

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.08.005

建筑结构用 Q235 钢超声波辅助锌-锰系磷化处理及耐蚀性研究

王利艳^{1*}, 咸庆军²

(1. 河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为有效提高建筑结构常用 Q235 钢的耐蚀性, 采用锌-锰系磷化工艺对 Q235 钢进行表面处理, 并在磷化过程中引入超声波。测试并分析了不加超声波以及施加超声波获得的锌-锰系磷化膜的物相、厚度、腐蚀前后的形貌特征及耐蚀性, 同时探讨了施加超声波对锌-锰系磷化膜的影响机理。结果表明: 在一定范围内超声波功率提高有利于提高形核密度并缩短成膜诱导期, 在相同时间内获得缺陷少、较厚且表面致密性较好的锌-锰系磷化膜, 表现出良好的耐蚀性。但超声波功率过高的情况下成膜速度变慢, 锌-锰系磷化膜中缺陷增多, 导致耐蚀性变差。超声波功率为 120 W 获得的锌-锰系磷化膜表面致密性最好, 厚度达到 11.8 μm , 其耐蚀性明显优于不加超声波获得的锌-锰系磷化膜, 腐蚀电流密度相比于 Q235 钢降低了超过一个数量级, 能对 Q235 钢起到理想的防护作用。

关键词: 锌-锰系磷化处理; 建筑结构钢; 超声波; 耐蚀性

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Study on zinc-manganese phosphating treatment and corrosion resistance of Q235 steel for construction structure

Wang Liyan^{1*}, Xian Qingjun²

(1. Henan Technical College of Construction, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to effectively improve the corrosion resistance of Q235 steel which is commonly used in construction structures, the surface treatment of Q235 steel was carried out by zinc-manganese phosphating process, and ultrasonic was introduced in the phosphating process. The phase, thickness, morphology characteristics before and after corrosion and the corrosion resistance of zinc-manganese phosphating films obtained with or without ultrasonic were tested and investigated, and the influence mechanism of ultrasonic on zinc-manganese phosphating film was also discussed. The results show that an increase in ultrasonic power within a certain range is beneficial for increasing the nucleation density and shortening the film induction period. Within the same time, the zinc-manganese phosphating film with fewer defects, higher thickness and better surface densification can be obtained, showing good corrosion resistance. However, when the ultrasonic power is too high, the film forming speed slows down, and the defects in zinc-manganese phosphating film increase, resulting in poor corrosion resistance. The zinc-manganese phosphating film obtained with ultrasonic power of 120 W has the best

收稿日期: 2023-04-03

修回日期: 2023-04-20

*通信作者: 王利艳(1981—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 土木工程材料、钢结构腐蚀与防护技术等, email: Wang_45edu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708181)

surface densification and the maximum thickness of 11.8 μm , its corrosion resistance is obviously better than that of the zinc-manganese phosphating film without ultrasonic. The corrosion current density is more than one order of magnitude lower than that of Q235 steel, which can play an ideal protective effect on Q235 steel.

Keywords: zinc-manganese phosphating treatment; steel for construction structure ; ultrasonic; corrosion resistance

磷化处理在工业中应用广泛,磷化膜作为一种不导电且与基体结合紧密的功能性膜层,能有效抑制钢铁、铝、镁及其合金等材料的腐蚀,起到较好的防护作用^[1-2]。然而,常规磷化膜的耐蚀性不理想,从工程应用角度,采取措施提高磷化膜的耐蚀性具有重要意义。

研究发现,除改进磷化液成分和优化电沉积工艺参数以外^[3-6],在磷化过程中引入磁场、超声波等特殊物理场同样是提高磷化膜耐蚀性的有效途径。宋辉等^[7]在AZ91D镁合金磷化过程中引入方向旋转的磁场,发现外加磁场促进形成较均匀且致密的磷化膜,表现出良好的耐蚀性。朱亮等^[8]在AZ31镁合金磷化过程中引入垂直方向磁场,发现磁场产生的特殊效应显著促进磷化膜形成并且有助于改善磷化膜表面致密性,其耐蚀性优于铬酸盐封闭处理后的磷化膜。邵红红等^[9]研究发现,在磷化过程中引入超声波促进成膜完整并且较快成膜,磷化膜的致密性改善,耐蚀性明显提高。Sheng等^[10]研究发现,引入超声波使磷化膜中孔洞减少,表面变得致密,有助于提高磷化膜的耐蚀性。朱立群等^[11]研究发现,在A3钢磷化过程中引入超声波起到较强的促进作用,获得完整且较为致密的磷化膜,与常规磷化膜相比表现出良好的耐蚀性。

