

# AZ31B 镁合金激光表面微凹坑效应及其电化学 腐蚀行为

周建忠 钟辉\* 黄舒 盛杰 戴磊 梅於芬

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 为研究激光表面微凹坑对 AZ31B 镁合金耐腐蚀性能的影响, 利用光纤激光器在材料表面制备微凹坑阵列。通过扫描显微镜观测微凹坑的形貌、直径和深度, 利用双单元电化学工作站测试微凹坑制备前后材料表面的动电位极化曲线。结果表明: 微凹坑的直径和深度均随激光功率的增大而增大, 微凹坑周围出现烧蚀现象; 微凹坑直径与扫描次数无显著相关性, 但微凹坑圆度与扫描次数呈正相关性。在相同微凹坑密度下, 与未处理试样相比, 激光功率为 6、10、16 W 时试样的自腐蚀电位分别向正移 -33、40、26 mV, 自腐蚀电流分别减少了 91.93%、92.09%、91.19%。激光功率为 10 W 时具有最好的抗腐蚀性能; 在相同激光功率下, 与未处理试样相比, 微凹坑密度为 1.5%、2.5%、5.0% 时试样的自腐蚀电位分别向正移 21、40、56 mV, 自腐蚀电流分别减少了 92.22%、92.09%、94.05%。在实验密度范围内, 微凹坑密度越高, AZ31B 镁合金表面的抗腐蚀性能越好。

**关键词** 激光光学; 微凹坑; 电化学腐蚀; 微凹坑阵列; AZ31B 镁合金

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0303007

## Surface Micro-Dimple Effect and Electrochemical Corrosion Behaviors of AZ31B Magnesium Alloy Treated by Laser

Zhou Jianzhong Zhong Hui Huang Shu Sheng Jie Dai Lei Mei Yufen

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** In order to study the influence of laser-induced micro-dimple on electrochemical corrosion behaviors of AZ31B magnesium alloy, samples are processed with optical fiber laser to get specific micro-dimple. The surface profile, diameter and depth of the micro-dimple are characterized by Axio CSM 700 and the electrochemical polarization curves are investigated by electrochemical work station. The results indicate that with the increment of laser power, the depth and diameter of micro-dimple increase but ablation occurs around the micro-dimple. The diameter of micro-dimple does not change significantly while the roundness improves with the number of processing increasing. Comparing with the untreated specimen, the corrosion potentials are improved by -33, 40, 26 mV and the self-corrosion currents decrease to 91.93%, 92.09%, 91.19% with laser powers of 6, 10, 16 W respectively under the same micro-dimple density condition. A better corrosion resistance is obtained with laser power of 10 W. For the same laser power condition, the corrosion potentials are improved by 21, 40, 56 mV and the self-corrosion currents decrease to 92.22%, 92.09%, 94.05% with the micro-dimple densities of 1.5%, 2.5%, 5.0% respectively comparing with the untreated specimen. Besides, the increasing of micro-dimple density leads to a better corrosion resistance of AZ31B magnesium alloy in the density zone of the experiment.

收稿日期: 2014-02-15; 收到修改稿日期: 2014-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51405204, 51175236)、中国博士后科学基金资助项目(2013M540417, 2014T70477)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123227110022)、江苏省科技支撑项目(工业)(BE2013097)、江苏省博士后科研资助计划项目(1401065B)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG109)

作者简介: 周建忠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: 15850270537@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

Key words laser optics; micro-dimple; electrochemical corrosion; micro-dimple array; AZ31B magnesium alloy  
 OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.1435; 350.3850

## 1 引言

AZ31B 镁合金具有良好的生物相容性和力学性能,并且其密度和弹性模量均与人体骨骼相近,是一种在人体骨骼替代材料领域应用广泛的生物医用植入材料<sup>[1-2]</sup>。然而,镁合金在人体生理环境中腐蚀速度很快,这极大地影响了医用镁合金的使用寿命和应用范围<sup>[3]</sup>。为了使其表面具有优良的耐腐蚀性和生物活性,需对其表面进行改性以改善其使用性能<sup>[4]</sup>,从而使其更适用于生物医学应用的要求。表面处理方法通常是利用各种表面处理工艺在材料表面形成一层具有生物活性的涂层,来改善材料的生物活性<sup>[5-8]</sup>。但这些方法却存在诸多缺陷,如涂层与基体结合强度较低,不能承受交变载荷;材料表层存在残余拉应力,易萌生疲劳裂纹;材料表面涂层存在气孔、裂纹等微观缺陷。上述缺陷会造成植入材料生物相容性和服役寿命的降低,并且材料的耐腐蚀性能也没有得到有效改善。

