

激光喷丸医用 Ti6Al4V 合金的耐生物腐蚀性能研究

孙昀杰¹, 周建忠¹, 黄 舒¹, 盛 杰¹, 樊玉杰², 陈松玲¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²江苏科技大学机械工程学院, 江苏 镇江 212003

摘要 为研究激光喷丸强化对医用 Ti6Al4V 合金表面耐生物腐蚀性能的影响,对 Ti6Al4V 合金试样表面进行激光喷丸强化处理;然后选用动电位极化曲线测试法研究了激光喷丸前后试样的电化学腐蚀性能,采用扫描电子显微镜观察腐蚀试样的表面形貌并进行能谱分析。结果表明,在测试参数范围内,激光喷丸强化试样的自腐蚀电位正移,腐蚀倾向降低;钝化电流密度降低,钝化区电位范围增大,钝化性能更稳定;击穿电位正移,点蚀敏感性降低;自腐蚀电流密度减小,腐蚀速率降低。与未处理试样相比,自腐蚀电位最大正移了 0.209 V,钝化电流密度最大降低了 2 个数量级,钝化区电位范围最大增幅为 86.90%,击穿电位最大增幅为 88.31%,自腐蚀电流密度最大降低了 81.75%。激光喷丸强化处理可有效改善医用 Ti6Al4V 合金表面的耐生物腐蚀性能。

关键词 激光技术; Ti6Al4V 合金; 激光喷丸强化; 电化学腐蚀; 极化曲线

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0702003

Research on Biological Corrosion Resistance of Medical Ti6Al4V Alloy Subjected to Laser Peening

Sun Yunjie¹, Zhou Jianzhong¹, Huang Shu¹, Sheng Jie¹, Fan Yujie², Chen Songling¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

Abstract In order to investigate the effect of laser peening (LP) on surface biological corrosion resistance of medical Ti6Al4V alloy, LP experiment was carried out on Ti6Al4V alloy and the electrochemical corrosion property of the alloy was investigated using potentiodynamic polarization curve method. The surface morphology of etched samples was observed by scanning electron microscope, and the energy spectra were measured. The results show that the self-corrosion potential of LP samples shifts positively and corrosion tendency decreases in the range of tested parameters; the passivation current density decreases while the potential range of passivation region increases, and passivation performance is more stable; the breakdown potential shifts positively and pitting susceptibility also decreases; the corrosion current density and corrosion rate all decrease. Compared with the untreated samples, the self-corrosion potential of LP samples maximally shifts 0.209 V and the passivation current density is reduced by two orders of magnitude; the maximum increases of the potential range of passivation region and breakdown potential are 86.90% and 88.31%, respectively, and the self-corrosion current density is maximally decreased by 81.75%. Therefore, LP process can effectively improve the biological corrosion resistance of the medical Ti6Al4V alloy.

Key words laser technique; Ti6Al4V alloy; laser peening; electrochemical corrosion; polarization curve

OCIS codes 350.3390; 160.1435; 160.3900

收稿日期: 2017-02-28; **收到修改稿日期:** 2017-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51575247, 51405207)、中国博士后科学基金(2014T70477, 2013M540417)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20140510)、江苏省重点实验室开放课题(JSKLEDC201501)

作者简介: 孙昀杰(1994—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: syj_ujs@163.com

导师简介: 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)

1 引 言

Ti6Al4V 合金具有良好的生物相容性、综合力学性能和工艺性能,广泛应用于人体生物医学工程领域,如制作人工髋关节和膝关节等硬组织替代物和修复物^[1]。在正常条件下,钛合金表面会生成一种稳定、连续、结合牢固的氧化物钝化膜,因此具有良好的耐蚀性。但由于人体环境较为复杂,在外力和体液的侵蚀下,钛合金表面的钝化膜有可能被剥离、溶解,而且具有潜在毒性的铝离子和钒离子会释放到组织中,在生物体内产生毒性,导致出现炎症、血栓等反应。因此,采用表面改性工艺来提高医用 Ti6Al4V 合金的耐蚀性越来越受到研究人员的关注。