虽然在磷化过程中引入特殊物理场能获得较好的效果,但是这方面研究还不够深入、完善,目前鲜见超声波功率或超声波频率等重要工艺参数对磷化膜性能影响的报道,有必要补充。本文选取建筑结构常用的Q235钢作为研究对象,在Q235钢磷化过程中引入超声波以期进一步提高锌-锰系磷化膜的耐蚀性。通过改变超声波功率探讨施加超声波对锌-锰系磷化膜的影响机理,从而获得耐蚀性优异的锌-锰系磷化膜,既是对磷化研究体系的补充和完善,也为锌-锰系磷化膜工程应用提供技术支持。

1 实验

1.1 实验材料

基体为40 mm×28 mm×1 mm的Q235钢板,化学组分(质量分数)如下:C 0.20%、Mn 1.40%、Si 0.35%、P 0.05%、S 0.05%,余量为Fe。首先用800#、2000#金相砂纸逐级打磨试样,表面光滑后浸在丙酮中超声波振荡除油,然后使用蒸馏水冲洗,并在预热到60℃、45 g/L的氢氧化钠溶液中浸泡8 min彻底除油。最后在10%盐酸中浸泡1 min活化,使用蒸馏水冲洗,接着吹干后放入恒温干燥箱中备用。

1.2 超声波辅助锌-锰系磷化处理

采用磷酸二氢锰、硝酸锰和硝酸锌作为主盐,硝酸镍和氯酸钠作为辅助促进剂配制磷化液,溶液主要成分为:磷酸二氢锰55 g/L、硝酸锰15 g/L、硝酸锌30 g/L、硝酸镍1 g/L、氯酸钠6 g/L,盛放在烧杯中。将烧杯置于UC-7480型超声波清洗机的水浴槽中,调控磷化液温度为63℃左右,然后将预处理后Q235钢试样完全浸在磷化液中进行超声波辅助锌-锰系磷化处理。改变超声波功率(40~200 W)开展5组实验,获得不同锌-锰系磷化膜,每组实验时间均为20 min。

1.3 形貌表征与性能测试

采用Ultima IV型X射线衍射仪获得不同锌-锰系磷化膜的XRD谱图,参数设置如下:扫描角度在15~85°范围内,扫描速率为4°/min,步长0.02°。将测试数据导入Jade软件中,通过比对标准PDF卡片对不同锌-锰系磷化膜进行物相分析。

采用CT-120型测厚仪测量不同锌-锰系磷化膜的厚度。为了降低测量误差,在每个试样表面任意测3个点,结果取平均值。

依照GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》进行盐雾实验,配制5%氯化钠溶液作为腐蚀介质,环境温度维持在35±2℃,连续喷雾60 h。

实验结束后使用蒸馏水清洗试样,吹干后采用EV018型扫描电镜观察不同锌-锰系磷化膜腐蚀前后的形貌。

采用CHI660D型电化学工作站模拟电化学腐蚀实验,将三电极体系在3.5%氯化钠溶液中浸泡一段时间,待开路电位稳定后开始测试极化曲线。工作电极为不同锌-锰系磷化膜试样,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。极化曲线的扫描速率为1 mV/s,电位范围-250 mV~+250 mV(相对于开路电位)。采用塔菲尔外推法对极化曲线进行拟合,得到腐蚀电位和腐蚀电流密度,并根据公式(1)算出不同锌-锰系磷化膜对Q235钢基体的防护效率 η 。

$$\eta = \frac{J_{\text{matrix}} - J_{\text{film}}}{J_{\text{matrix}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: J_{matrix} 表示Q235钢基体的腐蚀电流密度; J_{film} 表示不同锌-锰系磷化膜的腐蚀电流密度,单位均为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

依照GB/T 6807—2001《钢铁工件涂装前磷化处理技术条件》配制硫酸铜溶液进行点滴实验,主要成分为:硫酸铜41 g/L、氯化钠35 g/L、0.1 mol/L的盐酸13 mL/L。使用注射器取溶液滴在试样表面,液滴完全变色经历的时间定义为锌-锰系磷化膜的耐点滴时间。结合盐雾实验结果、点滴实验结果以及极化曲线拟合结果,评价不同锌-锰系磷化膜的耐蚀性。

2 结果与讨论

2.1 不同锌-锰系磷化膜的物相和厚度

图1所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜的XRD谱图。根据XRD谱图分析得知,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜以及施加超声波获得的锌-锰系磷化膜均含有 $\text{Mn}_2\text{Zn}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相和 $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相,这表明超声波对锌-锰系磷化膜的物相基本无影响。其中, $\text{Mn}_2\text{Zn}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相和 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相是磷化液中磷酸二氢锰多级离解生成的 Mn^{2+} 、 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 与 Zn^{2+} 结合以及 Zn^{2+} 与 PO_4^{3-} 结合形成,都在Q235钢表面沉淀结晶。 $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相是基体溶解生成的 Fe^{2+} 与磷化液中的 Zn^{2+} 及 PO_4^{3-} 结合形成,也在Q235钢表面沉淀结晶^[12]。

图2所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰

系磷化膜的厚度。

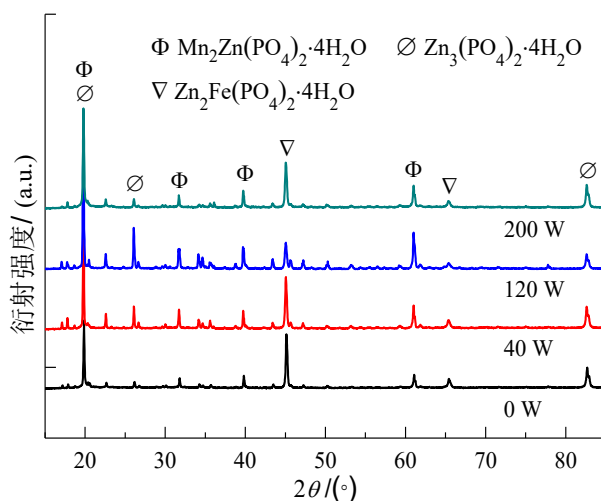


图1 改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜XRD谱图
Fig.1 XRD patterns of different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power

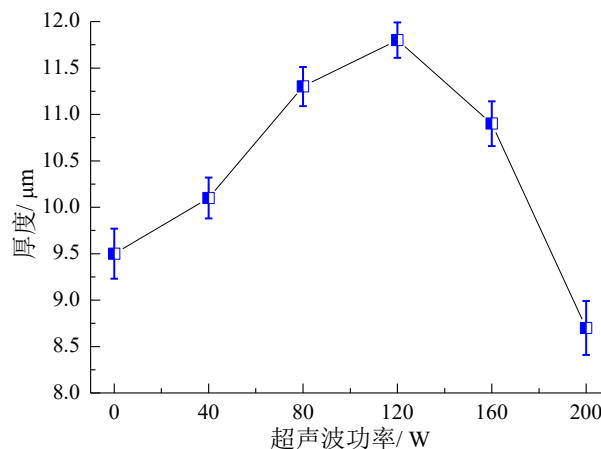


图2 改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜的厚度
Fig.2 Thickness of different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power

由图2可知,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜厚度为9.5 μm ,而施加超声波获得的锌-锰系磷化膜厚度在8.7~11.8 μm 范围内,并且随着超声波功率提高呈现先增加后降低的趋势,这表明在一定范围内超声波功率提高有利于获得较厚的锌-锰系磷化膜。超声波在锌-锰系磷化膜形成及生长过程中的作用机理主要体现在:超声波在磷化液中传递产生空化效应引起微射流和冲击波,促进磷化液分散的同时清洁Q235钢表面增强活性,使得活性晶核数量增多,形核密度提高^[13-14]。在一定范围内超声波功率提高有效提高了形核密度,从而缩短成膜诱导期,

锌-锰系磷化膜较快形成,因此在相同时间内获得更厚的锌-锰系磷化膜。超声波功率为 120 W 获得的锌-锰系磷化膜厚度达到 $11.8\text{ }\mu\text{m}$,与不加超声波获得的锌-锰系磷化膜厚度相比增加约 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。然而,当超声波功率超过 120 W,锌-锰系磷化膜的厚度反而降低。其原因是超声波功率过高的情况下产生极其强烈的空化效应,影响磷化液中离子浓度积,导致

磷化反应速度减慢,成膜诱导期延长,锌-锰系磷化膜的形成速度变慢,因此在相同时间内获得的锌-锰系磷化膜变薄。

2.2 不同锌-锰系磷化膜腐蚀前后的形貌

图 3(a)所示为 Q235 钢基体的原始形貌,图 3(b)~3(g)所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜的原始形貌。

