

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.09.005

喷丸和离子注入对镁合金摩擦腐蚀性能的影响

罗书鹏, 窦忠宇*, 李 粉

(安顺学院 电子与信息工程学院, 贵州 安顺 561000)

摘要: 针对镁合金摩擦耐蚀性能差的问题, 对镁合金 AZ31 进行喷丸和离子注入工艺处理, 研究不同强化工艺对镁合金摩擦和耐蚀性能的影响, 使用 X 射线衍射仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机、电化学工作站等对强化处理后的镁合金试样进行了测试与表征。结果表明: 喷丸和离子注入强化后镁合金 AZ31, 相较于抛光处理以及喷丸处理的镁合金的显微硬度更高, 这是由于 N 离子注入后有新相 Mg_3N_2 出现。摩擦磨损实验表明, 离子注入和喷丸复合处理的镁合金摩擦系数更低, 且磨损量相较于抛光处理试样降低近一倍。电化学结果显示复合处理的镁合金试样, 自腐蚀电位提高至 -1.13 , 自腐蚀电流密度大幅减小, 这是由于合金表面形成的 Mg_3N_2 新相以及过饱和氮的扩散保护作用, 说明表明离子注入和喷丸的复合工艺是进一步提高镁合金摩擦耐蚀性能的有效手段。

关键词: 镁合金; 喷丸; 离子注入; 摩擦磨损; 腐蚀性能

中图分类号: TG174; TG306

文献标识码: A

Effect of shot peening and ion implantation on friction corrosion properties of magnesium alloys

Luo Shupeng, Dou Zhongyu*, Li Fen

(School of Electronic and Information Engineering, Anshun University, Anshun 561000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor friction and corrosion resistance of magnesium alloy, magnesium alloy AZ31 was treated by shot peening and ion implantation, and the effect of strengthening process on the friction and corrosion resistance of magnesium alloy was studied. The magnesium alloy samples after strengthening were tested and characterized by X-ray diffractometer, microhardness tester, friction and wear testing machine and electrochemical workstation. Magnesium alloy AZ31 was treated by shot peening and ion implantation, and the effect of strengthening process on the friction and corrosion resistance of magnesium alloy was studied. The magnesium alloy samples after strengthening were tested and characterized by X-ray diffractometer, microhardness tester, friction and wear testing machine and electrochemical workstation. The results show that the microhardness of magnesium alloy AZ31 after shot peening and ion injection is higher than that of magnesium alloy after polishing and shot peening, which is due to the appearance of new phase Mg_3N_2 after N ion injection. The friction and wear experiments show that the friction coefficient of the magnesium alloy treated by ion injection and shot peening is lower, and the wear amount of the magnesium alloy treated by ion injection and shot peening is nearly twice that of the polished alloy. The electrochemical results show that the self-corrosion potential increases to -1.13 , and the self-corrosion current density decreases significantly, which is due to the new

收稿日期: 2024-05-12

修回日期: 2024-05-28

作者简介: 罗书鹏 (2001—), 男, 本科生, 研究方向: 表面技术, email: lsp2992433731@163.com

通信作者: 窦忠宇, email: dzyvs2010@126.com

基金项目: 安顺学院大学生创新创业计划训练项目 (SRT202225); 贵州省教育厅青年人才项目 (2022040)

Mg₃N₂ phase formed on the alloy surface and the diffusion protection of supersaturated nitrogen, indicating that the combined process of ion implantation and shot peening is an effective means to further improve the friction corrosion resistance of magnesium alloys.

Keywords: magnesium alloy; shot blasting; ion implantation; friction and wear; corrosion property

镁合金是一种绿色、轻质的材料,具有高比强度、高比刚度和生物相容性好等特点,镁合金材料常用于汽车、生物医学、航空航天、电子工业等领域中^[1-2],但是镁合金的硬度较低,其耐磨和腐蚀性能较差,这些严重限制了镁合金材料的工业应用。