目前通过表面改性提高 Ti6Al4V 合金耐蚀性的方法主要是在材料表面制备涂层^[2-3]。Kao 等^[4]利用闭域不平衡磁控溅射技术在未处理 Ti6Al4V 合金表面和经过高温气态渗氮处理的 Ti6Al4V 合金表面分别制备了 Ti-C:H 涂层,该涂层试样具有十分优异的摩擦特性、耐蚀性和生物相容性。Maleki 等^[5]通过等离子喷涂技术在 Ti6Al4V 合金表面制备了溶胶-凝胶硅酸三钙镁涂层,该涂层有效地改善了材料的生物活性和耐蚀性。Mohan 等^[6]利用阳极氧化技术在 Ti6Al4V 合金表面制备了自组织 TiO₂ 纳米涂层,并通过电化学交流阻抗谱和动电位极化曲线研究了其在 Hank's 模拟体液中的腐蚀行为,结果发现阳极氧化膜试样具有更好的耐蚀性和钝化行为。Mokgalaka 等^[7]利用激光金属沉积技术将镍粉和钛粉熔融在 Ti6Al4V 合金表面,制备了 NiTi 金属间化合物涂层;结果发现涂层试样的硬度较基体增大,且其在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的耐蚀性也有所提高。然而通过制备涂层对材料表面进行改性的方法存在涂层质量差以及膜基结合强度低的问题,如涂层中存在孔隙、微裂纹等缺陷,涂层与基体的界面存在残余拉应力,导致涂层在极端环境下易开裂或脱落。

激光喷丸强化(LP)技术是一种新型表面改性技术,它利用激光诱导产生高强冲击波压力,直接使材料表面发生微塑性变形,通过诱导产生高幅残余压应力细化表层晶粒,以及提高表层硬度等来改善材料的表面性能,近年来越来越多地被应用于提高医用材料表面的耐蚀性。Guo 等^[8]利用激光喷丸强化技术在镁-钙植入件表面诱导产生了更适合骨细胞依附的形貌,使植入件表层获得了高幅残余压应力,从而显著提高了其在模拟体液中的耐蚀性。此外研究人员还发现,通过调整激光功率和光斑搭接率可使激光喷丸植入件的耐蚀性得到进一步优化。Vinodh 等^[9]研究了不同搭接率下高重复率激光喷丸处理对纯镁试样耐生物腐蚀性能的影响,结果发现腐蚀速率随着搭接率的增加而降低,在 66% 搭接率下喷丸试样的腐蚀速率比未喷丸试样下降了 50%。李兴成等^[10]研究了激光喷丸次数对医用 AZ31 镁合金表面耐蚀性的影响,结果发现单次激光喷丸后镁合金的耐蚀性显著提高,而喷丸次数对耐蚀性的影响不大。目前激光喷丸强化技术在生物医用金属材料中的研究多集中于镁合金^[11],已有学者开始初步探讨激光喷丸强化技术对医用 Ti6Al4V 合金表面残余应力的影响^[12],但对于提高该合金在生理环境中耐蚀性的研究目前还鲜有报道。

本课题组针对医用 Ti6Al4V 合金开展了激光喷丸强化和电化学腐蚀实验研究,通过腐蚀热力学参数、动力学参数、钝化性能、点蚀敏感性、腐蚀表面形貌和能谱分析等,探讨了激光喷丸强化对医用 Ti6Al4V 合金表面耐生物腐蚀性能的影响。

2 实验方法及材料

实验材料选用 4 mm 厚的 Ti6Al4V 合金板材,其化学成分见表 1。

表 1 Ti6Al4V 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Ti6Al4V alloy (mass fraction, %)

Element	Al	V	Fe	O	C	N	H	Ti
Content	6.1	4.1	0.15	0.12	0.02	0.02	0.006	Bal.