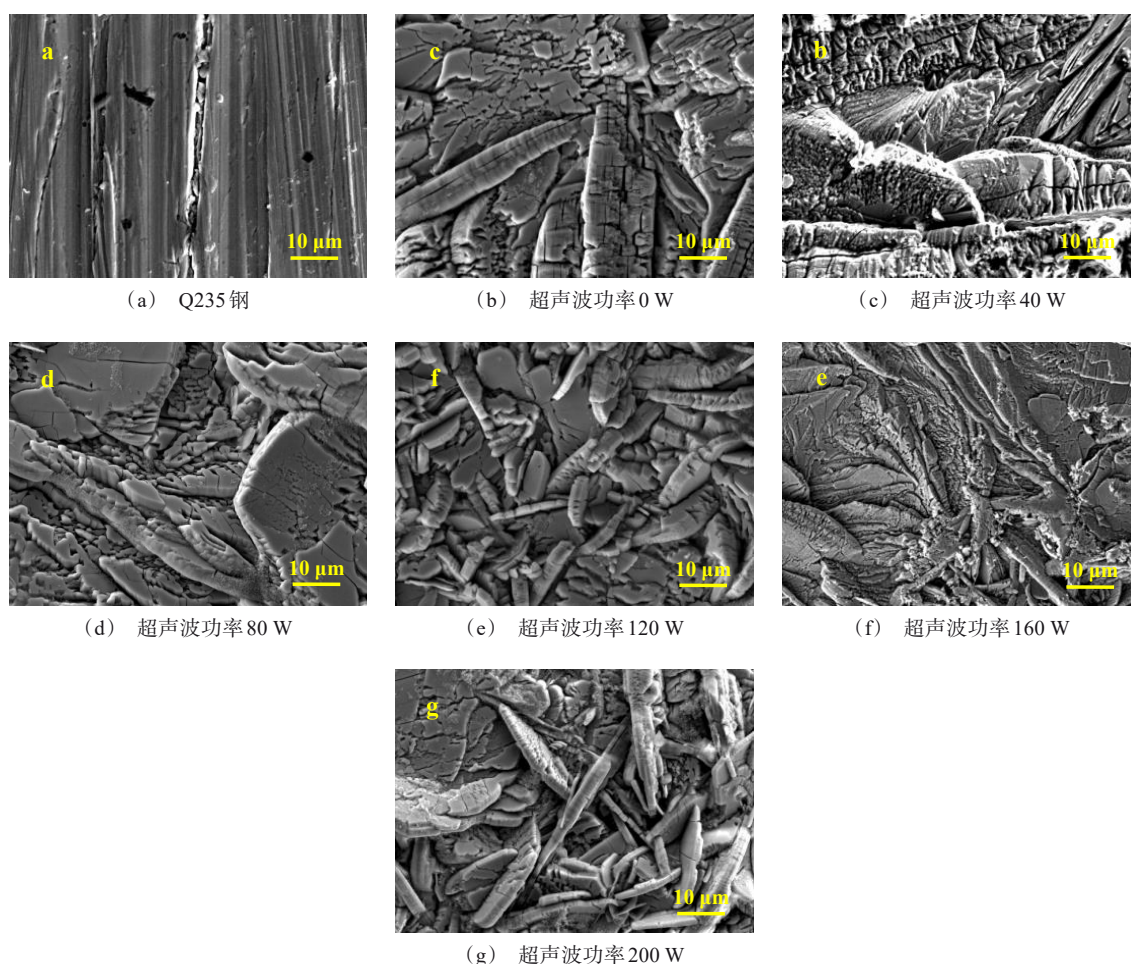


图 3 Q235 钢以及改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜的原始形貌

Fig.3 Original morphology of Q235 steel and different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power

由图 3 可以看出,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜晶粒呈不规则形态,在晶粒表面存在裂纹,并且晶粒无序堆积形成一些空隙。这些裂纹和空隙将成为腐蚀介质侵入锌-锰系磷化膜内部继而扩散诱发腐蚀的通道。对比图 3(b)~3(e)可知,施加超声波获得的锌-锰系磷化膜表面致密性相比于不加超声波获得的锌-锰系磷化膜有所改善。这是由于在一

定范围内超声波功率提高产生空化效应引起的微射流增强 Q235 钢表面活性,使活性晶核数量增多,并且在形核过程中还可能产生新的晶核,从而明显提高了形核密度。另外,在一定范围内超声波功率提高引起强烈的冲击波促进磷化液分散,有利于均匀成膜,从而减少锌-锰系磷化膜中的缺陷。新形成的较大晶粒还会被强烈冲击波剪切成碎块,弥散在晶

粒间可以起到填补空隙的作用,从而改善锌-锰系磷化膜表面致密性。如图3(e)所示,超声波功率为120 W获得的锌-锰系磷化膜表面致密性最好。然而,当超声波功率超过120 W,锌-锰系磷化膜表面凹凸不平程度加重,晶粒表面裂纹增多并且晶粒间的空隙深度增加,致密性逐渐变差。其原因是超声波功率过高的情况下产生极其强烈的空化效应,导致基体周围温度升高,可能打破磷酸盐水解反应的平衡状态,电离出的锌离子、磷酸根和亚铁离子浓度过饱和。由于磷化液的稳定性变差,磷酸根与金属

离子结合在Q235钢表面沉淀结晶受阻碍,导致形核密度降低,因此锌-锰系磷化膜的均匀性变差。超声波功率过高的情况下产生极其强烈的冲击波还可能剪切击碎一些小晶粒,同时造成较大晶粒在生长过程中裂纹增多,从而导致锌-锰系磷化膜中的缺陷增多,表面致密性变差。