目前,国内外已有多种表面强化工艺来提升镁合金性能的研究成果,主要的表面强化工艺方法有喷丸、微弧氧化、化学转化法、离子注入、激光冲击、涂层技术等^[3-4]。杜鹃等^[5]采用超声喷丸工艺对AZ80M镁合金板材进行表面纳米化处理,结果发现喷丸使AZ80M镁合金表层的晶粒尺寸显著减小,耐腐蚀性能显著提高。Jin等^[6]人发现经过微弧氧化处理后,镁合金AZ91的摩擦摩擦性能得到显著提高。韦仙等^[7]把羟基和羧基通过离子注入工艺对ZK60镁合金进行处理,发现合金的力学性能和耐蚀性均得到提高。Sukanta B等^[8]人采用离子体电解氧化(PEO)涂层技术对镁合金AZ31进行处理,发现突出了GNP-乙醇在改善PEO涂层AZ31的摩擦学性能方面的巨大潜力。延黎等人采用激光冲击强化对镁合金进行处理,结果表明激光冲击强化工艺改变了镁合金材料粗糙度、硬度从而影响其耐磨性能^[9]。

目前合金材料的强化工艺研究主要集中在单一处理工艺,对各种合金材料采用复合强化工艺的研究,特别是对镁合金材料复合处理的强化研究报道较少。汤曹勇^[10]发现经过微弧氧化后油漆的复合表面的耐腐蚀效果更好,复合处理工艺为镁合金电子备的防腐蚀结构设计提供指导。张聪惠等对镁合金采用高能喷丸和渗铝工艺进行处理,发现高能喷丸强化有利于镁合金表面渗铝,提高了镁合金的耐蚀性^[11]。黄庆国等^[12]采用限制模压变形和超声喷丸对镁合金AZ31试样进行表面处理,发现限制模压变形和超声喷丸具有叠加效果,复合处理工艺相对于单一处理工艺能进一步减小AZ31镁合金的晶粒尺寸,增强表面硬度。张聪惠等^[13]人研究发现经过高能

喷丸处理后的镁合金再进行镀膜处理可以提高膜层的结合力,膜层的耐腐蚀性能得到提高。基于此,本文对AZ31镁合金进行复合强化工艺处理,研究高能喷丸和离子注入复合处理工艺相较于喷丸处理、抛光处理对于合金力学性能、摩擦耐蚀性能的影响,以便为镁合金复合处理工艺提供实验参考。

1 实验材料及方法

实验材料选用镁合金AZ31板材,挤压成型。使用电火花线切割机加工成100 mm×100 mm×5 mm的尺寸,采用高能喷丸设备进行喷丸处理,喷丸直径为1 mm,喷丸工作压力为0.1 MPa,喷丸时间分别为10 min。使用电火花线切割机加工成15 mm×15 mm×5 mm的块体,再用1000#和2000#水磨砂纸打磨后进行抛光处理,使用超声清洗10 min后冷风吹干。使用多功能离子注入与沉积设备上进行N离子注入实验,真空度为 2×10^{-3} Pa,注入能量为20 keV,注入剂量为 1×10^{15} ions·cm⁻²。

采用X'Pert PRO衍射仪进行XRD测试,检测角20°~80°,扫描速度5°/min,步长0.02°/s;采用HV-1000维氏显微硬度计测试表面硬度数据,选取5个部位取其平均值,载荷0.98 N,保载时间为10 s;采用UMT-2型多功能摩擦磨损试验机进行镁合金表面摩擦实验,使用Al₂O₃球进行干摩擦,摩擦方式为圆周运动,摩擦时间20 min,载荷10 N,摩擦速度100 r/min,摩擦半径12 mm,采用电子天平对摩擦实验试样进行称重,精确到0.1 mg,采用失重法评估其磨损性能;使用上海辰华CHI660E电化学工作站进行了电化学测试,测试试样为工作电极,辅助电极为Pb电极,参比电极为饱和甘汞电极,电解液为3.5% NaCl水溶液。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图1为不同处理工艺的镁合金试样的X射线衍

射图谱,从图中可知,抛光处理的镁合金表面主要以Mg基体相为主,还有MgO相出现,说明表面有氧化层。喷丸强化处理后镁合金出现了Mg特征峰位置的变化,这是由于喷丸强化后产生了晶粒细化^[14]和压应力致使表面晶格结构发生了变形。同时发现N离子注入后镁合金表面除了Mg和MgO相外还出现

了 Mg_3N_2 新相,新相的产生导致表面性能发生改变。由于离子注入过程中产生了高温造成了晶粒的粗化^[15],离子注入轰击产生的内应力会产生大量缺陷促使镁合金表面晶格结构变形,这些导致了处理后的Mg的强度和峰位发生改变^[16]。

