

激光与光电子学进展

基于高速转镜的医用钛合金微孔阵列模板制造

刘士鹏*, 李峰西, 邢振宏, 崔炳军, 代书义

济南森峰激光科技股份有限公司, 山东 济南 250011

摘要 传统的激光打孔方式效率低、速度慢,而应用激光高速转镜制备医用钛合金微孔模板可以在百秒内制备上万个微孔结构。为此,对高速转镜制备医用钛合金微孔模板进行了研究,探究了激光参数、转镜扫描速度对打孔孔径、深度、锥度、孔形貌的影响,当高重复频率激光功率达到 500 W 时,钻孔直径可达 100 μm ,深度为 156 μm ,锥度趋于 0。高转镜扫描速度最大可达 1000 m/s,加工前确定孔距、行距等相关参数,加工效率可达万孔每秒。另外,为增大加工孔径,提出一种优化加工工艺技术,对常规转镜旋转扫描时需要进行校正的转镜扫描位置偏差进行利用。此方法可使最终孔直径达到 150 μm ,对生物涂层材料及药物沉积钛合金微孔模板更有益处。

关键词 激光光学; 高速转镜; 激光打孔; 医用钛合金; 微孔阵列; 骨板

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714002

Fabrication of Medical Titanium Alloy Microhole Array Substrates Based on High-Speed Polygon Mirror

Liu Shipeng*, Li Fengxi, Xing Zhenhong, Cui Bingjun, Dai Shuyi

Jinan Senfeng Laser Technology Co., Ltd., Jinan 250011, Shandong, China

Abstract The traditional laser drilling method is inefficient and slow. Preparation of medical titanium alloy microhole substrate by laser high-speed polygon mirror can prepare tens of thousands of microhole structures within 100 s. We primarily focused on the preparation of medical titanium alloy microhole substrates using a high-speed polygon mirror. The effects of laser parameters and the polygon mirror's scanning speed on the drilling aperture, depth, taper, and hole morphology were investigated. The high-repetition-rate laser with a power of 500 W yields a hole diameter of 100 μm , depth of 156 μm , and zero taper. The maximum scanning speed of the high-speed polygon mirror reaches 1000 m/s. Before processing, hole spacing, row spacing, and other related parameters were determined. A processing efficiency of 10000 holes per second is achieved. In addition, to increase the machining aperture, an optimized machining technology was proposed to correct the scanning position deviation of the polygon mirror during the scanning process. A final hole diameter of 150 μm can be achieved using this method. In addition, this method is beneficial to biomaterial coatings and deposit drugs on the titanium alloy microhole substrates.

Key words laser optics; high-speed polygon mirror; laser drilling; medical titanium alloy; microhole array; bone plate

1 引言

在医学医疗领域,金属生物材料对人体某些破损的生物硬组织比如关节、头盖骨、牙齿的制备及修复发挥着重要的作用,同时也积极应用于创伤骨组织的愈合,比如骨板、人工骨骼、骨髓内钉等^[1]。其中钛及钛合金是应用最广泛的生物医疗金属材料,具有更轻的质量、更好的机械性能、更接近自然骨的弹性模量,无

疑是生物硬组织首选的硬组织替代材料。但是 $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ (钛合金) 也有其难以避免的缺点。因为界面的结合强度不高及热膨胀系数不匹配,生物相容性欠佳,无法与宿主骨细胞在短时间内形成化学键加速结合,同时其金属基体光滑的表面也不易吸附羟基磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2, \text{HA}]$ 生物涂层或聚维酮,所以对钛合金表面处理变得尤为重要,材料表面处理的方法可以分为喷砂、磨削、酸碱蚀、激光处理。相比于其

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-16; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 山东省泰山产业领军人才项目