使用电火花线切割加工出尺寸为 40 mm×20 mm×4 mm 的试样,所有试样的待处理表面经过砂纸逐级打磨后,再用金刚石抛光膏逐级抛光至表面粗糙度 $R_a < 0.07 \mu\text{m}$,然后用无水乙醇进行超声波清洗,最后将试样放入干燥箱中烘干待用。激光喷丸强化实验选用法国 Thales 公司生产的 GAIA-R 型 Nd:YAG 激光器,其波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,重复频率为 1 Hz,输出光斑能量呈平顶分布。实验过程中选用的激光光斑直径为 3 mm,光斑搭接率为 50%,喷丸强化次数分别为 1 次和 2 次,激光功率密度分别为 5.659,

8.488, 11.318 $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$, 能量吸收层和约束层分别选用美国 3M 公司生产的 100 μm 厚铝箔和 2 mm 厚流动水帘, 激光喷丸路径及实物图如图 1 所示。

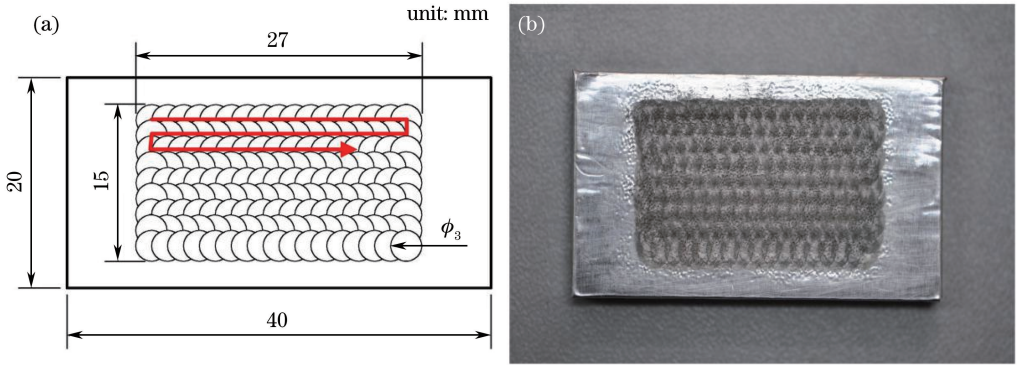


图 1 (a) 激光喷丸路径示意图; (b) 实物图

Fig. 1 (a) Abridged general view of laser peening path; (b) physical image

电化学腐蚀测试采用天津市兰力科化学电子高技术有限公司生产的 LK2005A 型电化学工作站, 采用三电极体系, 辅助电极采用铂片电极, 参比电极采用饱和甘汞电极 (SCE)。激光喷丸后, 采用线切割的方式加工出 10 mm \times 10 mm \times 4 mm 的电化学试样, 在喷丸面的背面连接导线, 然后用 704 胶对未处理表面进行封装并保证其导电性。电化学腐蚀性能测试前, 先将试样浸入至腐蚀介质中稳定 30 min。线性扫描塔菲尔曲线测试参数: 灵敏度 1 mA, 滤波参数 10 Hz, 放大倍率 1, 初始电位 -2.5 V, 终止电位 4.0 V, 扫描速率 0.005 $\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 。腐蚀溶液采用 Hank's 模拟体液 (HBSS), 其由 8.000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl、0.100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.400 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl、0.100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{MgCl}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.140 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 、0.152 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、0.060 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 及 1.000 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的葡萄糖组成。实验前用体积分数为 5.6% 的 NaHCO_3 调节溶液的 pH 至 7.2~7.6, 保持溶液温度为 (37 \pm 0.5) $^\circ\text{C}$ 。腐蚀实验结束后, 取出试样, 并用无水乙醇清洗, 干燥后备用。

电化学腐蚀实验结束后, 采用日本电子株式会社 JSM-7001F 型热场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样腐蚀表面的微观形貌, 用扫描电镜附带的能量色散谱仪 (EDS) 进行能谱分析。

3 结果与讨论

3.1 钝化性能

图 2 所示为未处理试样和不同功率密度激光喷丸强化试样在 Hank's 模拟体液中的极化曲线, (a)、(b) 分别对应 1 次激光喷丸强化和 2 次激光喷丸强化。从图 2 中可以看出, 在不同激光喷丸工艺参数下, Ti6Al4V 合金试样阴极极化曲线的变化趋势相似, 均表现出较为典型的吸氧腐蚀特征。图 2(a) 中的 E_{corr} 为自腐蚀电位; E_b 为击穿电位, 钝化状态在阳极极化曲线上体现为一条大致水平的线段, 其起始位置为致钝化电位 E_{ip} , 终止位置为过钝化电位 E_{tp} 。激光喷丸强化试样的钝化电流密度 i_p 和致钝化电位 E_{ip} 均比未处理

