

超声喷丸对变形镁合金 AZ80M 腐蚀行为的影响

杜娟¹ 邓森² 李杰³ 陈云³

(1.武汉交通职业学院智能制造学院;2.天华化工机械及自动化研究设计院有限公司;
3.武汉理工大学交通与物流工程学院)

摘 要 采用超声喷丸工艺对 AZ80M 镁合金板材进行表面纳米化处理。结果表明,超声喷丸使 AZ80M 镁合金表层的晶粒尺寸显著减小,距喷丸表面 50 μm 以内为大变形区域,存在部分微裂纹;距喷丸表面 50~150 μm 范围内为晶粒细化区域,其组织致密且无明显缺陷。超声喷丸+抛光的 AZ80M 试样耐蚀性显著提高,开路电势为-1.551 V、自腐蚀电位为-1.481 V、钝化阻抗值 R_c 达 1 772 Ω·cm²。浸泡腐蚀试验表明,超声喷丸+抛光的 AZ80M 试样腐蚀速率明显降低,腐蚀形貌更均匀,腐蚀防护效果更好。

关键词 超声喷丸;AZ80M;显微组织;腐蚀行为

中图分类号 TG146.22;TG174 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ultrasonic Shot Peening on Corrosion Behavior of AZ80M Alloy

Du Juan¹, Deng Sen², Li Jie³, Chen Yun³

(1.School of Intelligent Manufacture, Wuhan Technical College of Communications;
2.Tianhua Chemical Machinery and Automation Institute Co., Ltd.;
3.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology)

Abstract: AZ80M magnesium alloy plates were processed by ultrasonic shot peening. The results reveal that grain size on the surface layer of AZ80M magnesium alloy is significantly reduced. Within 50 μm from the peening surface, severe plastic deformation occurs with some micro cracks. In the range of 50~150 μm from the peening surface, grain refinement is observed, the structure is dense and free of apparent defects. The corrosion resistance of sample after ultrasonic shot peening is significantly improved, with an open-circuit potential of -1.551 V, a self-corrosion potential of -1.481 V, and a passivation impedance R_c up to 1 772 Ω·cm². Furthermore, immersion corrosion test indicates that the corrosion rate is significantly reduced with more uniform corrosion morphology and better corrosion protection.

Key Words: Ultrasonic Shot Peening, AZ80M, Microstructure, Corrosion Behavior

镁合金具有阻尼减振强、比强度高、屏蔽电磁干扰 等特点,在交通运输、航空航天等领域展现出良好的应

收稿日期:2022-09-12;修改稿收到日期:2022-11-23
第一作者简介:杜娟,女,1979 年出生,副教授,武汉(430065),E-mail:278096018@qq.com
通信作者:陈云,男,1981 年出生,教授,武汉(430063),E-mail:chenyunhbwh@163.com
引用格式:杜娟,邓森,李杰,等. 超声喷丸对变形镁合金 AZ80M 腐蚀行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):669-675.
DU J, DENG S, LI J, et al. Effects of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of AZ80M alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Al-
loys, 2023, 43(5):669-675.

[4] 许诺,王立昕,高瑜,等. 铝青铜合金的研究与发展[J]. 铸造工程, 2021(2): 11-15.

[5] 吕玉廷,王立强,毛建伟,等. 镍铝青铜合金(NAB)的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2016, 45(6): 815-820.

[6] LIN G, LEI Y, ZENG J, et al. A comparative study on effects of special casting processes on microstructural development in Cu-10Al-4Fe-4Ni alloy[J]. Journal of Materials Research 2013, 28: 2 874-2 880.

[7] LIN G, WANG H, WEI Y, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of nickel-aluminum bronze fabricated by centrifugal casting[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31: 3 832-3 840.

[8] 应俊龙,巢昺轩,李智勇.热处理工艺对离心铸造 QAl10-4-4 铝青铜组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021, 41(12): 1 568-1 571.

[9] 路阳,李振,李文生,等. 微量元素 Fe 对高铝铜合金腐蚀行为的影响[J]. 材料热处理技术,2008, 37(10): 33-36.

[10] 张赫栋,刘斌,石泽耀,等. 镍铝青铜合金海水腐蚀行为研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报,2021, 42(1): 25-33.

[11] 于辉,董飒英,黄国胜,等. 铝青铜在 3.5% NaCl 溶液中的脱成份腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2003, 23(6): 345-349.

[12] 魏笑,刘海霞,陈杰,等. NaCl 溶液质量分数和空蚀时间对被腐蚀铝青铜空蚀的影响[J].中国有色金属学报,2021, 31(2): 499-509.