通信作者: *lsp15650078976@163.com

他方法存在污染、效率低、可控性差等问题,近年来激光处理钛合金表面已成为研究的热点,尤其是利用激光在钛合金表面制造大量密集微孔、微坑来有效增大材料表面粗糙度,再利用电泳沉积、阳极氧化法等技术将羟基磷灰石生物涂层覆盖在材料表面,或填入坑内,使激光加工后的微孔模板与生物涂层大面积结合且孔内的药物更利于储存^[2-3]。

近年来,激光加工微孔的技术朝着高效率、高速度的方向发展,尤其是激光高速微孔阵列加工离不开高频脉冲激光器和高速扫描装置,随着激光微加工技术的发展,转镜技术逐渐成为高速激光微加工的代名词,相比于传统的振镜扫描仪,转镜的扫描速度可以高达 1000 m/s,是振镜扫描速度的几十倍甚至上百倍,同时超光滑的转镜表面和独特的结构设计确保了转镜加工过程中的重复定位精度,现场可编程逻辑门阵列(FPGA)同时控制转镜扫描的位置信息和激光脉冲频率相位,使得激光脉冲频率和扫描位置实现同步,完美地完成单次加工单点单脉冲灼烧。在高速加工的同时确保光斑的重复性,这对高质量加工来讲有着至关重要的影响。另外,在激光高速加工薄材料的过程中,在激光作用下受热影响材料很容易出现变形,导致无法使用。在高速转镜激光同步加工的过程中,单次扫描每一个加工位置只有一个激光脉冲注入,激光脉冲注入量受扫描次数的影响,有效减小了高频激光连续注入引起的粒子屏蔽效应及过大热影响区域^[4-7]。

2 试验装置

试验加工系统装置如图 1(a)所示,包括基于 FPGA 芯片的控制系统、高频脉冲激光发生装置、光束扩束整形系统、透镜反射镜系统、高速转镜扫描系统、 $f-\theta$ 聚焦透镜组、激光加工平台及加工靶材。其中, FPGA 控制系统对激光器调制系统、扫描装置和外部加工平台进行并行控制,实现激光器及转镜同步扫描过程,所用的激光发生装置是功率 500 W、重复频率 500 kHz 的光纤激

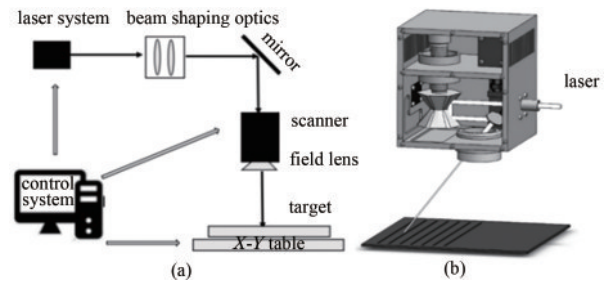


图 1 试验装置图。(a) 试验加工系统;(b) 高速转镜扫描装置
Fig. 1 Test setup diagram. (a) Experimental processing system; (b) high-speed polygon mirror scanning device

光器 (IPG YPLN-1-30×240-500-R), 输出波长为 1064 nm。高速转镜扫描系统装置如图 1(b)所示,主要包括 16 面八边形双锥棱镜、振镜、电机、检测器、 $f-\theta$ 聚焦透镜组等。其中得益于 16 面八边形双锥棱镜的独特设计,面型光滑,确保了激光 0° 入射无反光,减小了扫描场失真,激光加工重复定位精度能够达到 $\pm 5 \mu\text{m}$,配合 FPGA 同步扫描系统完美地完成单次加工单点单脉冲灼烧,加工孔位激光脉冲注入量受扫描次数影响,整个加工模板各孔位能量均匀,在高速加工的同时确保光斑的重复性,这对高质量加工来讲有着至关重要的作用。表 1 和 2 详细说明了激光器及扫描装置的参数。加工靶材为厚度 0.1~0.3 mm 钛合金,先将材料用丙酮及去离子水进行试验前清洗或超声清洗,表面打磨抛光处理。试验后的样品孔形貌、孔径、锥度等参数通过光学显微镜和扫描电镜进行测试和分析。

