

# 热处理对等离子喷涂铁基非晶合金涂层微观结构和耐腐蚀性能的影响

王琦杰, 易 于, 汪米琪, 姜思琪, 吴林涛, 周泽华, 杨光恒

(河海大学力学与材料学院, 南京 211100)

**摘要:** 采用等离子喷涂技术在 Q235 钢基体上制备  $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$  非晶合金涂层, 之后对涂层进行 200, 300, 500, 600, 700 °C 热处理, 研究了热处理对涂层微观结构、耐电化学腐蚀性能和耐均匀腐蚀性能的影响。结果表明: 随着热处理温度的升高, 涂层的非晶含量降低, 孔隙率先减小后增大, 经 300 °C 热处理后涂层的孔隙率最低, 且低于未热处理涂层的; 热处理后涂层中的晶体相主要包括  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{Fe-Cr}$ ,  $\text{Fe}_{63}\text{Mo}_{37}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  等; 随着热处理温度的升高, 涂层的自腐蚀电流密度先减小后增大, 经 300 °C 热处理后, 自腐蚀电流密度最小, 涂层的耐电化学腐蚀性能最好; 经过热处理后, 涂层在 NaCl 溶液中浸泡 31 d 后的单位面积质量损失减小, 且热处理温度越高, 单位面积质量损失越小, 涂层的耐均匀腐蚀性能提高。

**关键词:** 等离子喷涂; 铁基非晶合金涂层; 热处理; 微观结构; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG174.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)03-0025-07

## Effect of Heat Treatment on Microstructure and Corrosion Resistance of Plasma Sprayed Fe-based Amorphous Alloy Coating

WANG Qijie, YI Yu, WANG Miqi, JIANG Siqi, WU Lintao, ZHOU Zehua, YANG Guangheng

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:**  $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$  amorphous alloy coating was prepared on Q235 steel substrate by plasma spraying technique, and the coating was heat treated at 200, 300, 500, 600, 700 °C. The effect of heat treatment on the microstructure, electrochemical corrosion resistance and uniform corrosion resistance of the coating was studied. The results show that with the increase of heat treatment temperature, the amorphous phase content in the coating decreased, and the porosity decreased first and then increased; the porosity of the coating heat-treated at 300 °C was the lowest, and lower than that of the unheat-treated coating. The crystal phases in the coating after heat treatment mainly included  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{Fe-Cr}$ ,  $\text{Fe}_{63}\text{Mo}_{37}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ . With the increase of heat treatment temperature, the free corrosion current density of the coating decreased first and then increased; the free corrosion current density of the coating heat-treated at 300 °C was the smallest, and the electrochemical corrosion resistance was the best. After heat treatment, the mass loss per unit area of the coating immersed in NaCl solution for 31 d decreased; the higher the heat treatment temperature, the smaller the mass loss per unit area, indicating the uniform corrosion resistance of the coating was improved.

**Key words:** plasma spraying; Fe-based amorphous alloy coating; heat treatment; microstructure; corrosion resistance

收稿日期: 2019-03-26; 修订日期: 2020-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379070); 2018 年江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX18\_0569); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018B689X14)

作者简介: 王琦杰(1994-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生

导师: 周泽华教授

## 0 引言

金属构件在服役过程中经常会因磨损、腐蚀等原因而出现使用寿命短、安全可靠性能差等问题<sup>[1-2]</sup>。大量研究表明, 采用先进的表面工程技术制备高性能涂层可以有效提高金属构件的耐磨损及耐腐

蚀性能<sup>[3]</sup>。其中,铁基非晶合金涂层的结构高度无序<sup>[4-5]</sup>,且该类涂层中不存在晶界、位错、层错等微观缺陷,也不存在成分偏析和第二相,因而具有强度高、硬度高、耐磨损、耐腐蚀等优良的综合性能,成为材料和物理领域中的研究热点<sup>[6-8]</sup>。铁基非晶合金作为一种亚稳态结构,在热效应作用下其非晶态易向能量较低的亚稳非晶态或平衡晶态转变,即发生结构弛豫或晶化,其性能也将随之产生变化<sup>[9-14]</sup>。FU等<sup>[15]</sup>研究发现,采用电弧喷涂技术制备的铁基非晶合金涂层经500~800℃热处理后,涂层中的非晶相转变为晶相,涂层表现出优异的耐磨粒磨损性能。陈智慧等<sup>[16]</sup>对采用熔体快淬方法得到的Fe<sub>81</sub>Si<sub>3.5</sub>B<sub>13.5</sub>C<sub>2</sub>非晶薄带进行了350℃和400℃退火热处理,分别得到了经过内应力弛豫后的非晶薄带和部分晶化的非晶-纳米晶薄带,发现部分晶化试样的耐腐蚀性能较好。等离子喷涂技术因具有焰流温度高、喷涂效率高、工艺简单等优点而广泛应用于