近年来,通过在材料表面制备微结构来提高材料使用性能的方法备受关注。叶霞等<sup>[9]</sup>研究了激光诱导热解碳表面微织构对抗凝血性能的影响,结果表明激光加工后的微织构表面粘附的血小板较少,表现出较好的抗凝血性能;梁春永等<sup>[10-11]</sup>研究了多种周期性显微图案结构对生物相容性和细胞生长的影响,结果表明显微图案结构处理的试样具有更好的生物相容性,并且周期性显微图案结构促进了细胞的生长;此外,多位学者也研究了生物材料表面织构化对摩擦磨损性能的影响<sup>[12-14]</sup>,结果表明织构化改善了材料表面润滑性能,使摩擦磨损性能得到大幅度提高。以上研究表明,表面图案化改性能有效提高生物医用植入材料的生物活性。

激光技术作为生物医用植入材料表面图案化改性的新兴技术已逐步受到人们的青睐,已有部分学者利用激光的热效应和力效应对材料表面进行微织构处理,以提高材料的耐腐蚀性能和生物活性。上述研究为激光在生物材料实用性研究中提供了一定的实验数据。

本文研究了 AZ31B 镁合金在激光表面微凹坑效应下凹坑直径、凹坑深度和二维形貌随不同工艺参数的变化,以及材料在不同激光功率和不同微凹坑效应密度下的抗腐蚀性能差异,研究结果为生物医用镁合金激光表面微凹坑参数选择提供了新的参考依据。

## 2 实验

实验选用生物医用植入材料 AZ31B 镁合金,其化学成分(质量分数)为 Al 3.19%、Zn 0.81%、Mn 0.334%、Si 0.02%、Fe 0.005%、Cu 0.05%、Ca 0.04%、Be 0.1%、Mg 95.451%。试样尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm。经砂纸打磨、抛光后用无水乙醇进行超声波清洗。

采用 YLP-HP-100 型掺镱脉冲光纤激光器制备微凹坑。由于激光的功率密度高、脉冲宽度极短,聚焦到材料表面后,材料被迅速加热到汽化温度,直接以气相蒸发,形成微凹坑。激光器参数为激光波长  $\lambda_1 = 1064 \text{ nm}$ ,脉宽  $\tau_1 = 100 \text{ ns}$ ,频率  $f_1 = 20 \text{ kHz}$ ,激光扫描次数为 1 次,微凹坑区域为 10 mm×10 mm。为研究材料在不同激光功率和不同微凹坑密度下的抗腐蚀性能,实验中所用到的参数组合如表 1 所示。

表 1 激光表面微凹坑制备实验工艺参数

Table 1 Process parameters for laser surface micro-dimple

Sample	Laser power /W	Micro-dimple density /%
1 #	6	2.5
2 #	10	2.5
3 #	16	2.5
4 #	10	1.5
5 #	10	5.0

激光加工后对试样进行超声波清洗。采用德国蔡司生产的真彩色共聚焦扫描显微镜 AxioCSM700 测量微凹坑深度、二维形貌及三维形貌。

在试样微凹坑制备面的反面焊接铜线,然后采用环氧树脂对微织构处理以外的区域表面进行封装,待

环氧树脂固化后,将试样用无水乙醇进行超声波清洗。采用双单元电化学工作站测试电化学腐蚀性能,测试采用三电极体系,待测试样为工作电极,仅暴露面积约为  $1.0 \text{ cm}^2$  的激光微织构区域于电解质溶液中。扫描动电位范围为  $-1.8 \sim -1.2 \text{ V}$ ,扫描速率为  $0.5 \text{ mV/s}$ ,腐蚀液选用模拟体液(SBF)模拟体液(pH 值为 7.4 碱性条件下),在温度为  $36.5 \text{ }^\circ\text{C}$  环境下进行实验。电化学实验之前,试样在 SBF 模拟体液中浸泡  $20 \text{ min}$  以保证开路电位稳定。

SBF 人体模拟体液(1000 mL)的成分如下: NaCl 为  $8.035 \text{ g}$ ,  $\text{NaHCO}_3$  为  $0.355 \text{ g}$ , KCl 为  $0.225 \text{ g}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  为  $0.231 \text{ g}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$  为  $0.311 \text{ g}$ ,  $\text{CaCl}_2$  为  $0.292 \text{ g}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  为  $0.072 \text{ g}$ , Tris 为  $6.118 \text{ g}$ ,其余为  $\text{H}_2\text{O}$ ,采用 HCl 调节 PH 值<sup>[15]</sup>。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 激光工艺参数对微凹坑尺寸形貌的影响

##### 3.1.1 激光工艺参数对微凹坑阵列结构形貌的影响

采用激光单次扫描试样表面,图 1 所示为微凹坑密度在 2.5% 时,激光功率分别为 6、10、16 W 下微凹坑阵列二维形貌图。由图可以看出,微凹坑阵列稳定,圆度好,分布均匀。在微凹坑阵列密度一定时,随着激光功率的增大,相同面积内的微凹坑数量减少。

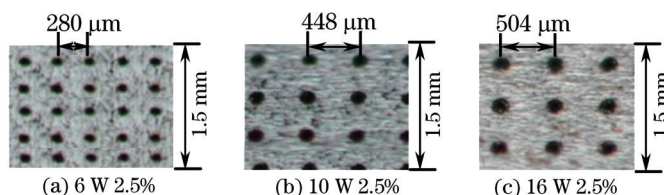


图 1 不同激光功率的微凹坑阵列形貌图

Fig.1 Profile of micro-dimple array under different laser powers

采用激光单次扫描试样表面,图 2 所示为激光功率在 10 W 时,微凹坑密度分别为 1.5%、2.5%、5.0% 时微凹坑阵列二维形貌图。由图可以看出,在激光功率一定时,随着微凹坑密度的增加,相同面积内的微凹坑数量增加。

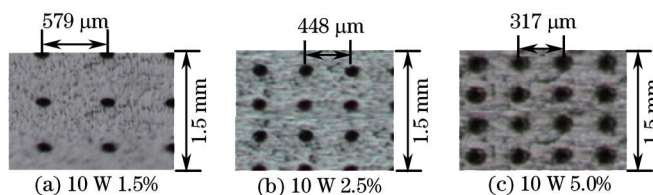


图 2 不同密度的微凹坑阵列形貌图

Fig.2 Profile of micro-dimple array under different densities

##### 3.1.2 激光工艺参数对单个微凹坑尺寸形貌的影响

图 3 为单次激光扫描下,激光功率为 6、7、9、12、16 W 时材料表面微凹坑二维形貌图。由图可以看出,微凹坑直径和烧蚀区域面积均随着激光功率的增大而增大;激光功率为 6 W 时,微凹坑边界不清晰,熔凝现象明显,这是由于激光功率较小时,材料不能吸收足够的能量汽化而发生的熔化凝固现象;激光功率为 16 W 时,微凹坑边界清晰,圆度较好。但是,能量过大使得凹坑周围烧蚀区域较大,并且可能会产生微裂纹等缺陷<sup>[16]</sup>,严重影响材料的生物活性。

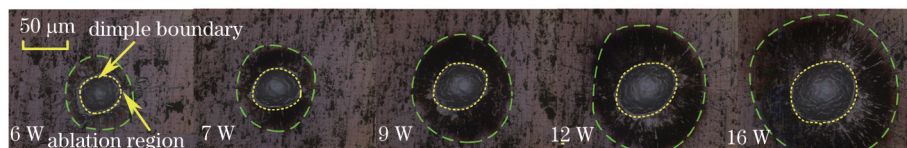


图 3 不同激光功率时微凹坑二维形貌图

Fig.3 Morphology of micro-dimple under different laser powers

图 4 为在扫描次数为 1 次时,不同激光功率情况下微凹坑轮廓图。从图中可以看出,随着激光功率的增

大,微凹坑直径和深度均在增大。当激光功率增大到一定数值时,微凹坑直径和深度的增值趋于平缓。这是因为激光功率密度较小时,材料吸收的能量不足以使其发生气化,微凹坑深度较小。随着功率密度的增大,材料吸收的能量增加,熔化程度加剧导致微凹坑深度随之增大。当激光功率增大到临界值时,由于激光功率密度过大,产生气化的材料量增加,一部分材料来不及喷溅出微凹坑,就会在微凹坑内形成重铸,导致微凹坑深度不变甚至变小。

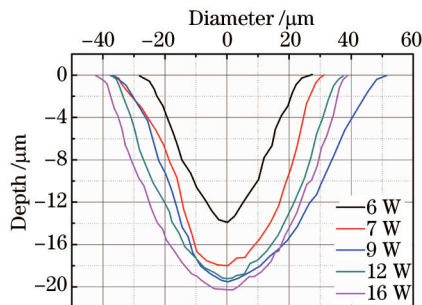


图4 不同激光功率时微凹坑轮廓图

Fig.4 Profile of micro-dimple under different laser powers

图5为激光功率在16 W时,扫描次数为1、2、5、7次下微凹坑二维形貌图。由图可知,扫描次数对微凹坑直径大小影响不大,但会加剧烧蚀现象。由于多次激光扫描时光斑是重合的,因此不同扫描次数下微凹坑直径基本相同。上一次扫描时微凹坑周围未气化的材料通过本次扫描气化蒸发,随着扫描次数的增加,微凹坑边缘越来越清晰,圆度越来越好。

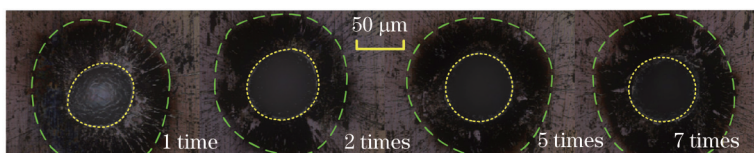


图5 不同扫描次数时微凹坑二维形貌图

Fig.5 Morphology of micro-dimple under different laser processing numbers

图6为激光功率为16 W时,扫描次数为1、2、5、7次下微凹坑轮廓图。由图可知,扫描次数为1次时,微凹坑轮廓清晰;扫描次数为2次时,微凹坑周围出现了明显的凹陷区域,这是由于第1次扫描时微凹坑周围产生的黑色烧蚀区域在第2次扫描时吸收了大部分能量,并且第1次扫描时,热向材料周围传导,造成微凹坑周围区域温升,导致第2次扫描时,微凹坑周围材料迅速汽化出现较深的凹陷;扫描次数为5次时,微凹坑边缘出现突起物,这是由于上一次扫描后微凹坑深度达到一定数值,激光焦点位置远离微凹坑底部,到达微凹坑底部的激光功率密度减小,材料汽化减弱,在激光辐照区发生熔化和飞溅现象,由于微凹坑过深,微凹坑内的熔融物质喷溅不出微凹坑而在凹坑内形成重铸的突起物;扫描次数为7次时,微凹坑周围出现了明显的凸出区域,这是由于前一次扫描后微凹坑周围形成的重铸突起物表面远离激光焦点位置,激光辐照区的激光功率密度较小,材料表面发生熔融现象,熔融物质在材料表面内重铸,形成明显凸起。

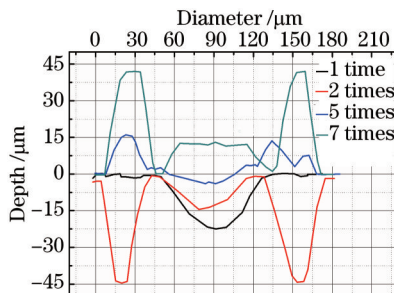


图6 不同扫描次数时微凹坑轮廓图

Fig.6 Profile of micro-dimple under different laser processing numbers

### 3.2 不同激光功率和不同微凹坑密度下微凹坑效应的电化学腐蚀行为

图7为不同激光功率下微凹坑制备后AZ31B镁合金在SBF模拟体液中的动电位极化曲线。由图可以看出,与未处理试样相比,试样在制备微凹坑后的极化曲线形状基本不变。由极化曲线拟合得出,未处理试样与1#、2#、3#试样的自腐蚀电位 $E_{corr}$ 分别为-1.575、-1.608、-1.535、-1.549 V,而自腐蚀电流 $I_{corr}$ 分别为 $7.607 \times 10^{-4}$ 、 $6.138 \times 10^{-5}$ 、 $6.019 \times 10^{-5}$ 、 $6.703 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>。因此,1#、2#、3#试样的自腐蚀电位比未处理试样相比分别正移-33、40、26 mV,自腐蚀电流分别减少了91.93%、92.09%、91.19%。这说明在激光功率为6 W时,AZ31B镁合金的耐腐蚀性降低;而在激光功率为10、16 W时,AZ31B镁合金的耐腐蚀性得到提高;并且激光功率为10 W时具有更好的抗腐蚀性能。

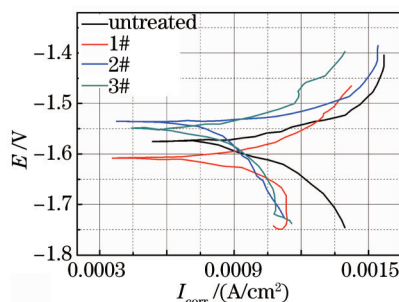


图7 不同激光功率下试样的电位极化曲线

Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of samples under different laser powers

激光微凹坑制备是一个热冲击过程,激光与材料相互作用相继发生冲击强化、热吸收、材料表面熔化和材料气化4个阶段。激光微凹坑制备时被激光快速熔化气化的镁合金的局部表面,冷却速度高达 $10^{10}$  °C/s,在高致热率和高致冷率情况下, $\beta$ 相被弥散分布,材料内部组织会发生重结晶现象,最终形成亚稳态结构和均匀细致的微观组织结构<sup>[17]</sup>,并在材料热影响区产生一定的硬化作用。在AZ31B镁合金的表面层,足够多的 $\beta$ 相能形成比较连续的腐蚀阻挡网络,从而能有效地阻止材料腐蚀扩展。激光功率为6 W时,由于激光能量较小不足以使材料发生气化而产生熔凝,表层材料熔凝过程中的热胀冷缩作用会产生残余拉应力<sup>[18]</sup>,而残余拉应力促进腐蚀裂纹的萌生和扩展,从而降低了材料的腐蚀性能<sup>[19-20]</sup>。激光功率为16 W时,可能是由于能量过大使材料过度烧蚀以至于微凹坑周围产生的微裂纹等缺陷,增加了电偶腐蚀和缝隙腐蚀的概率,降低了材料的抗腐蚀性能。激光功率为10 W时,足够的激光能量使表层材料产生熔化气化现象,材料表面空隙缺陷减少,并且表面硬度提高<sup>[19]</sup>。由于空隙对材料腐蚀有加速作用,所以试样在制备微凹坑后的耐腐蚀性能增加<sup>[20]</sup>。而硬度提高是亚稳态结构和晶粒细化的结果,由于细化后的晶粒较小,相邻晶粒取向各异,并且产生的晶界较多,使得裂纹扩展过程中受到晶界的阻碍作用,减缓了腐蚀裂纹的扩展。在高温情况下,试样表面容易形成致密的MgO氧化层,阻断基体与腐蚀溶液的反应,从而提高材料的耐腐蚀性能<sup>[21]</sup>。

由前面实验结果可知随着激光功率的增大,微凹坑直径和深度均在增大。当激光功率增大到一定数值时,微凹坑直径和深度的增值趋于平缓。激光功率较小时,仅仅只有表面很浅一层材料被熔化,微凹坑直径和深度值很小,激光微织构效应不明显,并且表层材料产生的残余拉应力对腐蚀裂纹的萌生和扩展有促进作用,从而降低了材料的腐蚀性能。随着微凹坑直径和深度值的增大,材料表面空隙缺陷减少,并且表面硬度明显提高,激光微织构效应明显,材料耐腐蚀性得到显著提高。当微凹坑直径和深度增大到一定数值时,激光微织构效应虽然对材料腐蚀性能有一定提高,但是材料表面出现的烧蚀和微裂纹等缺陷增加了材料腐蚀概率,所以此时材料耐腐蚀性能提高不明显。

图8为不同微凹坑密度制备后AZ31B镁合金动电位极化曲线。由图可以看出,与未处理试样相比,试样在制备微凹坑阵列后的极化曲线向左上方移动,极化曲线形状基本不变。由极化曲线拟合得出,未处理试样与4#、2#、5#试样的自腐蚀电位 $E_{corr}$ 分别为-1.575、-1.554、-1.535、-1.519 V,而自腐蚀电流 $I_{corr}$ 分别为 $7.607 \times 10^{-4}$ 、 $5.918 \times 10^{-5}$ 、 $6.019 \times 10^{-5}$ 、 $4.527 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>。因此,4#、2#、5#试样的自腐蚀电位比未处理试样相比分别向正移21、40、56 mV,自腐蚀电流分别减少了92.22%、92.09%、94.05%。这说明激光功率为10 W时,在实验密度范围内,微凹坑密度越高,AZ31B镁合金在SBF模拟体液中的抗腐蚀性能越好。

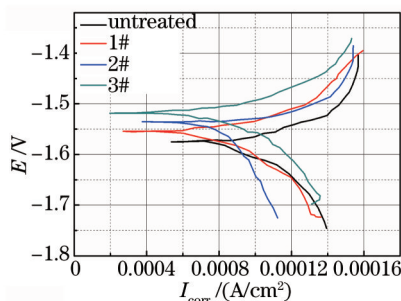


图8 不同密度下试样的电位极化曲线

Fig.8 Potentiodynamic polarization curves of samples under different densities

Dumitru 等推导的关于激光束对金属材料辐照熔化热影响区的宽度公式为  $L = \sqrt{(K\tau_p)/(\rho C_p)}$ , 根据公式计算和实验得到的热影响区宽度范围为  $0.5\sim 5\ \mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>。研究表明激光微凹坑表面硬度存在规律分布,热影响区内硬度最大,距离微凹坑越远,硬度就越小,两微凹坑中间区域硬度最低<sup>[22]</sup>。微凹坑密度越大,微凹坑间距就越小,相同面积内热影响区就越大,平均硬度越高,微凹坑效应越显著,材料的抗腐蚀性能就越好。

## 4 结 论

1) 激光功率在 6~16 W 范围内,微凹坑的直径和深度均随着激光功率的增大而增大。随着扫描次数的增加,微凹坑的深度减小,微凹坑直径基本不变,圆度随之变好,同时微凹坑周围出现烧蚀现象。

2) 与未处理试样相比,1#、2#、3# 试样的自腐蚀电位分别向正移-33、40、26 mV,自腐蚀电流分别减少了 91.93%、92.09%、91.19%。在激光功率为 6 W 时,AZ31B 镁合金的耐腐蚀性降低;而在激光功率为 10、16 W 时,AZ31B 镁合金表面的耐腐蚀性得到提高,并且激光功率为 10 W 时具有更好的抗腐蚀性能。

3) 与未处理试样相比,4#、2#、5# 试样的自腐蚀电位分别向正移 21、40、56 mV,自腐蚀电流分别减少了 92.22%、92.09%、94.05%。激光功率为 10 W 时,在实验密度范围内,微凹坑密度越高,AZ31B 镁合金在 SBF 模拟体液中的抗腐蚀性能越好。

