

皮秒激光微纳加工 304 不锈钢形貌调控

谢志伟¹, 董世运^{2*}, 闫世兴², 李恩重², 汪宏斌¹, 李重河¹¹上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072;²装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072

摘要 通过皮秒激光对 304 不锈钢表面进行刻蚀获得了光栅微纳结构, 分析了该微纳结构的尺寸及该不锈钢的表面形貌, 研究了不同激光加工参数对微纳结构的影响。结果表明, 平均功率对激光烧蚀率及光栅微纳结构尺寸具有显著影响; 增大扫描速率, 光栅微纳结构深度减小, 宽度基本保持不变, 激光烧蚀率呈不规则波动; 加工次数的增大则会减小激光烧蚀率。激光加工不锈钢表面制备微纳结构的较优工艺条件为高平均功率、较大扫描速率和小加工次数, 在该工艺条件下微纳加工不锈钢表面获得了超疏水性能。

关键词 激光技术; 激光加工; 形貌调控; 微纳结构; 加工参数; 皮秒激光

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.031402

Morphological Adjustment of 304 Stainless Steel by Picosecond Laser Micro-Nano Fabrication

Xie Zhiwei¹, Dong Shiyun², Yan Shixing², Li Enzhong², Wang Hongbin¹, Li Chonghe¹¹School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;²National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

Abstract The grating micro-nano structure is fabricated by picosecond lasers on the 304 stainless steel surface. The size of this micro-nano structure and the surface morphology of this processed stainless steel are characterized. The influences of different laser processing parameters on the micro-nano structure are studied. The result shows that the average power has a significant influence on the laser ablation rate and the size of grating micro-nano structure. If the scanning speed increases, the depth of the grating micro-nano structure decreases, while the width remains unchanged and the laser ablation rate shows an irregular fluctuation. The laser ablation rate decreases if the processing times increase. The better process conditions for fabricating micro-nano structures on the stainless steel surface are as follows: high average power, high scanning speed and low processing times, under which the superhydrophobic surface of stainless steel can be obtained successfully.

Key words laser technique; laser processing; morphological adjustment; micro-nano structures; processing parameters; picosecond laser

OCIS codes 140.3390; 140.7090; 240.6700

1 引言

微纳结构是指特征尺寸在微纳米量级的二维或三维结构^[1]。不同形貌的微纳结构具有不同的功能特性, 例如, 鲨鱼体表的菱形微纳结构具有减阻特

性^[2-4], 土壤生物蛻螂头部的凹坑状微纳结构具有高耐磨性^[5], 荷叶表面乳突状多层级结构具有超疏水和自清洁特性^[6-8]。因此, 微纳结构在不同材料领域表现出不同的功能特性^[9-15]。

不锈钢具有优良的力学性能, 优异的耐腐蚀性

收稿日期: 2017-09-08; 收到修改稿日期: 2017-09-20

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1100205)、北京市科技专项(Z161100004916009)、北京市科技计划(Z161100001516007)

作者简介: 谢志伟(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事超短脉冲激光微纳加工方面的研究。E-mail: reedxzw@i.shu.edu.cn

导师简介: 李重河(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事钛合金应用方面的研究。E-mail: chli@staff.shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: Syd422@sohu.com

和耐磨损性,被广泛应用于汽车、船舶、建筑等领域^[16-19]。然而,随着工业的快速发展,传统不锈钢材料难以满足人们的生产要求。因此,通过构筑功能化微纳结构,进行表面改性以提高不锈钢性能已成为研究热点之一^[20-21]。

金属材料表面微纳结构的制备方法主要有气相沉积法、腐蚀金属法、溶胶-凝胶法、高能束刻蚀法等^[22-26]。与其他微纳加工方法相比,超短脉冲激光具有加工精度高、热影响区小、形貌可控和重复性高等特点。皮秒激光介于飞秒和纳秒激光之间,既有类似于飞秒激光超短脉宽、超高峰值功率的特性,也有飞秒激光所欠缺的高加工效率。飞秒激光系统设备昂贵,现阶段不适合工业化加工,而纳秒激光作用金属表面会产生大面积热影响区,在激光作用区域周围溅射残留物,加工边缘粗糙^[27-28]。通过皮秒激光加工材料表面获得的不同形貌尺寸的微纳结构可呈现不同功能特性。吕晓占等^[29]结合皮秒激光辐照和快速化学腐蚀方法,制备获得了一种高效减反射晶硅表面微结构。Zheng等^[30]基于氟化处理,利用皮秒激光使钛合金表面润湿状态由超亲水性转变为超疏水性。因此,为了在不锈钢表面成功制备功能化微纳结构,探究激光加工参数对微纳结构尺寸形貌的影响规律显得至关重要。