表1 等离子喷涂工艺参数

Table 1 Process parameters for plasma spraying

主气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	载气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	辅气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	电压/V	电流/A	喷涂道次/次	枪头移速/(mm·s <sup>-1</sup> )	喷涂距离/mm
52.6	4.9	18.4	40.6	650	2	140	120

将涂层试样在XS2-512型箱式电阻炉中进行热处理,结合课题组前期研究结果和文献<sup>[14-19]</sup>中的研究结果,将热处理温度设定为200,300,500,600,700℃,保温时间均为30min,然后随炉冷却至室温。

## 1.2 试验方法

采用D8 advanced型X射线衍射仪(XRD)分析涂层的物相组成,使用铜靶,K<sub>α</sub>射线,扫描范围为20°~80°,扫描速率为10(°)·min<sup>-1</sup>。利用MDI Jade6软件对XRD谱进行Pseudo-Voigt函数拟合<sup>[20-21]</sup>,计算衍射峰强度,进而得到涂层的非晶体积分数 $\varphi$ ,其计算公式<sup>[21]</sup>为

$$\varphi = (1 - I_{\text{crystal}}/I_{\text{total}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_{\text{crystal}}$ 为晶体相的衍射峰强度; $I_{\text{total}}$ 为衍射峰总强度。

采用HITACHI S-4800型扫描电子显微(SEM)观察涂层的表面和截面形貌。在每个涂层试样截面上选取10个视场,采用DT2000金相图像分析软件,利用灰度法计算涂层的孔隙率。

使用CHI660E型电化学工作站在室温环境下进行电化学测试,采用标准三电极系统,工作电极为涂层试样,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,电解液为质量分数3.5%的NaCl溶液;电化

表面工程领域中<sup>[17-19]</sup>,但是目前有关热处理对等离子喷涂铁基非晶合金涂层耐腐蚀性能影响的研究相对较少,尤其是铁基非晶涂层的长效防护机理尚不清晰。为此,作者利用等离子喷涂技术在Q235钢基体上制备了Fe<sub>48</sub>Cr<sub>15</sub>Mo<sub>14</sub>C<sub>15</sub>B<sub>6</sub>Y<sub>2</sub>铁基非晶合金涂层,之后在不同温度下进行热处理,研究了热处理前后涂层的微观结构和耐腐蚀性能,以期铁基非晶合金涂层的实际应用提供试验依据。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

试验用等离子喷涂原料为Fe<sub>48</sub>Cr<sub>15</sub>Mo<sub>14</sub>C<sub>15</sub>B<sub>6</sub>Y<sub>2</sub>非晶合金粉;基体为尺寸15mm×15mm×6mm的Q235钢板,喷涂前对基体表面进行脱脂除锈和喷砂粗化处理。采用3710型等离子喷涂设备系统制备涂层,喷涂过程中采用的主气和载气均为氩气,辅气为氢气,具体工艺参数如表1所示。

学极化曲线的扫描范围为-1400~1500mV,扫描速率为1mV·s<sup>-1</sup>。按照JB/T 7901-2001,采用均匀腐蚀全浸试验研究涂层的耐均匀腐蚀性能,试验温度为室温。为避免因非喷涂面受到腐蚀而影响试验结果,将试样中的非涂层面镶嵌于环氧树脂中,涂层面上浸泡在质量分数3.5%的NaCl溶液中,同时为保持腐蚀溶液浓度稳定,在浸泡时用保鲜膜密封烧杯口,每3d更换一次腐蚀溶液。试验周期选择:1~6d以内每1d为一个周期,7~20d以内每2d为一个周期,21~31d以内,每4d为一个周期。一个腐蚀周期结束后将试样取出,在超声波清洗机中用蒸馏水清洗10min后,放入烘箱中烘干。用精度为0.0001g的精密电子天平称取试验前后试样的质量。将环氧树脂块体设为空白试样,用于消除在计算涂层质量损失时因环氧树脂受腐蚀而产生的试验误差。涂层单位面积质量损失的计算公式为

$$\Delta \bar{m}_c = \frac{\Delta m_s - \Delta m_r (S_s - S_c) / S_r}{S_c} \quad (2)$$

式中: $\Delta \bar{m}_c$ 为涂层单位面积质量损失; $\Delta m_s$ 为经树脂镶嵌后试样的质量损失; $\Delta m_r$ 为空白试样的质量损失; $S_s$ 为经树脂镶嵌后试样的表面积; $S_c$ 为涂层的面积; $S_r$ 为空白试样的表面积。

均匀腐蚀全浸试验结束后,采用 Hirox KH-7700 型超景深体视显微镜及 HITACHI S-4800 型扫描电子显微镜观察涂层的表面微观形貌,并用 SEM 附带的 ThermoFisher System7 型能谱仪(EDS)分析涂层表面的微区化学成分。采用 D8 advanced 型 X 射线衍射仪分析腐蚀产物的物相组成。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 物相组成