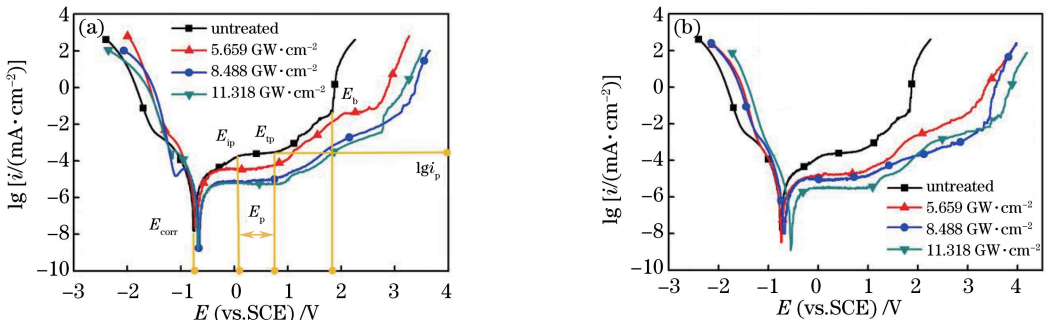


图 2 激光喷丸强化前后试样的极化曲线。(a) 1 次激光喷丸强化; (b) 2 次激光喷丸强化

Fig. 2 Polarization curves of untreated and LP treated samples. (a) 1 impact; (b) 2 impacts

试样的小,并且钝化区的电位范围 E_p 也比未处理试样的宽,说明激光喷丸强化 Ti6Al4V 合金在 Hank's 模拟体液中更容易发生钝化,且钝化状态更加稳定。

为对比不同激光喷丸强化参数对 Ti6Al4V 合金在 Hank's 模拟体液中钝化性能的影响,将图 2 所示极化曲线所体现出的各钝化动力学参数绘于图 3 中。

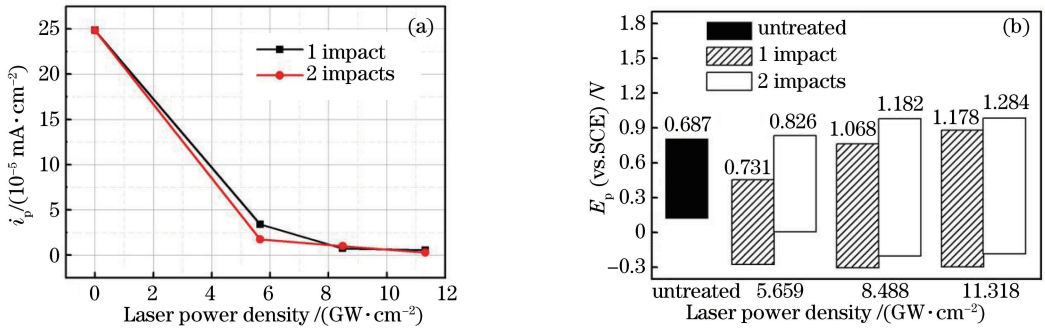


图 3 不同激光喷丸强化参数下试样的钝化动力学参数。(a)钝化电流密度;(b)钝化区电位范围

Fig. 3 Passivation kinetic parameters of samples under different LP parameters. (a) Passivation current density i_p ; (b) passivation zone potential range E_p

图 3(a)所示为激光喷丸强化前后,试样在 Hank's 模拟体液中的钝化电流密度。可以发现,与未处理试样相比,激光喷丸强化试样的钝化电流密度大幅下降,说明激光喷丸强化处理能够显著降低腐蚀体系钝化的难度和金属钝化后的腐蚀速率,激光喷丸强化后的 Ti6Al4V 合金表面更容易钝化,且钝化膜的保护性能更好。不同参数激光喷丸强化试样的钝化电流密度相差不大,说明喷丸试样表面所形成的钝化膜腐蚀速率基本相同。在 $11.318 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 激光功率密度下 2 次喷丸强化后,试样可获得最小的钝化电流密度 $2.959 \times 10^{-6} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,与未处理试样的 $2.483 \times 10^{-4} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 相比,降低了 2 个数量级 ($1.19 \times 10^{-2} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

