚀过程中,AlMg5-Zr 涂层的腐蚀速率要小于 AlMg5 涂层,因此 AlMg5-Zr 涂层的腐蚀速度较慢。

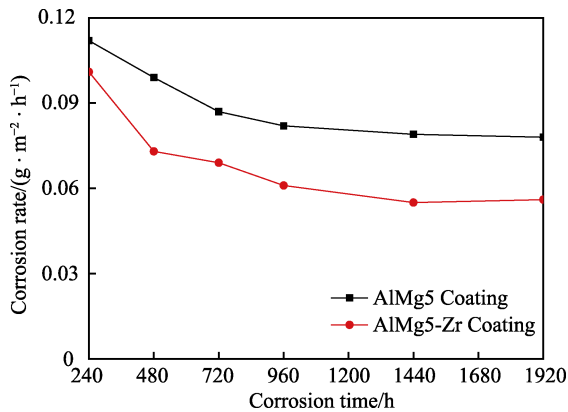


图 6 AlMg5 及 AlMg5-Zr 涂层中性盐雾腐蚀速率变化曲线
Fig.6 Salt spray corrosion rate curves of AlMg5 and AlMg5-Zr coatings

由以上腐蚀试验结果可知,AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的耐腐蚀性能优于 AlMg5 涂层。一方面,铝镁涂层中 Zr 元素的加入使涂层颗粒细小均匀,组织细化,降低了涂层的孔隙率,切断了涂层的腐蚀通道,使 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层表现出更加稳定的自封闭性以及较好的耐腐蚀性能。另一方面,Zr 元素本身是一种耐腐蚀性元素,不仅能提高铝镁涂层氧化膜的致密性,自身也能形成钝化膜,使 AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层生成致密的钝化区,从而提高了铝镁涂层的耐腐蚀性能^[17]。

3 结论

1) 在铝镁涂层中加入微量的 Zr 元素,与 Ti 元素联合变质作用,细化了涂层颗粒,使涂层组织更加均匀、致密,降低了涂层的孔隙率,改善了铝镁涂层的组织结构。

2) 在铝镁涂层中加入微量的 Zr 元素,细化了电弧喷涂过程中的雾化微粒,增强了微粒的抗氧化性能,从而增大了微粒与碳钢基体之间的有效接触面积,改善了涂层与基体之间的结合状况,提高了涂层的结合强度及表面硬度。拉伸试验及硬度试验结果表明,AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层与基体之间的结合强度比 AlMg5 涂层提升了约 13.8%,AlMg5-Zr 电弧喷涂涂层的表面显微硬度比 AlMg5 涂层提升了约 10.8%。

3) 在铝镁涂层中加入微量的 Zr 元素,改善了铝镁涂层的耐腐蚀性能。海水浸泡试验结果表明,在 2880 h 的腐蚀过程中,AlMg5-Zr 涂层的自腐蚀电位

始终高于 AlMg5 涂层,发生腐蚀的难度相对较大,最终 AlMg5-Zr 涂层表面失光变色较少。中性盐雾试验结果表明,涂层在盐雾腐蚀环境中进行到 960 h 后腐蚀速率趋于平稳,AlMg5-Zr 涂层的腐蚀速率相对较低,发生腐蚀的速度相对较慢,最终 AlMg5-Zr 涂层的微观腐蚀痕迹较不明显。

参考文献:

- [1] 张晞,孟立新. 金属热喷涂防腐技术在管道运输业应用展望[J]. 表面技术, 2000, 29(6): 23-25.
ZHANG Xi, MENG Li-xin. The application of antirust technology of metallic thermo-spray to pipeline transportation[J]. Surface technology, 2000, 29(6): 23-25.
- [2] 魏琪,任春岭,崔丽,等. 电弧喷涂铝基涂层耐腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 5-10.
WEI Qi, REN Chun-ling, CUI Li, et al. Corrosion resistance of Al based coating prepared by arc spraying[J]. Transaction of the China welding institution, 2006, 27(11): 5-10.
- [3] 李承宇,严生贵,王会阳,等. 铝镁及稀土铝镁电弧喷涂涂层的耐腐蚀性能研究[J]. 热喷涂技术, 2012, 4(4): 20-26.
LI Cheng-yu, YAN Sheng-gui, WANG Hui-yang, et al. Study of corrosion resistance of Al-Mg and Re-Al-Mg arc spraying coatings[J]. Thermal spray technology, 2012, 4(4): 20-26.
- [4] 刘静安,谢水生. 铝合金材料应用与开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
LIU Jing-an, XIE Shui-sheng. Application and development of aluminum alloy materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011.
- [5] GB/T 9793—2012, 热喷涂金属和其他无机覆盖层锌、铝及其合金[S].
GB/T 9793—2012, Thermal spraying-metallic and other inorganic coatings-zinc, aluminum and their alloys[S].
- [6] 王会阳. 一种热喷涂用稀土铝镁合金丝材: 中国, 201110312027.0[P]. 2011-10-16.
WANG Hui-yang. A Re-Al-Mg alloy wire for thermal spraying: China, 201110312027.0[P]. 2011-10-16.
- [7] 王旭,陈国钦,李冰,等. 复合添加 Sc、Zr、Ti 对 Al-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(4): 719-722.
WANG Xu, CHEN Guo-qin, LI Bing, et al. Effect of minor Sc, Zr and Ti Co-addition on microstructure and properties of Al-Mg alloys[J]. Rare metal materials & engineering, 2010, 39(4): 719-722.
- [8] 黄杰. Si、Zr 对 ER5356 焊丝及焊接接头性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
HUANG Jie. Effect of Si and Zr on the properties of ER5356 aluminum alloy wire as well as its welded joint[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

- [9] DANG Jing-zhi, HUANG Yu-feng, CHENG Jun. Effect of Sc and Zr on microstructures and mechanical properties of as-cast Al-Mg-Si-Mn alloys[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2009, 19(3): 540-544.
- [10] KENDIG K L, MIRACLE D B. Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Acta Materialia, 2002, 50(16): 4165-4175.
- [11] 黄国华. Al-Mg 合金涂层及其防腐性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
HUANG Guo-hua. The research of Al-Mg alloy coating and anti-corrosion property[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [12] LEE S, UTSUNOMIYA A, AKAMATSU H, et al. Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al-Mg alloys [J]. Acta materialia, 2002, 50(3): 553-564.
- [13] 杨金龙, 薛松柏, 薛鹏, 等. 锆元素对 Zn-15Al 钎料组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 61-65.
YANG Jin-long, XUE Song-bai, XUE Peng, et al. Effect of zirconium on microstructure and properties of Zn-15Al filler metal[J]. Transaction of the China welding institution, 2016, 37(12): 61-65.
- [14] 徐小平, 马世宁, 胡军志. Al 及 Al-Re 高速电弧喷涂层性能的研究[J]. 表面技术, 2005, 34(3): 25-29.
XU Xiao-ping, MA Shi-ning, HU Jun-zhi. Study on property of Al coating and Al-RE coating produced by high velocity arc spraying[J]. Surface technology, 2005, 34(3): 25-29.
- [15] 张中可, 李家锐, 车云. 晶粒细化剂对 Al-Mg-Si 铝合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2012, 33(5): 537-539.
ZHANG Zhong-ke, LI Jia-rui, CHE Yun. Effect of grain refiner on microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Si alloy[J]. Foundry technology, 2012, 33(5): 537-539.
- [16] 杨熙. 电弧喷涂稀土铝涂层组织及耐腐蚀性分析[J]. 铸造技术, 2013, 34(11): 1496-1498.
YANG Xi. Analysis on structure and anti-corrosion of arc sprayed Re-Zn-Al coating[J]. Foundry technology, 2013, 34(11): 1496-1498.
- [17] SUGEHIS L, LINDA G, MARIANA H S. Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal sprayed ceramic coatings[J]. Surface coating tech, 2004, 188-189: 135-139.