

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.12.017

纳米 ZrO₂ 颗粒对车辆用镁合金表面微弧氧化膜耐磨性能的影响

刘巧红¹, 李永越^{1*}, 徐光顺²

(1. 沧州交通学院 机械与动力工程学院, 河北 沧州 061100; 2. 中铁物总技术有限公司, 北京 100036)

摘要: 选用纳米 ZrO₂ 颗粒添加到电解液中, 以车辆制造中常用的 AZ31B 镁合金作为基体制备微弧氧化膜, 研究纳米 ZrO₂ 颗粒浓度对微弧氧化膜的形貌、成分、硬度以及耐磨性能的影响。结果表明: 随着电解液中纳米颗粒的浓度增加(0~3.5 g/L), 掺进微弧氧化膜中的 ZrO₂ 颗粒先增多然后减少, 微弧氧化膜的致密性逐步改善然后变差, 硬度和耐磨性能均先提高然后降低。纳米 ZrO₂ 颗粒浓度为 2.5 g/L 时制备的微弧氧化膜表面孔洞少、较为致密, 其硬度达到 340.5 HV, 是 AZ31B 镁合金的 3.5 倍。该微弧氧化膜还具有良好的耐磨性能, 稳定磨损阶段的摩擦系数约为 0.45, 明显低于 AZ31B 镁合金的摩擦系数(0.8), 并且磨损体积仅为 $3.17 \times 10^3 \mu\text{m}^3$, 较 AZ31B 镁合金降低了约两个数量级。

关键词: 微弧氧化膜; AZ31B 镁合金; 车辆; 纳米 ZrO₂ 颗粒; 耐磨性能

中图分类号: TG174.453; TQ630.6 **文献标识码:** A

Effects of nano-ZrO₂ particles on wear resistance of micro-arc oxide films on vehicle-use magnesium alloy

Liu Qiaohong¹, Li Yongyue^{1*}, Xu Guangshun²

(1. Department of Mechanical and Power Engineering, Cangzhou Jiaotong College, Cangzhou 061100, China; 2. China Railway Materials Technology Co., Ltd, Beijing 100036, China)

Abstract: By adding nano-ZrO₂ particles to the electrolyte, and selecting AZ31B magnesium alloy, commonly used in vehicle manufacturing, as the substrate, micro-arc oxide films were prepared. The effects of the concentration of nano-ZrO₂ particles on the morphology, component, hardness and wear resistance of micro-arc oxide films were further investigated. The results show that, as the concentration of nanoparticles in the electrolyte increase from 0 to 3.5 g/L, the ZrO₂ particles incorporated into the micro-arc oxide films initially increase and then decrease, and the compactness of the micro-arc oxide films is progressively improved but subsequently deteriorated, accompanied with first improvement and then reduction of both hardness and wear resistance. The micro-arc oxide film prepared when the concentration of nano-ZrO₂ particles is 2.5 g/L show a small number of pores on the surface and favorable

收稿日期: 2025-04-09 修回日期: 2025-06-30

作者简介: 刘巧红(1989—), 硕士, 讲师, 研究方向为汽车零部件制造工艺、材料性能分析, email: cangzhouliu1989@163.com

通信作者: 李永越(1992—), 硕士, 讲师, 研究方向为材料表面改性、车辆测试技术, email: liyongyue1@163.com

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目(ZC2021205)

引用信息: 刘巧红, 李永越, 徐光顺. 纳米 ZrO₂ 颗粒对车辆用镁合金表面微弧氧化膜耐磨性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(12): 131-138.

Liu Qiaohong, Li Yongyue, Xu Guangshun. Effects of nano-ZrO₂ particles on wear resistance of micro-arc oxide films on vehicle-use magnesium alloy[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(12): 131-138.

compactness, with a hardness of 340.5 HV, which is 3.5 times higher than that of AZ31B magnesium alloy. The prepared micro-arc oxide film also showed superior wear resistance, with a stable friction coefficient of approximately 0.45 at the steady wear stage, which is significantly lower than that of AZ31B magnesium alloy (0.8). Additionally, the wear volume of the prepared micro-arc oxide film is only $3.17 \times 10^3 \mu\text{m}^3$, which is indicative of a reduction of approximately two orders of magnitude compared to AZ31B magnesium alloy.

