

镁合金微弧氧化工艺参数研究

陈宏, 郭亚欣, 宫月, 陈永楠, 林洪才

(长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710000)

摘 要: 镁合金是目前最轻的金属, 它可以部分替代一些钢铁材料来实现材料的轻量化。而且镁合金具有比强度、比刚度较高, 减震性、减噪性、加工性较好等优点, 市场对它的需求量也越来越大。但是镁合金的电位很低, 易与其他金属发生电偶腐蚀, 利用微弧氧化可在镁合金表面制得一层综合性能较好、类似陶瓷层的一种膜层, 可大大提高镁合金的耐蚀性、耐磨性及耐高温性, 因此微弧氧化技术在镁合金表面处理上得到了较快发展。对此, 首先介绍了微弧氧化机理的研究现状, 总结了微弧氧化过程的几个主要阶段及其主要作用; 其次, 重点概述了影响镁合金微弧氧化陶瓷膜制备工艺的主要因素, 特别是电参数、电解液及氧化时间等对膜层结构、形貌及性能的影响; 最后提出目前镁合金微弧氧化工艺存在的几个主要问题, 并对其解决办法及应用前景进行了展望。

关键词: 镁合金; 微弧氧化; 陶瓷膜; 工艺参数

中图分类号: TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)05-0034-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.05.007

Process Parameters of Magnesium Alloys Micro-arc Oxidation

CHEN Hong, GUO Ya-xin, GONG Yue, CHEN Yong-nan, LIN Hong-cai

(School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

ABSTRACT: As the lightest metal, magnesium alloy can partly replace some steel materials in achieving light weight. Since magnesium alloy features in high specific strength, specific stiffness, good shock absorption, noise reduction and favorable machinability, it is now increasingly demanded by the market. However, owing to low electric potential, it was easily subject to galvanic corrosion galvanic corrosion with other metals. A ceramic layer-like coating of excellent comprehensive performance could be prepared on the surface of magnesium alloy surface by micro-arc oxidation. In this way, corrosion resistance, wear resistance and high-temperature resistance were all greatly improved. Therefore, micro-arc oxidation technology was developed rapidly on surface treatment of magnesium alloy. For this purpose, current research on mechanism of micro-arc oxidation was introduced firstly, several main stages of micro-arc oxidation process and their main functions were summarized; then main factors affecting preparation technology of magnesium alloy micro-arc oxidation ceramic film, especially effects of electrical parameters, electrolyte and oxidation time on the film structure, morphology and performance were elaborated in details; finally several key problems now present in the magnesium alloy micro-arc oxidation process, and solution and even application foreground were expected as well.

KEY WORDS: magnesium alloy; micro-arc oxidation; ceramic layer; process parameters

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

Received: 2017-01-10; Revised: 2017-02-20

作者简介: 陈宏 (1977—), 女, 副教授, 主要研究金属材料的表面处理技术。

Biography: CHEN Hong (1977—), Female, Associate professor, Research focus: surface treatment technology of metal materials.

镁合金被称为“21 世纪最具发展潜力的绿色工程材料”^[1], 相比于其他金属材料而言, 镁合金因其质轻、比强度和比刚度高以及消震性较好等优点, 在汽车、电器、计算机、航空、医疗等众多领域均有广泛应用。但耐蚀性差一直是其最严重的缺陷, 因此人们采用了各种各样的表面技术方法^[2-4], 如电镀、阳极氧化、金属涂层、化学转化膜处理、激光法、微弧氧化等来改善这种缺陷。

微弧氧化技术以其工艺简单、易操作、环保、制备的膜层性能较好等优势在镁合金表面改性方面得到了较快发展。微弧氧化技术又称微等离子体氧化技术^[5], 其基本原理是在电解液溶液中利用热化学、等离子体化学以及电化学方法在 Al、Mg、Ti 等金属表面, 通过产生火花放电斑点而生成一种陶瓷膜层的方法^[6]。其制得的陶瓷层具有多孔性结构, 影响这种结构的因素很多, 主要的影响因素有电压及加载方式、频率、占空比、电解液、添加元素等。本文较为系统地介绍了各主要因素对陶瓷层结构、性能影响的研究现状, 同时对微弧氧化工艺后处理及应用前景进行了介绍及展望, 为研究工作者提供理论参考。

1 电压对陶瓷层的影响

目前, 对微弧氧化过程的成长机理仍存在不同观点。Wei-wei Chen^[7]在高电流模式下研究了镁合金微弧氧化陶瓷层的成长机制, 认为微弧氧化工艺共分为五个阶段, 分别为阳极氧化阶段、钝化膜击穿阶段、微弧氧化快速增长阶段、大弧放电阶段、自修复阶段。其中, 微弧氧化快速增长阶段对膜层厚度具有很重要的作用, 而自修复阶段则对膜层表面质量有很重要的作用。同时, 验证了在微弧氧化的开始阶段膜层向内和向外增长几乎是同步的, 之后则主要为向外增长。另外, 对膜层主要相对陶瓷层结构及性能的影响也做了相应地分析, 得出陶瓷层中由于存在熔点高、强度高、耐蚀性好的 MgO、Mg₂SiO₄ 相, 膜层的综合性能得到了大大提高。在研究影响陶瓷层耐蚀性工艺参数时发现, 其主要影响因素是电压, 这一结论被 Zhang 通过大量试验得到验证。工艺参数对耐蚀性影响程度从高到低的顺序为终止电压、频率、占空比、电流密度, 而对膜层厚度影响程度从高到低为终止电压、电流密度、占空比、频率^[8]。由此可见, 在微弧氧化过程中应对电压的取值进行深入地探讨。

贾金龙^[9]主要对电压及其加载方式对膜层厚度的影响进行了详细地分析研究, 结果显示电压加载速率低于 100 V/min 时膜层的生长速率近似呈线性增长, 氧化时间为 30 min 时微弧氧化将进入平衡阶段,

之后膜层就会变得粗糙, 而且从膜层阻抗与厚度的关系情况可知, 两者变化趋势较为接近, 因此可以通过建立两者之间的关系来对膜层厚度情况进行监测, 从而指导现实生活中的生产。近年来对膜层耐高温性能的研究可知, 膜层的耐高温性能将会随电压升高而不断加强, 这可能是在高压下因膜层结构复杂而阻碍了氧的进入^[10]。除此之外, 彭飞等人^[11]研究表明当电压增加时, 膜层的厚度、结合力先增大后减小, 膜层的成膜速率、孔隙率、孔径、粗糙度一直增加。为了使微弧氧化陶瓷层更好地植入人体, 研究者也做了较多研究, 如 Pan^[12]研究了负向电压对微弧氧化过程中离子的移动和在模拟体液中降解的影响, 结果发现随着负向电压的增加, 涂层的耐蚀性增加、降解延迟, 磷灰石的形成能力提高。该方向的最新研究是 Razavi^[13]在镁合金表面利用电泳沉积和微弧氧化结合的方法制备出了耐蚀性较强、生物活性良好的含钙磷、磷灰石的陶瓷层。之后, 有研究发现在电解液中添加羟基磷灰石, 单一的微弧氧化技术也可制得生物活性较好的膜层。综上所述, 改变电压可改变膜层厚度, 并得到不同的膜层性能。因此, 在研究过程中如果对膜层厚度及性能方面要求较高, 应对电压进行认真选择。

2 频率、占空比及电源脉冲形式对陶瓷层的影响

频率和占空比对镁合金微弧氧化陶瓷层的影响也较大。一般来说, 陶瓷层的耐蚀性随频率的增加而变好, 随占空比的增大而变差。Tang、zou、宾远红^[14-16]等人在这方面做了相应研究, 发现占空比越大, 膜层的孔径、粗糙度均增大, 而耐蚀性则先增大后减小。除此之外, 他们还发现频率对膜层厚度影响较小, 而对孔径、粗糙度影响较大, 频率越大, 则孔径越小, 涂层结构越致密, 粗糙度越小。另外, 摩擦学实验也表明, 摩擦系数在频率增加时会变小。Hwang、Song 研究了电源频率与膜层电化学性能的关系, 发现电源频率增大使膜层孔洞尺寸和放电通道数量均大幅减小, 从而形成紧凑的膜层, 耐蚀性大大提高, 并在 2000 Hz 下得到最高的极化电阻^[17-18]。

杨瑞嵩^[19]对比了恒功率与恒压下镁合金微弧氧化的情况, 发现与恒压相比, 恒功率下起弧是先在大电流下进行, 后在高电压下进行, 制备的膜层具有微孔少、孔径大的特点, 性能较好。一般情况下, 电源脉冲包括单向、双向不对称脉冲^[20]。李连平^[21]研究了在铝盐体系下利用单、双极脉冲对 AZ91D 镁合金进行微弧氧化, 分别得出了其最佳工艺。如在单脉冲

下的最佳工艺为频率 600 Hz、占空比 25%；在双脉冲下的最佳工艺为频率 500 Hz、占空比 25%、脉冲个数 2:2。Y Ge^[22]研究了电流脉冲宽度的影响,发现电流脉冲宽度从 1508 s 增大到 9008 s 时,起弧时间明显缩短,起弧电压先降低后升高,而且孔洞数量、成膜速率随脉冲宽度的增加而减少,孔径尺寸随脉冲宽度的增加而变大。由此可以得出频率越大,孔径越小,膜层越紧湊;而占空比越大,孔径越大,膜层越粗糙。并且恒功率、大脉冲宽度下形成的陶瓷层比恒压、小脉冲宽度下形成的陶瓷层孔径数少、孔径大。因此,当对陶瓷层的形貌要求较高时,应尽量选择大频率、小占空比、恒功率。

3 电解液对陶瓷层的影响

电解液对镁合金微弧氧化陶瓷层的组成和性能有决定性影响。传统应用最多的体系是酸、碱性体系,但酸性体系因具有污染性已经很少被使用。目前,更多的研究集中在弱碱性电解液体系,最常见的为偏铝酸盐、硅酸盐、磷酸盐等溶液体系,这些体系制得的膜层主要为多孔结构的 MgO,研究发现主要的盐溶液浓度对膜层的耐蚀性有较大影响^[23-24]。此外,电解液浓度对微弧氧化起弧也有很大影响,特别是氢氧化钠、氟化钠的浓度,溶液中碱性越大,起弧电压越低,产生电火花就越容易。但碱性不易过大,否则对膜层将会有较大的溶解性,不利于陶瓷层的形成^[25]。还有研究发现 Na₂SiO₃ 浓度的增加使氧化镁含量下降,硅酸镁含量增大,接头结合强度下降,而且 (NaPO₃)₆ 浓度的增加使膜层耐蚀性下降^[26-27]。Barton^[28]研究表明电解液体系中的氟化物、柠檬酸根、四硼酸盐均会参与反应,分别起到增大耐蚀性、控制火花放电、降低火花放电电压的作用,进而阻碍了凹坑的形成。另外,在主盐为硅酸盐的电解液中添加焦磷酸盐进行微弧氧化,使膜层变得粗糙,但当焦磷酸盐为 3 g/L 时,耐蚀性最好,一旦超过此值,耐蚀性则会降低^[29]。

不同电解液体系制得涂层的形貌、组成及性能不同,因此对比不同电解液体系膜层的结构及性能对后期使用具有重要的作用。如 Yuan^[30]对 Na₂SiO₃、MgSiF₆、KF 三种不同电解液的膜层结合强度进行对比,发现相比于第三种电解液,前两者制备的膜层结合强度较高。所以对于不同材料而言,为得到较好的膜层,应选用较合适的电解液体系。近几年锆盐体系不断得到研究者的青睐,发现锆盐体系下会生成具有阻碍腐蚀介质进入的横向延展纹理,从而使耐蚀性得到提高。对比后发现铝盐中制得的陶瓷层耐蚀性最差,而硅酸盐体系中陶瓷层的耐蚀性介于锆盐与铝酸

盐之间。Zhang^[31]通过对比硅酸、植酸盐中制得的镁合金微弧氧化陶瓷层性能,发现植酸盐中膜层的孔隙、耐蚀性均较好,且击穿电压和终止点压也较高。吴振东^[32]分别在铝酸盐、硅酸盐、磷酸盐三种电解液中进行微弧氧化,探究其制得的热控涂层的结构和性能,得出同等条件下磷酸盐制得膜层的厚度、热控性均较好,但粗糙度大。Sheng^[33]对镁合金在复合电解液体系的微弧氧化进行了优化,得到优化后的电解液成分为: 17.5 g/L NaAlO₂, 5.0 g/L Na₃PO₄, 5.0 g/L NaOH, 3.0 g/L NaB₄O₇, 4.2 g/L C₆H₅Na₃O₇。总的来说,锆盐、植酸盐体系制备的陶瓷层耐蚀性较好,其次为硅酸盐体系,而铝酸盐制得的陶瓷层耐蚀性较差,所以当所处理的零件主要应用于腐蚀环境时,应首选锆盐、植酸盐体系。

4 电解液添加物对陶瓷层的影响

为了更好地使陶瓷层满足使用要求,人们通过在电解液中加入添加物来实现。姚晓红^[34]在硅酸盐中加入 Al₂O₃ 胶体,对胶体加入时间和加入量对膜层性能的影响做了研究,发现在反应 6 min 时加入胶体,耐蚀性最好,且腐蚀速度随加入胶体量的增多而减小。在电解液中添加纳米 α -Al₂O₃ 可以增大溶液的电导率,而且由于其分散性较好,会沉积在膜层的微孔及表面。大量实验显示当纳米 α -Al₂O₃ 质量浓度为 3 g/L 时,陶瓷层致密性好,耐蚀性好^[35]。另外, KOH 含量对膜层也有一定影响,Young^[36]等人针对 KOH 对膜层厚度、形貌的影响做了研究,得出膜层厚度随 KOH 含量的不断增加而变厚。Joni^[37]通过实验得出当 KOH 浓度为 0.5 ~ 1.5 mol/L 时,膜层孔径及孔隙率下降;当超过 1.5 mol/L 时,膜层孔径增大,产生微裂纹等。为了更好地改善膜层外观质量,人们考虑添加一些丙三醇,这主要是因为它可以较好地抑制尖端放电,从而稳定微弧氧化过程。有研究发现 KF 地加入也将增加电解液的电导率和膜层致密度,同时降低电压、孔径及表面粗糙度。此外,硅酸盐加入也会提高膜层的耐蚀性等^[38]。

近几年来,学者们开始对纳米材料及复合电解液展开研究,首先是探究了纳米 TiO₂ 对微弧氧化的影响,纳米 TiO₂ 加入有一个适当的范围,当其质量浓度增加到 3.2 g/L 时,膜层的结合力增加,而摩擦系数和质量损耗下降;质量浓度继续增加时,则会产生破坏作用^[39]。杨晓飞^[40]研究了在 NaAlO₂-Na₃PO₄ 复合电解液体系中加入纳米 TiO₂ 后的效果,结果显示加入纳米 TiO₂ 后比未加入时,膜层更致密,膜层的耐蚀性和耐磨性更好。在电解液中添加一些其他稀有

金属元素,也可改变膜层的性能。如 Laleh^[41]发现在微弧氧化过程中加入 Ce 可以显著提高膜层耐蚀性,明显降低孔隙率。Lee 发现添加 3%~5%铜离子,将会使生成的膜层从棕色变成深棕色,厚度增加,耐蚀性明显提高^[42]。另外,添加稀土盐后直接进行微弧氧化会使起弧延长,膜层性能变差,而先在稀土盐溶液中浸泡一段时间再进行微弧氧化制得的膜层耐蚀性能大大提高^[43]。因此为使制得的膜层性能较好,通常在电解液体系中适当地加入一些化学物质,如添加 KOH 可使膜层增厚,添加 KF 可降低孔径,添加丙三醇可抑制尖端放电。而添加一些纳米材料,如纳米 TiO₂、纳米 α -Al₂O₃ 均使膜层变得致密。所以,在实际操作过程中,若发现膜层结构形貌、性能等未达到要求时,可根据不同情况在电解液中选择性地加入一些添加物。

5 其他影响因素

除此之外,镁合金微弧氧化过程中的其他参数对膜层结构及性能也有影响。如骆瑞雪^[44]探讨了时间对微弧氧化陶瓷层结构及其性能的影响,发现在铝酸盐中,当电压处于 300~450 V 时厚度增长不明显,但是在一定电压条件下,氧化时间对微孔结构影响较大,且膜层与基体之间的结合强度最大可达 42 MPa。此外,电化学测试显示膜层耐蚀性随电压增大及氧化时间延长呈现不断上升趋势。另外,还发现膜层的厚度以及粗糙度均随氧化时间、加压时间间隔增大而增大,但结合力、孔隙率则先增大后减小。在模拟人体体液中进行耐蚀性研究发现,氧化时间为 5 min 时制得的陶瓷层耐蚀性最好。除此之外,pH 值的不同也使得膜层发生点蚀的时间不同^[45-46]。对极间距的影响研究发现,在均匀场强恒定输入电流下,极间距越大,溶液电阻越大,反应所需的电压就越大,起弧就越快;而非均匀场强下,极间距增大将使得膜层的均匀性得到改善^[47]。

6 展望

微弧氧化制得的陶瓷膜均不可避免地存在很多微孔,大大减弱了膜层的耐蚀性,因此对微弧氧化后的陶瓷层进行后处理就显得尤为重要,目前主要的后处理工艺有有机封孔和原位封孔^[48]等,但这两种技术尚不成熟,人们仍在不断地探索之中。同时,尽管有很多学者对微弧氧化进行了研究,但因其形成过程的复杂性,目前仍未形成较为系统的理论体系来解释镁合金微弧氧化的成膜机理,所以很难对镁合金微弧氧化陶瓷层进行大规模的工业生产。

因此,为了更好地满足现实生产及生活的要求,人们首先应针对影响陶瓷层结构、性能方面的主要因素进行进一步优化,其次对镁合金微弧氧化过程的成膜机理和后处理工艺继续进行探讨和完善。另外,为更好地拓宽其应用范围,研究者可以在复合技术、复合基体方面展开研究。此外,对其陶瓷层医学领域的研究也应加快步伐,从而将微弧氧化技术更多地应用于我们的生产与生活。

参考文献:

- [1] 霍丽娜. 镁合金: 21 世纪的绿色工程新材料[J]. 世界有色金属, 2012(12): 54—55.
HUO Li-na. Magnesium Alloys: 21st Century Green Engineering New Materials[J]. Journal of Nonferrous Metals in the World, 2012(12): 54—55.
- [2] BLAWERT C, DIETZEL W, GHALI E, et al. Anodizing Treatments for Magnesium Alloys and Their Effect on Corrosion Resistance in Various Environments[J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(6): 511—533.
- [3] 周游, 姚颖悟, 吴坚扎西, 等. 镁合金化学转化膜的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(5): 15—18.
ZHOU You, YAO Ying-wu, WU Jian-zhaxi, et al. Research Progress of Chemical Conversion Coatings on Magnesium Alloys[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(5): 15—18.
- [4] MALYSCHEV V N. New Application Possibilities for Aluminum: Formation of Wearresistant Ceramic Coatings Using the Micro-arc Oxidation Process[J]. Mo Metalloberfläche Beschichten Von Metall Und Kunststoff, 2006, 60(1): 28—29.
- [5] SHOKOUHFAR M, DEGHANIAN C, MONTAZERI M, et al. Preparation of Ceramic Coating on Ti Substrate by Plasma Electrolytic Oxidation in Different Electrolytes and Evaluation of Its Corrosion Resistance: Part II[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 2416—2423.
- [6] CHENG Y L, WU X Q, XUE Z G, et al. Microstructure, Corrosion and Wear Performance of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings Formed on Ti-6Al-4V Alloy in Silicate-hexametaphosphate Electrolyte[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 217(8): 129—139.
- [7] CHEN W W, WANG Z X, SUN L, et al. Research of Growth Mechanism of Ceramic Coatings Fabricated by Micro-arc Oxidation on Magnesium Alloys at High Current Mode[J]. Journal of Magnesium & Alloys, 2015, 3(3): 253—257.
- [8] ZHANG R F, SHAN D Y, CHEN R S, et al. Effects of Electric Parameters on Properties of Anodic Coatings Formed on Magnesium Alloys[J]. Materials Chemistry & Physics, 2008, 107(2—3): 356—363.
- [9] 贾金龙. 基于电参数的 AZ91D 镁合金微弧氧化膜层厚度分析研究[J]. 机械研究与应用, 2014(5): 93—95.

- JIA Jin-long. Study on Thickness of Micro-arc Oxidation Film on AZ91D Magnesium Alloy Based on Electrical Parameters[J]. Mechanical Research and Application, 2014(5): 93—95.
- [10] 樊正国, 吕海军, 姜雨, 等. 电压对镁合金微弧氧化膜层耐高温性能的影响[J]. 广州化工, 2014(24): 96—97.
- FAN Zheng-guo, LV Hai-jun, JIANG Yu, et al. The Voltage of Magnesium Alloy Micro-arc Oxide Film Layer of the Influence of High Temperature Resistant Performance[J]. Journal of Guangzhou Chemical Industry, 2014(24): 96—97.
- [11] 彭飞, 马跃洲, 王鹏, 等. 电压加载方式对镁合金微弧氧化过程及膜层性能的影响[J]. 材料保护, 2012, 45(7): 12—14.
- PENG Fei, MA Yue-zhou, WANG Peng, et al. Effect of Voltage Loading on Micro-arc Oxidation Process and Properties of Magnesium Alloy Coatings[J]. Materials Protection, 2012, 45(7): 12—14.
- [12] NARAYANAN T S N S, PARK I S, Min H L. Strategies to Improve the Corrosion Resistance of Microarc Oxidation (MAO) Coated Magnesium Alloys for Degradable Implants: Prospects and Challenges[J]. Progress in Materials Science, 2014, 60(3): 1—71.
- [13] RAZAVI M, FATHI M, SAVABI O, et al. In Vitro Study of Nanostructured Diopside Coating on Mg alloy Orthopedic Implants[J]. Materials Science & Engineering C, 2014, 41: 168—177.
- [14] TANG Y, ZHAO X, JIANG K, et al. The Influences of Duty Cycle on the Bonding Strength of AZ31B Magnesium Alloy by Microarc Oxidation Treatment[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(6): 1789—1792.
- [15] 宾远红, 刘英, 李培芬. 频率和占空比对镁合金微弧氧化的影响[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(31): 7640—7643.
- BIN Yuan-hong, LIU Ying, LI Pei-fen. Effect of Frequency and Duty Cycle on Micro-arc Oxidation of Magnesium Alloy[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(31): 7640—7643.
- [16] ZOU B, LÜ Guo-hua, ZHANG G L, et al. Effect of Current Frequency on Properties of Coating Formed by Microarc Oxidation on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1500—1505.
- [17] HWANG I J, HWANG D Y, KO Y G, et al. Correlation between Current Frequency and Electrochemical Properties of Mg Alloy Coated by Micro Arc Oxidation[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(15): 3360—3365.
- [18] SONG X, LU J, YIN X, et al. The Effect of Pulse Frequency on the Electrochemical Properties of Micro Arc Oxidation Coatings Formed on Magnesium Alloy[J]. Journal of Magnesium & Alloys, 2013, 1(4): 318—322.
- [19] 杨瑞嵩, 魏劲松, 崔学军. AZ91D 镁合金恒功率微弧氧化膜的结构及耐蚀性能[J]. 材料保护, 2015, 48(12): 8—11.
- YANG Rui-song, WEI Jin-song, CUI Xue-jun. Structure and Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy Constant Power Micro-arc Oxidation Film[J]. Materials Protection Materials Protection, 2015, 48(12): 8—11.
- [20] 赵晓鑫, 马颖, 孙钢. 镁合金微弧氧化研究进展[J]. 铸造技术, 2013(1): 45—47.
- ZHAO Xiao-xin, MA Ying, SUN Gang. Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Research Progress[J]. Journal of Casting Technology, 2013(1): 45—47.
- [21] 李连平, 郝建民, 安永太, 等. AZ91D 镁合金双脉冲微弧氧化参数确定及耐蚀性研究[J]. 热加工工艺, 2014(6): 205—208.
- LI Lian-ping, HAO Jian-min, AN Yong-tai, et al. Study on Determination of Parameters and Corrosion Resistance of AZ91D Magnesium Alloy by Double-pulse, Microarc Oxidation[J]. Hot Processing Technology, 2014(6): 205—208.
- [22] GE Y, JIANG B, LIU D. Effect of Current Pulse Width on Micro-arc Oxidation for Magnesium Alloys[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2015, 44(8): 1948—1952.
- [23] HAN X G, ZHU F, ZHU X P, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Modified MAO Film on Magnesium Alloy AZ31 Irradiated by High-intensity Pulsed Ion Beam[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(228): S164—S170.
- [24] XIA Y H, ZHANG B P, LU C X, et al. Improving the Corrosion Resistance of Mg-4.0Zn-0.2Ca Alloy by Micro-arc Oxidation[J]. Materials Science & Engineering C Materials for Biological Applications, 2013, 33(8): 5044—5050.
- [25] 屈晓莉, 常灿光. 镁合金压铸模铸件微弧氧化表面处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2016(2): 252—255.
- QU Xiao-li, CHANG Can-guang. The Magnesium Alloy Die-casting Die Casting Micro-arc Oxidation Surface Treatment Technology Research[J]. Journal of Casting Technology, 2016(2): 252—255.
- [26] GAO H, ZHANG M, YANG X, et al. Effect of Na_2SiO_3 Solution Concentration of Micro-arc Oxidation Process on Lap-shear Strength of Adhesive-bonded Magnesium Alloys[J]. Applied Surface Science, 2014, 314(10): 447—452.
- [27] MA H, LI D, LIU C, et al. An Investigation of $(\text{NaPO}_3)_6$ Effects and Mechanisms during Micro-arc Oxidation of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 266: 151—159.
- [28] WANG Z X, LIU W G, CHEN J, et al. Characterization of Ceramic Coating on ZK60 Magnesium Alloy Prepared in a Dual Electrolyte System by Micro-arc Oxidation[J]. Rare Metal, 2013, 32(5): 459—464.
- [29] 庄俊杰, 宋若希, 胡强, 等. 焦磷酸盐对 AZ31 镁合金微弧氧化陶瓷膜层的影响[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2016(2): 526—530.
- ZHUANG Jun-jie, SONG Ruo-xi, HU Qiang, et al. Pyrophosphate AZ31 Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Ceramic Membrane Layer[J]. The Influence of Material