图 3(b)所示为激光喷丸前后,试样在 Hank's 模拟体液中的钝化区电位范围。可以看出,随着激光功率密度和激光喷丸次数增加,Ti6Al4V 合金在 Hank's 模拟体液中的钝化区电位范围增大,与未处理试样的 0.687 V 相比,激光喷丸强化试样的钝化电位范围最大增大了 0.597 V,增幅为 86.90%,说明其表面的钝化状态更加稳定。

3.2 腐蚀倾向

将激光喷丸强化前后试样的自腐蚀电位 E_{corr} 绘于图 4 中。可以发现,虽然激光喷丸强化试样的初始腐蚀电位值较负,但其稳定后的自腐蚀电位值均正移,腐蚀热力学稳定性提高,发生电化学腐蚀的可能性降低。其中,激光功率密度为 $11.318 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、2 次激光喷丸试样的自腐蚀电位值 (-0.540 V) 最高,与未处理试样 (-0.749 V) 相比正移了 0.209 V,表现出了优异的腐蚀热力学稳定性。

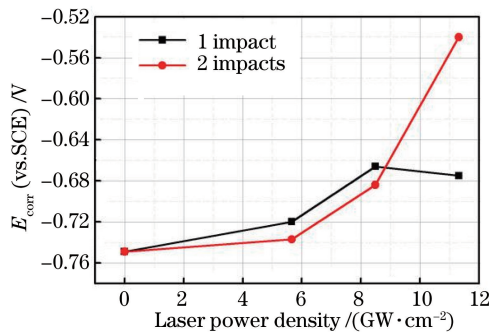


图 4 不同激光喷丸强化参数下试样的自腐蚀电位

Fig. 4 Self-corrosion potential of samples under different LP parameters

3.3 点蚀敏感性

将激光喷丸强化前后试样在 Hank's 模拟体液中的击穿电位 E_b 绘于图 5 中。可以发现,激光喷丸强化后试样表面的击穿电位强烈正移,说明激光喷丸处理可以显著降低 Ti6Al4V 合金表面在 Hank's 模拟体液

中发生点蚀的倾向,从而降低点蚀敏感性,提高其在生理环境中的耐点蚀性能。在激光功率密度相同的情况下,2次激光喷丸强化试样的击穿电位均比1次激光喷丸强化试样的要高,激光功率密度为 $11.318 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、2次激光喷丸强化试样的击穿电位最高,为 3.431 V ,与未处理试样(1.822 V)相比提高了 88.31% 。

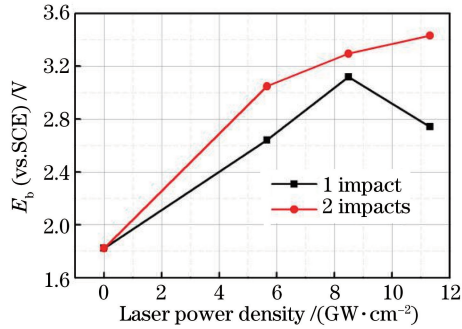


图 5 不同激光喷丸参数下试样的击穿电位

Fig. 5 Breakdown potential of samples under different LP parameters

3.4 腐蚀速率

根据极化曲线外延法对激光喷丸强化前后各试样在 Hank's 模拟体液中的自腐蚀电流密度 i_{corr} 进行研究,结果如图 6 所示。可以看出,随着激光功率密度和激光喷丸强化次数的增加,Ti6Al4V 合金在 Hank's 模拟体液中的自腐蚀电流密度降低,腐蚀速率减小,耐蚀性提高。激光功率密度为 $11.318 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、2次激光喷丸强化试样的腐蚀速率最小,为 $5.738 \times 10^{-8} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,与未处理试样($3.144 \times 10^{-7} \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)相比降低了 81.75% 。

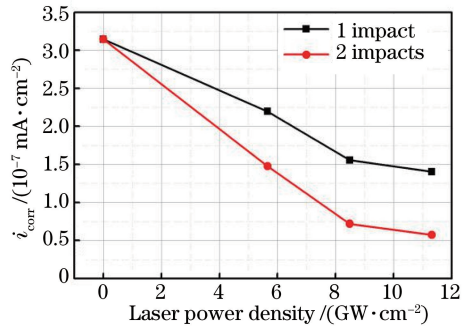


图 6 不同激光喷丸参数下试样的自腐蚀电流密度

Fig. 6 Self-corrosion current density of samples under different laser peening parameters

3.5 腐蚀表面形貌

在电化学腐蚀实验中,Ti6Al4V 合金表面的主要腐蚀形貌是点蚀,大部分区域的钝化膜并未被破坏。为了对比不同工艺参数试样的腐蚀情况,主要对蚀坑进行观察。图 7 为未处理试样和在 $11.318 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 激光功率密度下 2 次激光喷丸强化试样腐蚀表面的 SEM 形貌和 EDS 谱。其中,图 7(a)和(b)是未处理试样在不同放大倍数下的腐蚀表面形貌,可以发现蚀坑的表面较为粗糙,蚀坑边缘存在腐蚀微裂纹;图 7(e)为激光喷丸后试样的腐蚀表面形貌,其蚀坑表面和边缘较为平整。可见,激光喷丸强化处理能够有效降低 Ti6Al4V 合金表面的点蚀敏感性,改善腐蚀表面的质量。

图 7(c)和(d)、(f)和(g)分别为未处理试样和激光喷丸强化试样蚀坑表面和氧化膜的 EDS 谱。在激光喷丸强化前后试样的 EDS 谱中,元素种类并无差异,元素含量的差异也很小,但激光喷丸强化试样蚀坑和氧化膜中的氧含量均比未处理试样的高一些。分析认为,主要原因是激光喷丸强化处理 Ti6Al4V 合金表面的晶粒组织更加均匀细小^[13-14],使进入钛合金表面晶格的氧含量升高且分布更加均匀,从而进一步提升了 Ti6Al4V 合金的耐生物腐蚀性能。对于钝化性能,氧含量的升高可以使表面氧化膜更加致密,加快氧化膜的生长速率。对于腐蚀倾向,钛合金表面晶格氧含量的升高会降低钛原子的结合能,从而使合金表面的腐蚀

电位升高,发生腐蚀的倾向降低。对于点蚀敏感性,氧在钛合金表面的均匀分布可以改善或消除材料表面的不均匀性,减少裂纹等缺陷(点蚀源);此外氧化膜的加速生长还能够抑制蚀孔的生长和发展,降低点蚀敏感性。对于腐蚀速率,氧化膜致密程度和厚度的增加都会增大离子通过的阻力,降低离子在氧化膜中的迁移速率^[15],从而减小腐蚀电流密度,降低腐蚀速率。图 7(h)为(e)图中白色腐蚀产物的 EDS 谱,推断其为激光喷丸强化试样的腐蚀产物,部分腐蚀产物的存在可诱导堵塞孔隙、隔离 Cl^- 的自封闭效应^[16],从而阻滞腐蚀反应的进行,提高合金表面的耐蚀性。