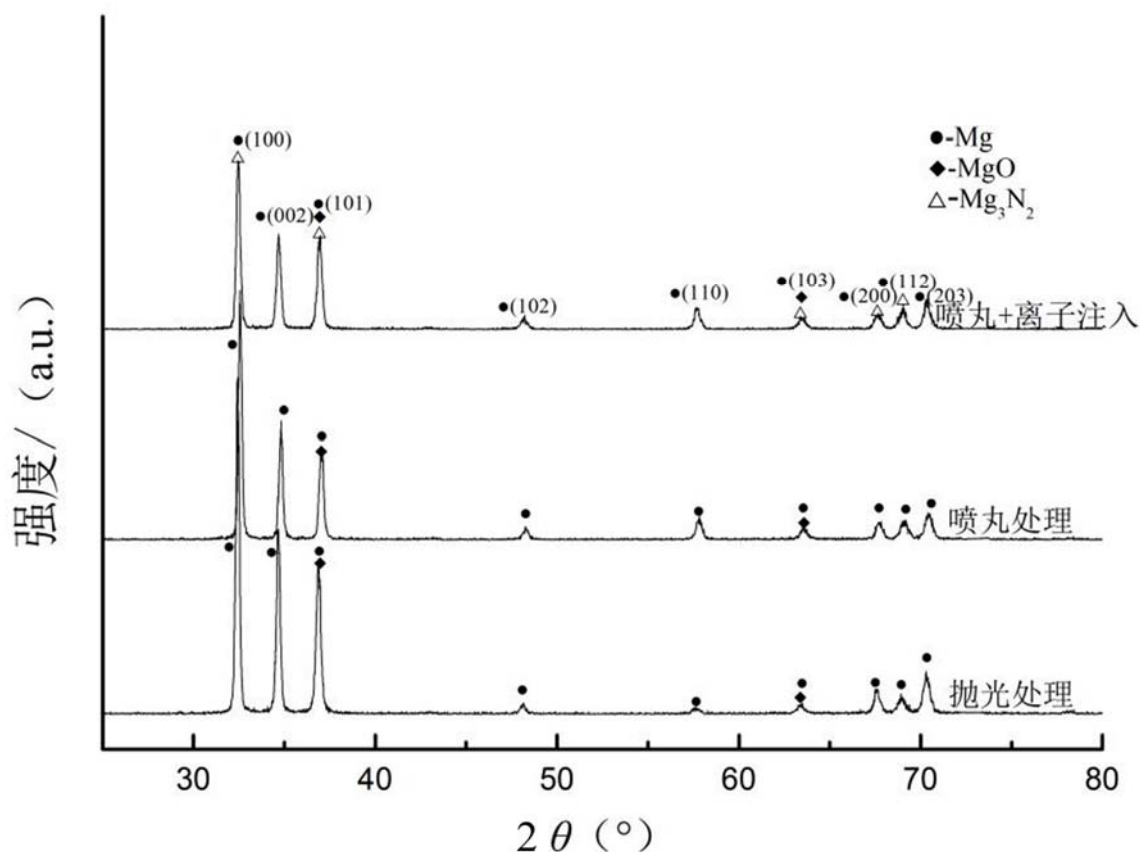


图1 镁合金试样的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of magnesium alloy samples

2.2 显微硬度

图2为不同处理工艺的镁合金试样5次测量的平均显微硬度,结果显示抛光处理试样的平均硬度在85 HV,经过喷丸处理后的试样表层硬度大幅增加,平均达到99 HV,这是由于喷丸处理能在材料一定深度内产生较好的变形硬化效果和表层细化,晶粒强化效应是由晶粒细化、应变强化和残余压应力引起的。研究表明^[17-18],晶粒尺寸越小,显微硬

度越高。喷丸和离子注入后的合金试样表层硬度进一步增大,显微硬度的增加是由于在高含氮层中形成了压缩残余应力和N相的微畸变。由于采用的维氏硬度测量方法压头的压入深度达到微米级^[19],超过了注入层深度,对于测量结果有一定的影响,因此复合处理工艺的镁合金表面显微硬度结果提升不大。

