

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.05.009

预变形对激光处理 AZ31 镁合金组织与性能的影响

朱磊^{1,2*}, 徐佳辰¹, 张梦佳³, 刘刚^{4*}

(1. 河南工业职业技术学院 机械工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳高性能金属材料重点实验室, 河南 南阳 473000; 3. 武汉科技大学 高性能钢铁材料及其应用省部共建协同创新中心, 湖北 武汉 430081; 4. 南阳理工学院 智能制造学院, 河南 南阳 473004)

摘要: 对 AZ31 镁合金进行不同的拉伸预变形, 预变形量分别为 1%、3%、5%、7%, 然后对其用激光焊机进行激光表面熔凝处理。采用光学显微镜、显微硬度计、拉伸试验机、电化学工作站等对不同预变形量条件下激光熔凝处理 AZ31 镁合金的组织 and 性能进行分析与测试, 以探究预变形对激光处理 AZ31 镁合金组织与性能的影响。结果表明: 随着预变形量的增加, 表面熔凝层的硬度逐渐增加, 热影响区的晶粒尺寸先变小后变大, 材料的抗拉强度随之先变大后变小。在预变形量为 1% 时, 抗拉强度最大, 达到 272.6 MPa; 熔凝层组织腐蚀电化学测试结果显示, 在预变形量为 5% 时, 材料的腐蚀电流密度最低, 耐腐蚀性能最好。

关键词: AZ31 镁合金; 预变形; 激光熔凝处理

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

Effect of predeformation on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy treated by laser

Zhu Lei^{1,2*}, Xu Jiachen¹, Zhang Mengjia³, Liu Gang^{4*}

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China; 2. Nanyang Key Laboratory of High Performance Metal Materials, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China; 3. Collaborative Innovation Center for Advanced Steels, International Research Institute for Steel Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 4. School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: The effect of predeformation on the microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy treated by laser was mainly explored. First, AZ31 magnesium alloy is subjected to different deformation amounts (1%, 3%, 5%, 7%), and then laser surface melting treatment is carried out by laser welding machine. The microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy treated by laser were analyzed and tested by means of optical microscope, microhardness tester, tensile tester, electrochemical workstation.

收稿日期: 2024-09-22

修回日期: 2024-10-24

作者简介: 朱磊(1980—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为金属连接技术、成型件缺陷分析及成型工艺数值模拟技术, email: hnpizhu@163.com

通信作者: 刘刚(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为轻合金连接及表面处理技术, email: liugang@nyist.edu.cn

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(232102220062、232102230049)

引用信息: 朱磊, 徐佳辰, 张梦佳, 等. 预变形对激光处理 AZ31 镁合金组织与性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5): 59-65, 100.

Zhu Lei, Xu Jiachen, Zhang Mengjia, et al. Effect of predeformation on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy treated by laser[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 59-65, 100.

The results show that when the predeformation amount is 1%, the microstructure is the densest, and the surface microhardness is increased. The corrosion electrochemistry of the melt layer showed that the corrosion current density was the lowest and the corrosion resistance was the best when the predeformation was 5%.

Keywords: AZ31 magnesium alloy; predeformation; laser melting treatment

镁合金以其轻巧、高比强度、高比刚度和出色的阻尼性能而著称。它在汽车制造、电子设备、国防工业以及航空航天领域的应用日益增多。但其强度和硬度通常较低，耐腐蚀性差，这在很大程度上制约了镁合金在更广阔领域的应用潜力^[1-6]。