图4(a)所示为Q235钢盐雾腐蚀60 h后的形貌,图4(b)~4(g)所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜盐雾腐蚀60 h后的形貌。

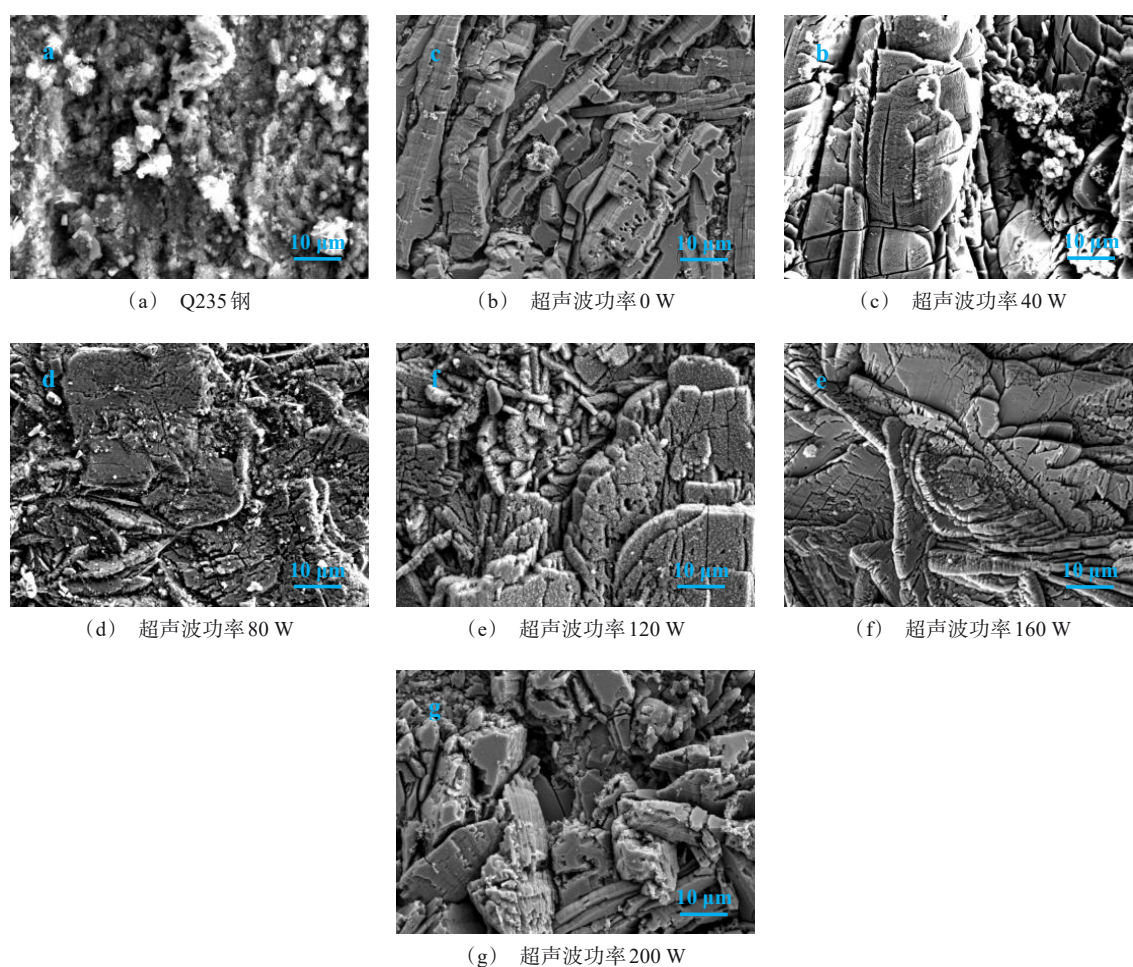


图4 Q235钢以及改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜盐雾腐蚀60 h后的形貌

Fig.4 Morphology of Q235 steel and different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power after salt spray corrosion for 60 h

从图4(a)看出,Q235钢盐雾腐蚀60 h后表面几乎被团絮状和颗粒状的腐蚀产物所覆盖,腐蚀程度很严重。从图4(b)看出,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜盐雾腐蚀60 h后晶粒表面的裂纹增多,晶粒

间的空隙也加深,还形成一些团絮状和颗粒状的腐蚀产物覆盖了局部区域。对比图4(b)与4(c)~4(e)可知,施加超声波获得的锌-锰系磷化膜腐蚀程度相比于不加超声波获得的锌-锰系磷化膜减轻,形成的