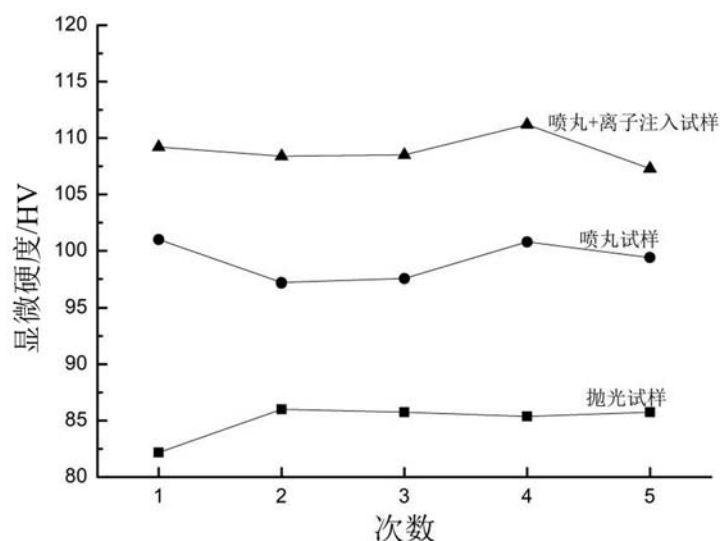


图 2 镁合金试样的显微硬度

Fig. 2 Microhardness of magnesium alloy samples

2.3 摩擦磨损性能

图3为不同处理工艺的镁合金试样的摩擦系数。由图3可知抛光镁合金试样由于组织的均匀性,表面的光洁度等问题摩擦系数的波动较大,平均摩擦系数为0.318,经喷丸处理后摩擦系数比较平稳,平均摩擦系数为0.300,经喷丸和离子注入后的摩擦系数显著降低,平均摩擦系数为0.281。经过喷丸处理后镁合金的摩擦系数显著降低,其原因是由于镁合金表面的晶粒细化,显微硬度提高的效果。而喷丸和离子注入处理的镁合金摩擦性能提高是由于N离子注入所产生的辐照强化、弥散强化、氮固溶强化

的共同效果。图4为不同处理工艺的镁合金试样磨损损失重,由图4中可知,在相同的实验条件下,喷丸处理后试样的质量损失量明显小于抛光镁合金,复合处理工艺的试样磨损量最小,和抛光处理工艺相比下降近一倍,磨损结果与摩擦系数的表现一致。摩擦实验结果表明,喷丸处理工艺可以显著提高镁合金材料的耐磨性,复合处理工艺进一步提高了镁合金材料的摩擦耐磨性能,证明了基于表面纳米化的离子注入技术是改善镁合金摩擦磨损性能的有效手段。