- Review: Album of Nanotechnology and New Materials, 2016(2): 526—530.
- [30] LI J X, ZHANG Y M, HAN Y, et al. Effects of Micro-arc Oxidation on Bond Strength of Titanium to Porcelain[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(8): 1252—1258.
- [31] ZHANG R F, XIONG G Y, HU C Y. Comparison of Coating Properties Obtained by MAO on Magnesium Alloys in Silicate and Phytic Acid Electrolytes[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(1): 255—259.
- [32] 吴振东, 李超楠, 夏琦兴, 等. 电解液体系对镁合金热控涂层结构和性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(12): 1731—1736.
- WU Zhen-dong, LI Chao-nan, XIA Qi-xing, et al. Influence of Electrolytic Liquid System on the Thermal Control Coating Structure and Properties of Magnesium Alloys[J]. Journal of Silicate, 2015, 43(12): 1731—1736.
- [33] SHENG L U, WANG Z X, CHEN J, et al. Optimization of Dual Electrolyte and Characteristic of Micro-arc Oxidation Coating Fabricated on ZK60 Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 929—935.
- [34] 姚晓红, 谢鹏华, 孙永花, 等. 微弧氧化电解液中加入 Al_2O_3 胶体对 AZ91D 复合陶瓷层性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016(8): 2092—2097.
- YAO Xiao-hong, XIE Peng-hua, SUN Yong-hua, et al. Effect of Al_2O_3 Colloid on the Properties of AZ91D Composite Ceramic Layer in Micro-arc Oxidation Electrolyte[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016(8): 2092—2097.
- [35] 包晗, 邵忠财, 刘鹏. Al_2O_3 纳米粉体对镁合金微弧氧化陶瓷膜性能的影响[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(7): 41—43.
- BAO Han, SHAO Zhong-cai, LIU Peng. The Influence of Nano Al_2O_3 Powder on the Properties of Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Ceramic Membrane[J]. Plating and Finishing, 2013, 35(7): 41—43.
- [36] KO Y G, NAMGUNG S, DONG H S. Correlation between KOH Concentration and Surface Properties of AZ91 Magnesium Alloy Coated by Plasma Electrolytic Oxidation[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(7): 2525—2531.
- [37] JONI M S, FATTAH-ALHOSSEINI A. Effect of KOH Concentration on the Electrochemical Behavior of Coatings Formed by Pulsed DC Micro-arc Oxidation (MAO) on AZ31B Mg Alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 661: 237—244.
- [38] VEYS-RENAUX D, BARCHICHE C E, ROCCA E. Corrosion Behavior of AZ91 Mg Alloy Anodized by Low-energy Micro-arc Oxidation: Effect of Aluminates and Silicates[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 251(8): 232—238.
- [39] LI Hong-xia, SONG R G, JI Zhen-guo. Effects of Nano-additive TiO_2 on Performance of Micro-arc Oxidation Coatings Formed on 6063 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 406—411.
- [40] 杨晓飞, 田林海, 曹盛, 等. 纳米 TiO_2 掺杂对 AZ91D 镁合金微弧氧化膜形貌及性能的影响[J]. 机械工程材料, 2013, 37(10): 79—82.
- YANG Xiao-fei, TIAN Lin-hai, CAO Sheng, et al. The Influence of Nanometer TiO_2 Doping on AZ91D Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Membrane Morphology[J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2013, 37(10): 79—82.
- [41] LALEH M, KARGAR F, SABOUR R A. Investigation of Rare Earth Sealing of Porous Micro-arc Oxidation Coating Formed on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(12): 1293—1297.
- [42] LEE S J, TOAN D L H. Effects of Copper Additive on Micro-arc Oxidation Coating of LZ91 Magnesium-lithium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 307: 781—789.
- [43] 郭剑, 邵忠财. 镁合金微弧氧化膜的制备工艺研究[J]. 电镀与环保, 2016, 36(5): 34—37.
- GUO Jian, SHAO Zhong-cai. The Preparation Methods of Magnesium Alloy Micro-arc Oxidation Film Research [J]. Journal of Electroplating and Environmental Protection, 2016, 36(5): 34—37.
- [44] 骆瑞雪, 慕伟意, 雷嘉骏. AZ91D 镁合金微弧氧化膜层性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014(S1): 319—323.
- LUO Rui-xue, MU Wei-yi, LEI Jia-jun. Performance of AZ91D Magnesium Alloy Micro-arc Oxide Film Layer Research[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014(S1): 319—323.
- [45] GU Y, BANDOPADHYAY S, CHEN C F, et al. Effect of Oxidation Time on the Corrosion Behavior of Micro-arc Oxidation Produced AZ31 Magnesium Alloys in Simulated Body Fluid[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 543(543): 109—117.
- [46] TIAN Y, YANG L J, LI Yan-fang, et al. Corrosion Behaviour of Die-cast AZ91D Magnesium Alloys in Sodium Sulphate Solutions with Different pH Values[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 912—920.
- [47] 严为刚, 蒋百灵, 施文彦, 等. 极间距对 6061 铝合金微弧氧化的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 7—12.
- YAN Wei-gang, JIANG Bai-ling, SHI Wen-yan, et al. The Influence of the Spacing of 6061 Aluminum Alloy Micro-arc Oxidation[J]. Journal of Surface Technology, 2016, 45(10): 7—12.
- [48] CUI X J, LIU C H, YANG R S, et al. Self-sealing Micro-arc Oxidation Coating on AZ91D Mg Alloy and Its Formation Mechanism[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 269(1): 228—237.