表 1 激光器的具体参数
Table 1 Specific parameters of laser

Maximum input power /W	Laser pulse frequency /MHz	Laser pulse width /ns	Single pulse energy /mJ
500	0.500	120	1.00
500	0.500	240	1.00
500	1.000	60	0.50
500	2.000	30	0.25

表 2 扫描装置具体参数
Table 2 Specific parameters of scanning device

Maximum scanning speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$f-\theta$ lens focal length /mm	Scanning range /($\text{mm}\times\text{mm}$)	Repeatability / μm	Focus spot / μm
1000	420	300×300	± 5	35

3 试验过程

高速激光微加工设备主要是基于高速转镜扫描装置配合高频脉冲激光器在所加工基板材料上高速、高效率加工出密集微群孔,在 FPGA 控制系统下执行同步扫描,另外得益于转镜高速扫描以及独特转镜结构设计,可以确保高速微加工过程中的重复定位精度,保证光斑的重复性。单次加工每一个扫描位置只有一个激光脉冲注入,激光脉冲注入量受扫描次数影响。可

以有效避免高频脉冲连续注入引起的粒子屏蔽效应以及过多热效应引起的材料变形,群孔能量分布均匀,孔型一致且边缘良好。本节主要分析高速高效率加工微孔过程中孔径、孔锥度、孔深度随激光器参数及扫描参数的变化。

3.1 钛合金表面群孔随激光器参数的变化

激光打孔的过程是激光与材料的相互作用过程,主要分为材料的熔化、蒸发、气化成孔,同时利用气化的反冲击力将熔化物排出^[8-9]。用于加工的激光脉冲

多呈高斯分布,其脉冲能量密度公式为

$$E = \frac{P_{\text{average}}}{f}, \quad (1)$$

式中: E 为激光单脉冲能量; P_{average} 为平均输出功率; f 为脉冲重复频率。激光束能量密度(J/cm^2),表示为

$$\Phi_0 = \frac{2p}{f\pi\omega_0}, \quad (2)$$

式中: ω_0 为光束束腰半径^[10]。

图 2 展示了激光器在不同脉冲宽度 60 ns、120 ns、240 ns 的情况下,激光打孔的孔径随平均功率的变化关系。从图 2 可以看出,在激光脉冲宽度为 120 ns 时,其灼烧阈值功率明显最低。这是因为:在脉冲宽度为 60 ns 时,激光脉冲重复频率为 1 MHz,此时单脉冲能量仅有 0.5 mJ;而在脉冲宽度为 240 ns 时,虽然与脉宽 120 ns 同为 500 kHz 重复频率和 1 mJ 单脉冲能量,但是 120 ns 的脉冲激光峰值功率高于 240 ns;在激光脉冲宽度为 120 ns 时,材料灼烧阈值能量密度最低,此时功率 $P=63 \text{ W}$, 阈值能量密度为 $4.59 \text{ J}/\text{cm}^2$ 。在激光功率达到 500 W 时,激光灼烧孔直径达到 $100 \mu\text{m}$,图 3 展示了灼烧孔直径随激光功率升高的变化。激光脉冲灼烧直径随激光泵浦功率的增大而增大,但增大趋势会逐渐变缓。聚焦后的激光光束模式为基模,能量呈高斯分布,且受激光脉冲宽度的影响脉冲能量不一样。因此加工过程中,越靠近光轴功率密度越大,这是因为靠近光轴部分气化蒸发量大,而远离光轴区域熔化重铸量大。当脉冲能量和功率密度达到一定程度时,材料产生的蒸气压力越大,带走的物质越多,孔径就越大,但是激光聚焦光斑孔径是一定的,因此其增大趋势会逐渐变缓。