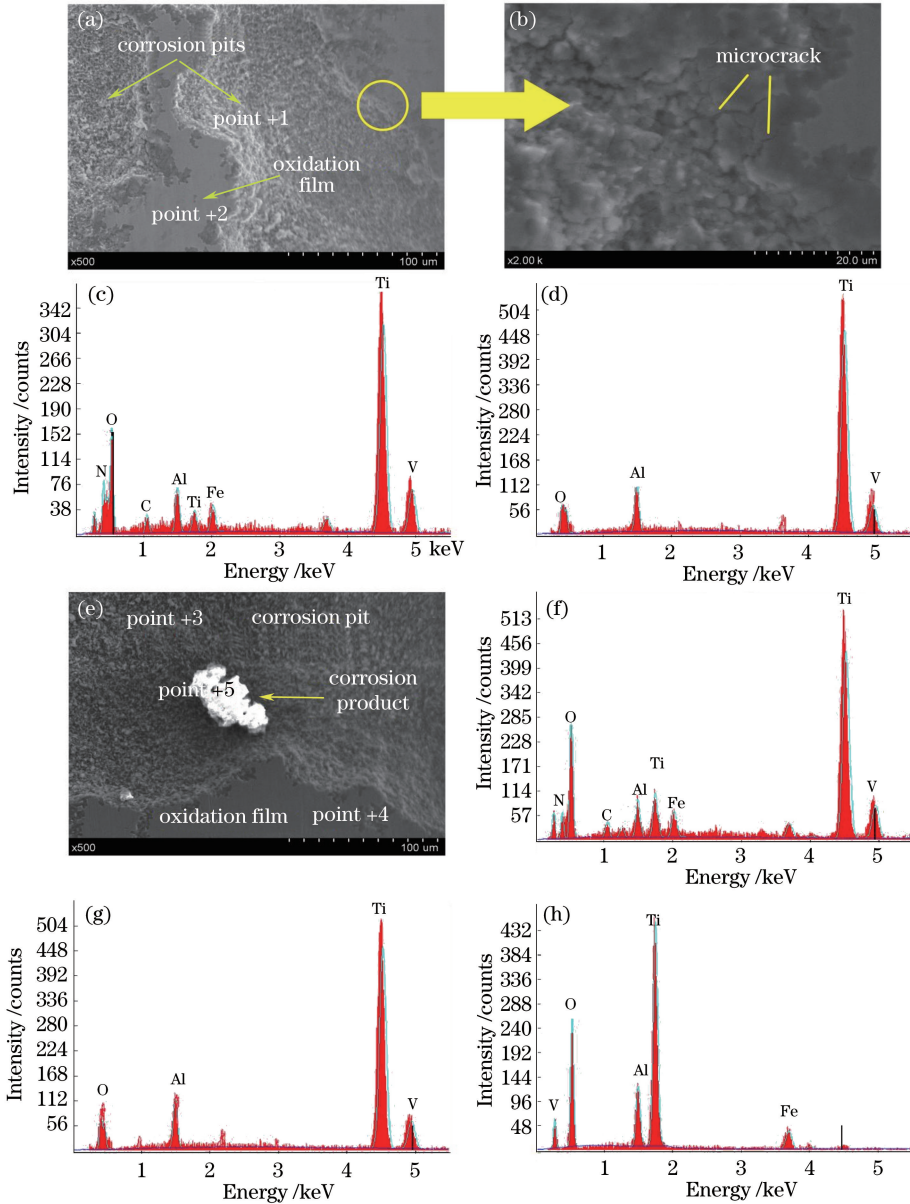


图 7 腐蚀试样表面的 SEM 形貌和 EDS 谱。(a)和(b)未处理试样的 SEM 形貌;(c) 1 处的 EDS 谱;(d) 2 处的 EDS 谱;
(e) 11.318 $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 激光功率密度下 2 次激光喷丸强化试样的 SEM 形貌;
(f) 3 处的 EDS 谱;(g) 4 处的 EDS 谱;(h) 5 处的 EDS 谱

Fig. 7 SEM morphology and EDS patterns of corrosion samples. (a) and (b) SEM morphology of untreated sample;
(c) EDS spectrum at point 1; (d) EDS spectrum at point 2; (e) SEM morphology of LP sample under the parameters of
11.318 $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ and 2 impacts; (f) EDS spectrum at point 3; (g) EDS spectrum at point 4; (h) EDS spectrum at point 5

4 结 论

(1) 激光喷丸处理能有效改善医用 Ti6Al4V 合金表面的耐生物腐蚀性能,主要体现在合金表面的钝化

电流密度和致钝化电位降低,钝化区电位范围增大,使钝化更容易发生,且钝态更稳定;自腐蚀电位和击穿电位正移,使发生电化学腐蚀的倾向和点蚀敏感性降低,从而降低腐蚀速率和提高耐点蚀性能。

(2) 激光喷丸工艺参数对 Ti6Al4V 合金耐蚀性有较大影响:在 $11.318 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的激光功率密度下 2 次喷丸强化时,可获得最高的自腐蚀电位,比未处理试样的自腐蚀电位正移了 0.209 V ;最大钝化电位范围增幅为 86.90% ;最小钝化电流密度降低了 2 个数量级;最高击穿电位提高了 88.31% ;腐蚀电流密度最大降低了 81.75% 。

(3) 激光喷丸强化处理通过均匀细化 Ti6Al4V 合金表层的晶粒,使进入钛合金表面晶格的氧含量升高且分布更加均匀,加快了氧进入钛合金表面晶格的速率,提高了钛合金表面氧化膜的保护性能,降低了钛合金表面的腐蚀倾向、点蚀敏感性和腐蚀速率,从而提高了合金表面的耐生物腐蚀性能。