本文利用皮秒激光在不锈钢表面进行了刻蚀,分析了激光平均功率、扫描速率、加工次数分别与单脉冲能量密度、光斑重叠率、脉冲数量之间的关系,探究了不同激光参数对刻蚀效率及光栅微纳结构的影响,观察了不锈钢表面微纳结构成形质量,研究结

论为在不锈钢表面制备不同功能特性微纳结构提供了实验依据。

2 实验

2.1 实验材料及加工方法

实验材料选用表面经镜面处理的 304 不锈钢,尺寸为 35 mm×35 mm×1.8 mm。首先,将试样放入乙醇中超声清洗 1 h;其次,利用皮秒激光器分别以不同的平均功率、扫描速率和加工次数辐照不锈钢表面,刻蚀获得不同尺寸的微纳结构,并对加工后的试样进行超声清洗以去除表面沉积物。皮秒激光加工的工艺参数:平均功率为 1.4, 2.8, 4.2, 5.6, 7.0 W;扫描速率为 100, 200, 300, …, 1000 mm·s⁻¹;加工次数为 1, 10, 20, …, 100。

实验加工设备采用重复频率为 40 kHz,中心波长为 1064 nm,最大平均功率为 7 W 的广东量泽有限公司的 PSHE300-15B 光纤皮秒激光器,皮秒激光加工系统如图 1 所示。从光纤输出的激光束经过多次反射后输入到打标器内,由扫描振镜控制激光束在 X、Y 方向上进行扫描加工,激光束按照设置的激光加工参数聚焦到试样表面进行刻蚀加工。其中,X-Y 振镜的最大扫描速度为 2000 mm·s⁻¹,场镜焦距为 63 mm,激光聚焦后光斑直径约为 25 μm。

在常态环境下,采用线型扫描方式刻蚀获得平行光栅微纳结构形貌。多次加工时,单道加工次数达到设定值时才会进行下一道加工,加工路径如图 2(a)所示,单元间距 d 为 50 μm。微纳结构形貌模型如图 2(b)所示,其中光栅微纳结构宽度为 a ,深度为 b 。

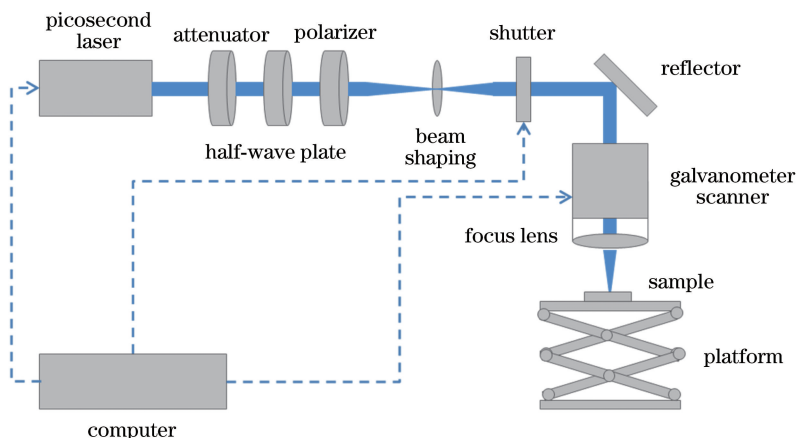


图 1 皮秒激光加工系统示意图

Fig. 1 Schematic of picosecond laser processing system

2.2 测试与分析方法

利用美国赛默飞有限公司 (FEI) 生产的

NovaNano SEM 650 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察加工后的试样表面形貌,利用日本奥林巴斯有限

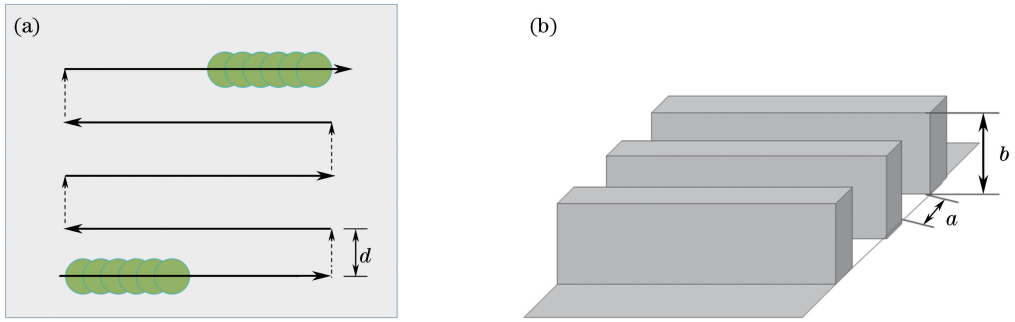


图 2 (a)皮秒激光加工路径示意图;(b)光栅微纳结构形貌示意图

Fig. 2 (a) Schematic of picosecond laser processing route; (b) schematic of grating micro-nano structure

公司(Olympus)生产的 Olympus-OLS4000 型激光扫描共聚焦显微镜测量微纳结构表面的宽度、深度和体积,利用东莞市晟鼎精密仪器有限公司的 SDC-150 光学接触角测量仪测试不锈钢表面接触角值。皮秒激光扫描加工速度快,扫描振镜的起点和终点位置存在加速和减速的现象,故选取光栅微纳结构中间段作为研究对象。同时,皮秒激光是以脉冲形式输出光子,当振镜以一定速度扫描时,会存在图 3(a)所示的光斑重叠现象。振镜扫描速度越小,光斑重叠区域越大,导致光栅微纳结构底部和边部出

现锯齿形状,如图 3(b)所示。因此,在不同位置测量获得的深度值和宽度值也不相同。为了使测量结果更加精确,在光栅微纳结构中段选取 5 处不同位置测量尺寸,获得其宽度和深度的平均值。为了比较不同激光参数下的加工效率,以激光烧蚀率作为衡量指标:

$$\rho = \frac{V}{l/\nu \times n \times 1/60} = \frac{60 \times V \times \nu}{l \times n}, \quad (1)$$

式中 ρ 为材料去除率, l 为光栅微纳结构长度, V 为光栅微纳结构体积, ν 为激光扫描速率, n 为加工次数。

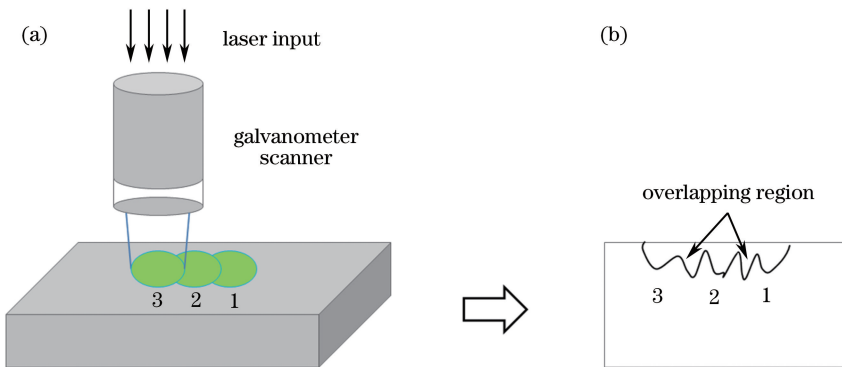


图 3 光栅微纳结构底部的形貌示意图

Fig. 3 Schematic of serrated morphology at bottom of grating micro-nano structure

3 实验结果与讨论

3.1 激光平均功率的影响规律

皮秒激光作用于不锈钢表面时,激光输入的单脉冲能量密度 F 为

$$F = \frac{4P}{\pi f D^2}, \quad (2)$$

式中 P 为激光平均功率, f 为重复频率, D 为光斑直径。由(2)式可知,当重复频率一定时,单脉冲能量密度与激光平均功率成正比。因此,提高激光平均功率可以增大单脉冲能量密度。当重复频率为 40 kHz,加工次数为 5,光斑直径为 25 μm ,光栅微

纳结构长度为 256 μm ,扫描速度为 100 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,平均功率与单脉冲能量密度和激光烧蚀率之间的关系如图 4 所示。由图可知,当平均功率增大时,单脉冲能量密度呈线性增大,激光烧蚀率呈指数增大;当平均功率从 5.6 W 增加到 7 W 时,激光烧蚀率从 0.071 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 0.135 $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,增大趋势最明显。

光栅微纳结构宽度和深度随激光平均功率的变化如图 5 所示。可以看出,当激光平均功率增大时,光栅微纳结构宽度呈线性增大,而深度呈指数增大。这是因为同一材料对激光的吸收率保持不变,增大平均功率可增大单脉冲能量密度,即在单位时间内作用