腐蚀产物少。尤其是超声波功率为 120 W 获得的锌-锰系磷化膜,盐雾腐蚀 60 h 后表面仍然较均匀致密,附着少量腐蚀产物,晶粒间的空隙也未因腐蚀作用明显加深和扩展。这是由于在一定范围内超声波功率提高有利于均匀成膜并减少锌-锰系磷化膜中的缺陷,促使形成表面致密性较好的锌-锰系磷化膜,阻挡腐蚀介质渗透能力增强,从而增大腐蚀过程阻力并延缓腐蚀发展,因此腐蚀程度减轻。从图 4(f)和 4(g)看出,超声波功率为 160 W 和 200 W 获得的锌-锰系磷化膜腐蚀程度明显加重,晶粒间的空隙由于腐蚀作用加深和扩展,并且表面凹凸不平程度进一步加重。由于超声波功率过高情况下获得的锌-锰系磷化膜中存在较多缺陷,表面凹凸不平较严重与腐蚀介质接触面积大,加之厚度降低阻挡腐蚀介质能力下降,导致腐蚀介质容易沿着缺陷处渗透侵蚀,从而加重锌-锰系磷化膜的腐蚀程度。

2.3 不同锌-锰系磷化膜的耐蚀性

2.3.1 极化曲线分析

图 5 所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜在 3.5% 氯化钠溶液中的极化曲线,表 1 列出极化曲线拟合结果。腐蚀电位越正且腐蚀电流密度越低,表明磷化膜的耐蚀性越好^[15-18]。结合图 5 和表 1 可知,Q235 钢的腐蚀电位最负(-587 mV)且腐蚀电流密度最高(82.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$),不加超声波获得的锌-锰系磷化膜的腐蚀电位相比于 Q235 钢正移了 55 mV,腐蚀电流密度的降低幅度不大。而施加超声波获得的锌-锰系磷化膜的腐蚀电位在(-559 mV~-473 mV)范围内,腐蚀电流密度相比于 Q235 钢有不同程度的降低。随着超声波功率从 40 W 提高到 120 W,锌-锰系磷化膜的耐蚀性逐步提高。这是由于在一定范围内超声波功率提高有利于均匀成膜并减少锌-锰系磷化膜中的缺陷,形成表面致密性较好的锌-锰系磷化膜,有效的阻挡腐蚀介质渗透同时减少与腐蚀介质的接触面积,增大腐蚀过程阻力从而延缓腐蚀发展。超声波功率为 120 W 获得的锌-锰系磷化膜具有最正的腐蚀电位-473 mV 和最低的腐蚀电流密度 7.35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,表现出优异的耐蚀性,其腐蚀电流密度相比于 Q235 钢降低了超过一个数量级,相比于不加超声波获得的锌-锰系磷化膜也明显降低。

然而,随着超声波功率从 120 W 提高到 200 W,锌-锰系磷化膜的腐蚀电位负移,伴随着腐蚀电流密

度从 7.35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 增加到 47.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,耐蚀性明显变差。尤其是超声波功率为 200 W 获得的锌-锰系磷化膜,其腐蚀电流密度达到 47.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$,耐蚀性甚至不如不加超声波获得的锌-锰系磷化膜。其原因是超声波功率过高的情况下导致锌-锰系磷化膜中的缺陷增多,并且表面凹凸不平程度加重,致密性变差,阻挡腐蚀介质能力下降。腐蚀介质容易沿着晶粒间的空隙侵入锌-锰系磷化膜内部,造成较强的局部腐蚀倾向,继而腐蚀反应过程加快,因此锌-锰系磷化膜的耐蚀性变差。

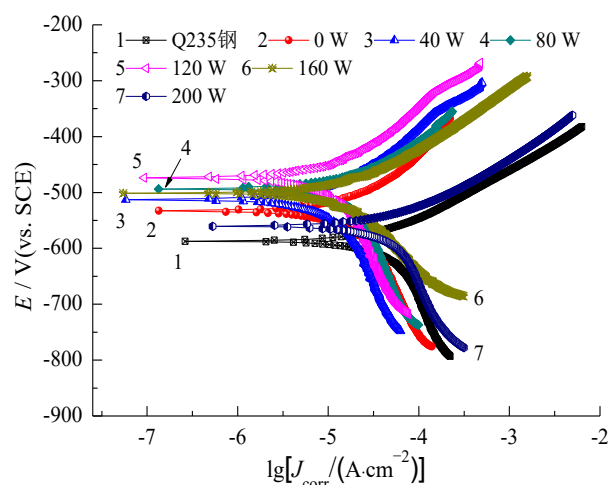


图 5 改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜在 3.5% 氯化钠溶液中的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power in 3.5% sodium chloride solution

表 1 极化曲线拟合结果

Tab.1 Fitting results of polarization curves

试样	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Q235 钢	-587	82.6
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 0 W)	-532	30.5
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 40 W)	-513	18.9
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 80 W)	-492	10.4
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 120 W)	-473	7.35
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 160 W)	-501	13.6
锌-锰系磷化膜 (超声波功率 200 W)	-559	47.8