在实际应用中，可以通过预变形或改善材料表面性能来提升其力学性能及耐腐蚀性。表面改性技术是改变部件表面的化学组成，从而增强其性能。其中激光表面改性技术在优化镁合金表面特性方面展现出明显的优势^[7-12]，图1所示为激光表面熔凝处理示意图。郑婷等^[13]采用激光表面熔凝技术对定向凝固AZ31镁合金铸锭进行了处理，并进行相关性能的测试。结果显示，处理后的试样晶粒尺寸明显细化，析出物的组织细小且分布均匀；且处理后的试样在显微硬度和耐蚀性方面都有显著提高。葛亚琼等^[14]使用横流连续CO₂激光器对AZ31B镁合金进行表面处理，并进行相关性能的测试。结果显示，熔凝层晶粒尺寸显著减小；在低能量密度的处理条件下，晶粒细化程度和 β -Mg₁₇Al₁₂强化相的综合强化效果最佳，显微硬度达到最高。王文先等^[15]使用固体脉冲Nd: YAG激光器，在液氮的极端冷却环境下对AZ31B镁合金进行了激光熔凝处理，经过液氮冷却的熔凝层展现出更加微小的晶粒结构，同时显微硬度得到了显著增强。肖罡等^[16]探讨了预变形对高应变速率轧制AZ31镁合金的微观结构和力学特性的影响，预变形后的AZ31镁合金比未预变形AZ31镁合金组织更加均匀、细小且力学性能明显提高。

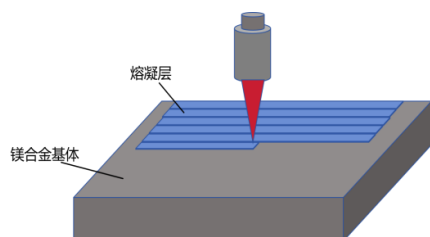


图1 激光熔凝示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser melting

目前，大多数学者研究了激光处理或预变形单

一工艺对镁合金组织与性能的影响，但对于预变形和激光处理复合工艺对镁合金的影响的关注很少。本实验通过对预变形后的AZ31镁合金板材进行激光熔凝处理，探究了预变形对激光熔凝处理镁合金组织与性能的影响。

1 材料和方法

将AZ31板材原材料进行激光切割，切割成20 mm×55 mm的尺寸形状，其中原板材的厚度为3 mm。采用拉伸试验机对试样分别进行预变形量为1%、3%、5%、7%的拉伸预变形，然后采用EFE-LMW-1500光纤激光焊机对拉伸后的样品进行激光熔凝处理，激光功率为180 W，焦距为118 mm，扫描速度为25 mm/s。采用折线往复式进行激光扫描，扫描间距设置为0.3 mm，激光扫描尺寸为15 mm×35 mm。

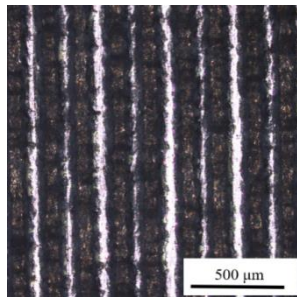
采用LEXT-OLS4100型激光共聚焦显微镜对试样表面熔凝层微观形貌、显微组织与表面粗糙度进行观察和分析，所用腐蚀液为苦味酸。采用Smartlab SE智能多功能X射线衍射仪对试样表面熔凝层进行物相分析。采用FALCON 500型维氏硬度计对样品的熔凝层、热影响区和母材进行硬度测量。测试过程中硬度计所用载荷50 g，每个数据的测量要选取三个距离较远的位置进行测量，然后取其平均值作为最终的硬度值。将样品用线切割机切成拉伸件，采用UTM04304X高性能电子万能试验机对其进行拉伸测试，测量工件的抗拉强度。采用使用Autolab PGSTAT 302N电化学工作站对样品进行耐腐蚀性能的测定。将试样的待测面对准并覆盖测量接口，使用紧固螺栓将试样压紧。向容器中倒入3.5 wt.%的NaCl溶液，直到液面完全覆盖测量接口。将氯化银电极置于容器中，确保其底部完全浸没于溶液之中。连接阳极和辅助电极（即Pt电极），并将这些电极与测量器相连。