Keywords: micro-arc oxide film; AZ31B magnesium alloy; vehicle; nano-ZrO₂ particles; wear resistance

镁合金兼具质量轻、比强度高、减振性能、抗疲劳性能、导热性能和加工性能好等优点,是制造车辆底盘、轮毂等承重部件以及发动机罩、仪表盘基座、电机端盖等非承重部件的理想材料^[1-3]。作为轻质、高强度金属材料,镁合金能显著降低车辆燃油消耗,同时提升车辆的操控性和乘坐舒适性。然而,镁合金存在硬度低、耐磨性能较差等问题^[4-7],限制了在车辆制造中的广泛应用。长期以来,如何提高镁合金的硬度和耐磨性能一直是业界和学术界关注的问题。

微弧氧化是一种依靠电解液与电参数匹配调节,在铝、镁、钛及其合金表面原位成膜的工艺。虽然微弧氧化过程能耗较高,但原位成膜的特点以及微弧氧化膜与基体结合牢固、综合性能优异,使得微弧氧化成为镁合金表面改性的最佳选择。然而,采用常规工艺制备的微弧氧化膜表面孔洞多、致密性较差,在一定程度上限制了性能发挥。为了减少微弧氧化膜的孔洞,改善其致密性从而提高硬度和耐磨性能,国内外研究者采取了多种策略。张红涛等^[8]向电解液中添加稀土盐硝酸钇,发现适量硝酸钇能改善微弧氧化膜的平整度和致密性,进而提高硬度和耐磨性能。张雨露等^[9]向电解液中添加稀土盐硝酸铈,发现适量硝酸铈可以促进微弧氧化过程,使微弧氧化膜增厚且表面粗糙度降低,有利于提高微弧氧化膜的耐磨性能。Lin等^[10]尝试改变电解液中氟化盐的浓度,发现氟化盐在一定范围内能有效改善微弧氧化膜的均匀性和致密性,进而提高耐磨性能。李颂和饶模松等^[11-12]研究发现,在微弧氧化过程中施加负脉冲电压或调控脉冲频率,同样可以提高微弧氧化膜的硬度和耐磨性能。除此之外,Zhang等^[13]向电解液中添加氧化石墨烯颗粒,Mashtalyar等^[14]向电解液中添加纳米TiN颗粒,他们发现微/纳米颗粒可以作为添加剂,颗粒通过机械渗入的方式被微弧氧化膜包覆,能有效提高微弧氧化膜的耐磨性能。目前,关于微弧氧化的电解液成分和电参数优化相关的研究较多,而关于添加微/纳米

颗粒制备微弧氧化膜的研究较少。添加微/纳米颗粒能填补微弧氧化膜的孔洞,改善其致密性从而有效提高硬度和耐磨性能。因此,有必要继续开展这方面研究。

纳米ZrO₂颗粒具有硬度高、耐高温和耐磨损等特性,作为一种硬质颗粒非常适用于提高膜层的硬度和耐磨性能。本文选用纳米ZrO₂颗粒添加到电解液中,以车辆制造中常用的AZ31B镁合金作为基体制备微弧氧化膜。通过研究纳米ZrO₂颗粒浓度对微弧氧化膜的形貌、成分、硬度以及耐磨性能的影响,以期获得具有较高硬度和良好耐磨性能的微弧氧化膜,为镁合金表面改性提供借鉴。

1 实验

1.1 实验材料与电解液

裁切50 mm×25 mm×2 mm的AZ31B镁合金试样,依次用1500#砂纸打磨、无水乙醇浸泡除油、去离子水清洗,然后烘干。

称取10 g硅酸钠、3 g氢氧化钠和3 g氟化钠,溶于适量去离子水中,然后补加去离子水定容至2 500 mL。选用纯度高于99.99%、平均粒径为50 nm ZrO₂颗粒,由博华斯纳米科技有限公司生产。根据实验用量称取4份纳米ZrO₂颗粒,分别为0.25、0.75、1.25和1.75 g,都与适量去离子水混合并经过超声振荡处理配成纳米颗粒分散液。将4份纳米颗粒分散液相对应倒入烧杯I、II、III和IV中,每个烧杯盛有500 mL电解液。烧杯V中也盛有500 mL电解液,但不添加纳米颗粒分散液。

1.2 微弧氧化膜制备

处理后的AZ31B镁合金作为阳极,与直流电源正极连接。不锈钢板作为阴极,与直流电源负极连接。借助机械装置持续的搅拌电解液,搅拌速度为100 r/min,以分散纳米颗粒防止团聚。在烧杯I~IV中进行4组实验,都是在镁合金基体上制备掺杂纳米ZrO₂颗粒的微弧氧化膜,以下简称颗粒掺杂膜。在烧杯V中进行1组实验,是在镁合金基体上制备常

规微弧氧化膜,以下简称常规膜。

1.3 表征与测试

1.3.1 形貌特征与成分

利用扫描电镜(SEM, MERLIN Compact型)观察并分析不同微弧氧化膜的形貌特征,并利用能谱仪(EDS, Xplore型)在相同加速电压下分析不同微弧氧化膜的成分。

1.3.2 硬度

利用显微硬度计(HVS-1000型)测定不同微弧氧化膜的硬度,设定施加的载荷和保持时间分别为0.49 N和15 s。每个试样表面选取3个点,通过测量卸载后形成的压痕对角线长度计算获得硬度值,并取平均值。

1.3.3 耐磨性能

采用多功能摩擦磨损试验机(MFT-5000型)在无润滑条件下进行摩擦实验,以常规膜或颗粒掺杂膜作为待磨件,并以合金钢球作为对磨件,摩擦副接触形式为球盘接触。设定载荷、旋转速度和摩擦时间分别为3 N、150 r/min和480 s。摩擦实验结束后,利用摩擦磨损试验机集成的三维光学形貌仪观察常规膜和颗粒掺杂膜的磨痕三维形貌,同时测量磨痕宽度、磨痕的最大深度和磨损体积。

2 结果与讨论

2.1 纳米颗粒对微弧氧化膜形貌和成分的影响

AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的EDS图谱如图1所示。由图1(a)可知,AZ31B镁合金的主要成分为Mg、C和O。由图1(b)可知,常规膜的主要成分为Mg、O和Si。由图1(c)~图1(f)可知,颗粒掺杂膜的主要成分均为Mg、O、Si和Zr,不同于常规膜。由于配制电解液未使用含Zr试剂,因而Zr元素全部来源于纳米ZrO₂颗粒,表明纳米ZrO₂颗粒参与微弧氧化过程并掺进微弧氧化膜中。

随着纳米颗粒浓度从0增加到3.5 g/L,不同微弧氧化膜中Zr元素的质量分数呈现先升高后降低趋势,如图2所示。这表明随着纳米颗粒添加量增多,掺进微弧氧化膜中的ZrO₂颗粒逐渐增多。但过量添加纳米颗粒的情况下,电解液中空间位阻效应减弱,导致高表面活性的纳米颗粒相互接触极易发生团聚,因而掺进微弧氧化膜中的ZrO₂颗粒较少。

AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的SEM照片如图3所示。对比图3(a)和图3(b)发现,镁合金表面形成一层具有多孔特征的常规膜,孔洞数量较多并且尺寸为微米级,呈无序分布。另外还发现,常规