## 参 考 文 献

- 1 Staiger M P, Pietak A M, Huadmai J, *et al.*. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review[J]. *Biomaterial*, 2006, 27(9): 1728-1734.
- 2 Witte F. The history of biodegradable magnesium implants: A review[J]. *Acta Biomaterialia*, 2010, 6(5): 1680-1692.
- 3 Muller W D, Nascimento M L, Zeddies M, *et al.*. Magnesium and its alloys as degradable biomaterials: corrosion studies using potentiodynamic and EIS electrochemical techniques[J]. *Materials Research*, 2007, 10(1): 5-10.
- 4 Zeng R C, Dietzel W G, Witte F, *et al.*. Progress and challenge for magnesium alloys as biomaterials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(8): B3-B14.
- 5 Meirelles L, Arvidsson A, Andersson K P, *et al.*. Nano hydroxyapatite structures influence early bone formation[J]. *J Biomedical Materials Research Part A*, 2008, 87(2): 299-307.
- 6 Rossi S, Tirri T, Paldan H, *et al.*. Peri-implant tissue response to TiO<sub>2</sub> surface modified implants[J]. *Clin Oral Implants Res*, 2008, 19(4): 348-355.
- 7 Wang J, Chao Y, Wan Q, *et al.*. Fluoridated hydroxyapatite coatings on titanium obtained by electrochemical deposition[J]. *Acta Biomaterialia*, 2009, 5(5): 1798-1807.
- 8 Heinrich A, Dengler K, Koerner T, *et al.*. Laser-modified titanium implants for improved cell adhesion[J]. *Lasers Med Sci*, 2008, 23(1): 55-58.
- 9 Ye Xia, Wang Ze, Zhou Ming, *et al.*. Research of surface micro-structure and anti-coagulant property of pyrolytic carbon induced by laser[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(5): 696-699.
- 叶霞,王泽,周明,等.激光诱导热解碳表面微结构及抗凝血性研究[J].*激光技术*, 2013, 37(5): 696-699.
- 10 Liang Chunyong. Micro-patterned Treatment of Ti Alloy Surface and its Biological Activation Mechanism[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. 7-68.

- 梁春永. 钛合金表面图案化处理及生物活性化机理[D]. 天津: 天津大学, 2008. 7-68.
- 11 Li Chunyan. The Pure Implants Which Surface Modification Using Femtosecond Laser and Performance Evaluation[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2012. 6-32.  
李春艳. 纯钛种植体表面飞秒激光改性及性能评价[D]. 天津: 天津医科大学, 2012. 6-32.
- 12 Chen Xiaolin. Surface Texturing and Plasma Nitriding Treatment of Titanium Alloy and Study of Its Bio-Tribological Properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. 6-49.  
陈晓林. 钛合金表面织构与等离子渗氮处理及其生物摩擦特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. 6-49.
- 13 Yan Ce. Study on Micro/Nano-Patterning Techniques and Associated Cell Behaviors such as Critical Areas of Cell Adhesion[D]. Shanghai: Fu Dan University, 2012. 11-191.  
闫 策. 表面微纳米图案化技术及细胞粘附临界面积等问题的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012. 11-191.
- 14 Wu Bo. Preparation and Study of Metal-Based Bionic Functional Microstructure by Laser[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. 65-111.  
吴 勃. 金属仿生功能微结构的激光制备与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011. 65-111.
- 15 Kokubo T, Kushitani H, Sakka S, *et al.*. Solutions able to reproduce in vivo surface-structure changes in bioactive glass-ceramic A-W3[J]. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1990, 24(6): 721-734.
- 16 Luft A, Franz U, Emsermann L, *et al.*. A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling[J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 1996, 63(2): 93-101.
- 17 Song Guangling. Corrosion and Protection of Magnesium Alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 268.  
宋光铃. 镁合金腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 268.
- 18 Zhang Guoshun. Modern Laser Manufacturing Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. 194-197.  
张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 194-197.
- 19 Sha Dong. Tribological Properties of Laser Textured Surfaces of Ti6Al4V[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. 20-21.  
沙 东. Ti6Al4V 表面激光织构化及其摩擦学特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011. 20-21.
- 20 Chen Jufang. Study on Laser Surface Modification of AM50 Magnesium Alloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. 90-92.  
陈菊芳. AM50 镁合金表面激光改性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008. 90-92.
- 21 Li Longchuan. Surface Modification of Pure Magnesium and Its Biocompatibility Studies for Biomedical Applications[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. 30-31.  
李龙川. 纯镁表面改性及生物相容性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004. 30-31.
- 22 Wan Yi. Study on Surface Texturing and Alloying Technology Improving Tribological Properties of Seal Material[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. 31-35.  
万 轶. 表面织构与合金化改善密封材料摩擦学性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008. 31-35.

栏目编辑: 韩 峰