2 结果与讨论

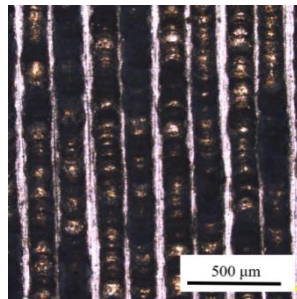
2.1 预变形对激光处理AZ31镁合金表面形貌的影响

不同预变形量AZ31镁合金样品经激光熔凝处

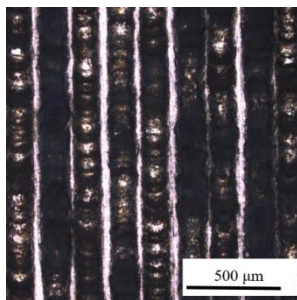
理后的熔凝层表面形貌及三维形貌图分别见图2、图3。通过图3可知,预变形量为零时(0%),激光熔凝处理后试样表面的粗糙度为 $9.987\ \mu\text{m}$,预变形量为1%、3%、5%、7%时,激光熔凝处理后试样表面粗糙度分别为 8.283 、 8.087 、 7.648 和 $7.611\ \mu\text{m}$,均比未经预变形的试样的表面粗糙度小,且随着预变形量的增加,试样表面粗糙度降低。说明预变形后激光熔凝处理能够有效改善原始AZ31镁合金试样的表面粗糙度,有利于表面成型的质量。



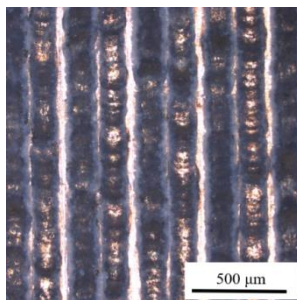
(a) 零预变形



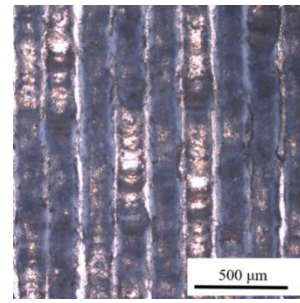
(b) 1%预变形



(c) 3%预变形



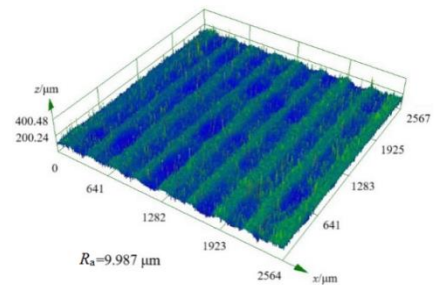
(d) 5%预变形



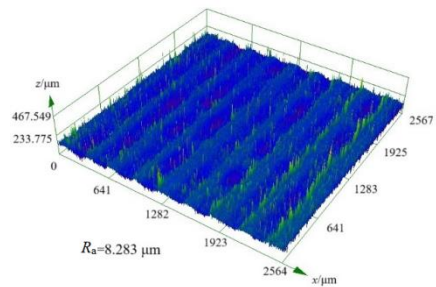
(e) 7%预变形

图2 不同预变形量下试样的熔凝层表面形貌

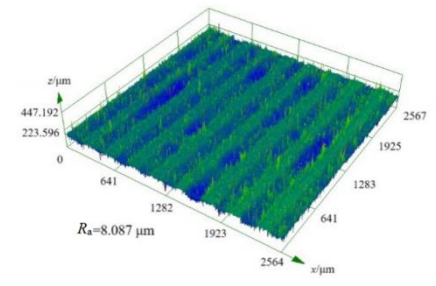
Fig.2 Surface morphology of the molten layer of specimens under different predeformation amounts