(编辑:刘卫)

用前景^[1-2]。但镁合金化学活性强、电位平衡点低,表面腐蚀膜比较疏松,对基材的保护效果差,导致镁合金的耐腐蚀能力差,严重阻碍了镁合金的进一步应用^[3]。

对镁合金表面进行处理是提高其耐腐蚀性能的一种重要途径。超声喷丸作为一种金属材料自纳米化表面处理手段,对镁合金腐蚀行为的影响也受到广泛关注。研究表明,超声喷丸处理可实现金属材料表面的自纳米化,在材料表层形成具有纳米晶粒的细化层,细化层组织致密、晶界密集,能显著提高材料的耐腐蚀性能^[4-5]。KAKIUCHI T 等^[6]对 AZ61 镁合金进行了二次超声喷丸处理,发现两次超声喷丸都会增加材料表面的硬度和残余压应力,第二次超声喷丸会降低第一次处理后的表面粗糙度,从而实现疲劳强度的稳定提高。PERAL L B 等^[7]研究了不同温度条件下超声喷丸对 AZ31 镁合金腐蚀性能的影响,发现超声喷丸导致的表面粗糙度变化对 AZ31 镁合金腐蚀行为的影响最大,但对于粗糙度相差不大的试样,晶粒尺寸变化也会对腐蚀行为造成影响。ZHANG J Y 等^[8]研究发现,超声喷丸在 AZ31 镁合金表面形成了纳米晶层和 200 μm 深的梯度微观结构。现关于 AZ 系镁合金的研究侧重在 AZ31、AZ61、AZ91 等牌号,而对于 AZ80M 镁合金的超声喷丸处理与研究报道则较少。

AZ80M 镁合金在航空航天领域具有广泛的研究价值和应用前景,现阶段主要因其耐腐蚀性较差而应用受限。本研究对 AZ80M 镁合金板材进行超声喷丸处理,并对处理过的试样进行显微组织观察及腐蚀行为研究,分析 AZ80M 镁合金的腐蚀性能,以期对 AZ80M 镁合金腐蚀防护的实际工程应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 AZ80M 镁合金板材,厚约 4 mm,其主要成分见表 1。进行超声喷丸前,用线切割机床将板材切割成尺寸约为 60 mm×60 mm 的方形喷丸试样;超声喷丸结束后,再根据试验需要将喷丸部分材料进行二次切割。

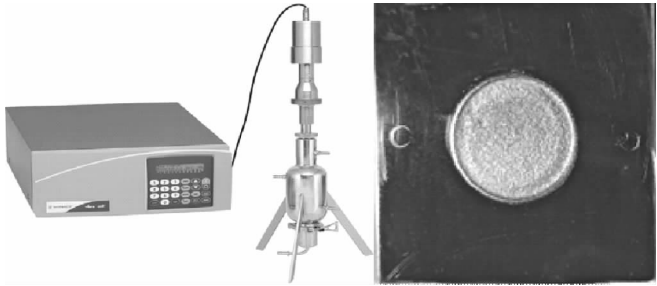
表 1 AZ80M 镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AZ80M magnesium alloy %					
元素	ω_{B}				
	Al	Zn	Mn	Si	Mg
标准	7.8~9.2	0.20~0.80	0.15~0.50	≤ 0.10	余量
实测	8.31	0.52	0.28	0.01	余量

1.2 超声喷丸

试验采用 VCX1200 型超声喷丸装置,净输出功率为 1 200 W,频率为 20 kHz,喷丸室的直径为 25 mm,

喷丸选用直径为 3 mm 的碳化钨弹丸,振动头的振幅为 50 μm ,试样待处理表面距离振动头顶端的工作距离为 15 mm,超声喷丸处理时间为 4 min。超声喷丸试验在室温下进行,超声喷丸设备及喷丸后的试样见图 1。



(a) 超声喷丸设备 (b) 喷丸后的试样

图 1 超声喷丸设备及喷丸后的试样

Fig.1 Ultrasonic shot peening equipment and sample after peening

1.3 显微组织观察

金相试样采用苦味酸腐蚀液(苦味酸 5 g+冰醋酸 5 mL+无水乙醇 90 mL+去离子水 10 mL)进行腐蚀,并在蔡司 Scope A1 型光学显微镜下进行金相组织观测。利用 AxiaChemiSEM 型扫描电镜进行腐蚀组织形貌分析。腐蚀后的试样先放到铬酸溶液(200 g/L 的 CrO_3 +10 g/L 的 AgNO_3)中清洗,将表面的腐蚀产物去除干净,随后置于无水乙醇中进行超声清洗,冷风吹干后尽快观察分析。

1.4 电化学测试

利用电化学工作站(CHI660E)测试试样的开路电势、Tafel 极化曲线及电化学阻抗谱。采用三电极测量法进行电化学测试,其中参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,试样为工作电极,腐蚀介质采用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液。在常温下静置 30 s 后开始测试,开路电势扫描时间为 400 s;Tafel 电位扫描区间为 $[E \pm (200 \sim 300)]$ mV,扫描速度为 1 mV/s;阻抗谱的测试频率范围为 0.01 Hz~100 kHz,用 ZView 软件拟合等效电路,分析阻抗行为。