参 考 文 献

- [1] Xia Mujian, Zhang Yu, Zhou Guanghong, *et al.* Research progress in surface modification of biomedical Ti6Al4V alloy [J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(8): 645-647.
夏木建, 章 跃, 周广宏, 等. 医用 Ti6Al4V 合金表面改性研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(8): 645-647.
- [2] Gu Y, Chen L, Yue W, *et al.* Corrosion behavior and mechanism of MAO coated Ti6Al4V with a grain-fined surface layer[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016, 664: 770-776.
- [3] Yu Pengcheng, Liu Xiubo, Lu Xiaolong, *et al.* Study on tribology and high-temperature oxidation resistance of laser cladding composite coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1003004.
余鹏程, 刘秀波, 陆小龙, 等. Ti6Al4V 合金激光熔覆复合涂层的摩擦学和高温抗氧化性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1003004.
- [4] Kao W H, Su Y L, Horng J H, *et al.* Improved tribological, electrochemical and biocompatibility properties of Ti6Al4V alloy by gas-nitriding and Ti-C:H coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 283: 70-79.
- [5] Malekighaleh H, Hafezi M, Hadipour M, *et al.* Effect of tricalcium magnesium silicate coating on the electrochemical and biological behavior of Ti-6Al-4V alloys[J]. Plos One, 2015, 10(9): 0138454.
- [6] Mohan L, Anandan C, Rajendran N. Electrochemical behaviour and bioactivity of self-organized TiO₂ nanotube arrays on Ti-6Al-4V in Hanks' solution for biomedical applications[J]. Electrochimica Acta, 2015, 155: 411-420.
- [7] Mokgalaka M N, Popoola A P I, Pityana S L. In situ laser deposition of NiTi intermetallics for corrosion improvement of Ti-6Al-4V alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3315-3322.
- [8] Guo Y, Sealy M P, Guo C. Significant improvement of corrosion resistance of biodegradable metallic implants processed by laser shock peening[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 583-586.
- [9] Vinodh K C, Sivakumar N. Effect of high repetition laser shock peening on biocompatibility and corrosion resistance of magnesium[J]. Optics and Laser Technology, 2017, 88: 75-84.
- [10] Li Xingcheng, Zhang Yongkang. Effect of laser shock times on electrochemical performance of AZ31 magnesium alloy [J]. Laser Technology, 2015, 39(4): 466-470.
李兴成, 张永康. 激光冲击次数对镁合金电化学特性的影响[J]. 激光技术, 2015, 39(4): 466-470.
- [11] Zhang Qinglai, Qian Yang, An Zhibin, *et al.* Study on electrochemical corrosion of magnesium alloys by laser shock processing in NaCl solution[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903002.
张青来, 钱 阳, 安志斌, 等. 基于激光冲击的镁合金在 NaCl 溶液中电化学腐蚀的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903002.
- [12] Correa C, Gil-Santos A, Porro J A, *et al.* Eigenstrain simulation of residual stresses induced by laser shock processing in a Ti6Al4V hip replacement[J]. Materials and Design, 2015, 79: 106-114.
- [13] Huang S, Sheng J, Zhou J Z, *et al.* On the influence of laser peening with different coverage areas on fatigue response and fracture behavior of Ti-6Al-4V alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 147: 72-82.
- [14] Ren X D, Zhou W F, Liu F F, *et al.* Microstructure evolution and grain refinement of Ti-6Al-4V alloy by laser shock processing[J]. Applied Surface Science, 2015, 363: 44-49.
- [15] Li Shaozhe, Zhang Lingfeng, Xing Qingpu. Effect of laser shock processing on electrochemical corrosion behavior of AZ91 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503004.
李少哲, 张凌峰, 邢清蒲. 激光冲击强化对 AZ91 镁合金的电化学腐蚀行为的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503004.
- [16] Liu Rongxiang, Zhou Liwen, Yang Yujie, *et al.* Study on microstructure and corrosion resistance of the Ti6Al4V coating by velocity arc spray[J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 14-16.
刘荣祥, 周立文, 杨玉杰, 等. 电弧喷涂 Ti6Al4V 涂层的组织与耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1): 14-16.