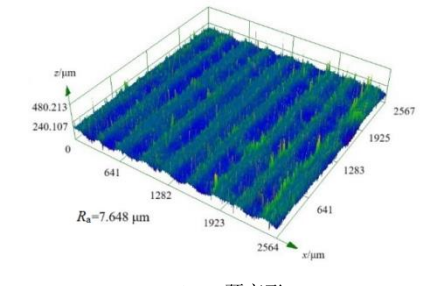
(a) 零预变形



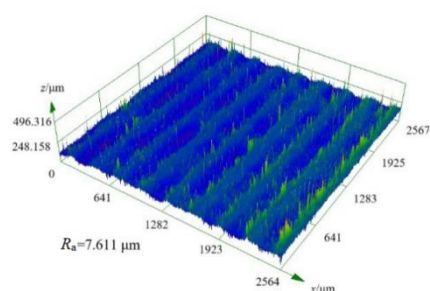
(b) 1%预变形



(c) 3%预变形



(d) 5%预变形



(e) 7%预变形

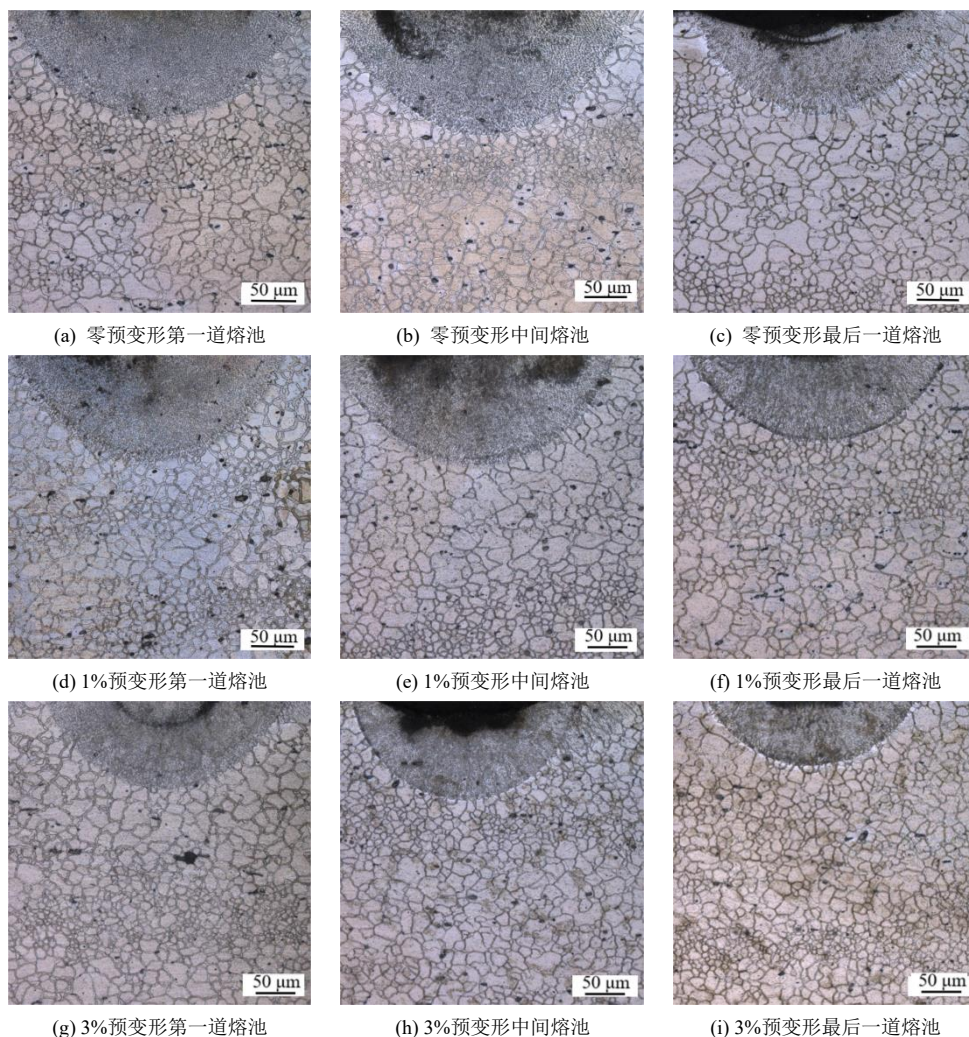
图3 不同预变形量下试样的三维形貌图

Fig.3 Three-dimensional morphology of specimens under different predeformation amounts

2.2 预变形对激光处理 AZ31 镁合金显微组织的影响

图4为预变形AZ31镁合金经激光熔凝处理后的显微组织特征。当对预变形量为零的AZ31镁合金板材进行激光熔凝处理时，随着激光熔凝处理的进行，板材温度升高导致热影响区晶粒长大尺寸变