由图 1 可以看出:未热处理涂层在  $2\theta$  为  $45^\circ$  左右存在宽化漫衍射峰,说明采用等离子喷涂技术制备的涂层为典型的非晶态合金;200,300  $^\circ\text{C}$  热处理涂层的衍射峰仍为明显的宽化漫衍射峰,说明涂层仍为非晶态;500,600  $^\circ\text{C}$  热处理涂层在  $2\theta$  为  $30^\circ, 32^\circ, 45^\circ$  等位置均出现微弱尖锐峰,说明涂层出现晶化现象;700  $^\circ\text{C}$  热处理涂层的衍射峰明显变窄,且在  $2\theta$  为  $37^\circ, 42^\circ, 45^\circ, 53^\circ$  等位置均出现尖锐峰,表明涂层晶化程度提高,但仍存在一些非晶相。经分析可知,热处理涂层中的晶体相主要包括  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{Fe-Cr}$ ,  $\text{Fe}_{63}\text{Mo}_{37}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  等。由计算结果可知,未热处理和 200,300,500,600,700  $^\circ\text{C}$  热处理涂层中的非晶体积分数分别为 84.35%, 82.97%, 82.31%, 76.36%, 71.48%, 43.52%, 可见随着热处理温度的升高,涂层中的非晶含量降低。

### 2.2 微观结构

由图 2 可以看出:在等离子喷涂过程中,高温熔

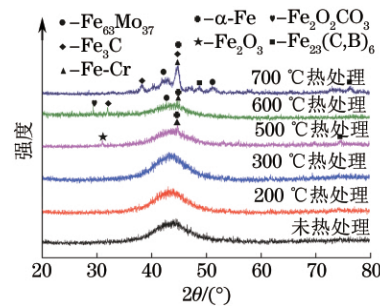


图 1 未热处理和不同温度热处理涂层的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of unheat-treated and heat-treated coatings at different temperatures

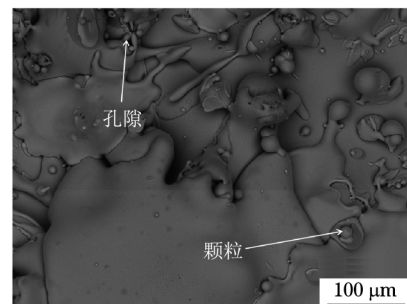


图 2 未热处理涂层的表面 SEM 形貌

Fig.2 Surface SEM morphology of unheat-treated coating

融的合金颗粒撞击基体,颗粒充分变形,扁平化程度良好,扁平状颗粒层层堆积,从而形成典型的层状结构;涂层中存在少许未熔颗粒和孔隙,孔隙主要来源于喷涂过程中产生的气孔、熔融扁平状颗粒凝固时发生冷缩而形成的空隙以及颗粒之间堆积不完整而形成的空隙<sup>[22]</sup>。由图 3 可知:所制备涂层的厚度