1.5 浸泡腐蚀测试

试样用原始 AZ80M 板材经表面抛光去除氧化层后,再分别进行未超声喷丸、仅超声喷丸、超声喷丸+抛光 3 种不同的方式处理。未超声喷丸处理试样与超声喷丸+抛光试样在腐蚀前均用 2000 号细砂纸缓慢打磨平整,再用抛光布抛光。用无水乙醇清洗制作好的腐蚀试样并冷风吹干,然后用树脂镶嵌并称重。浸泡腐蚀完成后,用铬酸溶液将覆盖在试样表面的腐蚀产物去除干净,保证试样在铬酸溶液中浸没 5~10 min 直至没有明显的气泡产生。去除完腐蚀产物后,立即用无水乙醇对

试样进行超声清洗 15 min,冷风吹干后进行称重。

浸泡腐蚀质量损失速率计算方法为:

$$v_r = \frac{M_0 - M_1}{St} \tag{1}$$

式中, v_r 为试样的腐蚀质量损失速率; M_0 、 M_1 分别为试样腐蚀前、后的质量, mg; S 为试样浸入到溶液中的表面积, cm^2 ; t 为试样浸泡的时间, h。

设置了 I、II 两组试验, I 组浸泡时间确定为 24 h, 浸泡所需的 NaCl 溶液质量分数分别设置为 2%、3.5% 和 5%, 以研究经 3 种不同方式处理的 AZ80M 镁合金试样在不同质量分数 NaCl 溶液中的腐蚀行为; II 组所用 NaCl 溶液质量分数为 3.5%, 浸泡时间分别设置成 1、3、6、12、24 和 48 h, 以研究经 3 种不同方式处理的 AZ80M 镁合金试样在 NaCl 溶液中腐蚀行为随时间的变化。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 2 为超声喷丸前后 AZ80M 镁合金的金相组织,

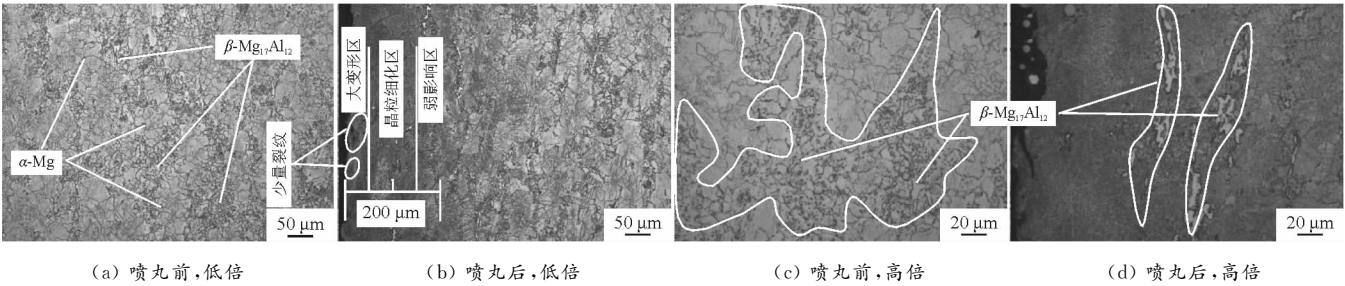


图 2 超声喷丸前后 AZ80M 合金的金相组织

Fig.2 Microstructure of AZ80M alloy sample before and after peening

XRD 图谱, 其中超声喷丸处理后的试样在测试前进行了轻微抛光, 以去掉浅表层的大变形区。结果表明, 试样经超声喷丸处理后, 物相组成基本没有变化, 主要由 α -Mg 和 β -Mg₁₇Al₁₂ 组成。但是超声喷丸处理后的衍射峰中最右侧的 α -Mg 衍射峰消失, 左侧又增加了部分 β -Mg₁₇Al₁₂ 的衍射峰, 说明析出相的分布有所改变。

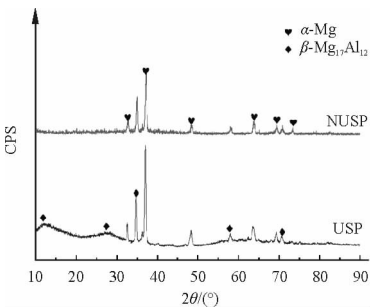


图 3 AZ80M 合金试样表面的 XRD 图谱

(NUSP 为超声喷丸处理前, USP 为超声喷丸处理后)

Fig.3 XRD patterns of AZ80M sample surface

其中左侧区域靠近试样表面, 右侧为试样内部。可以看出, 超声喷丸前试样组织由大小不均的 α -Mg 等轴晶和网状第二相 β -Mg₁₇Al₁₂ 组成, 晶粒尺寸范围在 5~30 μm 之间, 表层晶粒和内部晶粒大小没有明显差别。而对于超声喷丸处理后的试样(见图 2b 和图 2d), 由于剧烈塑性变形的影响, 材料表层的显微组织尺寸显著减小, 在距喷丸表面 50 μm 以内, 为大变形区域, 存在部分微裂纹(图 2b 虚线圈出区域)。裂纹产生可能是因为超声喷丸时弹丸动能较大, 撞击到 AZ80M 镁合金表面后, 瞬态的塑性变形跟不上^[9]。在距喷丸表面 50~150 μm 范围内, 为晶粒细化区域, 其间组织致密且无明显缺陷。