于不锈钢表面单位面积的能量增大,这使得刻蚀宽度和深度呈不同趋势增大。图 6 所示为光栅微纳结构的三维形貌图,可以进一步看出,平均功率为 7 W 时

的激光刻蚀痕迹比平均功率为 1.4 W 时的明显。因此,调节激光平均功率可有效获得所需形貌结构的横向和纵向尺寸,对材料的去除效果具有重要影响。

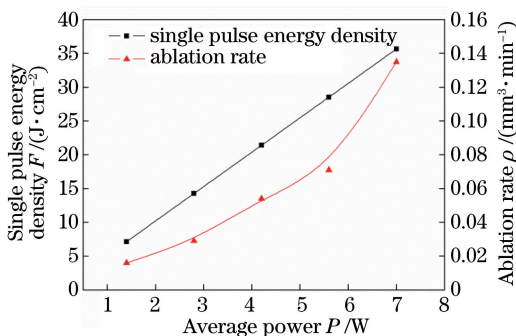


图 4 单脉冲能量密度和激光烧蚀率随平均功率的变化曲线

Fig. 4 Single pulse energy density and laser ablation rate versus average power

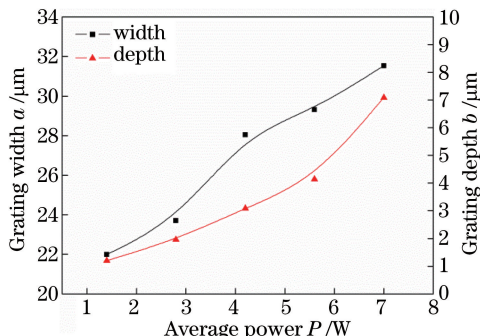


图 5 光栅微纳结构宽度和深度随平均功率的变化曲线

Fig. 5 Width and depth of grating micro-nano structure versus average power

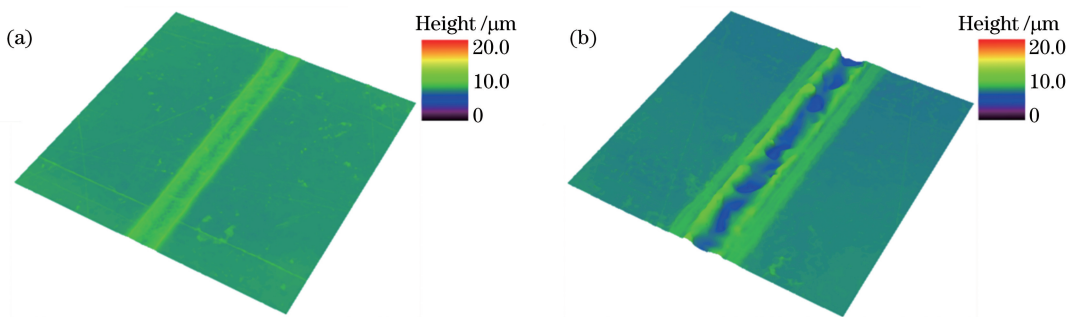


图 6 不同平均功率下的光栅微纳结构形貌图。(a) 1.4 W;(b) 7.0 W

Fig. 6 Morphologies of grating micro-nano structures under different average powers. (a) 1.4 W; (b) 7.0 W

3.2 激光扫描速率的影响规律

扫描速率会改变光斑重叠区域大小,使得光斑重叠率发生变化,相邻光斑重叠示意图如图 7 所示。分析可得,重叠区域面积 S_1 为

$$S_1 = \frac{D^2}{2} \arccos \frac{L}{D} - \frac{L \sqrt{D^2 - L^2}}{2}, \quad (3)$$

式中 L 为相邻光斑距离,且 $L = \nu/f$; 光斑面积 $S = \pi D^2/4$ 。光斑重叠率 η 为

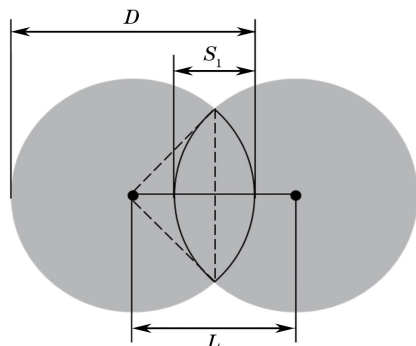


图 7 皮秒激光的光斑重叠示意图

Fig. 7 Schematic of picosecond laser spot overlap

$$\eta = \frac{S_1}{S} =$$

$$\frac{2D^2 \arccos[\nu/(Df)] - (2\nu/f) \sqrt{D^2 - (\nu^2/f^2)}}{\pi D^2}. \quad (4)$$

当光斑直径为 25 μm , 重复频率为 40 kHz, 加工次数为 5, 平均功率为 7.0 W 时, 光斑重叠率和激光烧蚀率与扫描速率间的关系如图 8 所示。可以看

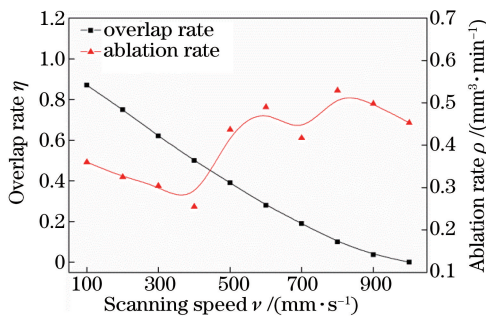


图 8 光斑重叠率、激光烧蚀率随扫描速率的变化曲线

Fig. 8 Spot overlap rate and laser ablation rate versus scanning speed

出,扫描速率越大,相邻光斑重叠区域越小,重叠率呈线性减小。当扫描速率为 $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,重叠率为零,此时相邻光斑完全分离。光栅微纳结构 SEM 图如图 9 所示,结合图 8、9 可知,扫描速率为 $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的光斑重叠区域明显大于扫描速率为 $700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的,相邻光斑间距与所计算值基本

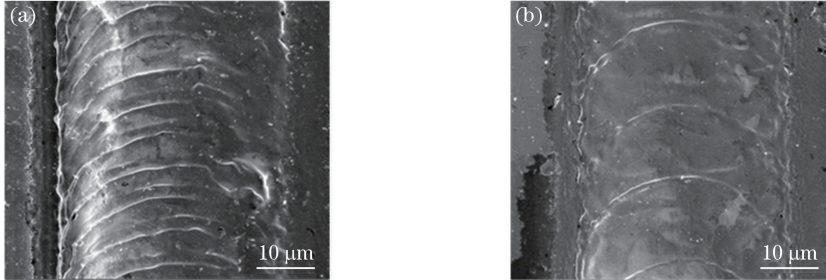


图 9 不同扫描速率下的光栅微纳结构的 SEM 图。(a) $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 9 SEM images of grating micro-nano structures under different scanning speeds. (a) $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $700 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

不同扫描速率条件下光栅微纳结构宽度和深度的变化如图 10 所示。从图中可以看出,随着扫描速率的增大,光斑重叠区域逐渐减小,作用于材料表面的能量减小,材料的去除量减小,因此光栅微纳结构深度呈幂函数减小。扫描速率的变化并不改变热影响区的大小,因而光栅微纳结构宽度在 $30 \mu\text{m}$ 附近波动。

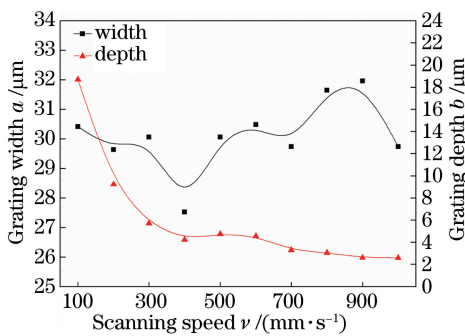


图 10 光栅微纳结构宽度和深度随扫描速率的变化曲线

Fig. 10 Width and depth of grating micro-nano structures under different scanning speeds

3.3 激光加工次数的影响规律

在制备微纳结构过程中,通过改变加工次数可以调节激光脉冲数量,从而获得所需微纳结构尺寸。定义单个光斑范围内脉冲数量为 N , 则

$$N = \frac{nDf}{v}. \quad (5)$$

当光斑直径为 $25 \mu\text{m}$, 重复频率为 40 kHz , 扫描速率为 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,加工次数与脉冲数量、激光烧蚀率之间的关系如图 11 所示。从图中可以看出,随着加工次数逐渐增加,单个光斑内脉冲数量呈

一致。同时,激光烧蚀率随扫描速率的增大呈曲线波动,这主要是因为扫描速率越快,光斑重叠区域越小,从而减小了材料的去除量,但激光作用材料时间也越短,材料去除量和激光作用时间两个因素的比值共同影响激光烧蚀率,故激光烧蚀率呈曲线波动。

线性递增,而激光烧蚀率则呈减小趋势。虽然加工次数的增加可以增大脉冲数量,但激光不断刻蚀材料表面使得焦距逐渐偏离加工后的材料表面。因此,作用于材料中的能量逐渐减小,材料去除量减小,激光烧蚀率呈减小趋势。

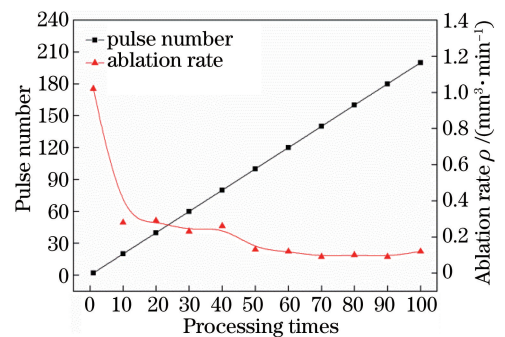


图 11 脉冲数量和激光烧蚀率随加工次数的变化曲线

Fig. 11 Pulse number and laser ablation rate versus processing times

不同加工次数条件下光栅微纳结构宽度和深度的变化如图 12 所示,光栅微纳结构宽度和深度曲线均呈波动趋势。从图中可以看出,当加工次数为 $1\sim 40$ 时,凹槽宽度基本保持不变,约为 $28 \mu\text{m}$,凹槽深度呈线性增大趋势。当加工次数为 $40\sim 70$ 时,凹槽宽度以对数函数规律增大,相应的凹槽深度逐渐减小。光栅微纳结构的三维形貌如图 13 所示,可以看出,当加工次数为 40 与 50 时,光栅微纳结构宽度和深度存在明显的区别。这是因为加工次数较多,材料表面热量大量积累并向凹槽四周扩散,从而增大热影响区,使得凹槽周边金属开始熔化;加工结束后,未气化的熔融金属回流至凹槽底部,从而使使得凹

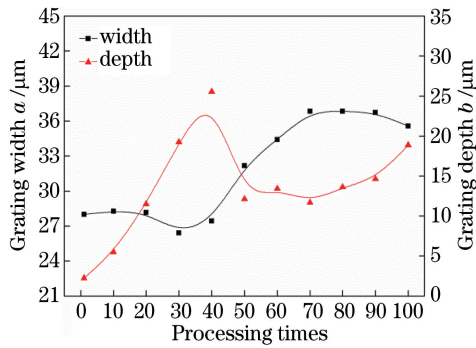


图 12 光栅微纳结构宽度和深度随加工次数的变化曲线

Fig. 12 Width and depth of grating micro-nano structures versus processing times

槽深度减小,宽度增大。当加工次数为 70~100 时,凹槽宽度在 $36.5 \mu\text{m}$ 附近波动,而加工次数的增加使得激光作用材料表面的时间进一步增加,材料吸收较多的热量,从而使得更多的熔融金属气化,因此

凹槽深度逐渐增大。

激光加工工艺参数的调整对激光烧蚀率及光栅微纳结构宽度、深度具有显著影响。为保证一定的激光加工效率,同时保证加工的微纳结构尺寸达到要求,激光加工不锈钢表面制备微纳结构的较优加工工艺条件为高平均功率、较大扫描速率和小加工次数。例如,为了在不锈钢表面制备超疏水微纳结构,选取实验设定的平均功率为 7.0 W ,扫描速率为 $500 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,加工次数为 30,单元间距为 $50 \mu\text{m}$,通过皮秒激光加工获得了网状形貌微纳结构,其三维形貌图和 SEM 图如图 14 所示。通过接触角测量仪测试发现,不锈钢表面接触角高达 152° ,为超疏水润湿状态。因此,探究激光加工工艺参数对激光烧蚀率及微纳结构尺寸的影响,可为制定合理的加工工艺提供指导,进而高效制备所需功能特性微纳结构,这对微纳结构在材料表面改性中的应用具有重要意义。

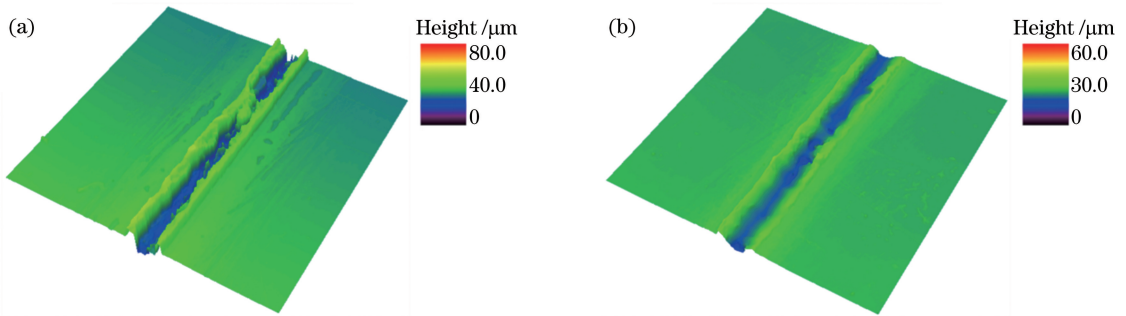


图 13 不同加工次数下的光栅微纳结构三维形貌图。(a) 40;(b) 50

Fig. 13 3D morphologies of grating micro-nano structures under different processing times. (a) 40; (b) 50

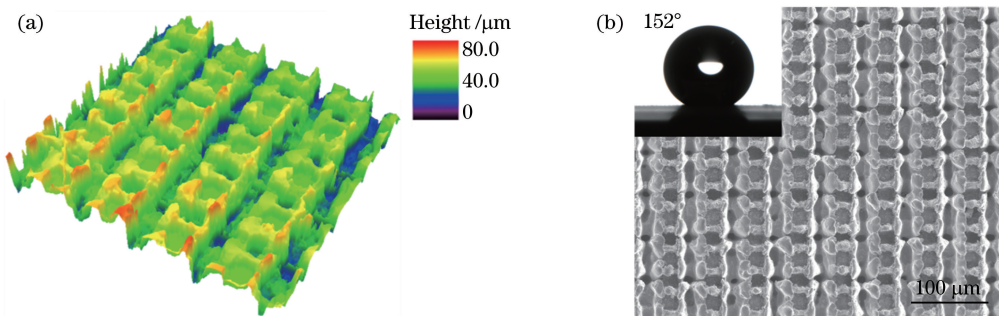


图 14 不锈钢表面的微纳结构。(a)三维形貌图;(b) SEM 图

Fig. 14 Micro-nano structure on stainless steel surface. (a) 3D morphology; (b) SEM image

4 结 论

在皮秒激光刻蚀不锈钢表面过程中,增大平均功率可增大激光能量密度,提高加工效率;增大扫描速率会减小光斑重叠率,使光栅微纳结构深度减小;随着加工次数的增加,激光烧蚀率逐渐减小,光栅微纳结构宽度和深度呈曲线波动。实验表明,在高平均

功率、较大扫描速率、小加工次数的加工工艺条件下,既可获得所需微纳结构尺寸,又可以提高加工效率。

参 考 文 献

- [1] Zhou X Q, Hou Q, Liu Q, *et al.* Research status and tendency of measurement techniques for geometric features of micro/nano structures[J].

- Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(3): 327-339.
- 周晓勤, 侯强, 刘强, 等. 微纳结构几何特征检测技术的研究现状与发展趋势[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 327-339.
- [2] Pu X, Li G J, Huang H L. Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface[J]. *Biology Open*, 2016, 5(4): 389-396.
- [3] Watson G S, Green D W, Schwarzkopf L, *et al.* A gecko skin micro/nano structure: A low adhesion, superhydrophobic, anti-wetting, self-cleaning, biocompatible, antibacterial surface [J]. *Acta Biomaterialia*, 2015, 21: 109-122.
- [4] Luo Y H, Xu X, Li D, *et al.* Recent developments in fabricating drag reduction surfaces covering biological sharkskin morphology[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2016, 32(1): 93-113.
- [5] Gao K, Sun Y H, Gao R F, *et al.* Application and prospect of bionic non-smooth theory in drilling engineering [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(4): 519-522.
- 高科, 孙友宏, 高润峰, 等. 仿生非光滑理论在钻井工程中的应用与前景[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(4): 519-522.
- [6] Frankiewicz C, Attinger D. Texture and wettability of metallic lotus leaves[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(7): 3982-3990.
- [7] Zang D M, Zhu R W, Zhang W, *et al.* Corrosion-resistant superhydrophobic coatings on Mg alloy surfaces inspired by lotus seedpod[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(8): 1605446.
- [8] Yuan Z Q, Wang X, Bin J P, *et al.* A novel fabrication of a superhydrophobic surface with highly similar hierarchical structure of the lotus leaf on a copper sheet [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285(B): 205-210.
- [9] Fan P X, Long J Y, Jiang D F, *et al.* Study on ultrafast laser fabrication of UV-FIR ultra-broad-band antireflection surface micro-nano structures and their properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0806005.
- 范培迅, 龙江游, 江大发, 等. 紫外-远红外超宽谱带高抗反射表面微纳结构的超快激光制备及功能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0806005.
- [10] Bao Z J, Wang C W, Zhang Y, *et al.* Modification of wettability of stainless steel by picosecond laser surface microstructuring[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 180-183.
- [11] Wang Z, Wang C W, Wang M, *et al.* Manipulation of tribological properties of stainless steel by picosecond laser texturing and quenching[J]. *Tribology International*, 2016, 99: 14-22.
- [12] Guo L, Lin Y T, Zhang Z H, *et al.* Mechanism of laser coloration of stainless steel and color prediction based on neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1102008.
- 郭亮, 林远添, 张震华, 等. 不锈钢激光着色机理及基于神经网络的颜色预测[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1102008.
- [13] Wang F, Zhang C F, Lu Y F, *et al.* Laser shock processing of polycrystalline alumina ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(3): 911-919.
- [14] Talbi A, Petit A, Melhem A, *et al.* Nanoparticles based laser-induced surface structures formation on mesoporous silicon by picosecond laser beam interaction[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 374: 31-35.
- [15] Pan H H, Wang Z, Fan W Z, *et al.* Superhydrophobic titanium surface micro/nanostructures induced by femtosecond laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0802002.
- 泮怀海, 王卓, 范文中, 等. 飞秒激光诱导超疏水钛表面微纳结构[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0802002.
- [16] Lazar A M, Yespica W P, Marcelin S, *et al.* Corrosion protection of 304L stainless steel by chemical vapor deposited alumina coatings[J]. *Corrosion Science*, 2014, 81(2): 125-131.
- [17] Tavares S S M, Pardal J M, Ponzio E, *et al.* Influence of microstructure on the corrosion resistance of hyperduplex stainless steel[J]. *Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion*, 2010, 61(4): 313-317.
- [18] Li H B, Zhou E Z, Zhang D W, *et al.* Microbiologically influenced corrosion of 2707 hyperduplex stainless steel by marine pseudomonas aeruginosa biofilm[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20190.
- [19] Kim S, Lee K B, Kang S M. Lubrication of stainless steel surfaces for marine antifouling applications [J]. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2016, 37(12): 2087-2090.
- [20] Yang D Z, Liu J H, E X X, *et al.* Experimental study of composition and influence factors on fouling of stainless steel and copper in seawater[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 94: 767-772.

- [21] Wang K K, Kim B J, II-Heo, *et al.* Fabrication and characterization of antimicrobial surface-modified stainless steel for bio-application[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 310: 256-262.
- [22] Hashempour M, Vincenzo A, Zhao F, *et al.* Direct growth of MWCNTs on 316 stainless steel by chemical vapor deposition: Effect of surface nano-features on CNT growth and structure[J]. *Carbon*, 2013, 63(2): 330-347.
- [23] Wu Y F, Wang Y M, Liu H, *et al.* The fabrication and hydrophobic property of micro-nano patterned surface on magnesium alloy using combined sparking sculpture and etching route[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 80-87.
- [24] Ruan M, Wang J W, Liu Q L, *et al.* Superhydrophobic and anti-icing properties of sol-gel prepared alumina coatings[J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, 57(6): 638-645.
- [25] Yu P, Ning C Y, Tan G X, *et al.* Micropatterned film with nano-porous sodium titanate structure fabricated via template-free direct laser irradiation technology: Characteristics and set-selective apatite deposition ability [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 235: 267-272.
- [26] Jiang D F, Fan P X, Gong D W, *et al.* High-temperature imprinting and superhydrophobicity of micro/nano surface structures on metals using molds fabricated by ultrafast laser ablation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 56-63.
- [27] Li C, Cheng G H, Stoian R. Investigation of femtosecond laser-induced periodic surface structure on tungsten[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0532001.
李晨, 程光华, Stoian Razvan. 飞秒激光诱导金属钨表面周期性自组织结构的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0532001.
- [28] Wang Z, Zhao Q Z. Research progress of manipulating tribological property of materials by ultrashort-pulse-induced surface micro-nano texture [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 110003.
王卓, 赵全忠. 超短脉冲激光诱导微纳结构调控材料摩擦性能的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 110003.
- [29] Lü X Z, Ji L F, Wu Y, *et al.* Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴燕, 等. 皮秒激光-化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403006.
- [30] Zheng B X, Jiang G D, Wang W J, *et al.* Fabrication of superhydrophilic or superhydrophobic self-cleaning metal surfaces using picosecond laser pulses and chemical fluorination[J]. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 2016(5/6): 1-13.