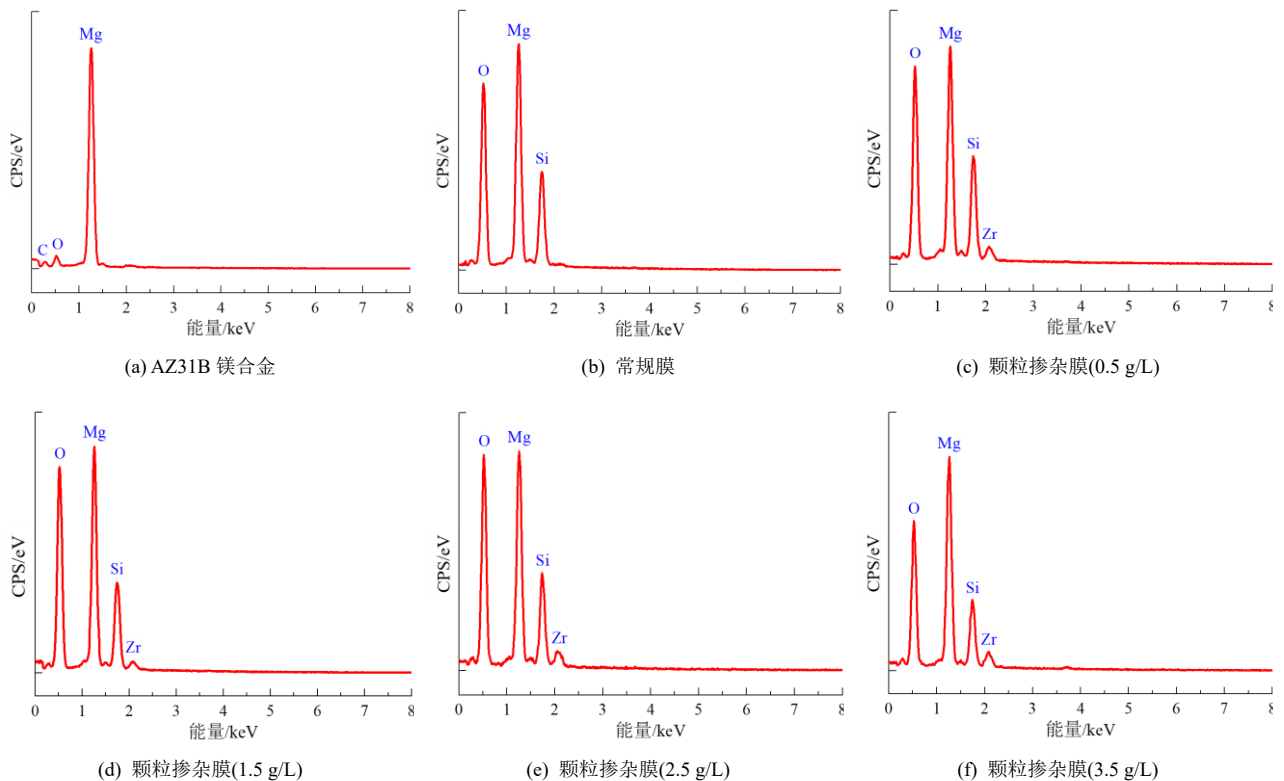


图1 AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的EDS图谱

Fig.1 EDS spectra of AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

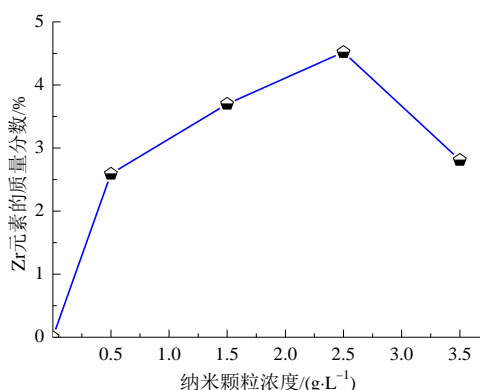


图2 不同微弧氧化膜中 Zr 元素的质量分数

Fig.2 Mass fraction of Zr element in different micro-arc oxide films

膜表面存在凸起，主要位于孔洞周围。结合微弧氧化原理分析，在镁合金微弧氧化过程中同时发生热化学、等离子化学和电化学等多种复杂反应，反应过程中会形成放电通道，加之气体不间断产生并逸出，从而导致微弧氧化膜表面出现较多孔洞^[15-16]。在镁合金微弧氧化过程中还会形成熔融态物质从放电通道中涌出，但遇电解液迅速冷却凝固，从而在孔洞周围形成凸起。对比图3(b)和图3(c)发现，纳米颗粒浓度为0.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜形貌特征与常规膜相似，孔洞尺寸、数量和分布状况无明显差异。这表明添加少量纳米颗粒难以有效填补微弧氧化膜的孔洞，对于改善微弧氧化膜的致密性效果微弱。

对比图3(b)和图3(d)、图3(b)和图3(e)发现，纳米颗粒浓度为1.5和2.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜致密性均好于常规膜，并且随着纳米颗粒浓度从1.5 g/L增加到2.5 g/L，颗粒掺杂膜的孔洞数量呈减少趋势，致密性逐步改善。这表明添加适量纳米颗粒能有效填补微弧氧化膜的孔洞，主要原因在于：一方面，纳米颗粒通过电泳迁移和机械搅动等途径进入放电通道，被凝固后熔融态物质包覆起到类似于填充封孔作用，还会阻碍气体从放电通道中逸出，从而降低孔洞形成几率。另一方面，纳米颗粒通过电泳迁移和机械搅动等途径吸附在微弧氧化膜表面，可能促进熔融态物质均匀流动并缩短凝固时间，从而较好的封堵孔洞^[17]。掺进微弧氧化膜中的纳米颗粒增多的情况下，起到的填充封孔作用以及对熔融态物质凝固过程的调控作用增强，因而微弧氧化膜表面孔洞数量减少，致密性逐步改善。

对比图3(e)和图3(f)发现，纳米颗粒浓度为3.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜表面孔洞数量增多，致密性降低，并且表面出现微裂纹，以孔洞为中心扩展。可能是因为过多纳米颗粒在电解液中分散不均匀，极易发生团聚，团聚态颗粒无法均匀地进入放电通道，并且会造成微弧氧化放电过程不稳定，使微弧氧化膜中放电通道增多，从而形成较多孔洞。另外，团聚态颗粒附着在微弧氧化膜表面导致局部放电能量过高，高能放电区域熔融态物质收缩应力增大，容易形成微裂纹。