图6所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜对Q235钢基体的防护效率。由图6可知,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜对Q235钢基体的防护效率较低,为63.1%。施加超声波获得的锌-锰系磷化膜对Q235钢基体的防护效率在42.1%~91.1%范围内,并且随着超声波功率提高呈现先升高后降低的趋势。由于在一定范围内超声波功率提高有利于形成表面致密性较好的锌-锰系磷化膜,有效阻挡了腐蚀介质渗透和扩散,表现出较弱的腐蚀倾向,从而对Q235钢基体起到良好的防护作用。然而,当超声波功率超过120 W,由于超声波功率过高的情况下产生极其强烈的空化效应导致锌-锰系磷化膜中的缺陷增多,表面致密性变差,阻挡腐蚀介质渗透能力下降,锌-锰系磷化膜表现出较强的局部腐蚀倾向,因此对Q235钢基体的防护作用减弱。

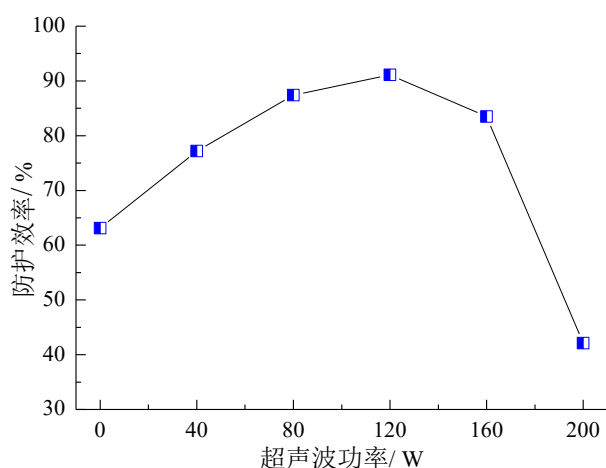


图6 改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜对Q235钢基体的防护效率

Fig.6 Protection efficiency of different zinc-manganese phosphating films on Q235 steel substrate obtained by changing ultrasonic power

2.3.2 耐点滴时间分析

图7所示为改变超声波功率获得的不同锌-锰系磷化膜的耐点滴时间。由图7可知,不加超声波获得的锌-锰系磷化膜的耐点滴时间为176 s,而施加超声波获得的锌-锰系磷化膜的耐点滴时间在152~228 s范围内。通常认为耐点滴时间越长,磷化膜的耐蚀性越好^[19-21]。超声波功率为120 W获得的锌-锰系磷化膜的耐点滴时间达到228 s,相比于不加超声波获得的锌-锰系磷化膜的耐点滴时间延长了约50 s,其耐蚀性最好,与盐雾实验结果和极化

曲线分析结果一致。结合上述分析,在一定范围内超声波功率提高有利于均匀成膜,并减少锌-锰系磷化膜中的缺陷,形成表面致密性较好的锌-锰系磷化膜,有效阻挡了腐蚀介质渗透,锌-锰系磷化膜的局部腐蚀倾向弱,因此耐点滴时间长。然而,超声波功率过高的情况下造成锌-锰系磷化膜表面致密性变差,晶粒表面的裂纹增多并且晶粒间的空隙深度增加,阻挡腐蚀介质渗透能力下降,表现出较强的局部腐蚀倾向,因此耐点滴时间短。

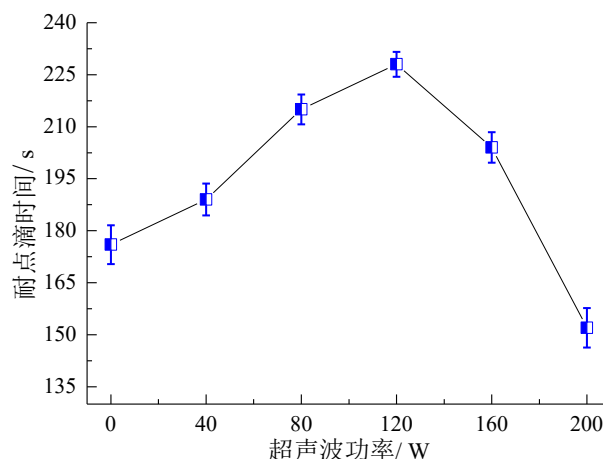


图7 不同超声波功率下锌-锰系磷化膜的耐点滴时间

Fig.7 Dripping-resistant time of different zinc-manganese phosphating films obtained by changing ultrasonic power

3 结论

(1)在建筑结构常用的Q235钢表面制备的锌-锰系磷化膜晶粒呈不规则形态,存在一些空隙,其物相组成为 $\text{Mn}_2\text{Zn}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 相,能对Q235钢基体起到一定的防护作用。磷化过程中施加超声波对锌-锰系磷化膜的物相、厚度、形貌特征及耐蚀性造成一定影响,在一定范围内超声波功率提高能获得缺陷少、较厚且表面致密性较好的锌-锰系磷化膜,表现出良好的耐蚀性。但超声波功率过高的情况下锌-锰系磷化膜厚度变薄,而且缺陷增多,导致耐蚀性变差。