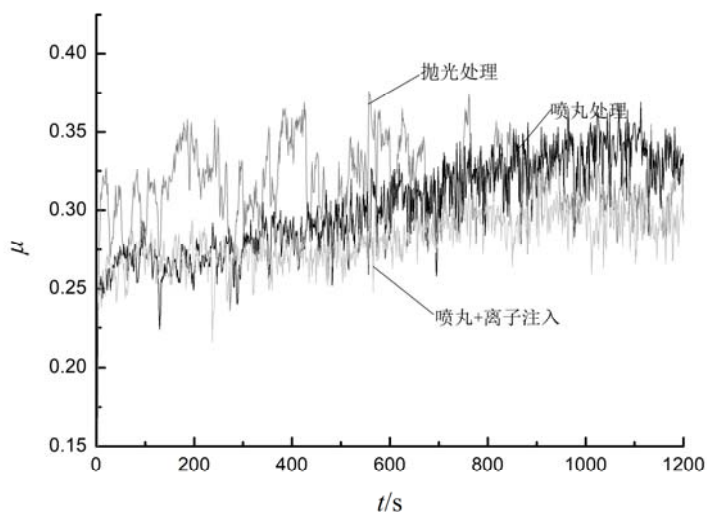


图 3 处理后镁合金的摩擦系数

Fig. 3 Friction coefficient of treated magnesium alloy

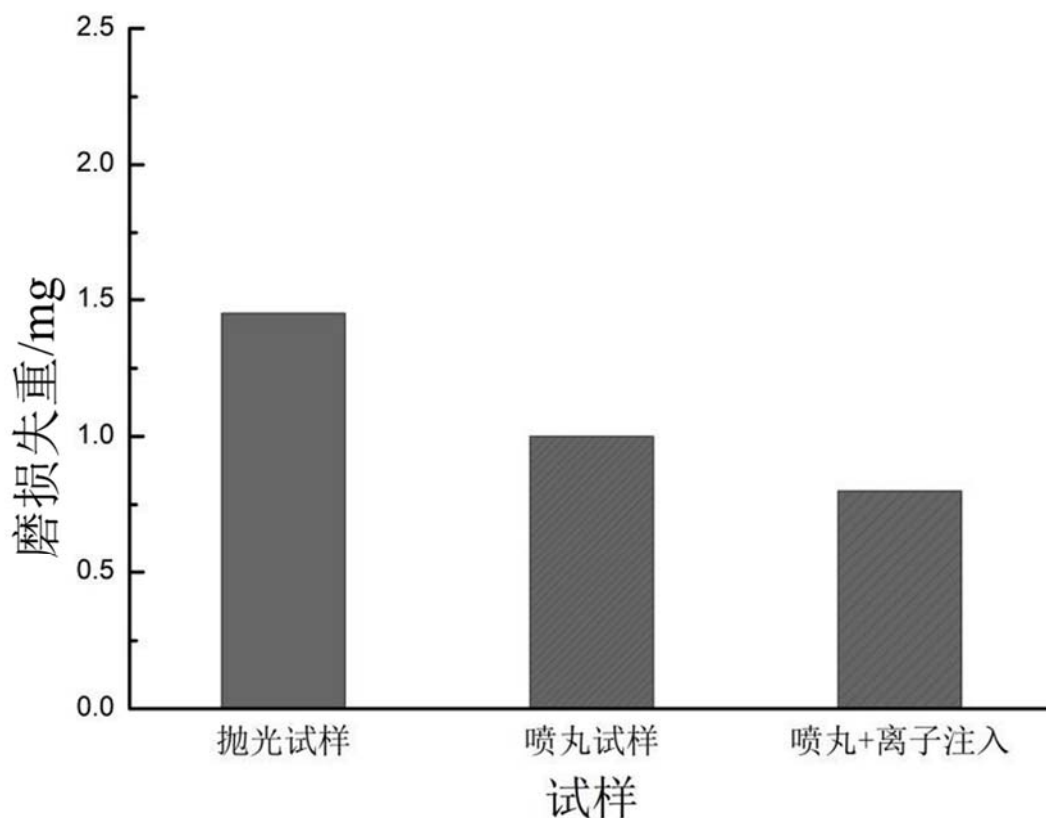


图4 处理后镁合金的磨损失重

Fig. 4 Wear loss of treated magnesium alloy

2.4 腐蚀性能

不同处理工艺的镁合金试样极化曲线如图5所示,使用Tafel外推法得到的腐蚀信息见表1。从图5中可以看到经过喷丸处理之后,镁合金的阳极极化曲线向钝化方向迁移,表1的数据显示,进行喷丸处理后镁合金相较于抛光处理的试样其自腐蚀电位增加,腐蚀电流密度减小。经过N离子注入之后,镁合金的腐蚀电位进一步提升,腐蚀电流密度大幅降低,这些都说明了喷丸和离子注入后镁合金试样的

耐蚀性能得到了大幅度增强。除了喷丸后的镁合金晶粒细化和压应力外^[5,20],N作为一种间隙元素,植入后形成间隙固溶体,易于形成非晶表面,提高了抗点蚀能力。高能离子注入工件表面,与表面附近的原子和电子发生一系列碰撞,产生强大的能量,导致有效加工层的结构和组织发生变化,镁合金表面改性层由MgO和Mg₃N₂组成,具有良好的耐蚀性。当注入剂量达到一定临界值时,注入层变得无序,结构具有良好的抗氧化和抗腐蚀能力^[20-21]。

表1 不同处理工艺的镁合金腐蚀数据.

Tab. 1 Corrosion data of magnesium alloy by different treatment processes.