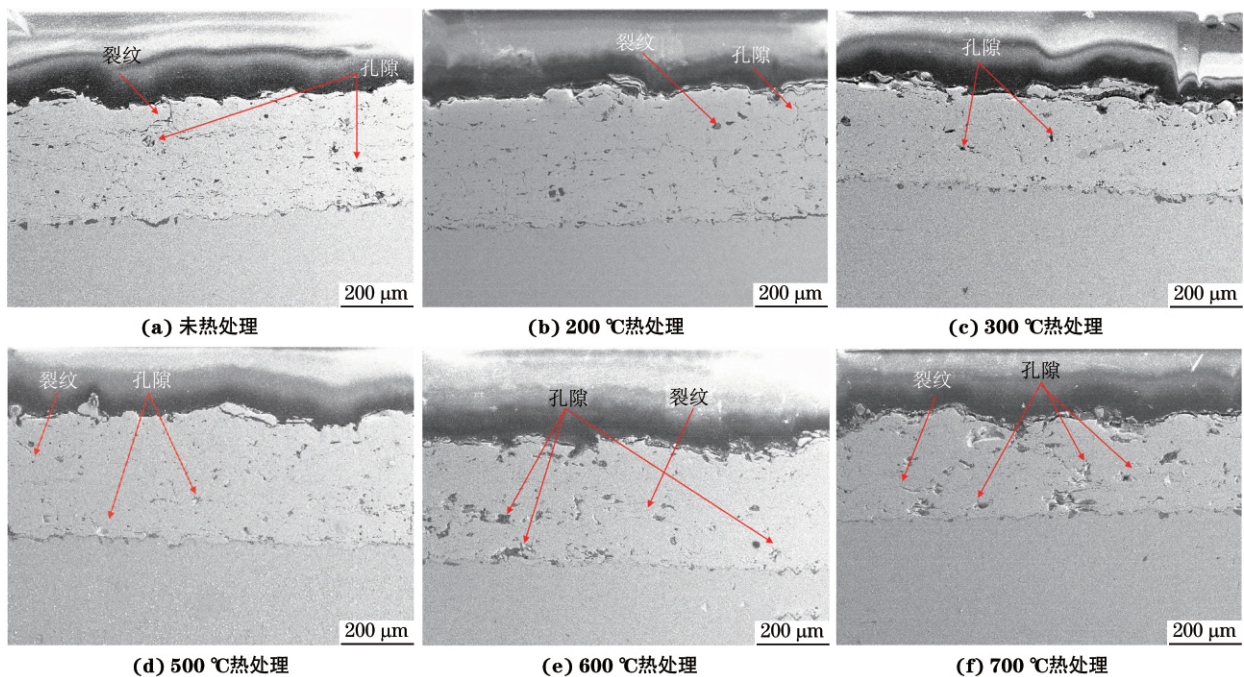


图 3 未热处理和不同温度热处理涂层的截面 SEM 形貌

Fig.3 Cross-sectional SEM images of unheat-treated (a) and heat-treated coatings at different temperatures (b-f)

为  $300\sim 400\ \mu\text{m}$ ;未热处理涂层结构均匀致密,呈现出层状结构,但存在少量的裂纹和孔隙;经过  $200,300\ ^\circ\text{C}$  热处理后,在扩散作用下涂层中扁平颗粒之间的空隙变少,微裂纹产生弥合,组织均匀性增加;  $500,600,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的孔隙明显增加,且出现了大尺寸孔洞。这是因为在  $500\sim 700\ ^\circ\text{C}$  热处理后,涂层发生晶化,晶体相的形成引起晶格畸变,导致裂纹的萌生,进而产生孔隙,同时大气环境中的氧元素在孔隙和裂纹处富集,导致扁平化颗粒堆积界面发生氧化,而生成的氧化物塑性和韧性较差,易产生裂纹,从而导致涂层的孔隙增多<sup>[23]</sup>。计算得到未热处理和  $200,300,500,600,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的孔隙率分别为  $3.68\%, 3.16\%, 2.97\%, 4.89\%, 5.34\%, 6.68\%$ 。

### 2.3 耐电化学腐蚀性能

自腐蚀电位的高低反映材料发生腐蚀的难易程度,所对应的自腐蚀电流密度的大小反映材料发生腐蚀的快慢程度。一般来说,自腐蚀电位越高,自腐蚀电流密度越低,材料越难发生腐蚀,且发生腐蚀的速率也越低。图 4 中的  $E$  为相对于 SCE 的电位,  $i$  为电流密度,由图 4 可知:未热处理涂层在 NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度和自腐蚀电位分别为  $4.012\times 10^{-5}\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $-929\ \text{mV}$ ;  $200,300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的耐电化学腐蚀性能提高,自腐蚀电流密度分别为  $3.696\times 10^{-5}$ ,  $2.292\times 10^{-5}\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,自腐蚀电位分别为  $-896$ ,  $-868\ \text{mV}$ ;  $500,600,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的耐电化学腐蚀性能比未热处理的降低,自腐蚀电流密度分别为  $6.910\times 10^{-5}$ ,  $8.064\times 10^{-5}$ ,  $1.392\times 10^{-4}\ \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,自腐蚀电位分别为  $-948$ ,  $-918$ ,  $-1105\ \text{mV}$ 。涂层的耐电化学腐蚀性能与涂层中的非晶含量和孔隙率关系密切<sup>[10,16]</sup>。  $200,300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的孔隙率下降,腐蚀介质很难渗入涂层中,

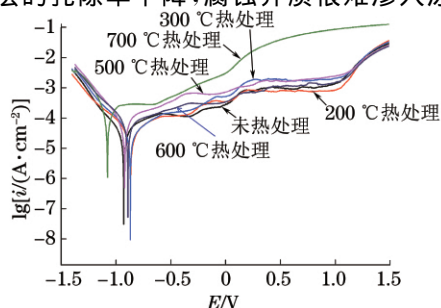


图 4 未热处理和不同温度热处理涂层在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of unheat-treated and heat-treated coatings at different temperatures in NaCl solution

因此涂层的自腐蚀电流密度降低,耐电化学腐蚀性能提高。  $500,600,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层中的非晶含量降低,晶体相的出现和结构弛豫使得非晶涂层的短程有序性与不均匀性提高,导致腐蚀微电池数目增加<sup>[24]</sup>,同时涂层中的孔隙率明显增加,腐蚀介质通过孔隙进入涂层深处,从而增加了腐蚀介质和基体的接触概率,导致涂层的自腐蚀电流密度增加,耐电化学腐蚀性能降低。