大，见图4(b)、4(c)所示。此时并未发生再结晶现象；对预变形量为1%的板材进行激光熔凝处理，发现相比于预变形为零的试样，其第一道熔池的热影响区晶粒尺寸较大，如图4(d)所示，但随着激光熔凝处理的进行，热影响区晶粒逐渐细化，如图4(e)、4(f)所示，这可能是因为经过1%预变形后，晶粒能在较低的温度下长大且随着温度的升高，晶粒开始发生再结晶，导致晶粒尺寸减少；对预变形量为3%、5%、7%的板材进行激光熔凝处理，发现相比预变形1%的试样，其第一道熔池的热影响区晶粒尺寸均较小，分别见图4(g)、4(j)、4(m)。这可能是因为随着预变形量的增加，材料在较低温度下就可以发生再结晶，晶粒细化，但随着激光熔凝处理的继续进行，温度升高，再结晶后的晶粒开始长大，晶粒尺寸变大，晶粒粗化分别见图4(h)、4(i)、4(k)、4(l)、4(n)、4(o)。综上所述：当AZ31镁合金板材的预变形量为1%时，对其进行激光熔凝处理所得到的板材的热影响区平均晶粒尺寸最小。



(a) 零预变形第一道熔池

(b) 零预变形中间熔池

(c) 零预变形最后一道熔池

(d) 1%预变形第一道熔池

(e) 1%预变形中间熔池

(f) 1%预变形最后一道熔池

(g) 3%预变形第一道熔池

(h) 3%预变形中间熔池

(i) 3%预变形最后一道熔池

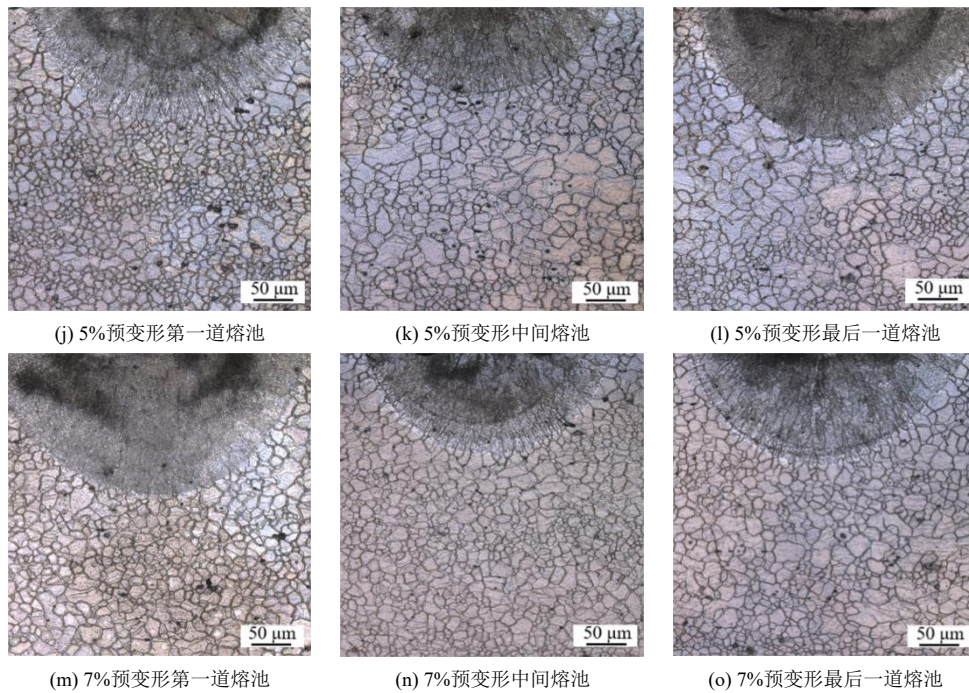


图4 不同预变形量下试样的显微组织

Fig.4 Microstructure of specimens under different predeformation amounts

2.3 预变形对激光处理 AZ31 镁合金物相的影响

图5为不同预变形后激光熔凝处理AZ31镁合金试样表面的X射线衍射图谱。根据图中的衍射峰分析, AZ31镁合金板材表面经过激光熔凝处理后, 熔凝层组织并没有新相生成, 均是由 α -Mg相和少量 β -Mg₁₇Al₁₂相构成。但 β -Mg₁₇Al₁₂相的衍射峰强度发生变化, 含量由高到低为7% > 5% > 3% > 1% > 0%, 零预变形最低。这说明在进行激光熔凝处理前对样品进行预变形会使样品中 β -Mg₁₇Al₁₂相的含量增加。