对比图 2c 和图 2d 划线区域可以发现, 超声喷丸后的晶粒细化区域, β 相的分布更平行于喷丸表面, 呈细长条状, 而超声喷丸前试样的 β 相则具有不定向性, 呈网状交错分布。在距喷丸表面 150~220 μm 范围内, 为弱影响区, 是细化层和基体组织的过渡区域, 该区域细化晶与基体原始晶粒交杂, 受超声喷丸影响较小。

图 3 为超声喷丸前后 AZ80M 合金试样表面的

2.2 电化学测试结果

图 4 为超声喷丸前后 3 组 AZ80M 镁合金试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中测试得到的稳态开路电势。其中, 未经超声喷丸试样的稳态开路电势为 -1.563 V, 而仅超声喷丸及超声喷丸+抛光试样的开路电势分别为 -1.583 V 和 -1.551 V。可以发现, 经 3 种不同方式处理的镁合金试样, 开路电势不同, 大小排序依次为: 超声喷丸+抛光 > 未超声喷丸 > 仅超声喷丸。说明超声喷丸处理后, 再抛光去除表面粗糙层, 可有效地降低 AZ80M 镁合金发生腐蚀的倾向性。

经 3 种不同方式处理的 AZ80M 镁合金试样, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中的 Tafel 极化曲线见图 5。可以看出, 仅超声喷丸处理试样的极化曲线比较对称, 阴极与阳极斜率相近, 均比较平缓, 意味着试样阴极和阳极反应均比较活跃, 耐腐蚀性能较差。未超声喷丸处理试样极化曲线斜率比仅超声喷丸处理试样大, 且阳极斜率大

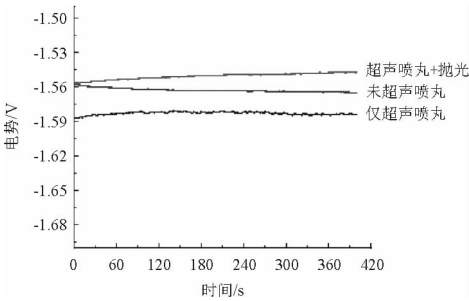


图 4 AZ80M 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的稳态开路电势
Fig.4 Steady-state open-circuit potential of AZ80M in 3.5% NaCl solution

于阴极斜率。超声喷丸+抛光处理试样的阴极斜率与未喷丸处理试样接近,但阳极出现斜率陡增的拐点,说明其阳极反应过程中出现钝化现象(见图 5 中 a 处位置),大大提高了耐腐蚀性能。

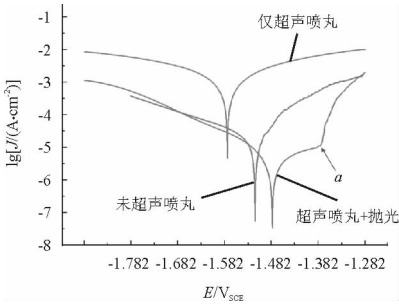


图 5 AZ80M 镁合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of AZ80M alloy in 3.5% NaCl solution

3 组试样中,仅超声喷丸处理试样的自腐蚀电位最小,约为-1.558 V;而未超声喷丸处理试样的自腐蚀电位略高,约为-1.522 V;超声喷丸+抛光处理试样的自腐蚀电位最高,约为-1.481 V。3 种处理方式下试样的阳极反应先负移后正移,说明仅超声喷丸处理的 AZ80M 镁合金表面腐蚀膜的稳定性下降,而在超声喷丸后经抛光去除表面粗糙层则使得 AZ80M 镁合金表面腐蚀膜的稳定性增加。

表 2 为 3 种不同方式处理后 AZ80M 镁合金极化曲线的拟合结果,其中, E_{cor} 为自腐蚀电位, J_{cor} 为自腐蚀电流密度, R_p 为极化电阻, b_a 、 b_c 分别为曲线的阳极和阴极斜率。可以看出,3 种方式处理后试样的极化曲线的斜率排序为:超声喷丸+抛光>未超声喷丸>超声喷丸。超声喷丸+抛光试样的极化曲线阳极斜率达到 14.077,约为未超声喷丸试样的两倍,钝化效果明显。同时,未超声喷丸处理试样自腐蚀电流密度为 $38.54 \mu A/cm^2$,仅超声喷丸处理的试样自腐蚀电流明显密度增加,达到 $1403 \mu A/cm^2$,而超声喷丸+抛光试样的自腐蚀电流密度最低,约为 $3.672 \mu A/cm^2$,三者间存在几个数量级的差异。相应地,经 3 种方式处理后试样的极化电阻呈现与自腐蚀电流密度相反的趋势,未超

声喷丸试样极化电阻为 $847 \Omega \cdot cm^2$,仅超声喷丸处理试样为 $32 \Omega \cdot cm^2$,超声喷丸+抛光试样为 $5725 \Omega \cdot cm^2$ 。可见经超声喷丸处理之后,再通过抛光去除表面粗糙层,可以促进腐蚀过程中钝化现象的形成,显著改善 AZ80M 镁合金的电化学腐蚀性能。