### 2.4 耐均匀腐蚀性能

由图 5 可以看出:浸泡 5 d 后,未热处理和  $300,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层表面迅速变暗,失去原有金属光泽,涂层表面生成点状黄褐色腐蚀产物;浸泡 31 d 后,未热处理涂层和  $300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层表面出现深黄褐色点状或线条状腐蚀区域,  $700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层表面腐蚀区域黄褐色加深,腐蚀产物呈片状覆盖在涂层表面。由图 6 可以看出:未热处理和  $200,300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层在浸泡过程中的单位面积质量损失不断增加,腐蚀速率逐渐降低,浸泡 31 d 后,未热处理和  $200,300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的单位面积质量损失分别为  $346,316,275\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $500,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层在浸泡 5 d 内的单位面积质量损失不断增加,浸泡时间为 5~31 d 时,单位面积质量损失增加的幅度很小,浸泡 31 d 后,  $500,700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的单位面积质量损失分别为  $134,85\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,分别为未热处理涂层的  $38.7\%, 24.6\%$ 。由此可知,热处理温度越高,单位面积质量损失越小,涂层的耐均匀腐蚀性能越好。

由图 7 可知:浸泡 31 d 后,未热处理和  $300\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层表面坑洼不平,形成絮状腐蚀产物,且存在少许裂纹;  $700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层表面的腐蚀产物结构均匀致密,形成了一层腐蚀产物膜,这在一定程度上阻止了外界腐蚀溶液与涂层的进一步接触,从而减缓腐蚀进程。由图 8 可知,未热处理涂层表面的腐蚀产物由  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{CrO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeOCl}$  等物相组成,  $700\ ^\circ\text{C}$  热处理涂层的腐蚀产物由  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{CrO}$ 、 $(\text{Cr},\text{Fe})_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeOCl}$ 、 $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$  等物相组成。

涂层在 NaCl 溶液中的耐均匀腐蚀性能依赖于牺牲阳极作用以及氧化膜的隔离作用<sup>[25]</sup>。NaCl 溶液中的  $\text{Cl}^-$  一方面通过降低涂层的氧化还原电位来扩大涂层的腐蚀范围,另一方面直接参与阳极反应<sup>[26]</sup>。结合腐蚀产物的 XRD 谱和 EDS 谱可以看出,经  $700\ ^\circ\text{C}$  热处理后涂层表面腐蚀产物中钼元素含量较高,且存在较多的含铬氧化物。钼元素可提高钝化层的稳定性,使涂层表面生成的钝化层更致

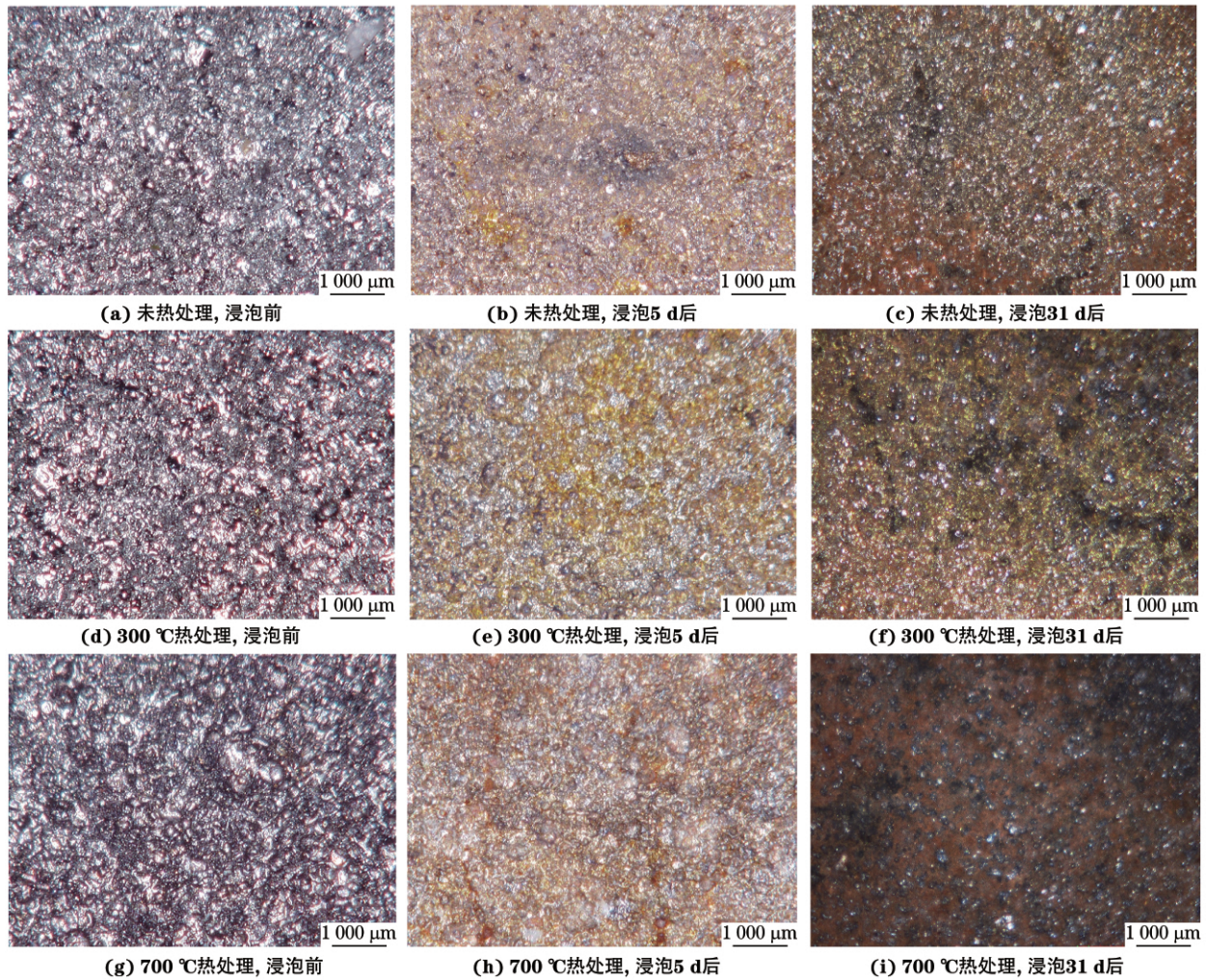


图5 未热处理和不同温度热处理涂层在 NaCl 溶液中浸泡不同时间前后的表面形貌

Fig.5 Surface morphology of unheat-treated (a-c) and heat-treated coatings at different temperatures (d-i) in NaCl solution before (a, d, g) and after immersion for different times (b-c, e-f, h-i)

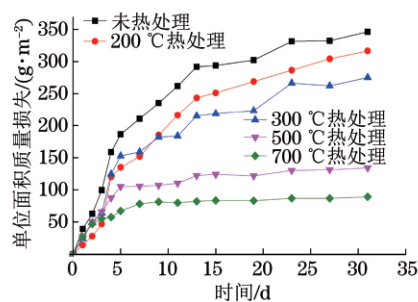


图6 未热处理和不同温度热处理涂层在 NaCl 溶液中浸泡后的单位面积质量损失随时间的变化曲线

Fig.6 Mass loss per unit area vs time curves of unheat-treated and heat-treated coatings at different temperatures after immersion in NaCl solution

密牢固,且钼元素含量的增加使得点蚀电位迅速提高,导致腐蚀速率降低<sup>[27]</sup>。在浸泡过程中,铬元素会形成稳定的高价  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化层并覆盖在涂层表面。 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化层的形成提高了涂层的自腐蚀电

位,减缓腐蚀过程。同时,结构致密的腐蚀产物堆积填充在涂层表面或缺陷处,对 NaCl 腐蚀介质起到屏蔽功能,阻碍其进一步接触基体<sup>[28]</sup>。因此,经热处理后,涂层在 NaCl 溶液中的耐均匀腐蚀性能提高。

由涂层的动电位极化曲线可知,700 °C 热处理涂层的自腐蚀电流密度较高,自腐蚀电位较低,电化学腐蚀倾向较大;但长期浸泡 31 d 后其单位面积质量损失反而较小,这是因为在浸泡过程中 700 °C 热处理涂层表面更易生成腐蚀产物,腐蚀产物堆积在涂层表面或孔隙处,阻止了腐蚀介质进一步与涂层接触,从而减小后续腐蚀速率。

### 3 结 论

(1) 随着热处理温度的升高,等离子喷涂  $\text{Fe}_{48}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{14}\text{C}_{15}\text{B}_6\text{Y}_2$  非晶合金涂层的非晶含量降低,热处理后涂层中的晶相主要包括  $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\text{Fe-Cr}$ 、

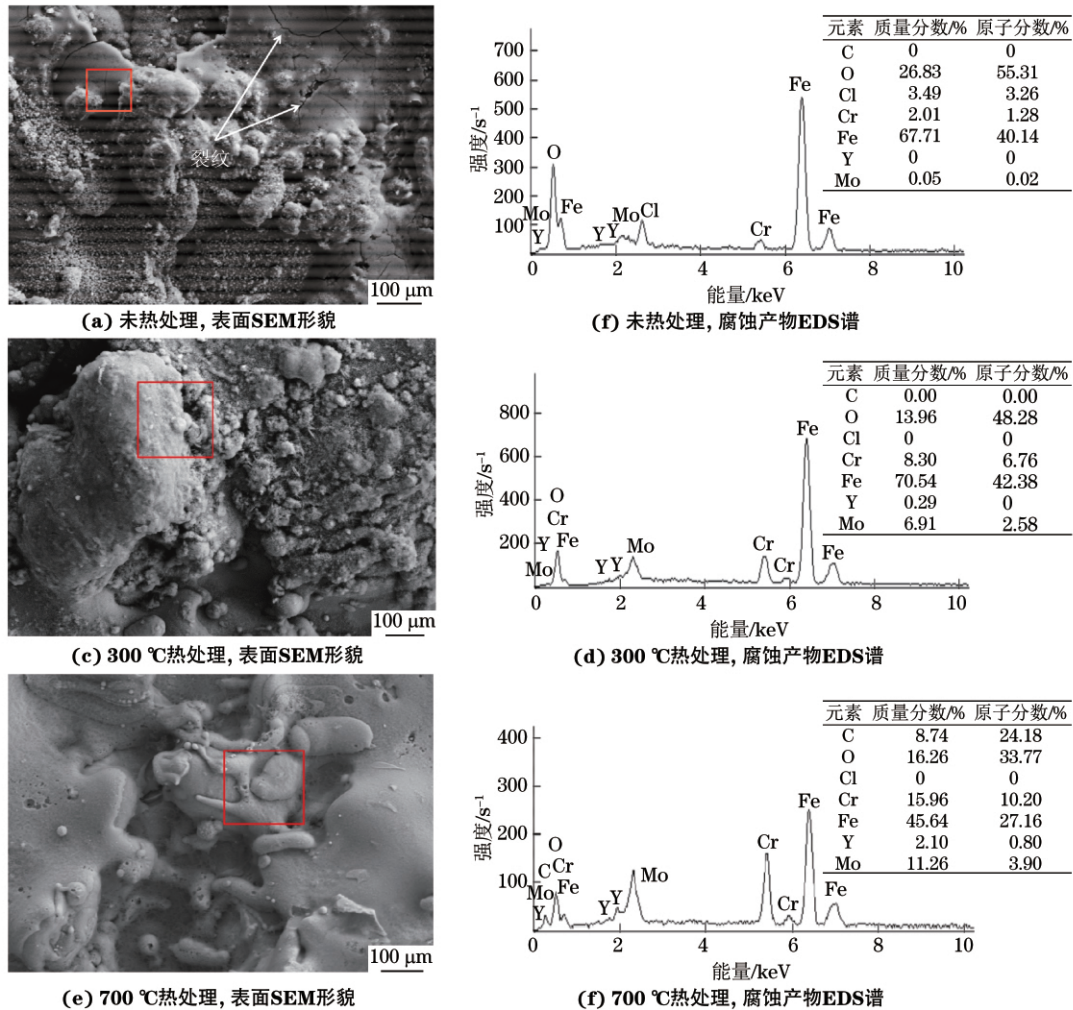


图7 未热处理和不同温度热处理涂层在 NaCl 溶液中浸泡 31 d 后的表面 SEM 形貌和腐蚀产物 EDS 谱  
Fig.7 Surface SEM morphology (a, c, e) and EDS spectra of corrosion products (b, d, f) of unheat-treated (a-b) and heat-treated coatings at different temperatures (c-f) after immersion in NaCl solution for 31 d

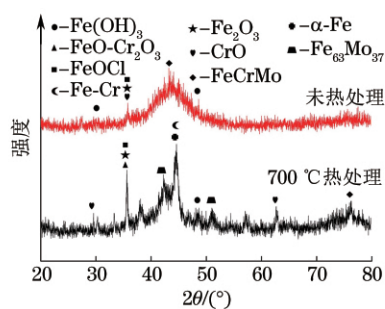


图8 未热处理和 700 °C 热处理涂层在 NaCl 溶液中浸泡 31 d 后的腐蚀产物 XRD 谱

Fig.8 XRD patterns of corrosion products of unheat-treated and heat-treated coatings at 700 °C after immersion in NaCl solution for 31 d

$\text{Fe}_{63}\text{Mo}_{37}$ 、 $\text{Fe}_3\text{C}$  等;随着热处理温度的升高,涂层的孔隙率先降低后增大,经 300 °C 热处理后涂层的孔隙率最低,且低于未热处理涂层的。

(2) 随着热处理温度的升高,涂层的自腐蚀电

流密度先减小后增大,经 300 °C 热处理后,自腐蚀电流密度最小,涂层的耐电化学腐蚀性能最好,且优于未热处理涂层的;经过热处理后,涂层在 NaCl 溶液中浸泡 31 d 后的单位面积质量损失减小,且热处理温度越高,单位面积质量损失越小,涂层的耐均匀腐蚀性能提高;与未热处理涂层相比,经 700 °C 热处理后涂层在浸泡过程中更易生成较多的腐蚀产物并堆积在涂层表面或孔隙处,形成了致密的产物层,阻挡腐蚀介质进一步与涂层接触,导致腐蚀速率和质量损失的降低。

参考文献:

- [1] MARCEAUX S, BRESSY C, PERRIN F X, et al. Development of polyorganosilazane-silicone marine coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2014, 77(11):1919-1928.
- [2] 宓宇晓,周泽华,王泽华,等.海工构件防生物吸附涂料的研究进展[J].材料导报, 2015, 29(3):35-39.