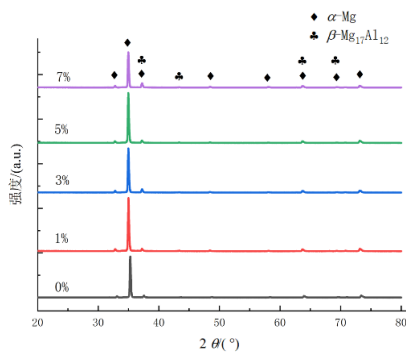


图5 不同预变形量下试样的XRD衍射图谱

Fig.5 XRD diffraction patterns of specimens with different predeformation amounts

2.4 预变形对激光处理 AZ31 镁合金硬度的影响

不同预变形情况下激光熔凝处理后母材区、热影响区及熔凝层显微硬度值如图6所示。由图6可以

看出, 对AZ31镁合金板材进行预变形, 激光熔凝处理后表面熔凝层的硬度随着预变形量的增加而提高; 热影响区的硬度在预变形量为1%时最大, 这与其晶粒尺寸最小相对应; 不同预变形量下母材的硬度较为接近, 这是因为激光熔凝处理为表面改性技术, 母材区所受影响较小。

根据Hall-Petch公式^[17], 晶粒尺寸降低, 合金硬度升高。进行预变形的AZ31镁合金板材经激光熔凝表面处理后, 熔凝层、热影响区晶粒尺寸发生不同的变化, 其硬度产生变化。

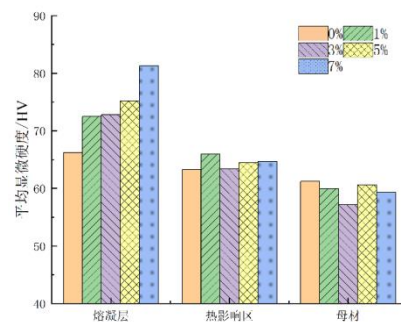


图6 不同预变形量下试样各区域硬度值

Fig.6 Hardness values of various regions of the specimen under different predeformation amounts

2.5 预变形对激光处理 AZ31 镁合金抗拉强度的影响

图7所示为不同预变形样品经激光熔凝处理后

AZ31镁合金板材的拉伸应力应变曲线。表1为不同预变形样品经激光熔凝处理后测得的抗拉强度。从表中我们可以看出，未变形的试样经激光熔凝处理后抗拉强度为266.42 MPa，而经过1%的预变形后试样抗拉强度有所提高，为272.61 MPa，且达到最高值。经过3%的预变形后试样抗拉强度增强不明显，为269.31 MPa。经过5%的预变形后，试样的抗拉强度开始下降，为265.13 MPa；当经过7%的预变形后，试样的抗拉强度明显下降，为252.80 MPa。

综上所述，AZ31镁合金板材进行1%预变形时，激光熔凝处理后材料的抗拉强度较好。这是因为，根据显微组织观察，AZ31镁合金板材预变形1%时，激光熔凝处理后板材的晶粒尺寸最小。晶粒细化可以促进材料的塑性变形。随着晶粒尺寸的减小，位错运动遭遇显著阻力，原本用于塑性形变的能量转而驱动位错在晶界区域进行滑移等活动。这种转变导致材料展现出较强的塑性变形能力，并间接提升

了其抗拉强度。而AZ31镁合金板材预变形为3%、5%、7%时，板材能在较低温度下发生再结晶，晶粒细化，但随着激光熔凝处理的进行，再结晶后的晶粒长大，晶粒粗化，导致其抗拉强度下降。