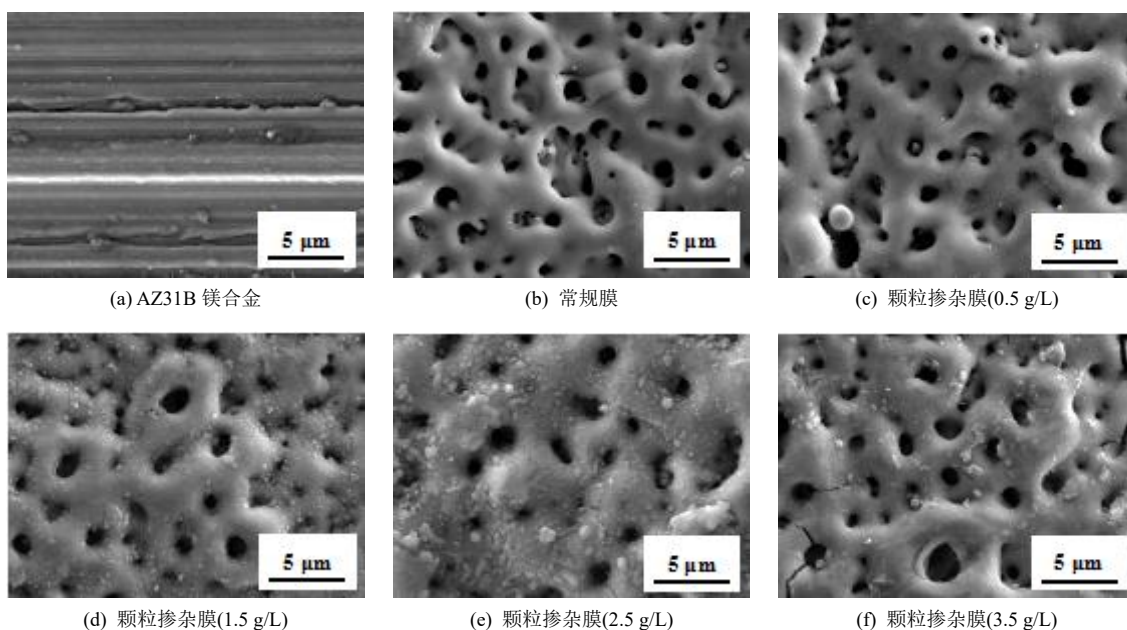


图3 AZ31B 镁合金和不同微弧氧化膜的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜表面元素分布状况如图4所示,可见Mg、O、Si和Zr元素都较均匀分布,这表明镁合金基体、电解液中的硅酸根离子以及纳米ZrO₂颗粒均参与微弧氧化过程。虽然Zr元素分布相对稀疏,但是未出现在局部区域聚集的现象,由此反映出纳米ZrO₂颗粒较均匀地掺进微弧氧化膜中。

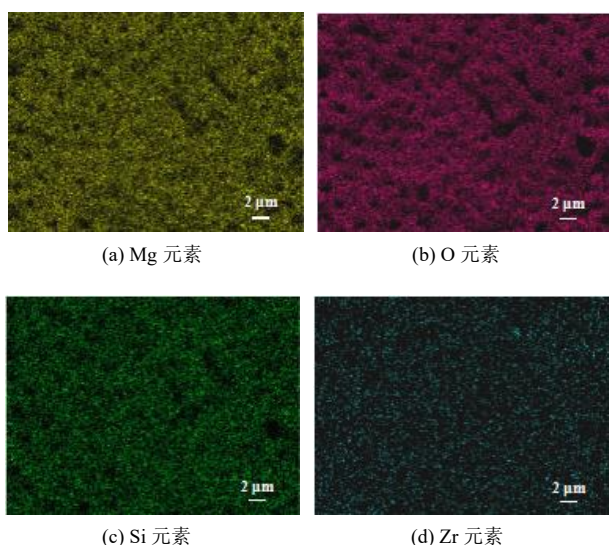


图4 纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜表面元素分布状况

Fig.4 Elemental distribution on the surface of nanoparticle-doped film prepared at nanoparticle concentration of 2.5 g/L

2.2 纳米颗粒对微弧氧化膜硬度的影响

AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的硬度如图5所示。由图可知,常规膜的硬度较AZ31B镁合金(硬度为96 HV)提高约180 HV,而颗粒掺杂膜的硬度较AZ31B镁合金不同程度的提高。其中,纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜硬度最高,达到340.5 HV,是AZ31B镁合金的3.5倍。分析表明,颗粒掺杂膜具有较高的硬度主要由于其表面孔洞少,致密性好于常规膜,致密结构能传递载荷,避免局部应力集中,因而受外部载荷情况下颗粒掺杂膜抵抗局部变形或破裂的能力与常规膜相比增强。随着纳米颗粒浓度从2.5 g/L继续增加达到3.5 g/L,颗粒掺杂膜的硬度反而降低,从340.5 HV降至282.7 HV。原因是纳米颗粒浓度为3.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜致密性较差,表面存在较多孔洞还出现微裂纹,受外部载荷情况下容易引起局部应力集中,可能发生较大程度变形甚至破裂。