表 2 AZ80M 镁合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的极化曲线拟合值

处理方式	3.5% NaCl solution				
	$E_{cor}/V_{vs,SCE}$	$J_{cor}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	$b_a/(mV \cdot a^{-1})$	$b_c/(mV \cdot a^{-1})$	$R_p/(\Omega \cdot cm^2)$
未超声喷丸	-1.522	38.54	7.493	5.870	847
仅超声喷丸	-1.558	1403	5.153	4.596	32
超声喷丸+抛光	-1.481	3.672	14.077	6.606	5725

图 6 为 3 种处理方式下 AZ80M 镁合金试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱 Nyquist 图。可以看出,3 组试样的容抗弧半径大小的排序为:超声喷丸+抛光>未超声喷丸>仅超声喷丸。仅超声喷丸处理试样的阻抗谱高频和低频区半径均很小,说明其耐腐蚀性能远低于其余两组试样。超声喷丸+抛光处理试样在高频段阻抗值只是略大于未超声喷丸处理试样,而其在低频区的阻抗则要远大于未超声喷丸处理试样,表明超声喷丸+抛光处理试样表面膜层对基体的保护作用远大于未超声喷丸处理试样。这主要是因为浸泡初期,仅超声喷丸处理试样表面粗糙度很大,凹凸不平且浅表层存在部分裂纹,致使表面无法形成连续的钝化膜,没有钝化膜覆盖的镁合金表面与熔液直接接触;而未超声喷丸处理试样的表面相对较光滑,在初期腐蚀比较均匀,但由于组织粗大且均匀性略差,其形成的腐蚀产物附着性和腐蚀膜稳定性较差,无法对进一步腐蚀形成持续有效的抵抗。对于超声喷丸+抛光处理试样而言,表面粗糙度低且晶粒细化,能快速形成连续且均匀致密的钝化膜,使得带电粒子穿越钝化膜的阻抗远大于其余两组试样^[10]。

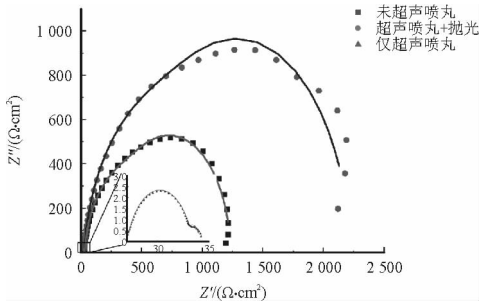


图 6 AZ80M 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱
Fig.6 Electrochemical impedance spectrum of AZ80M alloy in 3.5% NaCl solution

表 3 是 3 种处理方式下 AZ80M 镁合金试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中电化学阻抗谱的等效电路拟合数

据。 R_s 为溶液电阻,由于是在同浓度溶液中测试,3 组数据相差不大; R_c 和 R_{ct} 分别为钝化膜层电阻和电荷转移电阻,3 组试样与之对应的相关数据大小关系排序为:超声喷丸+抛光>未超声喷丸>仅超声喷丸,而 3 组试样的 CPE_c 和 CPE_d 数值大小顺序则与电阻值相反。其中,仅超声喷丸处理试样的 R_c 和 R_{ct} 分别为 $6.361\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $0.623\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,远低于其余两组试样的电阻值,说明不论是在初期的镁合金阳极与溶液直接接触反应阶段还是中后期的钝化膜形成阶段,该试样均不能很好地抵抗腐蚀。超声喷丸+抛光处理试样的 R_c 值为 $1\ 772\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,约为未超声喷丸处理试样 R_c 值的 1.9 倍,说明超声喷丸+抛光处理试样的钝化效果明显,增大了试样电化学腐蚀过程中与钝化膜相关的阻抗。这可能是由于超声喷丸+抛光处理试样表面均匀且晶粒细化,能够快速且完整地形成致密的钝化膜,不存在或者较少存在未被钝化膜覆盖的“缺口”区域,使得溶液中的阴离子需要穿过钝化膜才能到达镁合金基体表面^[11]。

表 3 AZ80M 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱拟合值
Tab.3 Electrochemical impedance spectrum fit values of AZ80M alloy in 3.5% NaCl solution

处理方式	$R_s/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$CPE_c/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_c/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$	$CPE_d/(\mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_{ct}/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
未超声喷丸	28.13	7.682	935.1	8.647	271.8
仅超声喷丸	27.01	238.8	6.361	8.768	0.623
超声喷丸+抛光	24.25	9.741	1 772	14.17	427.9

2.3 浸泡腐蚀结果

表 4 为 I 组浸泡腐蚀试验得到的 3 组试样在不同浓度 NaCl 溶液中的腐蚀速率。可以发现,随着 NaCl 溶液浓度增加,试样的腐蚀速率均逐渐增大。

表 4 AZ80M 镁合金在不同浓度 NaCl 溶液中浸泡 24 h 的腐蚀速率
Tab.4 Corrosion rate of AZ80M alloy in different concentrations of NaCl solution for 24 h ($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)

处理方式	$w(\text{NaCl})/\%$		
	2	3.5	5
未超声喷丸	0.75	1.48	1.74
仅超声喷丸	2.38	3.44	3.86
超声喷丸+抛光	0.47	0.61	0.97