(2)超声波功率为120 W获得的锌-锰系磷化膜表面致密性最好,厚度达到11.8 μm ,具有最正的腐蚀电位-473 mV、最低的腐蚀电流密度7.35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和最长的耐点滴时间228 s,该磷化膜对Q235钢基体的防护效率达到91.1%,并且经过60 h盐雾实验

后腐蚀程度最轻,能起到理想的防护作用,适用于建筑结构钢防腐蚀。

参考文献

- [1] Thomas R, Alphin J J, Unock A, et al. A detailed study on the enhanced anti-corrosion properties of nano silicon dioxide additive influencing calcium modified zinc phosphate coating on mild steel[J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2022, 16(3): 207-225.
- [2] Chen X. Effect of manganese phosphating on properties of 45 steel used for gear production[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(3): 220326.
- [3] 张书弟, 何欢欢, 许宇恒, 等. AZ91D 镁合金锰系磷酸盐转化膜的研究: 磷化液各组分及含量对耐蚀性能的影响[J]. *材料导报*, 2022, 36(S1): 354-359.
- [4] 张伟华, 张颖超, 孙伟, 等. 柠檬酸对建筑用 16Mn 钢磷化膜物相与耐蚀性的影响[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(6): 21-25.
- [5] 马冬威, 史秋月, 袁国民, 等. 工艺参数对 38MnVS 钢锰系磷化膜表面形貌和耐蚀性的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(8): 221-225.
- [6] 许兵, 司晓卉, 张立祥. 40Cr 钢表面锌-锰系磷化膜的制备与耐腐蚀性能研究[J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(6): 13-17.
- [7] 宋辉, 赵明, 王学良, 等. 旋转磁场对 AZ91D 镁合金表面磷化处理的影响[J]. *电镀与精饰*, 2015, 37(7): 1-4, 14.
- [8] 朱亮, 赵明, 高福勇. 外加磁场下 AZ31 镁合金磷化膜结构及耐蚀性研究[J]. *表面技术*, 2011, 40(4): 85-88.
- [9] 邵红红, 陈婷婷, 朱姿虹, 等. 超声场下磷化时间对 NiTi 合金表面磷化膜形貌及性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 23-28.
- [10] Sheng M Q, Wang C, Zhong Q D, et al. Ultrasonic irradiation and its application for improving the corrosion resistance of phosphate coatings on aluminum alloys[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(1): 21-25.
- [11] 朱立群, 王喜眉, 王建华. 超声波作用下常温磷化工艺的研究[J]. *航空学报*, 2007, 28(z1): 168-173.
- [12] 胡国辉. 金属磷化工艺技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] 胡贵芳, 胡秀英, 宋皖杰, 等. 超声波作用下钢铁常温磷化影响因素研究[J]. *电镀与精饰*, 2019, 41(5): 9-15.
- [14] Sun X X, Liu M Y, Song J C, et al. Corrosion behaviors of hybrid ultrasonic phosphating coatings on carbon steel in simulated 150 °C hot-dry-rock fluids[J]. *Geothermics*, 2020, 86: 101807.
- [15] 石文龙, 赵野, 吴青华, 等. Q235 钢表面涂覆含碳酸钙和石墨烯无机富锌涂层的耐蚀性能[J]. *材料保护*, 2022, 55(8): 8-15.
- [16] Liu W L, Wang Q Y, Hao J, et al. Corrosion resistance and corrosion interface characteristics of Cr-alloyed rebar based on accelerated corrosion testing with impressed current[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 22: 2996-3009.
- [17] 徐立, 周学杰, 郑鹏华, 等. Q235 钢在武汉土壤中的腐蚀行为研究[J]. *材料保护*, 2022, 55(2): 74-80, 98.
- [18] Jin S Y, Ma X C, Wu R Z, et al. Effect of carbonate additive on the microstructure and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coating on Mg-9Li-3Al alloy[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(7): 1453-1463.
- [19] 孟学林, 梁金禄, 尹丽. 钼酸钠对 AZ31B 镁合金磷化膜耐蚀性能的影响[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(8): 1-6.
- [20] 周殿买, 姜磊, 王美婷, 等. $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 浓度及硅酸盐封孔处理对高铁枕梁用 Mg-Zn-Y-Ca 合金表面钙系磷化膜的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2021, 41(6): 849-856.
- [21] 吕芳, 谷娜. 化工管道连接法兰磷化工艺条件优化及磷化膜的耐蚀性[J]. *电镀与精饰*, 2022, 44(3): 59-63.