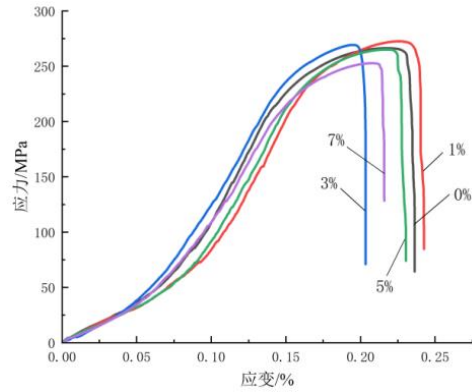


图7 不同预变形量下试样的拉伸应力应变曲线

Fig.7 Tensile stress-strain curves of specimens with different predeflections

表1 不同预变形量下试样的抗拉强度

Tab.1 Tensile strength of specimens with different predeflections

预变形量/%	0	1	3	5	7
抗拉强/MPa	266.42	272.61	269.31	265.13	252.80

2.6 预变形对激光处理 AZ31 镁合金极化曲线的影响

图8为不同预变形量样品经激光熔凝处理后样品的阻抗图谱与极化曲线图，图8(a)的阻抗图由高频容抗弧，低频容抗弧与感抗弧组成，高频容抗弧的半径越大，试样的耐腐蚀性能越好，而出现感抗弧则说明试样在3.5 wt.% NaCl溶液中出现了点蚀现象

象^[18]。图8(b)极化曲线配合Tafel外推法可以计算出腐蚀电流密度，腐蚀电流密度越小，材料的耐腐蚀性能越好^[19]。通过图8和表2可以看出，腐蚀电流密度由高到低为：1% > 3% > 0% > 7% > 5%。由此可知，试样耐腐蚀性能由高到低为预变形量5%、7%、0%、3%、1%。即预变形为5%时，激光熔凝处理的试样腐蚀性能最好。

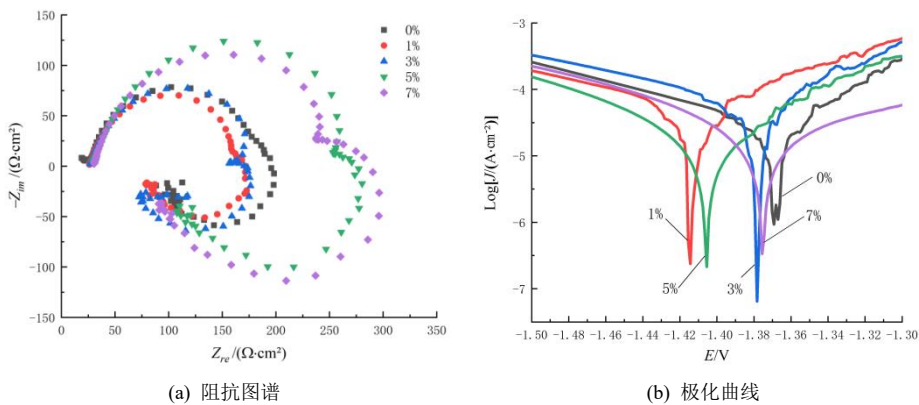


图8 不同预变形量下试样的阻抗图谱和极化曲线

Fig.8 Impedance spectra and polarization curves of samples under different predeformation

AZ系列镁合金的耐腐蚀特性与其内部β相的分

布以及晶粒大小具有显著关联性。通常，第二相含

量的提升往往导致腐蚀速度的加速。随着晶粒尺寸增大,晶界往往会积聚大量铝和杂质元素,使得这些区域的铝及杂质浓度高于晶粒内部,由此引发的成分非均匀性在晶界形成了电势差,从而催生了微电池效应,显著加速镁合金的腐蚀进程^[20]。随着预变形量的增加,激光熔凝处理后镁合金表面熔凝层的晶粒尺寸越来越小,耐腐蚀性能提高。但对样品进行不同的预变形量,激光处理后AZ31镁合金中 β 相的含量不同。预变形量为7%的样品中熔凝层晶粒尺寸小于预变形量为5%的样品,但其熔凝层 β 相的含量大于预变形量为5%的样品,两者共同作用导致预变形量为7%的样品的耐腐蚀性能较预变形量为5%的样品差。虽然预变形量为1%和3%的样品熔凝层晶粒尺寸小于未经预变形样品的晶粒尺寸,但其 β 相含量增加,两者共同作用导致其耐腐蚀性能低于未经预变形的样品。

不同预变形量样品经激光熔凝处理后,样品的耐腐蚀性能发生变化,但其腐蚀电流密度为同一数量级,即样品耐腐蚀性能并无大幅度的提升或下降,预变形量对样品的耐腐蚀性能影响较小。

表2 不同预变形量下试样的电化学拟合参数

Tab.2 Electrochemical fitting parameters of specimens with different predeformations

预变形量 /%	腐蚀电位 /V	腐蚀电流密度 /($10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
0	-1.386	3.96
1	-1.416	5.69
3	-1.372	5.43
5	-1.405	1.90
7	-1.377	2.14

3 结论

(1) 在显微镜下观察到预变形量为零时,随着激光熔凝处理的进行,热影响区的晶粒尺寸变大;预变形1%时,激光熔凝处理后热影响区的晶粒细化,晶粒尺寸变小;当预变形量为3%、5%、7%时,随着激光熔凝处理的进行,热影响区的晶粒开始长大,晶粒粗化。

(2) 随着预变形量的增加,激光熔凝处理后样品熔凝层的硬度增加,且熔凝层组织硬度较基体母材硬度上升;进行1%预变形的样品,抗拉强度达到最高,随着预变形量的继续增加,抗拉强度逐渐降低,甚至低于未经变形的样品经激光熔凝处理后的

抗拉强度。

(3) 预变形量为5%和7%时,样品表面耐腐蚀性能提高,而预变形量为1%和3%时,样品表面耐腐蚀性能比未经变形的样品的耐腐蚀性能差,其中,预变形5%时,样品表面的耐腐蚀性能最好。但样品的腐蚀电流密度均在同一数量级,即样品的耐腐蚀性能变化不明显,预变形对样品耐腐蚀性能影响小。

参考文献

- [1] 汪凌云,黄光胜,范永革,等. 变形AZ31镁合金的晶粒细化[J]. 中国有色金属学报, 2003(3): 594-598.
- [2] 贾伟鑫,乐启焱,宝磊,等. AZ31 镁合金板材弯曲行为的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(2): 177-181.
- [3] 朱必武,崔悦,刘筱,等. 热扭转下AZ31镁合金微观组织和力学性能研究[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(12): 121-128.
- [4] 杨秉焯,卜少科,吴博,等. 挤压态AZ31镁合金板的电化学腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2023, 52(15): 34-37.
- [5] 汪丽佳,胡励,苗天虎,等. 预变形对双峰分离非基面织构AZ31镁合金板材室温力学行为及微观组织演变的影响[J]. 金属学报, 2024, 60(7): 881-889.
- [6] Senocak C T. Effects of PEO and BN-PVD coatings on the wear, corrosion, and surface properties of AZ31 magnesium alloy[J]. Physica Scripta, 2024, 99(11): 115934-115934.
- [7] 李勇,缪星旭,张成佳,等. 激光熔凝处理对P20钢组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(9): 209-215.
- [8] 丁浩川,蓝永庭,解远航,等. 激光熔凝改性Q235钢表面的微观组织和力学性能演变分析[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(5): 640-649.
- [9] 和豪涛,王晨,李金辉,等. 汽车用AZ91镁合金的表面激光改性研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(5): 41-50.
- [10] 周德瑞,纪红,许越. 激光表面改性对金属材料表面耐腐蚀性能的影响[J]. 材料保护, 2002(2): 9-11.
- [11] 张昕宇,李继军,丁慧,等. 预变形及退火对变形镁合金组织及性能影响研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 26-31.
- [12] Padmavathi F, Sundar K, Joshi M, et al. Effect of pulsed Nd/YAG laser melting treatment on microstructural and corrosion behaviour of AZ91C Mg alloy[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(5): 583-589.
- [13] 郑婷,李明熹,张峻巍,等. 定向凝固镁合金表面激光