图 7 和图 8 分别为 II 组浸泡腐蚀试验得到的 3 种处理方式下 AZ80M 镁合金的质量损失和腐蚀速率。由图 7 可知,超声喷丸+抛光处理试样的质量损失最少,仅超声喷丸处理试样的质量损失最多,并且随着时间增加,3 组试样质量损失的差值逐渐加大。在 48 h 时,仅超声喷丸、未超声喷丸和超声喷丸+抛光处理的 3 组试样质量损失分别为 121.5、52.1 和 21.7 mg。由图

8 可知,仅超声喷丸和未超声喷丸处理试样在初期腐蚀速率较大,随时间增加腐蚀速率逐渐降低并趋于平稳,而超声喷丸+抛光处理试样在前 6 h 腐蚀速率有小幅增加,随后缓慢降低并趋于平稳,这可能是因为在 6 h 前主要腐蚀的是表面的原始氧化层,腐蚀抵抗性随时间增长而降低,但在 6 h 左右原始氧化层基本腐蚀完,溶液开始接触细化晶粒层,试样表面形成了比较完整的钝化膜,能够较好地减缓腐蚀进度。综合来看,超声喷丸+抛光处理试样腐蚀速率的整条曲线相对平缓,这说明超声喷丸+抛光处理试样的腐蚀速率比较平均,随时间变化波动较小,腐蚀一致性好。

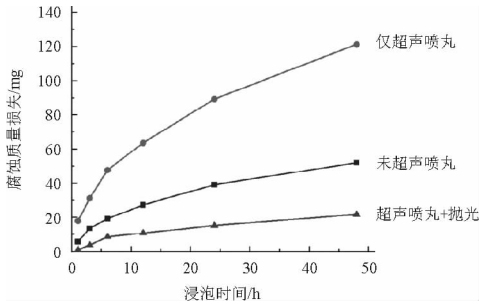


图 7 AZ80M 镁合金在 3.5% NaCl 溶液腐蚀质量损失结果
Fig.7 Weight-loss results of AZ80M alloy in 3.5% NaCl solution

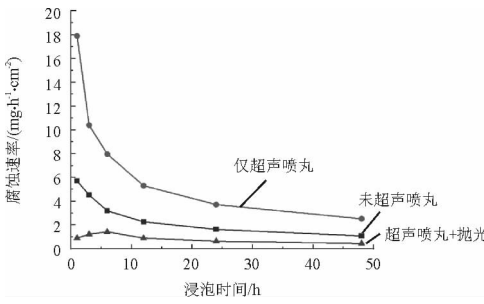


图 8 AZ80M 镁合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀速率
Fig.8 Corrosion rate of AZ80M alloy in 3.5% NaCl solution

图 9 和图 10 为 3 种处理方式下 AZ80M 镁合金试样在不同浓度 NaCl 溶液中浸泡腐蚀 24 h 的整体表面形貌与宏观形貌,即 I 组试验得到的腐蚀形貌。可以看出,随着 NaCl 溶液浓度增加,3 组试样的腐蚀情况都逐渐加剧。其中,未超声喷丸处理试样表面腐蚀痕迹较浅,腐蚀区域逐渐扩大,未被腐蚀的光泽区域逐渐减小直至最终几乎完全腐蚀。仅超声喷丸处理试样从低浓度 NaCl 溶液中就被强烈腐蚀,见图 9d~图 9f 和图 10d~图 10f,形貌都有大量较深的腐蚀坑洞,表面无光泽,结合腐蚀质量损失情况,不难发现其腐蚀是随着 NaCl 溶液浓度加大而变得更严重。超声喷丸+抛光处理试样在 2% 的 NaCl 溶液中浸泡 24 h 只有 3 处面积较小的腐蚀区域,且相对分散,见图 9g~图 9i;在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中腐蚀区域数量和面积均