- [3] 吴涛,朱流,郇剑.热喷涂技术现状与发展[J].国外金属热处理,2005,26(4):1-6.
- [4] LUBORSKY F E.非晶态金属合金[M].柯成,唐与湛,罗阳,译.北京:冶金工业出版社,1999.
- [5] INOUE A, KONG F L, ZHU S L, et al. Production methods and properties of engineering glassy alloys and composites[J]. Intermetallics, 2015, 58:20-30.
- [6] KISHITAKE K, ERA H, OTSUBO F. Thermal-sprayed Fe-10Cr-3P-7C amorphous coatings possessing excellent corrosion resistance[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5(4):476-482.
- [7] CHOKETHAWAI K, MCCARTNEY D G, SHIPWAY P H. Microstructure evolution and thermal stability of an Fe-based amorphous alloy powder and thermally sprayed coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2):351-359.
- [8] 汪卫华.非晶态物质的本质和特性[J].物理学进展, 2013, 33(5):177-351.
- [9] 王绪威.非晶材料及应用[M].北京:高等教育出版社,1992.
- [10] 聂贵茂,黄诚,李波,等.铁基非晶合金涂层制备及应用现状[J].表面技术, 2017, 46(11):6-14.
- [11] JIAO J, LUO Q, WEI X, et al. Influence of sealing treatment on the corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings in HCl solution [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 714: 356-362.
- [12] ZHANG C, CHU Z, WEI F, et al. Optimizing process and the properties of the sprayed Fe-based metallic glassy coating by plasma spraying [J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 319:1-5.
- [13] 樊自拴,孙冬柏,俞宏英.等离子喷涂制备铁基非晶-纳米复合涂层[J].北京科技大学学报,2005(5):582-585.
- [14] 刘倩楠,刘咏,李飞.热处理对 Fe 基非晶合金涂层的相组成及摩擦磨损行为的影响[J].粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(5):586-591.
- [15] FU B Y, HE D Y, ZHAO L D. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Fe-based amorphous coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 480(2):422-427.
- [16] 陈智慧,严彪,李翔. FeSiBC 非晶纳米晶合金材料的腐蚀行为研究[J].金属功能材料, 2009, 16(6):1-4.
- [17] MAUER G, JARLIGO M O, REZANKA S, et al. Plasma spraying of ceramics with particular difficulties in processing [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(1/2): 30-37.
- [18] 吴子健.热喷涂技术与应用[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [19] KOBAYASHI A, YANO S, KIMURO H, et al. Fe-based metallic glass coatings produced by smart plasma spraying process[J]. Materials Science & Engineering: B, 2008, 148(1):110-113.
- [20] BARICCO M, ENZO S, BASER T A, et al. Amorphous/nanocrystalline composites analysed by the Rietveld method[J]. Journal of Alloys and Compounds,2010,495(2):377-381.
- [21] 姜超平.等离子喷涂铁基非晶涂层结构与性能研究[D].西安:长安大学,2015.
- [22] QIAO J H, JIN X, QIN J H, et al. A super-hard superhydrophobic Fe-based amorphous alloy coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2017,334:286-291.
- [23] 刘黎明,张超.热处理温度对大气等离子喷涂 316L 不锈钢涂层组织和性能的影响[J].表面技术,2018,47(8):155-161.
- [24] 李淑云.铁基非晶合金低温热处理过程中的微观结构演变及耐蚀性变化[D].济南:山东大学,2017.
- [25] 苏枫.高铝锌基合金涂层的耐蚀机理研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [26] 李洋.力学因素作用下铁基非晶涂层腐蚀行为实验研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [27] TAN M W, AKIYAMA E, HABAZAKI H, et al. The role of chromium and molybdenum in passivation of amorphous Fe-Cr-Mo-P-C alloys in deaerated 1 M HCl[J]. Corrosion Science, 1996, 38(12):2137-2151.
- [28] CHEN Y X, XU B S, YAN L, et al. Structure and sliding wear behavior of 321 stainless steel/Al composite coating deposited by high velocity arc spraying technique [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(3):603-609.

(上接第 24 页)

- [7] LORENZ W J, MANSFELD F. The determination of corrosion rates by electrochemical DC and AC methods[J]. Corrosion Science,1981, 21(9): 647-672.
- [8] 卢铁兵,肖荆,张波,等.超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J].超高压技术,2001,27(3):24-27.
- [9] 原徐杰,张俊喜,陈启萌,等.电场作用下金属 Zn 在薄液膜下的电极过程研究[J].腐蚀科学与防护技术,2014,26(3):197-204.
- [10] 戴念维.电场环境下碳钢大气腐蚀行为的研究[D].上海:上海电力大学,2016.
- [11] DAIN W, ZHANG J X, CHEN Q M, et al. Effect of the direct current electric field on the initial corrosion of steel in simulated industrial atmospheric environment [J]. Corrosion Science, 2015, 57(99):295-303.
- [12] 陈启萌.外加电场下金属的大气腐蚀过程研究[D].上海:上海电力大学,2015.
- [13] 任呈强,李丽,王煦,等.管线钢在干湿交替环境下的腐蚀[J].腐蚀与防护,2011,32(4):272-275.
- [14] 刘东雨,韦艳妮,张静,等. Al-0.32Mg-xSi 合金铸态组织中的 AlFeSi 相[J].热处理技术与装备, 2014, 35(2):10-14.
- [15] 徐佳佳.氯化物盐水溶液微观结构特征的理论计算研究[D].长沙:湖南大学,2013.