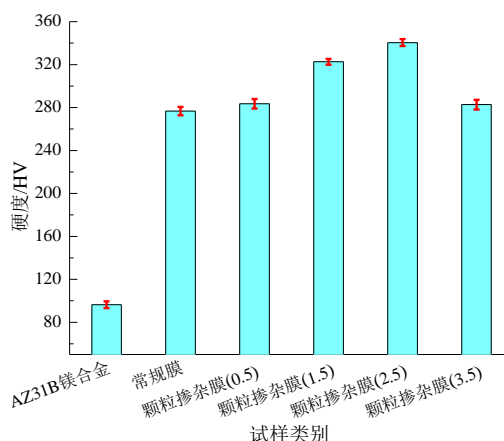


图5 AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的硬度

Fig.5 Hardness of AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

2.3 纳米颗粒对微弧氧化膜耐磨性能的影响

AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的摩擦系数曲线如图6所示。对比发现,随着摩擦时间延长,AZ31B镁合金的摩擦系数变化比较平稳,但始终保持在0.8左右。由于镁合金基体的硬度低,在钢球挤压下表面会发生较大程度变形甚至破裂,同时遭受磨屑的往复碾压,因而其摩擦系数较高。常规膜以及纳米颗粒浓度为0.5和3.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜的摩擦系数都呈现大幅度波动性变化,原因是这3种微弧氧化膜表面孔洞多,并且孔洞周围凸起程度大,当凸起区域与钢球接触时形成非均匀性接触,由于接触面积小,因而摩擦系数较低。但凸起区域被磨平后,微弧氧化膜与钢球接触面积增大,因而摩擦系数升高。鉴于微弧氧化膜表面的孔洞与凸起呈现交错分布,这导致摩擦系数随着摩擦时间延长呈现大幅度波动性变化。

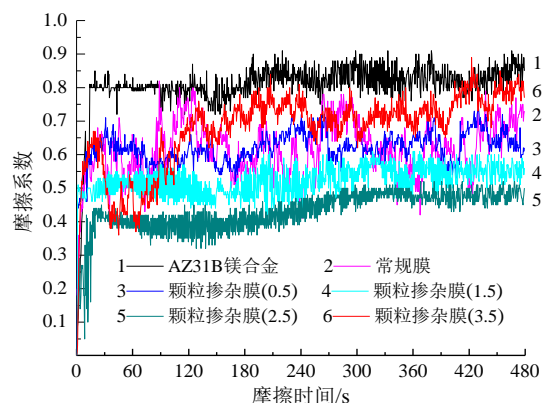


图6 AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的摩擦系数曲线

Fig.6 Friction coefficient curves of AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

随着摩擦时间延长, 纳米颗粒浓度为1.5和2.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜的摩擦系数都逐渐趋于稳定。原因是这两种颗粒掺杂膜表面孔洞少并且孔洞周围凸起程度低, 在摩擦过程中与钢球的接触面积不会发生明显突变。当处于稳定磨损阶段, 纳米颗粒浓度为1.5和2.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜的摩擦系数分别为0.52和0.45左右。相比较而言, 纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜具有更低的摩擦系数, 其耐磨性能最好。

AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的磨痕三维形貌以及磨痕特征参数如图7和表1所示。结合图表可知, AZ31B镁合金的磨痕轮廓不规则, 磨痕宽度

为740 μm, 磨痕的最大深度达到40 μm, 并且磨损体积高达 $1.18 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ 。常规膜的磨痕与AZ31B镁合金相比变窄, 磨痕的最大深度和磨损体积明显减小。纳米颗粒浓度为0.5和3.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜的磨痕宽度和磨痕的最大深度相差不大, 磨损体积介于 $9.0 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4 \mu\text{m}^3$ 之间。但与AZ31B镁合金相比, 常规膜和这两种颗粒掺杂膜的磨损程度较轻, 都能起到减磨作用从而提高镁合金基体的耐磨性能。纳米颗粒浓度为1.5和2.5 g/L时制备的两种颗粒掺杂膜的磨痕宽度和磨痕的最大深度均小于AZ31B镁合金、常规膜和另外两种颗粒掺杂膜, 并且磨损体积低于 $4.0 \times 10^3 \mu\text{m}^3$, 它们的耐磨性能明

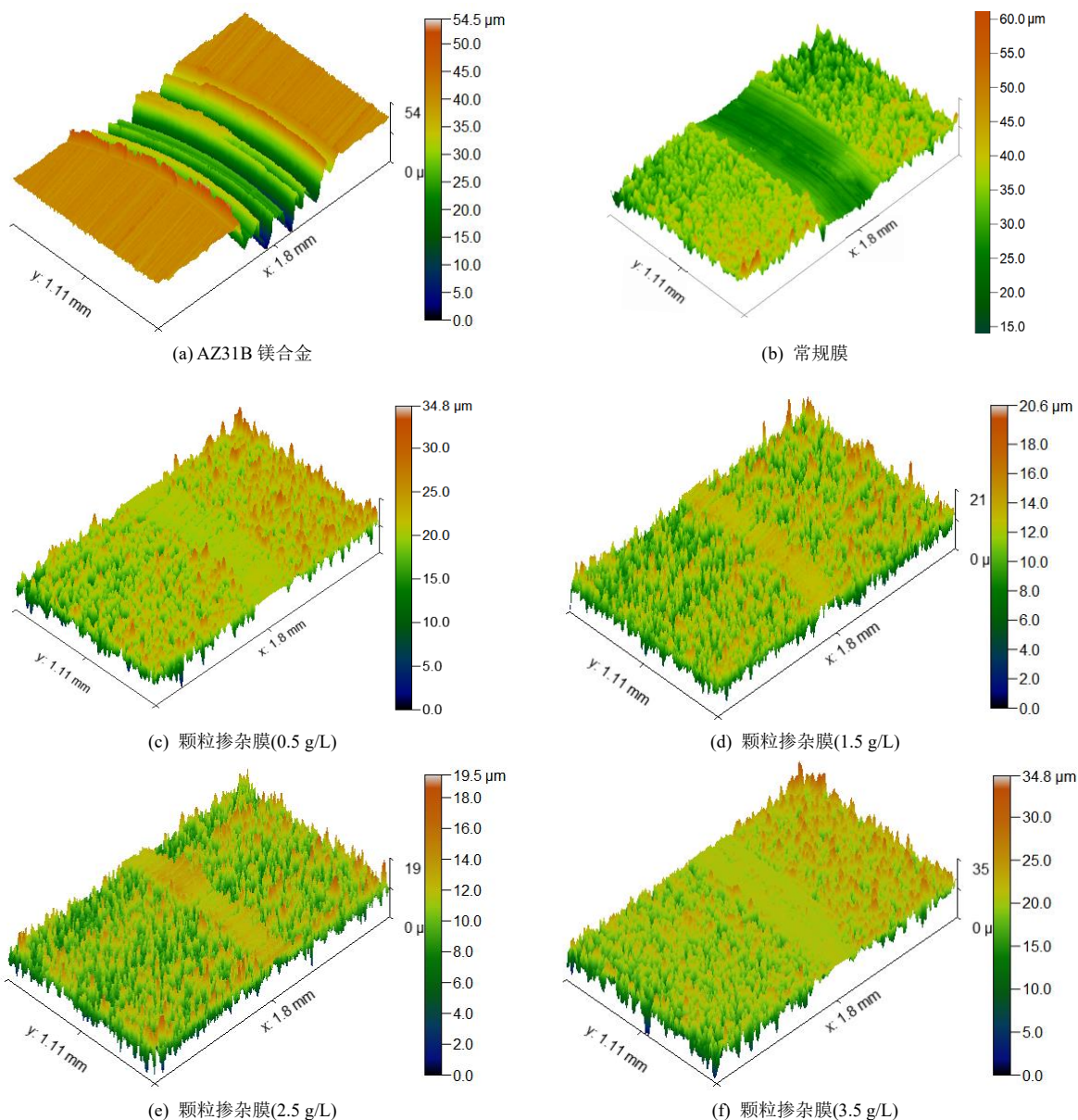


图7 AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的磨痕三维形貌

Fig.7 Three-dimensional morphology of wear scar on AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

表1 AZ31B镁合金和不同微弧氧化膜的磨痕特征参数

Tab.1 Wear scar characteristic parameters of AZ31B magnesium alloy and different micro-arc oxide films

试样类别	磨痕宽度/ μm	磨痕的最大深度/ μm	磨损体积/ μm^3
AZ31B 镁合金	740	40	1.18×10^5
常规膜	520	20	2.76×10^4
颗粒掺杂膜(0.5 g/L)	350	12	9.04×10^3
颗粒掺杂膜(1.5 g/L)	230	8	3.85×10^3
颗粒掺杂膜(2.5 g/L)	200	6	3.17×10^3
颗粒掺杂膜(3.5 g/L)	400	15	9.65×10^3

显较好。尤其是纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜,具有良好的耐磨性能,其磨损体积较AZ31B镁合金的磨损体积降低了约两个数量级,较常规膜的磨损体积降低了约一个数量级。

结合形貌特征、硬度以及磨痕三维形貌分析,AZ31B镁合金与钢球对磨可能发生磨粒磨损、黏着磨损和氧化磨损^[18-20],多种磨损机制共同作用导致其磨痕轮廓不规则,并且磨损程度严重。常规膜和颗粒掺杂膜与钢球对磨主要发生磨粒磨损,由于磨损机制单一,因而磨痕轮廓规则,它们的磨损程度与AZ31B镁合金相比较轻。纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜表面较为致密,并且硬度达到340.5 HV,致密结构和硬度高的优势使其受到外部载荷情况下能有效传递载荷,局部区域不会发生较大程度变形,因而在摩擦过程中产生的磨屑量少,并且磨屑转移到摩擦副之间对微弧氧化膜造成的二次磨损程度较轻。另外,掺进微弧氧化膜中的ZrO₂颗粒会随着磨屑转移过程到达摩擦副之间,凭借硬质特性可以起到承受载荷的作用,也有利于减轻微弧氧化膜的磨损程度。理论上,掺进微弧氧化膜中的ZrO₂颗粒越多,并且颗粒分散性越好,微弧氧化膜与钢球对磨过程中会有较多ZrO₂颗粒被剥落,并伴随着磨屑转移起到减磨作用。因此,纳米颗粒浓度为2.5 g/L时制备的颗粒掺杂膜具有良好的耐磨性能,适用于AZ31B镁合金表面强化从而显著提高其硬度和耐磨性能。

3 结论

(1) 电解液中的纳米ZrO₂颗粒会参与微弧氧化过程并掺进微弧氧化膜中,起到填补孔洞的作用,使微弧氧化膜的致密性改善,微弧氧化膜受到外部载荷情况下抵抗局部变形能力增强并且能有效传

递载荷,因而硬度和耐磨性能提高。

(2) 纳米ZrO₂颗粒浓度为2.5 g/L时制备的微弧氧化膜表面孔洞少、较为致密,其硬度(340.5 HV)是AZ31B镁合金的3.5倍,摩擦系数与AZ31B镁合金相比降低约44%,磨损体积降低了约两个数量级。该微弧氧化膜具有较高硬度和良好的耐磨性能,适用于AZ31B镁合金表面强化从而显著提高其硬度和耐磨性能。

参考文献

- [1] 孟雪. 镁合金电沉积/电聚合防腐超/高疏水涂层的制备及性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [2] 程大庆, 韩卫强, 王硕. 镁合金车轮的性能分析[J]. 北京汽车, 2023(3): 25-27, 46.
- [3] Wang M M. An industrial perspective on magnesium alloy wheels: A process and material design[J]. Materials Sciences and Applications, 2023, 14(1): 20-44.
- [4] Seenuvasaperumal P, Elayaperumal A, Kumar P S M, et al. Analyzing the mechanical and wear behavior of age hardening processed AZ31 magnesium composites[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2021, 9(1): 015031.
- [5] Rajesh Y, Pares S V, Siddaraju C. Effect of ECAP on microstructure and wear resistance of AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2023, 71(1): 57-65.
- [6] 郑锦豪, 陈妍, 李璐瑶, 等. AZ31B镁合金镀覆Al+Ni合金层的组织和性能研究[J]. 信息记录材料, 2024, 25(11): 24-26.
- [7] 熊凡奇, 揭晓华, 卢静, 等. 镁合金表面沉积Al-Al₂O₃/AT₁₃复合涂层及其耐磨耐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2024, 57(6): 1-7.
- [8] 张红涛, 王铁成, 张云龙, 等. Y(NO₃)₃掺杂对AZ91D

- MAO涂层微观结构和耐磨性的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(4): 200-205.
- [9] 张雨露, 祁星, 姜波, 等. 硝酸铈添加剂对AZ91D镁合金微弧氧化膜组织与性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2024, 46(8): 18-24.
- [10] Lin M Y, Wu P H, Lee H B, et al. Improving mechanical properties and corrosion resistance of AZ31 alloy by micro-arc oxidization and post supercritical CO₂-assisted electroless plating[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 315: 129047.
- [11] 李颂. 镁合金微弧氧化膜的制备, 表征及其性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [12] 饶模松, 杨巍, 魏明珠, 等. 脉冲频率对镁锂合金黑色微弧氧化膜层耐磨与抗腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(18): 116-125.
- [13] Zhang Y L, Chen F, Zhang Y, et al. Influence of graphene oxide on the antiwear and antifriction performance of MAO coating fabricated on MgLi alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 364: 144-156.
- [14] Mashtalyar D V, Sinebryukhov S L, Imshinetskiy I M, et al. Hard wearproof PEO-coatings formed on Mg alloy using TiN nanoparticles[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 503: 144062.
- [15] 宋仁国, 孔德军, 宋若希. 微弧氧化技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] 王昌, 浦承皓, 马迪, 等. 微弧氧化陶瓷层生长机理及影响因素分析[J]. 热加工工艺, 2023, 52(16): 6-9.
- [17] Kaseem M, Lee Y H, Ko Y G. Incorporation of MoO₂ and ZrO₂ particles into the oxide film formed on 7075 Al alloy via micro-arc oxidation[J]. *Materials Letters*, 2016, 182: 260-263.
- [18] 任峻. AZ91D 镁合金摩擦磨损行为及机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [19] 崔功军, 师睿博, 李赛, 等. AZ80A, ZK60A 和 ME20M 镁合金干摩擦学性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10103-10108.
- [20] 苏腾飞. AZ51 镁合金摩擦磨损性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.