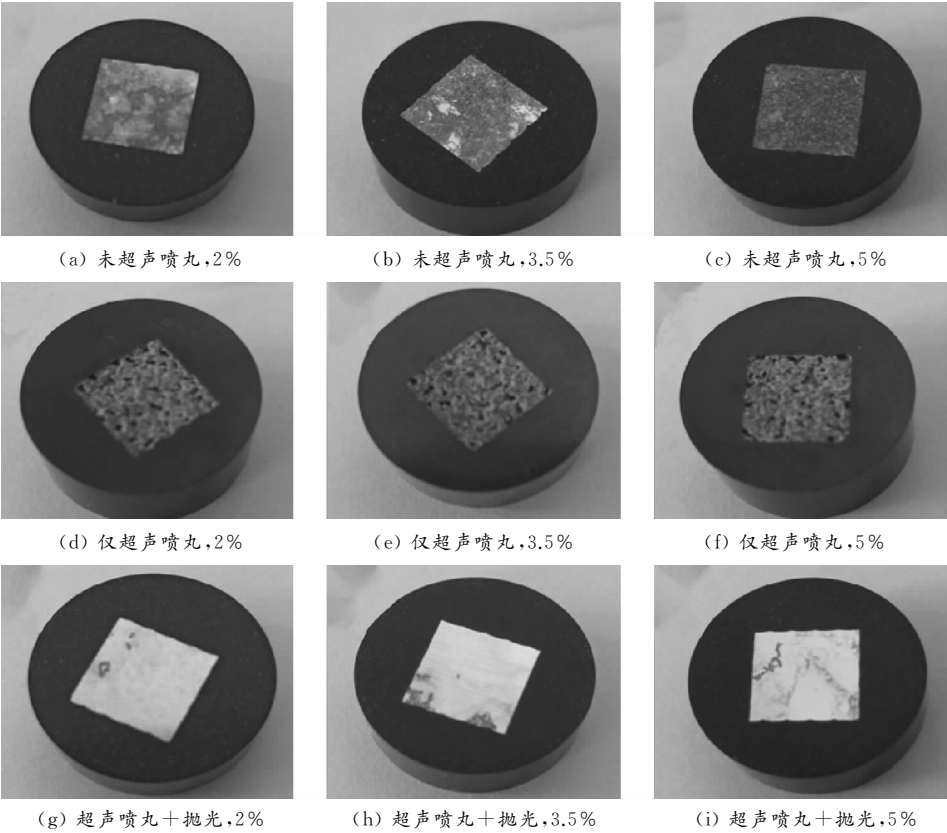


图 9 不同方式处理 AZ80M 镁合金在不同浓度 NaCl 溶液中浸泡 24 h 的整体表面形貌

Fig.9 Overall surface morphologies of AZ80M with different treatment methods in different concentrations of NaCl solution for 24 h

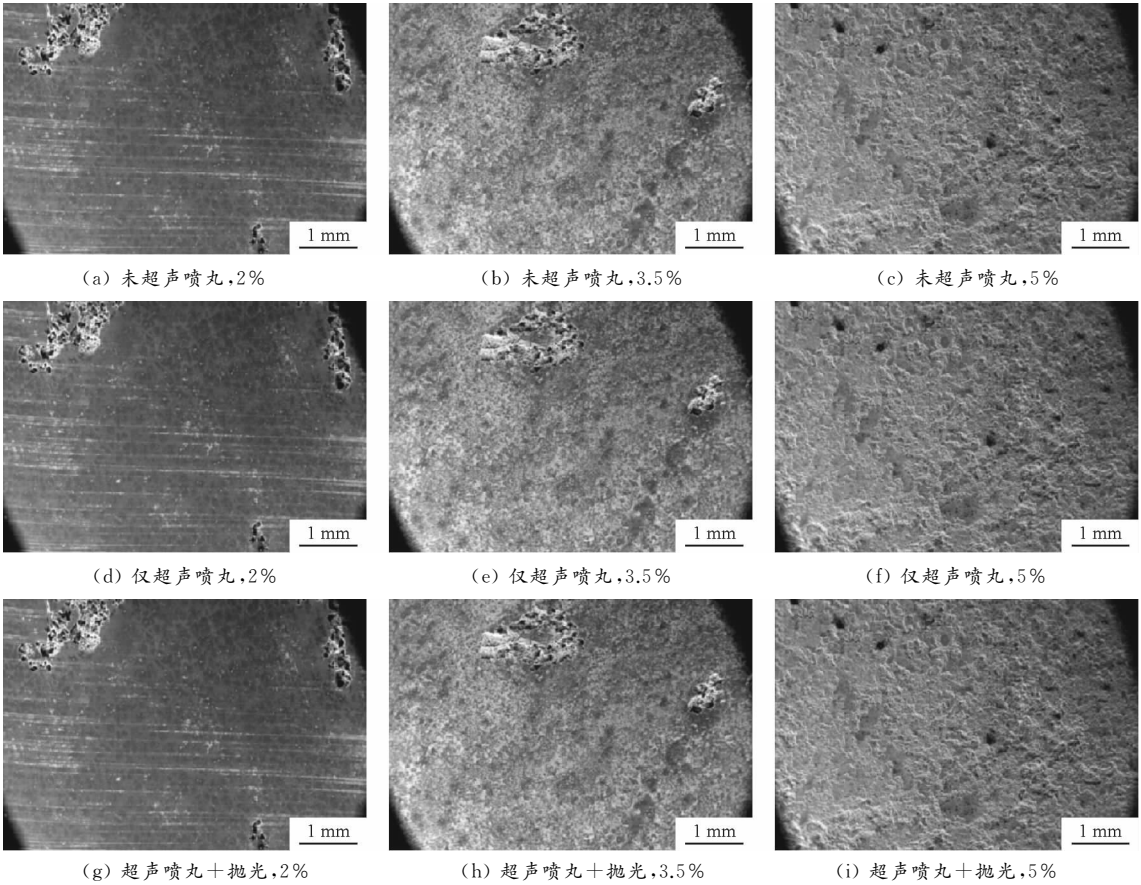


图 10 AZ80M 镁合金在不同浓度 NaCl 溶液中浸泡 24 h 的宏观腐蚀形貌

Fig.10 Macroscopic corrosion morphology of AZ80M alloy with different treatment methods in different concentrations of NaCl solution for 24 h

