

# 高功率绿光飞秒激光诱导产生钛表面周期性微结构

秦晓阳\*\*, 黄婷\*, 肖荣诗

北京工业大学高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

**摘要** 采用飞秒激光在金属材料表面制备周期性微结构在光伏发电、自清洁以及生物医学等领域具有广阔的应用前景。采用功率为 75 W、脉宽为 800 fs、波长为 515 nm 的飞秒激光, 首先研究线扫描条件下钛的烧蚀阈值, 然后基于 90°交叉面扫描的加工方式诱导钛表面微结构, 推导出面扫描时单位点的有效脉冲数计算公式, 并对结构演变规律进行归纳分析。结果表明: 同文献报道的红外飞秒激光相比, 钛表面绿光飞秒激光的烧蚀阈值明显降低; 不同参数对钛表面微结构的影响可以归纳为面扫描单位点的有效脉冲数和激光能量密度。当激光能量密度较低时, 随着有效脉冲数的增加, 钛表面微结构由不均匀分布的驼峰状凸起转变为均匀的柱状阵列结构, 能量密度较高时则转变为相互连接的丘陵状结构。高的激光能量密度、低的有效脉冲数与低的激光能量密度、高的有效脉冲数诱导的结构类似, 使用高能量密度可显著提高加工效率。

**关键词** 激光技术; 绿光飞秒激光; 周期性微结构; 钛; 烧蚀阈值

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002006

## Periodic Microstructure on Ti Surface Induced by High-Power Green Femtosecond Laser

Qin Xiaoyang\*\*, Huang Ting\*, Xiao Rongshi

*High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

**Abstract** The femtosecond laser, which induces periodic microstructures on the surfaces of metallic materials, is extensively applied in photovoltaic power generation, self-cleaning, and biomedical fields. In this paper, we fabricate periodic microstructures on the surface of Ti by utilizing a green femtosecond laser with a power of 75 W, a pulse width of 800 fs, and a wavelength of 515 nm. First, the ablation threshold of Ti under the line-scan condition is discussed herein. The Ti surface microstructures are induced based on a 90° cross-surface scan processing. We derive the formula for the calculation of the effective-pulse number per unit point in the surface scanning and summarize the microstructural evolution. The results obtained demonstrate the following: 1) the ablation threshold of Ti by utilizing the green femtosecond laser is significantly lower than that of the previously reported long-wavelength infrared laser; 2) the surface microstructure of Ti can be attributed to the effective-pulse number per unit point and the laser fluence in the surface scanning. Due to the increase in the effective-pulse number, the microstructure changes from nonuniform distribution of hump to uniform columnar array structure when the laser fluence is low, or to interconnected hilly structure when the laser fluence is high. The similar structure can be obtained either by applying a high laser fluence and small effective-pulse number, or a low laser fluence and large effective-pulse number. The former can significantly increase processing efficiency.

**Key words** laser technology; green femtosecond laser; periodic microstructure; Ti; ablation threshold

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900

## 1 引 言

微加工技术在航天工业、汽车、医疗器械和消

费电子等领域具有广泛应用。与传统的化学腐蚀、机械、电子束熔融等微加工技术相比, 超快激光微加工具有加工精度高、加工材料广泛、无热效

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-21; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51675013)

\* E-mail: huangting@bjut.edu.cn; \*\* E-mail: qinxiaoyang@emails.bjut.edu.cn

应以及低能耗等优势<sup>[1]</sup>。超快激光是一种通过锁模技术产生、持续时间在皮秒和飞秒量级的脉冲激光<sup>[2]</sup>,具有超高的峰值功率。近十几年来,通过飞秒激光微加工技术在材料表面直接制备周期性微结构被认为是极具潜力的研究方向之一<sup>[3]</sup>。钛金属具有密度低、耐腐蚀性和耐高温性良好、强度高以及化学性质稳定等特点,已被广泛应用于工业、航空、医疗器械等领域<sup>[4]</sup>。表面具有周期性微结构的钛金属可作为良好的生物薄膜、耐磨材料、疏水性材料和抗反射材料等,其使用性能与微结构形貌密切相关<sup>[5]</sup>。

使用飞秒激光可以在多种材料表面制备周期性微结构,如金刚石<sup>[6]</sup>、石英玻璃<sup>[7]</sup>、陶瓷<sup>[8]</sup>等非金属材料, Si<sup>[9]</sup>、SiC<sup>[10]</sup>等半导体材料,以及各种金属材料<sup>[11-14]</sup>。具有不同形貌的表面微结构可以改变材料的亲、疏水性<sup>[11]</sup>,增强材料的抗腐蚀性能<sup>[12]</sup>,减小材料表面的摩擦力<sup>[13]</sup>,并可使材料具有丰富的颜色效应<sup>[14]</sup>等,在多个领域极具应用潜力。Moradi等<sup>[15]</sup>采用波长为 800 nm、平均功率为 2 W 的飞秒激光在不锈钢表面制备得到了具有微纳复合结构的超疏水表面。Jiang等<sup>[16]</sup>同样采用波长为 800 nm、平均功率为 2 W 的飞秒激光在钨表面制备出了表面覆盖纳米条纹的周期性圆锥形凸起微结构,该结构可作为高温固态压印工艺的模具。Vorobyev等<sup>[17]</sup>采用波长为 800 nm、平均功率为 1 W 的飞秒激光在钛表面制备出了被纳米结构覆盖的周期为 120  $\mu\text{m}$  的凹槽,显著降低了钛的表面反射率。Wu等<sup>[18]</sup>使用波长为 800 nm 的飞秒激光,在钛箔上直接制备出微孔阵列结构,使得该结构具有超亲水性和水下超疏油性,该结构已成功应用于油水混合物的分离过程。

目前,研究人员主要采用长波长红外飞秒激光器在金属材料表面诱导微结构。随着科技的不断发展,更短波长、更高功率的飞秒激光器逐渐被研制出来。短波长激光可以提供更高的单光子能量,有利于提高金属材料对激光能量的吸收。高功率和高重复频率配合短波长激光有望大幅提升加工效率,实现工业化大规模生产。

本文采用功率为 75 W、波长为 515 nm 的高功率绿光飞秒激光器在空气中诱导钛表面微结构,研究了钛表面绿光飞秒激光烧蚀阈值、能量密度、扫描次数、扫描速度、扫描间距对钛表面周期性微结构形成的影响规律。

## 2 实验设备与方法

选用厚度为 250  $\mu\text{m}$ 、纯度为 99.99% 的纯钛箔进行实验,激光处理前先用去离子水、乙醇、丙酮溶液依次对样品超声清洗 10 min,吹干后待用。选用的激光器为 Trumpf-5000 型绿光飞秒激光器,脉宽为 800 fs,重复频率为 600 kHz,最大平均输出功率为 75 W,波长为 515 nm。激光器出光后,光被导入到 IS<sub>6</sub>14 型高速振镜系统,然后通过焦距为 255 mm 的聚焦镜入射到待加工材料的表面。采用 DUMA 光束分析仪测得聚焦光斑的直径为 50  $\mu\text{m}$ 。图 1 为飞秒激光加工实验装置示意图。实验中使用吸尘器去除加工过程产生的飞沫物。

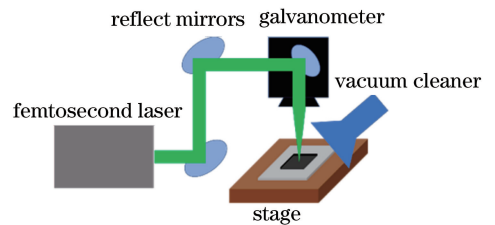


图 1 飞秒激光诱导钛表面微结构的加工示意图

Fig. 1 Schematic of generation of periodic microstructures on surface of Ti induced by femtosecond laser

首先通过线扫描的方式研究钛箔的烧蚀阈值,然后采用 90°交叉面扫描(水平扫描一次,旋转 90°后以相同参数再扫描一次)的方式研究激光烧蚀微结构演变规律,所有实验均在大气条件下进行。利用 HITACHI S-3400N 扫描电子显微镜(SEM)和 OLYMPUS OLS5100 激光共聚焦显微镜(LSCM)观察钛表面的微观形貌。

## 3 结果与分析

### 3.1 钛表面绿光飞秒激光的烧蚀阈值

材料表面出现永久性可探测损伤的最低激光能量密度( $F$ )被称为激光烧蚀阈值,影响材料表面烧蚀阈值的因素主要包括材料的自身特性、激光参数和有效脉冲数<sup>[19-21]</sup>。线扫描单位点有效脉冲数  $N_e$  的计算公式为<sup>[22]</sup>

$$N_e = \frac{2\omega_0 f}{v}, \quad (1)$$

式中: $\omega_0$ 为光斑半径; $f$ 为重复频率; $v$ 为扫描速度。当光斑半径和重复频率不变时,通过改变扫描速度可以获得不同的线扫描的有效脉冲数  $N_e$ 。

当有效脉冲数  $N_e = 40$  时(即扫描速度  $v =$

750 mm/s),不同激光能量密度下钛箔表面的烧蚀形貌如图 2 所示。当激光能量密度  $F \leq 6.78 \text{ J/cm}^2$  时,钛箔表面可见清晰的烧蚀痕迹;随着激光能量密度的增加,烧蚀区的线宽逐渐增大;当  $6.78 \text{ J/cm}^2 < F \leq 9.04 \text{ J/cm}^2$  时,在光斑中心区域出现了 V 形的烧蚀微槽,微槽深度随激光能量

密度的增大而增加;当激光能量密度  $F > 9.04 \text{ J/cm}^2$  时,烧蚀微槽加深且变宽,边缘出现颗粒状团聚物,三维形貌转变为 U 形,此时在激光作用区域材料发生了熔化,光斑中心出现烧蚀通道,材料熔化后小液滴受等离子体冲击向两侧飞溅,然后凝固,团聚为不规则的颗粒<sup>[22]</sup>。

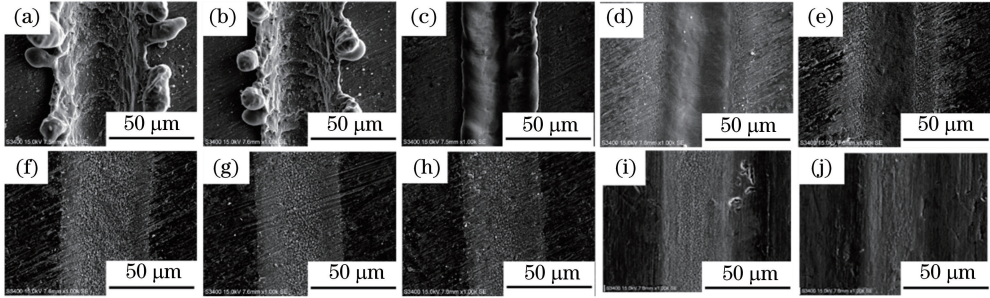


图 2 单位点有效脉冲数为 40 时,不同激光能量密度下钛箔表面的烧蚀形貌。

- (a)  $11.30 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $10.17 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (c)  $9.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (d)  $7.91 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (e)  $6.78 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  
 (f)  $5.65 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (g)  $3.39 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (h)  $1.13 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (i)  $0.68 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (j)  $0.23 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

Fig. 2 SEM images of microstructures on surface of Ti under line-scanning at different laser fluences when effective-pulse number per unit point is 40. (a)  $11.30 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (b)  $10.17 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (c)  $9.04 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (d)  $7.91 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (e)  $6.78 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  
 (f)  $5.65 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (g)  $3.39 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (h)  $1.13 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (i)  $0.68 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; (j)  $0.23 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$

当激光能量密度较低时,烧蚀线宽与激光能量密度的关系为<sup>[22]</sup>

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln \left[ \frac{F_0}{F(N)} \right], \quad (2)$$

$$F_0 = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 f}, \quad (3)$$

式中: $D$  为烧蚀区的线宽; $F_0$  为焦点处的峰值能量密度; $F(N)$  为  $N$  个有效脉冲下飞秒激光的烧蚀阈值; $P$  为激光功率。当激光能量密度较高时,激光束边缘处的光强也达到了烧蚀阈值,导致烧蚀线宽不稳定<sup>[23]</sup>,所以测试烧蚀阈值时应以低的激光能量密度为准,选取的激光能量密度分别为  $0.23, 0.45, 0.68, 0.90, 1.13 \text{ J/cm}^2$ 。表 1 列出了扫描速度及对应单位点的有效脉冲数。

表 1 飞秒激光扫描速度与对应单位点的有效脉冲数

Table 1 Femtosecond laser scanning speed and corresponding effective-pulse number per unit point

Scanning speed / ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	300	750	3000
Number of effective pulses	100	40	10

结合上述公式可以拟合出激光能量密度与烧蚀宽度的关系曲线,结果如图 3 所示,可得到  $515 \text{ nm}$  飞秒激光对钛的烧蚀阈值分别为  $34 \text{ mJ/cm}^2$  ( $N_e = 100$ )、 $120 \text{ mJ/cm}^2$  ( $N_e = 40$ )、 $182 \text{ mJ/cm}^2$  ( $N_e = 10$ )。可以看出,随着有效脉冲数的增加,烧蚀阈值降低,这一规律与文献<sup>[24]</sup>的结果一致<sup>[24]</sup>。

Nathala 等<sup>[25]</sup>测得了  $800 \text{ nm}$  飞秒激光有效脉冲数为 220 时,钛的烧蚀阈值为  $30 \sim 45 \text{ mJ/cm}^2$ 。本文研究结果表明绿光飞秒激光有效脉冲数为 100 时,钛箔的烧蚀阈值为  $34 \text{ mJ/cm}^2$ ,与  $800 \text{ nm}$  飞秒激光有效脉冲数为 220 时钛的烧蚀阈值相当。以上结果表明,钛对短波长激光的吸收率更高,故采用绿光飞秒激光能更有效地对钛进行烧蚀加工。

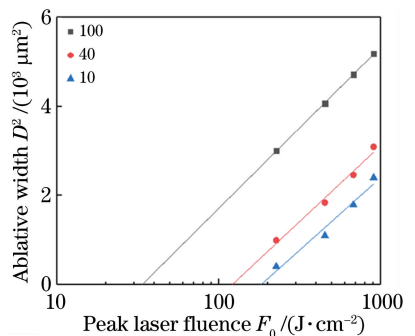


图 3 单位点有效脉冲数为 10、40、100 时,

烧蚀区线宽度的平方与激光能量密度的拟合曲线

Fig. 3 Squared width of ablated zone as a function of laser fluence when effective-pulse numbers per unit point are 10, 40, and 100, respectively

### 3.2 工艺参数对表面微结构形貌的影响规律

#### 3.2.1 表面微结构随扫描次数的变化规律

在激光能量密度为  $1.13 \text{ J/cm}^2$ 、扫描速度为  $2000 \text{ mm/s}$ 、扫描间距为  $20 \mu\text{m}$  的条件下,钛箔表

面形貌随扫描次数的演化规律如图 4 所示。扫描 1 次时,材料表面出现纳米条纹结构,如图 4(a)所示,这主要是入射光与表面电磁波相互干涉形成的<sup>[26-27]</sup>。纳米条纹结构的出现改变了材料的表面粗糙度,会影响后续激光作用时的能量吸收。非均匀吸收的激光能量会导致材料表面部分区域迅速熔化,在表面张力下发生受迫流动,产生表面毛细波<sup>[28]</sup>。随着扫描次数的增加,激光能量的沉积增加,毛细波发生紊乱,然后凝固为不均匀分布的

驼峰状凸起<sup>[29]</sup>。继续增加扫描次数,驼峰结构数量增多,分布逐渐趋于均匀,单个驼峰结构的尺寸增大,如图 4(c)~(e)所示。扫描 20 次后,驼峰结构汇聚,转变为柱状阵列结构,均匀地覆盖在材料表面,如图 4(f)~(h)所示。从图 5 可以看出:当扫描次数小于 10 次时,不均匀分布的驼峰结构的高度随扫描次数的增加而增大;当扫描次数达到 20 次后,柱状阵列结构的高度随着扫描次数的增加趋于稳定,约为 20  $\mu\text{m}$ 。

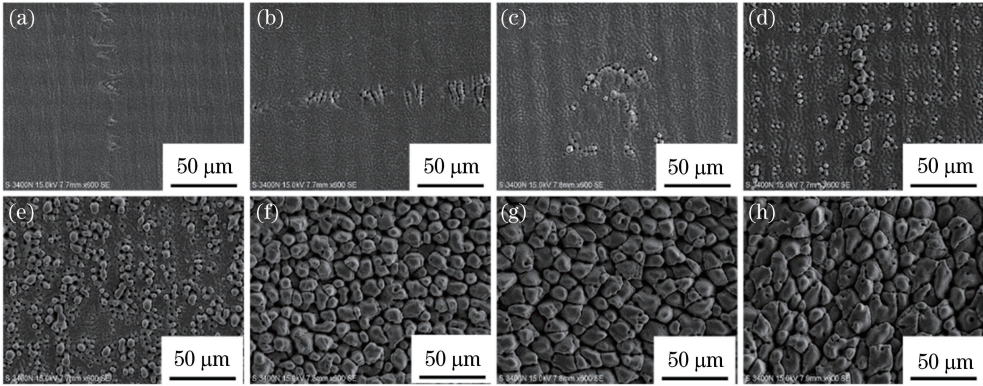


图 4 激光能量密度为 1.13 J/cm<sup>2</sup>时,不同扫描次数诱导后,钛箔表面微结构的 SEM 形貌。

(a) 1; (b) 2; (c) 4; (d) 8; (e) 10; (f) 20; (g) 40; (h) 80

Fig. 4 SEM images of microstructures on surface of Ti induced by different scanning times when laser fluence is 1.13 J/cm<sup>2</sup>. (a) 1; (b) 2; (c) 4; (d) 8; (e) 10; (f) 20; (g) 40; (g) 80

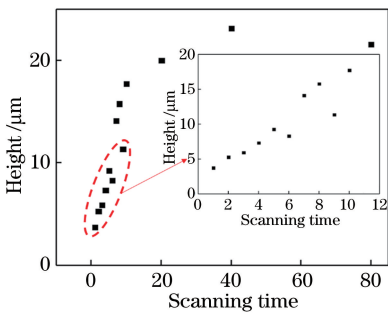


图 5 能量密度为 1.13 J/cm<sup>2</sup>时,钛箔表面微结构高度差随扫描次数的变化

Fig. 5 Height of femtosecond laser-induced microstructure on surface of Ti as a function of scanning time, when laser fluence is 1.13 J/cm<sup>2</sup>

### 3.2.2 能量密度对表面微结构的影响规律

图 6、图 7 分别为能量密度为 5.65 J/cm<sup>2</sup> 和 10.17 J/cm<sup>2</sup>时,钛箔表面微结构随扫描次数的演化规律(扫描速度为 2000 mm/s,扫描间距为 20  $\mu\text{m}$ )。可以看出,激光能量密度为 5.65 J/cm<sup>2</sup>时,钛表面微结构的演变与激光能量密度为 1.13 J/cm<sup>2</sup>时的结构演变类似,经历了纳米条纹结构→不均匀驼峰结构→均匀柱状结构的变化。此外,柱状结构尺寸显著增加。

当激光能量密度为 10.17 J/cm<sup>2</sup>时,钛箔表面微结构随扫描次数的演化规律如图 7 所示:经历了鱼鳞状结构→丘陵状结构的转变。由图 2 可知,当激光能量密度大于 9.04 J/cm<sup>2</sup>时,钛箔发生了明显的熔化-凝固现象。因此,在 10.17 J/cm<sup>2</sup>的激光能量密度作用下,随着扫描次数增加,表面的熔化材料发生流动,填充鱼鳞状结构间隙的凹坑,形成丘陵状微结构。LSCM 结果显示:扫描 2 次时,表面微结构的高度差已达到约 10  $\mu\text{m}$ ,继续增加扫描次数,表面形貌会发生变化,但微结构的高度差基本稳定在 10  $\mu\text{m}$ 。

### 3.2.3 扫描速度对表面微结构的影响规律

表 2 为扫描间距为 20  $\mu\text{m}$ 时,以 2000, 3500, 5000 mm/s 三种不同扫描速度 90°交叉扫描 20 次后钛箔表面微结构的 SEM 图,激光能量密度分别为 3.39 J/cm<sup>2</sup> 和 7.91 J/cm<sup>2</sup>。当激光能量密度为 3.39 J/cm<sup>2</sup>时,在 2000 mm/s 扫描速度下,钛箔表面能够得到均匀分布的珊瑚状凸起结构;增加扫描速度到 3500 mm/s 和 5000 mm/s(其他参数不变),本质上是降低了沿激光扫描方向的光斑重叠率,所以加工区域的激光能量注入不均匀,得到的微结构分布也不均匀。增加能量密度到 7.91 J/cm<sup>2</sup>后,可

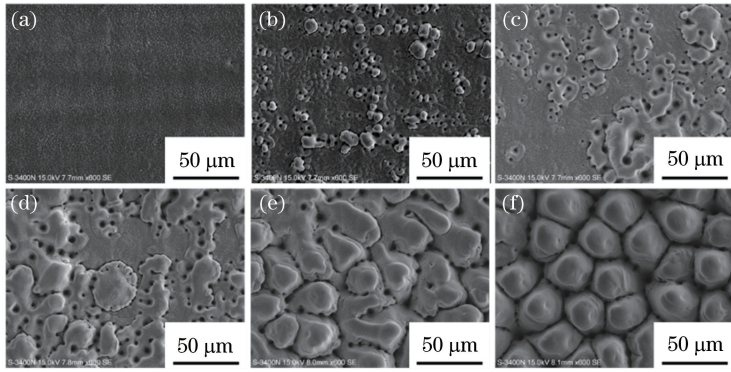


图 6 激光能量密度为  $5.56 \text{ J/cm}^2$  时,不同扫描次数诱导后,钛箔表面微结构的 SEM 形貌。

(a) 1; (b) 5; (c) 8; (d) 10; (e) 20; (f) 40

Fig. 6 SEM images of microstructures on surface of Ti induced by different scanning times when laser fluence is  $5.56 \text{ J/cm}^2$ . (a) 1; (b) 5; (c) 8; (d) 10; (e) 20; (f) 40

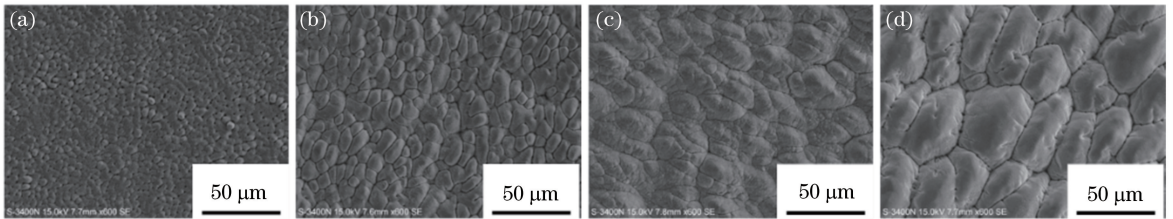
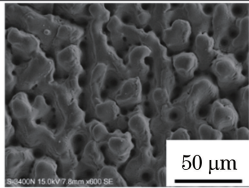
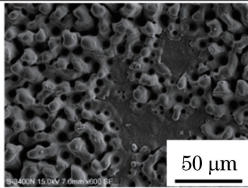
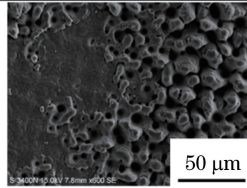
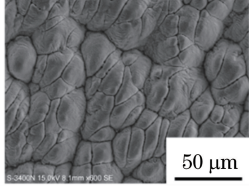
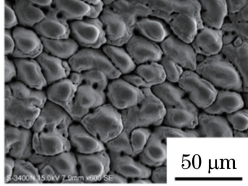
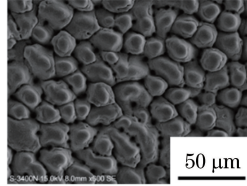


图 7 当激光能量密度为  $10.17 \text{ J/cm}^2$  时,不同扫描次数诱导后,钛箔表面微结构的 SEM 形貌。(a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 20

Fig. 7 SEM images of microstructures on surface of Ti induced by different scanning times when laser fluence is  $10.17 \text{ J/cm}^2$ . (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 20

表 2 扫描间距为  $20 \mu\text{m}$  时,不同扫描速度和激光能量密度下诱导钛箔表面微结构的 SEM 形貌

Table 2 SEM images of microstructures on surface of Ti at different scanning speeds and different laser fluences when scanning pitch is  $20 \mu\text{m}$

Laser fluence /( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	Scanning speed of 2000 mm/s	Scanning speed of 3500 mm/s	Scanning speed of 5000 mm/s
3.39			
7.91			

以看到,扫描速度增加到  $5000 \text{ mm/s}$  时在钛表面仍然可形成均匀分布的微结构,这主要源于激光能量呈高斯分布的特性。图 8(a)为高斯光束能量密度分布示意图,当激光能量密度较低时,只有光斑中心的能量密度可以达到材料的烧蚀阈值;随着激光能量密度增加,能够达到烧蚀阈值的光斑直径增大,激光对作用区域覆盖得更均匀。图 8(b)为沿同一方向扫描时不同扫描速度和激光能量密度下的光斑重

叠示意图。

### 3.2.4 扫描间距对表面微结构的影响规律

扫描间距主要影响相邻扫描光束作用区域的搭接率。固定扫描速度为  $2000 \text{ mm/s}$ ,激光能量密度为  $1.13 \text{ J/cm}^2$ ,观察不同扫描次数下微结构形貌随相邻线扫描间距( $10, 20, 30 \mu\text{m}$ )的变化,SEM 图如表 3 所示。可见,较小的扫描间距与较多的扫描次数配合能得到类似的表面微结构,说明随着扫描间

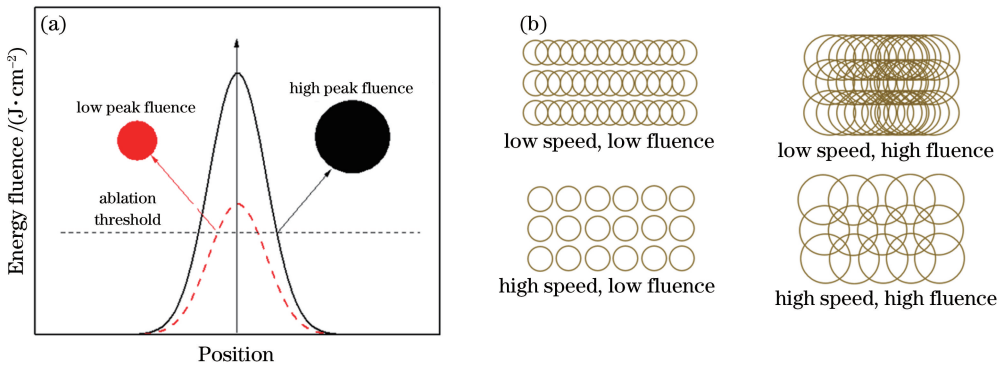


图 8 高斯光束能量密度分布示意图以及光斑重叠示意图。(a)高斯光束能量密度分布示意图；

(b)平行扫描时不同扫描速度和激光能量密度下的光斑重叠示意图

Fig. 8 Effects of laser fluence and scanning speed. (a) Schematic of fluence distribution of Gaussian laser beam; (b) schematic of spot overlapping at different scanning speeds and fluences in parallel scan

表 3 不同扫描间距和扫描次数下飞秒激光加工后,钛箔表面微结构的 SEM 图

Table 3 SEM images of microstructures on surface of Ti at different scanning pitches and scanning times

Scanning pitch / $\mu\text{m}$	Scanning time of 10	Scanning time of 20	Scanning time of 40
10			
20			
30			

距的增加,相邻激光束加工区域的搭接率降低,单位面积沉积激光的能量降低,实际生产中可通过合理调节参数来提升加工效率。

### 3.2.5 有效脉冲数的影响规律

上述实验中分别通过改变飞秒激光的扫描次数、扫描速度、扫描间距来调节钛箔表面的微结构,本质上来说均是改变了单位点的有效脉冲数。由于实验中的扫描间距  $L$  均小于光斑直径,因此推导出的相邻扫描线的搭接率  $R_0$  以及垂直于扫描方向的单位点脉冲数  $N_i$  分别为

$$R_0 = \frac{2\omega_0 - L}{2\omega_0} = 1 - \frac{L}{2\omega_0}, \quad (4)$$

$$N_i = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{L}{2\omega_0}\right)} = \frac{2\omega_0}{L}. \quad (5)$$

此外,实验采用  $90^\circ$  交叉扫描的加工方式,扫描次数为  $n$ ,基于线扫描的有效脉冲数  $N_e$  与垂直于扫描方向有效脉冲数  $N_i$ ,可以得到飞秒激光加工过程中面扫描单位点的有效脉冲数  $N_m$  为

$$N_m = 2n \cdot N_e \cdot N_i = 2n \cdot \frac{2\omega_0 f}{v} \cdot \frac{2\omega_0}{L} = 8\omega_0^2 f \frac{n}{vL}. \quad (6)$$

通过调节激光扫描速度、扫描间距以及扫描次数获得单位点的有效脉冲数  $N_m$  分别为 1000、1500、2000 时的相关实验参数如表 4 所示。图 9 所示为

激光能量密度为  $1.13 \text{ J/cm}^2$  时,不同有效脉冲数  $N_m$  下得到的钛箔表面微结构的 SEM 图。可以看出:当面扫描有效脉冲数一定时,钛箔表面的微结构

具有相似的形貌特征;随着有效脉冲数增加,微结构形貌由驼峰状转变为柱状阵列,且径向尺寸逐渐粗化。

表 4 获得不同有效脉冲数的扫描速度、扫描次数及扫描间距

Table 4 Effective-pulse numbers of surface scan obtained by adjusting different scanning speeds, scanning times, and scanning pitches

Parameter	Pulse number of 1000			Pulse number of 1500			Pulse number of 2000		
	Fig.9(a)	Fig.9(b)	Fig.9(c)	Fig.9(d)	Fig.9(e)	Fig.9(f)	Fig.9(g)	Fig.9(h)	Fig.9(i)
$v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	2000	3000	4000	1000	2000	3000	1000	2000	4000
$n$	20	20	40	20	20	30	20	20	40
$L / \mu\text{m}$	30	20	30	40	20	20	30	15	15

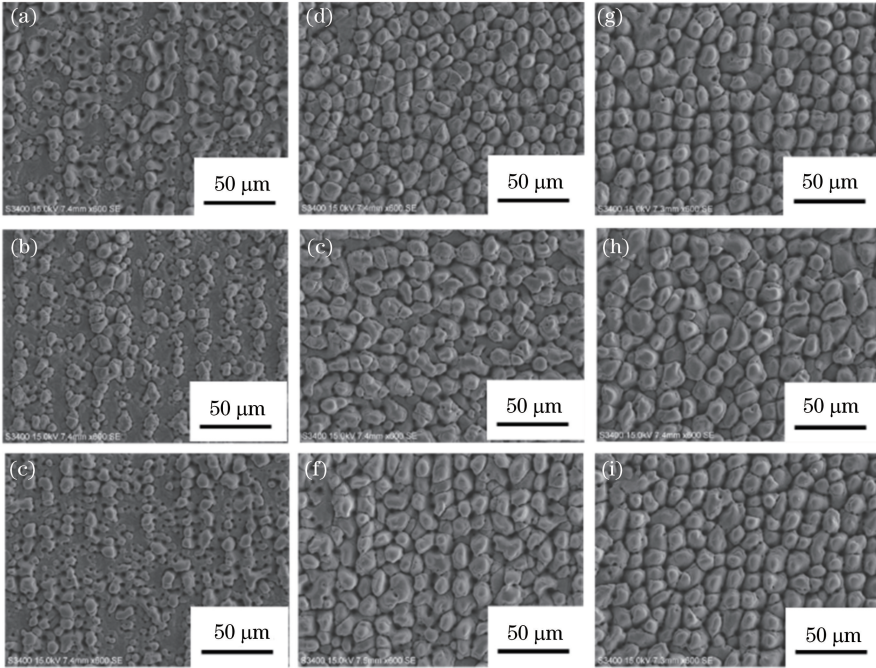


图 9 激光能量密度为  $1.13 \text{ J/cm}^2$ ,有效脉冲数分别为 1000、1500、2000 时,钛箔表面微结构的 SEM 图。

(a)~(c) 1000;(d)~(f) 1500;(g)~(i) 2000

Fig. 9 SEM images of microstructures on surface of Ti at different effective-pulse numbers

(1000, 1500, and 2000) when laser fluence is  $1.13 \text{ J/cm}^2$ . (a)-(c) 1000; (d)-(f) 1500; (g)-(i) 2000n

由表 5 可知,表面微结构随单位点有效脉冲数增加的变化趋势与扫描次数增加、扫描速度降低、扫描间距减小时的变化规律一致。当激光能量密度较低时,随着有效脉冲数增加,不均匀分布的驼峰结构逐渐汇聚,形成柱状阵列凸起结构;当激光能量密度较高时,表面逐渐演化为丘陵状结构。此外,当有效脉冲数  $N_m = 3000$ ,激光能量密度  $F = 1.13 \text{ J/cm}^2$  时,对应的表面微结构与  $N_m = 1000, F = 5.65 \text{ J/cm}^2$  和  $N_m = 600, F = 7.91 \text{ J/cm}^2$  条件下制备的表面微结构形貌类似,因此实际生产中可以使用高能量密度配合低脉

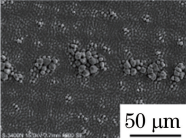
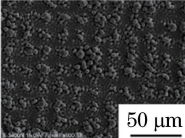
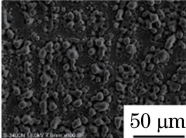
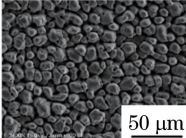
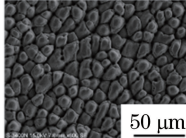
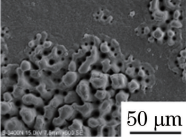
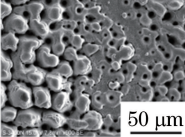
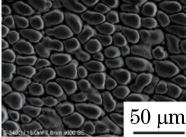
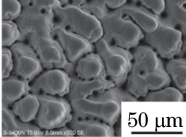
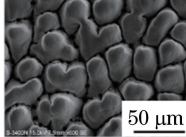
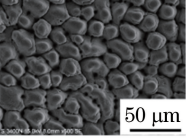
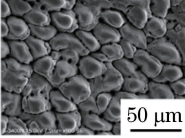
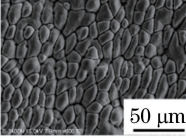
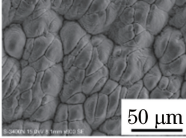
冲数的方法进行加工,提升加工效率。

## 4 结 论

采用高功率 515 nm 波长绿光飞秒激光在钛箔表面制备周期性微结构,钛的烧蚀阈值较红外激光明显降低。通过改变激光能量密度和有效脉冲数可以调控钛箔表面的微观形貌,高能量密度、低有效脉冲数与低能量密度、高有效脉冲数下的加工结构类似,使用高能量密度、低有效脉冲数可以显著提高微结构的制备效率。

表 5 不同激光能量密度、单位点有效脉冲数激光诱导后,钛箔表面微结构的 SEM 形貌

Table 5 SEM images of microstructures on surface of Ti at different laser fluences and effective-pulse numbers

Laser fluence/(J·cm <sup>-2</sup> )	Pulse number of 600	Pulse number of 857	Pulse number of 1000	Pulse number of 1500	Pulse number of 3000
1.13					
5.65					
7.91					cut

参 考 文 献

[1] Shank C V, Ippen E P. Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked CW dye laser[J]. Applied Physics Letters, 1974, 24(8): 373-375.

[2] Zhang F T, Nie Z G, Qiu J R. Realization of optical modulation in germanium oxide glass by femtosecond laser direct writing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202006.  
张芳腾, 聂兆刚, 邱建荣. 飞秒激光直写实现氧化锗玻璃内部光调制[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202006.

[3] Zhang J Z, Chen F, Yong J L, *et al.* Research progress on bioinspired superhydrophobic surface induced by femtosecond laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110001.  
张径舟, 陈烽, 雍佳乐, 等. 飞秒激光诱导仿生超疏水材料表面的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110001.

[4] Bonse J, Höhm S, Koter R, *et al.* Tribological performance of sub-100-nm femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium[J]. Applied Surface Science, 2016, 374: 190-196.

[5] Cunha A, Elie A M, Plawinski L, *et al.* Femtosecond laser surface texturing of titanium as a method to reduce the adhesion of staphylococcus aureus and biofilm formation[J]. Applied Surface Science, 2016, 360(B): 485-493.

[6] Huang J H, Liang G W, Li J, *et al.* Femtosecond laser processing of polycrystalline diamond microstructure array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302007.  
黄建衡, 梁国文, 李冀, 等. 飞秒激光制备多晶金刚石微结构阵列[J]. 中国激光, 2017, 44(3):

0302007.

[7] Xing S L, Liu L, Zou G S, *et al.* Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0403001.  
邢松龄, 刘磊, 邹贵生, 等. 飞秒激光参数对石英玻璃微孔加工的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0403001.

[8] Zhou H B, Li C, Zhou Z K, *et al.* Femtosecond laser-induced periodic surface microstructure on dental zirconia ceramic[J]. Materials Letters, 2018, 229: 74-77.

[9] Shen M Y, Crouch C H, Carey J E, *et al.* Formation of regular arrays of silicon microspikes by femtosecond laser irradiation through a mask[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(11): 1715-1717.

[10] Miyagawa R, Ohno Y, Deura M, *et al.* Characterization of femtosecond-laser-induced periodic structures on SiC substrates[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(2): 025602.

[11] Lee B E J, Exir H, Weck A, *et al.* Characterization and evaluation of femtosecond laser-induced sub-micron periodic structures generated on titanium to improve osseointegration of implants[J]. Applied Surface Science, 2018, 441: 1034-1042.

[12] Zhan Z B, Li Z H, Yu Z, *et al.* Superhydrophobic Al surfaces with properties of anticorrosion and reparability[J]. ACS Omega, 2018, 3(12): 17425-17429.

[13] Bonse J, Kirner S, Griepentrog M, *et al.* Femtosecond laser texturing of surfaces for tribological applications[J]. Materials, 2018, 11(5): E801.

[14] Liedl G, Pospichal R, Murzin S P. Features of



- changes in the nanostructure and colorizing of copper during scanning with a femtosecond laser beam [J]. *Computer Optics*, 2017, 41(4): 504-509.
- [15] Moradi S, Kamal S, Hatzikiriakos S G. Superhydrophobic laser ablated stainless steel substrates exhibiting [J]. *Surface Innovations*, 2015, 3(3): 151-163.
- [16] 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.
- [17] Vorobyev A Y, Topkov A N, Gurin O V, *et al.* Enhanced absorption of metals over ultrabroad electromagnetic spectrum [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(12): 121106.
- [18] Wu S Z, Li C Z, Jiao Y L, *et al.* Multifunctional oil-water and immiscible organic liquid separation by micropore arrayed Ti foil [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 221-226.
- [19] Nolte S, Momma C, Jacobs H, *et al.* Ablation of metals by ultrashort laser pulses [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1997, 14(10): 2716-2722.
- [20] Povarnitsyn M E, Itina T E, Sentis M, *et al.* Material decomposition mechanisms in femtosecond laser interactions with metals [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(23): 235414.
- [21] Christensen B H, Balling P. Modeling ultrashort-pulse laser ablation of dielectric materials [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(15): 155424.
- [22] Liang J C, Liu W D, Li Y, *et al.* A model to predict the ablation width and calculate the ablation threshold of femtosecond laser [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 456: 482-486.
- [23] Mannion P, Magee J, Coyne E, *et al.* Ablation thresholds in ultrafast laser micromachining of common metals in air [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4876: 470-478.
- [24] Mannion P T, Magee J, Coyne E, *et al.* The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micromachining of common metals in air [J]. *Applied Surface Science*, 2004, 233: 275-287.
- [25] Nathala C S R, Ajami A, Ionin A A, *et al.* Experimental study of fs-laser induced sub-100-nm periodic surface structures on titanium [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5915-5929.
- [26] Kuladeep R, Dar M H, Deepak K L N, *et al.* Ultrafast laser induced periodic sub-wavelength aluminum surface structures and nanoparticles in air and liquids [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(11): 113107.
- [27] Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(11): 3688-3689.
- [28] Zhang W, Cheng G H, Feng Q. Unclassical ripple patterns in single-crystal silicon produced by femtosecond laser irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 263(24): 436-439.
- [29] Zhou S Q, Ma G J, Wang C H, *et al.* Rule of morphology variation of Ti alloy surface induced by femtosecond lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0902003.
- 周树清, 马国佳, 王春华, 等. 飞秒激光诱导钛合金表面形貌变化的规律 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0902003.