样品	抛光处理	喷丸处理	喷丸+离子注入
自腐蚀电位/V	-1.5	-1.3	-1.13
腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)	5.72×10 ⁻⁵	5.61×10 ⁻⁶	1.48×10 ⁻⁹

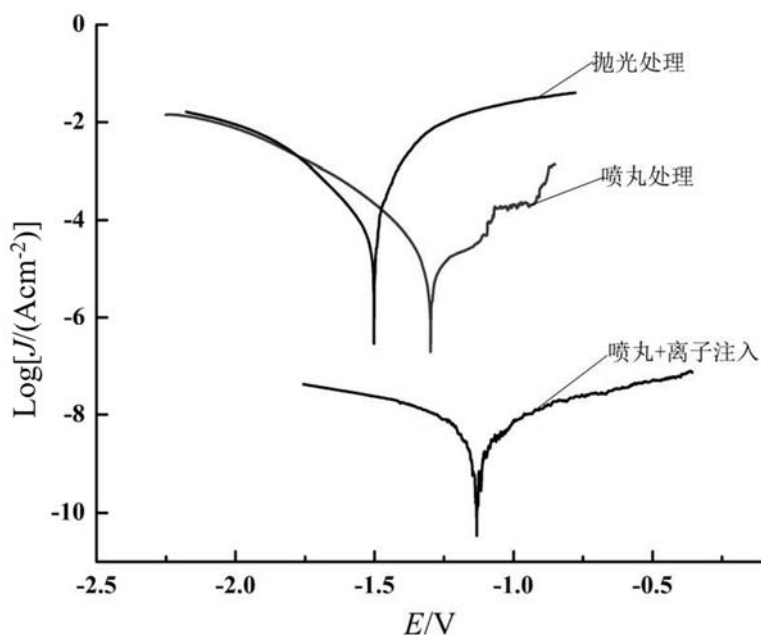


图 5 不同处理工艺的镁合金试样的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of magnesium alloy by different treatment processes.

3 结论

1) 对镁合金试样进行不同的表面处理工艺,发现经过喷丸和离子注入后镁合金表面的显微硬度大幅增加, N离子注入后有新相 Mg_3N_2 出现, 镁合金试样表面的硬度最高, 这是由于N离子注入后表面产生辐照强化、弥散强化和硬质相氮化物造成的。

2) 摩擦实验表明复合工艺处理的镁合金摩擦系数降至0.281, 磨损失重量最小, 磨损结果与摩擦系数的表现一致。

3) 电化学结果显示喷丸和离子注入处理的镁合金的腐蚀电位提高, 腐蚀电流密度大幅减小, 腐蚀性能得到大幅提升, 说明喷丸和离子注入的复合处理工艺是提高镁合金的耐磨和耐蚀性能的有效手段。

参考文献

- [1] 王悦存, 周凡, 葛延峰, 等. 镁合金表面改性防护研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(2): 100-112.
- [2] 齐左飞, 吴志生, 陈金秋, 等. 镁合金表面耐蚀涂层现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2021, 50(20): 1-6.
- [3] 王森, 吕滨江, 郭峰. 表面处理对镁合金摩擦磨损性能影响的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(12): 6-13.
- [4] 夏先朝, 潘玥, 袁杏, 等. 镁合金表面腐蚀防护技术研究进

展[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 37-50.

- [5] 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.
- [6] Jie J, Huan L, Xiaohan L. Friction and wear behavior of micro arc oxidation coatings on magnesium alloy at high temperature[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(5): 1202-1206.
- [7] 韦仙, 冯中营, 杨文锦. 有机官能团离子注入对 ZK60 镁合金力学性能和耐蚀性的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(8): 45-53.
- [8] Bhowmick S, Muhaffel F, Shirzadian S, et al. Tribological performance of a plasma electrolytic oxidation-coated Mg alloy in graphene-incorporated ethanol[J]. Lubricants, 2023, 12(1): 2.
- [9] 延黎, 吴昊年, 田乐, 等. 激光冲击强化 MB8 镁合金的工艺分析及摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 45-57.
- [10] 汤曹勇. AZ91D 镁合金电子设备耐腐蚀性复合表面处理工艺技术[J]. 现代机械, 2018, (3): 9-12.
- [11] 张聪惠, 宋国栋, 王婧, 等. 表面纳米化对 AZ91D 镁合金渗铝行为的影响(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(2): 447-453

下转 92 页