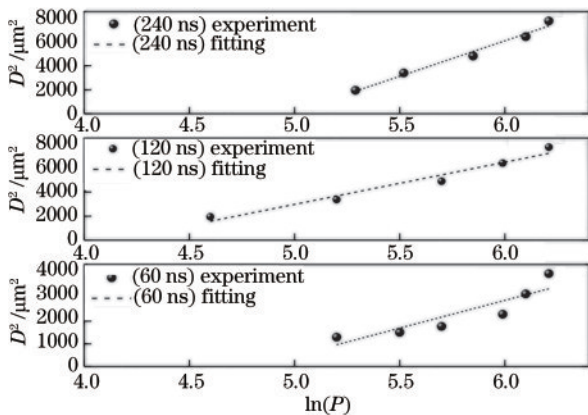


图 2 灼烧孔径随功率对数的变化关系

Fig. 2 Relationship between burning aperture and logarithm of power

图 4 展示了激光灼烧厚度为 0.1 mm 的钛合金孔径、孔深度、孔锥度随激光入射功率的变化曲线。从图 4 可以看出:当激光功率达到 275 W 时,薄材料被打透,随激光功率升高,孔径和孔深度变大,孔锥度减少;当激光功率达到 500 W 时,激光灼烧孔半径为 $50 \mu\text{m}$,

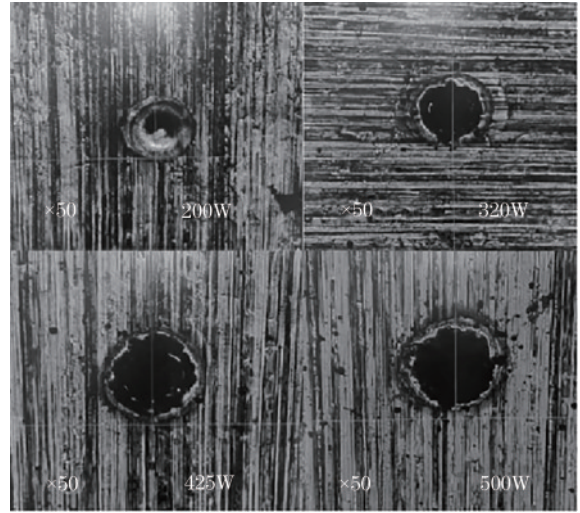


图 3 灼烧孔径随激光功率升高的变化

Fig. 3 Variation of burning aperture with increasing laser power

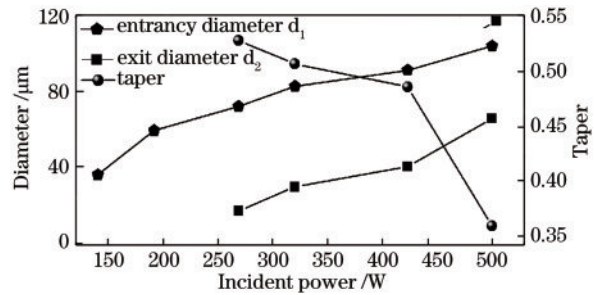


图 4 0.1 mm 钛合金入口孔径、出口孔径、孔锥度随激光入射功率的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of hole inlet diameter, outlet diameter, and hole taper of 0.1 mm titanium alloy with laser incident power

灼烧深度为 $156 \mu\text{m}$,孔锥度接近 0,形成直通孔。图 5 为激光灼烧厚度 1 mm 的钛合金,截面观察激光打孔深度及形貌随功率升高的变化^[11]。

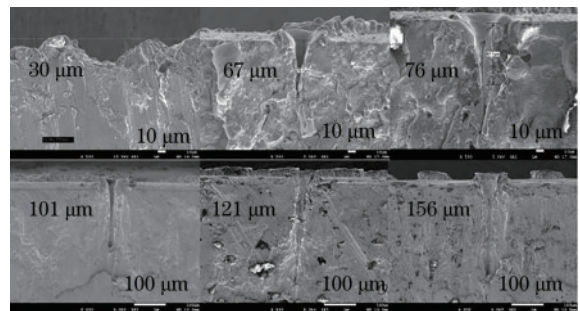


图 5 激光打孔深度及形貌随功率升高的变化

Fig. 5 Variation of laser drilling depth and morphology with increasing laser power

3.2 高速转镜激光加工钛合金表面微群孔

高速转镜激光微群孔加工方式与激光环切打孔或振镜方式打孔,在本质上是根本区别的。传统的打孔方式是一个孔一个孔地进行加工,当激光停留在某

一个位置时,对该位置进行激光钻孔工作,当加工完成后,根据振镜的偏转及编程系统的控制,对下一个位置进行加工,这样的过程耗时长、效率低,加工上万个孔需要几十分钟以上^[12-13]。而高速转镜激光微孔加工在扫描频率与激光脉冲重复频率同步工作的情况下对整个加工幅面进行整体扫描,单次扫描每一个扫描位置只有激光单脉冲注入,扫描整体次数决定了激光脉冲注入量,能够实现激光多脉冲钻孔,基于转镜高速扫描特性,转镜的扫描速度最大可达 1000 m/s,整个加工过程中高速高效钻孔效率可达万孔每秒。

图 6 为高速转镜激光加工厚度为 0.3 mm 的钛合金密集微群孔模板,其中孔间距、行间距、行错位间距都可以进行编程控制。孔间距主要受到转镜扫描速度和激光脉冲重复频率的影响,其关系式为

$$P_d = \frac{V_s}{f}, \quad (3)$$

式中: P_d 为孔间距; V_s 为转镜扫描速度。

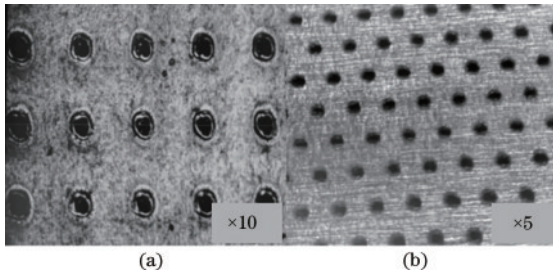


图 6 高速转镜激光加工 0.3 mm 钛合金微群孔模板。
(a) 微孔阵列;(b) 微孔错位排列

Fig. 6 High-speed polygon mirror laser processing 0.3 mm titanium alloy micro group holes substrate. (a) Microhole arrays arrangement; (b) microhole arrays dislocation arrangement

图 7 展示了高速转镜在厚度 0.3 mm 的钛合金板材上进行激光加工微群孔的孔形貌随扫描速度的变

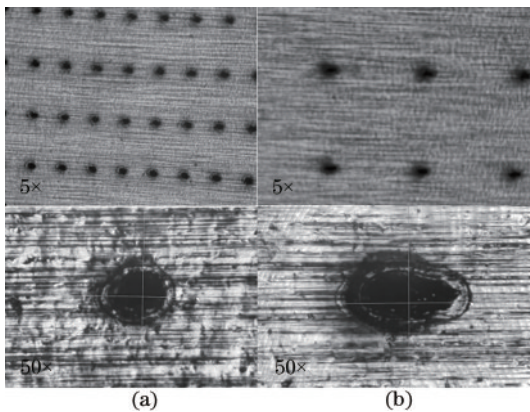


图 7 孔形貌随扫描速度的变化。(a) 扫描速度为 160 m/s;
(b) 扫描速度为 500 m/s

Fig. 7 Variation of hole morphology with scanning speed.
(a) Scanning speed is 160 m/s; (b) scanning speed is 500 m/s

化,扫描尺寸为 40 mm×40 mm。图 7(a)为转镜扫描速度 160 m/s,图 7(b)为转镜扫描速度 500 m/s,可以看出,图 7(b)中孔形貌呈扁椭圆,这是因为随扫描速度增大,激光在一个位置的加工会以越来越快的速度进行偏转,在超高速扫描的情况下,难以避免地会呈现扁椭圆孔形貌。表 3 详细列出转镜激光高速加工微群孔效率。这里扫描尺寸设置为 100 mm×100 mm,扫描次数设置为 40 次,扫描孔距受扫描次数和激光脉冲频率的影响,那么表面孔个数也会相应变化,即随扫描速度的增大,加工时长会逐渐减少,可以明显看出,激光加工微群孔作业可以控制在百秒内完成,加工速度得到了极大提高。

表 3 高速转镜激光高速加工微群孔效率
Table 3 Efficiency of micro group holes processed by the high-speed polygon mirror

Scanning speed / ($m \cdot s^{-1}$)	Scanning range / ($mm \times mm$)	Hole spacing / mm	Number of scans	Punch time / s
100	100×100	0.2	40	51
160	100×100	0.32	40	4
250	100×100	0.5	40	20
500	100×100	1.0	40	10
800	100×100	1.6	40	5

3.3 优化加工工艺研究

图 8 为高速转镜制备医用钛合金微孔模板后,将聚维酮通过涂覆干燥及阳极氧化法覆盖在材料表面及孔内部的样板。从图 8 可以看出,经处理后的微群孔表面,药粉颗粒能均匀地填充在所有微孔内。微孔存在时,整个基体包括口内壁都具有导电性,颗粒会优先沿着微孔内壁圆周轮廓开始沉积,逐渐一层层把孔中心填满。当孔内沉积完成后,继续沉积在材料整体表面,从图 8 可以看出,材料表面有裂痕存在,这是聚维酮药物干裂的表现。从局部区域的放大图可以看出聚维酮药物的填充效果,由于孔内存在气压,药物

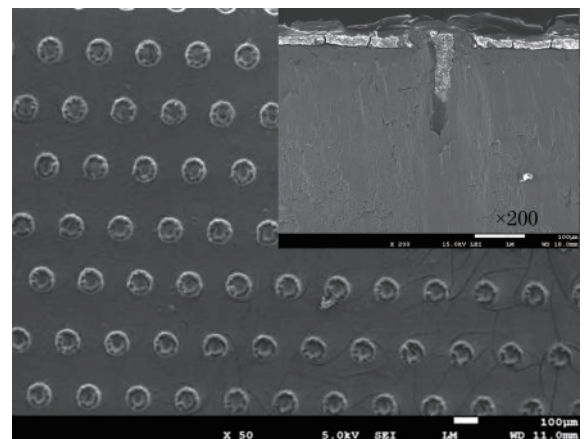


图 8 聚维酮覆盖填充后的医用钛合金微孔模板
Fig. 8 Medical titanium alloy microhole substrate covered and filled with povidone

并没有完全填满,表面接触角可达 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,如果配合加压负载,效果可能会更明显。

由此可以看出,激光微孔直径越大,药物储存量也越大,针对不同的应用模式对孔径的需求也会增大。但此设备满功率运行时,加工微孔直径最大为 $100\ \mu\text{m}$,孔径大小与激光脉冲能量有直接关系。高速转镜设备匹配的激光器都应为高重复频率脉冲激光器,但在市场上,高重复频率大脉冲能量的激光器技术受限且价格昂贵,经济效益低。

本文提出一种应用高速转镜激光加工微群孔增大孔径的方法,对常规激光打孔中转镜旋转扫描时需要进行校正的转镜扫描位置偏差进行利用,将其变为一个固定的值,使得转镜下一个工作面的扫描位置较上一个工作面的扫描位置在转镜扫描方向发生向左、向右位移,以实现转镜扫描方向的光斑交叠。同时利用振镜偏转方向的位移,使转镜下一个工作面的扫描位置较上一个工作面的扫描位置在振镜偏转方向发生向上、向下位移,从而将原有的一个圆形光斑变成一个梅花形光斑,不仅可以有效增大激光打孔直径,而且突破了高速转镜设备由于高重复频率脉冲激光对于加工孔径的限制。如图 9 所示,具体地:以转镜上第一个工作面所得的扫描位置为原点,此时靶材上所得的扫描位置为 $d_y=0\ \mu\text{m}, d_x=0\ \mu\text{m}$ (其中 d_y 为光斑沿转镜扫描方向的转镜扫描偏差, d_x 为光斑沿振镜偏转方向的振镜偏转偏差);而转镜上第二个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=-100\ \mu\text{m}, d_x=0\ \mu\text{m}$;转镜上第三个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=100\ \mu\text{m}, d_x=0\ \mu\text{m}$;转镜上第四个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=-50\ \mu\text{m}, d_x=50\ \mu\text{m}$;转镜上第五个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=50\ \mu\text{m},$

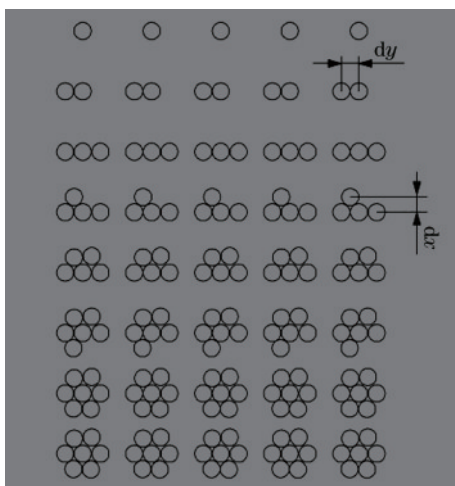


图 9 梅花形光斑构造

Fig. 9 Quincunx spot structure

$d_x=50\ \mu\text{m}$;转镜上第六个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=-50\ \mu\text{m}, d_x=-50\ \mu\text{m}$;转镜上第七个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=50\ \mu\text{m}, d_x=-50\ \mu\text{m}$;转镜上第八个工作面在靶材上所得的扫描位置相较于第一个工作面,其位置为 $d_y=0\ \mu\text{m}, d_x=0\ \mu\text{m}$ 。其中,扫描位置在转镜扫描方向的偏差可以通过调整转镜上每个工作面与脉冲激光发生器打开、关闭时间之间的对应关系来改变,而在振镜偏转方向的偏差可以通过调整振镜的偏转来改变。因此整个基板上的群孔呈现“梅花形”光斑,从而有效增大了加工孔径,图 10 为本文方法和正常扫描钻孔后的孔径对比图,本文方法加工后的孔径达到 $150\ \mu\text{m}$,比原来增大 $50\ \mu\text{m}$ 。

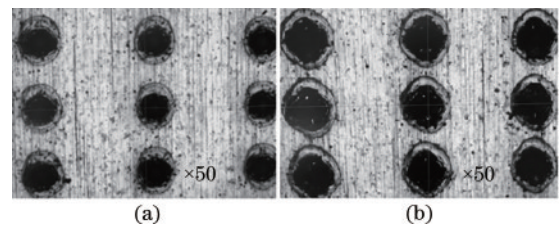


图 10 优化加工工艺前后的孔径对比。(a)优化前;(b)优化后
Fig. 10 Aperture comparison before and after process optimization.

(a) Before optimization; (b) after optimization

4 结 论

通常医用钛合金微孔模板表面需要上万个微孔结构,用来在微孔内部和微孔模板表面沉积吸附羟基磷灰石生物涂层或聚维碘酮等药物,传统的激光打孔方式处理此问题效率低、速度较慢,而利用高速转镜激光加工医用钛合金微孔模板可实现百秒内加工上万个微孔,转镜最大扫描速度可达 $1000\ \text{m/s}$ 。本文研究了高速转镜加工钛合金微孔模板过程中,激光参数及转镜转镜参数对激光钻孔孔形貌、孔径、孔锥度、深度的影响。在适宜激光脉冲宽度灼烧下,材料的熔化量和蒸发量可以达到最优的比例,打孔直径、深度随功率增大而增大,孔锥度随功率增大而减小。当激光功率达到最大 $500\ \text{W}$ 时,打孔直径达 $100\ \mu\text{m}$,孔深度为 $156\ \mu\text{m}$,孔锥度趋于 0。当转镜扫描速度超过 $500\ \text{m/s}$ 时,微孔模板上群孔的孔形貌随转镜扫描速度的增大而呈现扁椭圆形状。另外,为了在微孔模板上填充吸附更多的生物材料或药物,需要增大群孔直径,由于孔距与功率有直接关系,现阶段高重复频率大能量激光器技术受限,且价格昂贵。本文提出一种优化转镜激光加工工艺,对常规激光打孔中转镜旋转扫描时需要进行校正的转镜扫描位置偏差进行利用,将其变为一个固定的值,使得转镜下一个工作面的扫描位置较上一个工作面在转镜扫描方向发生向左、向右位移,以实现转镜扫描方向的光斑交叠,同时利用振镜偏转方向的位移,

使转镜下一个工作面的扫描位置较上一个工作面在振镜偏转方向发生向上、向下位移,从而使原有的圆形光斑变成梅花形光斑,有效增大了激光打孔直径,且突破了高速转镜设备受高重复频率脉冲激光对于加工孔径的限制,此方法最终实现了群孔直径达 150 μm 。

参 考 文 献

- [1] 袁启明. 激光技术在医学领域的应用与发展[J]. 现代医学仪器与应用, 2007(5): 26-32.
Yuan Q M. Application and development of laser technology in medical field[J]. Modern Medical Equipment and Application, 2007(5): 26-32.
- [2] Ribeiro A A, Vaz L G, Guastaldi A C, et al. Adhesion strength characterization of PVDF/HA coating on cp Ti surface modified by laser beam irradiation[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(24): 10110-10114.
- [3] Mirhosseini N, Crouse P L, Schmidh M J J, et al. Laser surface micro-texturing of Ti-6Al-4V substrates for improved cell integration[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 7738-7743.
- [4] 齐立涛. 激光加工工艺技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
Qi L T. Research on laser processing technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.
- [5] 王蔚, 沈杰, 刘伟军, 等. 脉冲激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面氧化层的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802004.
Wang W, Shen J, Liu W J, et al. Effect of scanning speed of galvanometer on surface oxide layer of TA15 titanium alloy in pulsed laser cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802004.
- [6] Jandeleit J, Horn A, Weichenhain R, et al. Fundamental investigations of micromachining by nano- and picosecond laser radiation[J]. Applied Surface Science, 1998, 127/128/129: 885-891.
- [7] 吴常津. 转镜扫描的光学原理[J]. 真空电子技术, 1993(6): 24-34.
Wu C J. The optical principles of scanning mirrors[J]. Vacuum Electronics, 1993(6): 24-34.
- [8] 张恒. 纳秒激光诱导若干金属材料微结构及其应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.
Zhang H. Research on fabrication of microstructures on metals induced by nanosecond laser and its applications [D]. Suzhou: Soochow University, 2008.
- [9] 郭敏超, 王明娣, 张胜江, 等. FR-4 覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1202008.
Guo M C, Wang M D, Zhang S J, et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1202008.
- [10] 安连生, 李林, 李全臣. 应用光学[M]. 3 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
An L S, Li L, Li Q C. Applied optics[M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Insitute of Technology Press, 2002.
- [11] 谢洪波, 李勇, 姚丽娟, 等. 激光转镜扫描系统中自由曲面 $f-\theta$ 物镜的设计[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 742-746.
Xie H B, Li Y, Yao L J, et al. Design of free-form $f-\theta$ lens in polygonal mirror laser scanning system[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 742-746.
- [12] 张旭, 李子扬, 李伟, 等. 激光雷达转镜扫描直流电机精确调速控制研究[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 11-17.
Zhang X, Li Z Y, Li W, et al. Research on precise speed control of the DC motor of lidar rotating mirror scanning [J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 11-17.
- [13] 郝云波, 赵凯, 黄叶玲, 等. 激光熔化沉积 TC11 钛合金双重退火后的组织和力学性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202001.
Hao Y B, Zhao K, Huang Y L, et al. Microstructures and mechanical properties of doubled annealed laser melting deposited TC11 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202001.