增加,有逐渐聚集的趋势;在 5% 的 NaCl 溶液中腐蚀区域开始汇聚成丝条状。

同样,图 10a~图 10c 和图 10g~图 10i 呈现的表面腐蚀情况也说明 NaCl 溶液浓度的增加会使得试样腐蚀加剧。区别在于超声喷丸处理试样的腐蚀是由局部开始逐渐扩大到整个表面,而超声喷丸+抛光处理试样的腐蚀则是整个表面比较均匀地向着材料内部侵蚀。这可能与超声喷丸前后材料组织分布的均匀性有关,超声喷丸使得表层组织细化分散,得到的晶粒细化层组织缺陷更少、更致密,局部差异减小^[12]。

综合对比 3 组试样,可以发现超声喷丸+抛光处理试样的耐腐蚀性能最好,试样表面还有大部分区域有光泽,未被大面积明显腐蚀。这一结果和浸泡腐蚀质量损失的数据及电化学测试数据相吻合。超声喷丸之后再抛光去除表面粗糙层,与溶液接触的界面光滑且晶粒细化,使得腐蚀过程中产生的腐蚀膜更均匀且不易脱落,出现了钝化现象,可以极大地增加 AZ80M 镁合金的耐腐蚀性能^[13]。

4 结 论

(1)超声喷丸处理使得 AZ80M 镁合金表层组织由大小不一的等轴晶粒变为具有不同尺度的梯度结构组织。距喷丸表面 50 μm 以内,为大变形区域,存在部分微小裂纹。距喷丸表面 50~150 μm 范围为细化晶粒层,其间组织致密且无明显缺陷。

(2)经超声喷丸+抛光处理后,AZ80M 镁合金耐蚀性显著提高。试样钝化效果明显,钝化阻抗值 R_p 达 $1\,772\ \Omega \cdot \text{cm}^2$;腐蚀形貌分布均匀,沿表面和截面的腐蚀扩展均减缓。

(3)超声喷丸+抛光处理后 AZ80M 镁合金耐蚀性改善的主要原因是超声喷丸处理后组织分布均匀,晶粒明显细化,在腐蚀过程中形成较为均匀致密的钝化膜,能有效保护基体。同时,抛光去除了含有微裂纹的浅表层大变形区,减小了表面粗糙度,使得试样与溶液直接接触的表面积大大减少,进而提高了 AZ80M 镁合金的耐腐蚀性。

参 考 文 献

- [1] 王志平,熊新红,陈云,等. 挤压铸造 Mg-4Al-0.5RE-0.8Ca 合金腐蚀行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 397-401.
- [2] 吴国华,陈玉狮,丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.
- [3] CHEN Y, WANG Z P, XIONG X H, et al. Microstructures and corrosion behaviors of squeeze-cast Mg-4Al-2RE and Mg-4Al-0.5RE-xCa ($x=0.3, 0.8$, and 1.5) alloys[J]. Materials&Corrosion, 2018, 69(9): 1 300-1 309.

- [4] BAGHERIFARD S, HICKEY D J, FINTOVA S, et al. Effects of nanofeatures induced by severe shot peening (SSP) on mechanical, corrosion and cytocompatibility properties of magnesium alloy AZ31[J]. Acta Biomaterialia, 2018, 66(2): 93-108.
- [5] 陈菊芳,李兴成,周金宇,等. AM50 镁合金表面激光喷丸强化层耐腐蚀性能与机理研究[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 58-63.
- [6] KAKIUCHI T, UEMATSU Y, SANADA K, et al. Fatigue strength improvement of Mg alloy AZ61 by double ultrasonic shot peening[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2016, 82(842): 16-18.
- [7] PERAL L B, ZAFRA A, BAGHERIFARD S, et al. Effect of warm shot peening treatments on surface properties and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 401: 126 285.
- [8] ZHANG J Y, PENG P, SHE J, et al. A study of the corrosion behavior of AZ31 Mg alloy in depth direction after surface nanocrystallization[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 396(3): 125 968-125 972.
- [9] LIN B, ZHANG J Y, SUN Q Q, et al. Microstructure corrosion behavior and hydrogen evolution of USSP processed AZ31 magnesium alloy with a surface layer containing amorphous Fe-rich composite[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(17): 10 172-10 182.
- [10] 刘玉项. 合金化对镁电化学腐蚀速率影响的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(1): 361-372.
- [11] LU F F, MA K, LI CX, et al. Enhanced corrosion resistance of cold-sprayed and shot-peened aluminum coatings on LA43M magnesium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 394(1): 125 865-125 867.
- [12] LIU C C, ZHENG H, GU X, et al. Effect of severe shot peening on corrosion behavior of AZ31 and AZ91 magnesium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770(7): 500-506.
- [13] PANDEY V, SINGH J K, CHATTOPADHYAY K, et al. Optimization of USSP duration for enhanced corrosion resistance of AA7075[J]. Ultrasonics, 2019, 91(5): 180-192.

(编辑:张正贺)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |