

激光与光电子学进展

皮秒激光旋切制孔工艺研究

刘晓东^{1,2}, 陈亮^{1,2}, 王曦照^{1*}, 熊政军¹

¹中南民族大学激光与智能制造研究院, 湖北 武汉 430074;

²中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要 为探究金属材料微孔的高质量成型工艺,采用皮秒激光旋切加工的方式在金属材料表面上开展微孔成型的实验研究。通过控制旋转光学系统光路中楔形棱镜的偏转和反射镜的平移来实现对微孔形状(尺寸和锥度)的控制。以 1 mm 厚的 304 不锈钢为实验对象,主要研究了激光脉冲能量、离焦量、重复频率以及激光旋转速度等实验参数对微孔成型质量的影响。实验结果表明:激光脉冲能量是微孔成型质量的关键因素;离焦量在一定程度上能改变微孔的锥度;激光的重复频率和旋转速度决定微孔的热影响和重铸层厚度。当激光脉冲能量为 141 μJ 、重复频率为 66.67 kHz 时,取离焦量为 +0.1 mm、激光的旋转速度为 8000 r/min,制备出了孔径范围在 100~300 μm 之间、锥度均可控的高质量微孔。

关键词 激光加工; 皮秒激光; 旋切制孔; 不锈钢; 微孔

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0714005

Study on Technology of Picosecond Laser Making Micro-Hole with Helical Drilling

Liu Xiaodong^{1,2}, Chen Liang^{1,2}, Wang Xizhao^{1*}, Xiong Zhengjun¹

¹*Institute of Laser and Intelligent Manufacturing, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;*

²*College of Electronic and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract In order to explore the high-quality forming process of micro-holes, the picosecond laser combined with helical drilling technology was used to carry out the basic experiments of micro-hole forming. The shape (taper and size) of the micro-hole can be controlled by changing the deflection angle and translation of the wedge prism in the optical path of the rotating optical system. Taking 1-mm 304 stainless steel as an example, the influence of processing parameters such as laser pulse energy, defocusing amount, repetition frequency and laser helical drilling speed on the quality of micro-hole processing was studied. According to the experimental results, laser pulse energy is the key factor of micro-hole forming quality, defocusing amount can change the taper of the micro-hole to a certain extent, and the repetition frequency and rotation speed of the laser determine the thermal influence of the micro-hole and the thickness of the recasting layer. While laser pulse energy is 141 μJ , repetition frequency is 66.67 kHz, defocusing amount is +0.1 mm, and laser helical drilling speed is 8000 r/min, the high-quality micro-holes with pore diameters ranging from 100 to 300 μm and controllable tapers can be obtained.

Key words laser processing; picosecond laser; helical drilling; stainless steel; micro-hole

收稿日期: 2021-06-03; 修回日期: 2021-06-15; 录用日期: 2021-06-29

基金项目: 中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(CZZ19007, CZQ21029)、武汉光电国家研究中心开放基金(2021WNLOKF017)、浙江省自然科学基金(LQ20E050014)

通信作者: *wangxizhao@scuec.edu.cn

1 引言

微孔结构已经广泛应用于现代工业产品中,如燃油机的喷射喷嘴、航空航天发动机零部件的气膜冷却孔、喷墨打印机喷头上的微孔等^[1-3]。该类微孔往往具有尺寸小($<300\ \mu\text{m}$)、深径比大、加工质量要求高等特点。传统的机械钻孔、电火花制孔和电子束制孔等加工方式难以胜任微孔的高精度、高效率加工需求^[4-5]。激光制孔技术是以高功率密度激光束照射被加工材料,使材料被迅速加热至汽化温度,蒸发形成孔洞,具有加工效率高、获得深径比较大、材料适应性强等优点^[3]。激光制孔正逐步成为微孔加工新工艺的生长点。

目前,激光制孔主要有单脉冲制孔、多脉冲制孔、环切制孔和旋切制孔等方式^[6-8]。其中,单脉冲制孔是利用单个脉冲激光来完成对材料的去除,所得到的微孔深度浅、圆整度低、重铸层厚;多脉冲制孔是采用多个激光脉冲作用于材料同一点,因此能够加工较深的微孔,但微孔入口处重熔堆积明显、热影响大;环切制孔是利用激光束与材料之间的相对旋转运动来实现对微孔的加工,旋转运动能够保证加工微孔的圆整度,但加工出来的微孔通常呈正锥形。旋切制孔是通过旋转光学元件的运动来实现激光束旋转运动,与环切制孔不同的是,聚焦光束在做圆周运动的同时,还在做自旋运动,因此该加工方式能有效地避免聚焦激光束的能量分布不均匀和非圆形光斑(如椭圆光斑)造成的微孔圆度缺陷的问题^[9]。

旋切制孔是当前微孔加工的研究热点。德国斯图加特大学的学者^[10]设计了由 4 个光学楔形棱镜

组成的旋转光学系统,实现激光束绕着圆心做旋转运动,并证实了这种加工方式能在极大程度上减少微孔入口的重铸层厚度,采用纳秒激光旋切制孔的加工方式其加工质量甚至优于飞秒冲击制孔方式。Fornaroli 等^[11]使用纳秒旋切钻孔的方式,在 1 mm 厚的不锈钢上得到了孔径、锥度均可控的微孔,但是加工过程中热影响较大,需要使用质量分数为 10% 的盐酸对样品进行清洗。将超快激光与旋切加工方式结合能够获得热影响区更小、加工质量更高的微孔。Kleinbauer 等^[12]采用旋切钻孔方式加工,在 0.1 mm 厚不锈钢上使用皮秒激光制备出 $100\ \mu\text{m}$ 的微孔。何超等^[9, 13-14]使用皮秒激光旋切制孔得到了不同孔型(T 字形、Y 字形)的微孔。孙树峰等^[3]使用皮秒激光结合旋切加工的方式在 0.2 mm 厚的 SUS 304 不锈钢上得到了孔径为 $200\ \mu\text{m}$ 的热影响区小、边缘质量好的小锥度微孔。

为获得尺寸和孔型可控、质量高的微孔,本文以 304 不锈钢作为实验对象,采用皮秒脉冲激光结合旋切光学系统的加工方式,探究了旋转光学系统对微孔的孔径和锥度的调控机制,系统地研究了激光脉冲能量、离焦量、重复频率和激光旋转速度对微孔形貌质量(热影响、锥度、重铸层厚度、微孔内壁规整度)的影响规律。通过合理地优化工艺,实现了对不同孔径、不同锥度微孔的精细加工,可为燃油机的喷嘴、涡轮机叶片的气膜孔、光纤导嘴等微孔的制作提供参考。

2 实验设备及方案

所使用的皮秒激光旋切加工平台结构如图 1 所

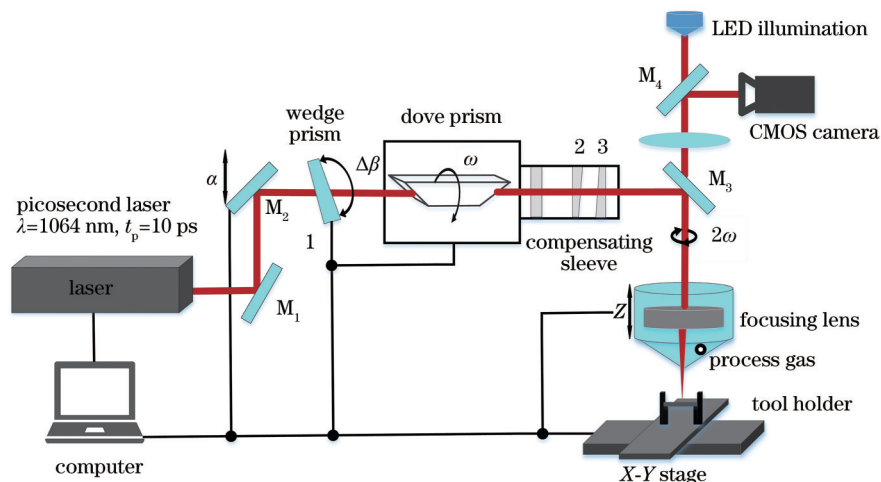


图 1 皮秒激光旋切加工装置图

Fig. 1 Picosecond laser processing experimental machine

示,主要由激光器、旋转光学系统和控制系统等部分组成。激光器为德国相干公司生产的 Hyper Rapid 型皮秒激光器,其基本性能参数如表 1 所示。旋转光学系统由楔形棱镜 1、道威棱镜和补偿镜片组成。旋转光学系统带动激光束绕光轴做高速旋转运动,激光束经过聚焦透镜(焦距为 60 mm)聚集于材料表面,即可实现对材料表面的微孔加工。加工系统中的 X-Y 二维运动平台能够将待加工材料移动至指定加工位置。与 Z 轴同轴安装的高分辨率 CMOS 相机用于查找激光焦点位置和观察激光制孔过程。为了便于及时排除加工过程中的熔融、飞溅物,整个加工过程辅以同轴吹气。

加工微孔的尺寸和孔形主要通过旋切光学系

表 1 激光器的基本性能参数

Table 1 Basic performance parameters of laser

Laser parameter	Value
Wavelength /nm	1064
Pulse duration /ps	10
Average power /W	0~50
Pulse energy / μ J	0~200
Repetitive rate /kHz	10~1000
Beam quality parameter M^2	≤ 1.2

统来进行调控。其中,控制楔形棱镜 1 的偏转角度能够改变加工孔径的大小。如图 2 所示,当激光束经过楔形棱镜 1 时,传播方向将发生 $\Delta\varphi$ 角度的改变,从而导致激光束经过聚焦透镜后发生 R 距离大小的位置偏移。

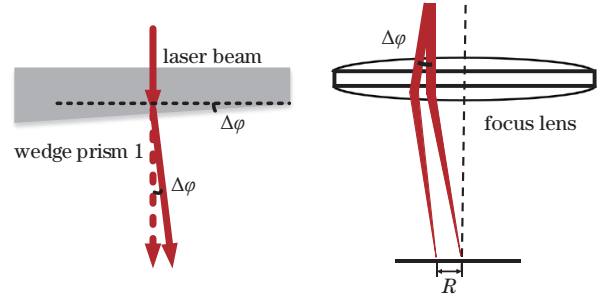


图 2 楔形棱镜 1 的偏转对孔径的影响

Fig. 2 Effect of deflection of wedge prism 1 on diameter

微孔的锥度主要通过平移反射镜 M_2 的位置来进行控制,如图 3 所示,当旋转光束与聚焦透镜中心的距离为 L 时,即可在材料表面加工出倒锥孔、直孔、正锥孔。图 3 中, D_1 和 D_2 分别为微孔的入孔直径和出孔直径, θ 为激光束与中心轴的夹角, f 为聚焦透镜的焦距。

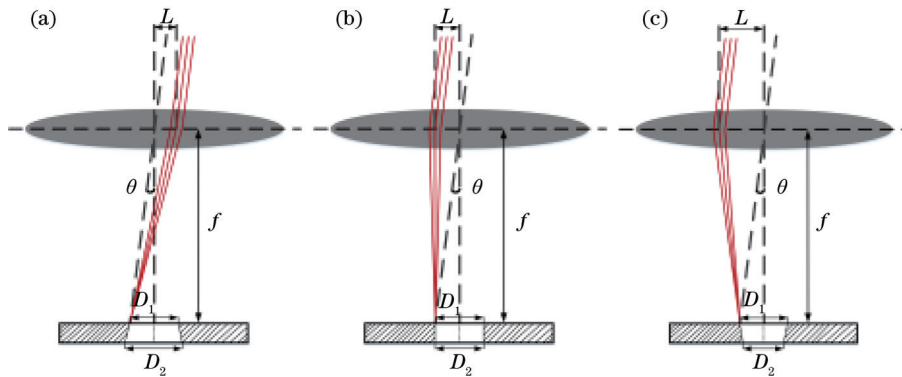


图 3 三种微孔模型。(a)倒锥孔;(b)直孔;(c)正锥孔

Fig. 3 Three micro-hole models. (a) Negative conical; (b) cylindrical drilling; (c) positive conical

实验选用样品材料为厚度为 1 mm 的 304 不锈钢(06Cr19Ni10)板,主要物理性能参数有:硬度(≤ 201 HBW; ≤ 92 HRB; ≤ 210 HV)、密度(20°C , 7.93 g/cm^3)、熔点($1398\sim 1454^\circ\text{C}$)。整个实验过程在室温中进行,旋切加工系统的技术参数如表 2 所示。实验后,用体积分数为 75% 的酒精对微孔出、入口进行超声清洗,然后使用金相磨抛机对微孔进行打磨处理,最后利用激光共聚焦显微镜(基恩士 VK-X250)和超景深显微镜(基恩士 VHX-6000)分

别观察和测量微孔出、入口孔径的大小、圆整度、热影响、重铸层厚度以及微孔剖面形貌等。

表 2 旋切加工系统的技术参数

Table 2 Processing parameters of helical drilling system

Processing parameter	Value
Wedge prism angle /($^\circ$)	-25~25
Deflection mirror position /mm	-5~5
Helical speed /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	0~5000
Defocus amount /mm	-0.5~0.5
Process gas /MPa	2.5

3 实验结果讨论

3.1 激光参数对微孔成型的影响

3.1.1 激光脉冲能量对微孔成型的影响

旋转光学的光路系统决定微孔的基本形状,图4为楔形棱镜1处于初始位置,离焦量 $\Delta f=0$,反射镜 M_2 平移量为 -1 mm ,激光重复频率为 66.67 kHz 、旋转速度为 4000 r/min 时,加工微孔的出、入口孔径随激光脉冲能量的变化关系。显然,在该设定光路系统下,所加工微孔为入口直径大于出口直径的正锥孔。随着激光脉冲能量的增大,微孔的出、入口尺寸均呈现出增大趋势。此时,当脉冲能量小于 $33\text{ }\mu\text{J}$ 时,材料表面上只留下聚焦激光做圆周运动的烧蚀痕迹,未能在不锈钢板表面形成微通孔;随着激光脉冲能量的增加,材料的烧蚀越来越剧烈,材料被逐步烧穿,出口孔径尺寸迅速增大;当激光脉冲能量增大至 $78\text{ }\mu\text{J}$ 时,入口尺寸趋于稳定而当激光脉冲能量大于 $123\text{ }\mu\text{J}$ 时,出口的孔径趋于稳定。

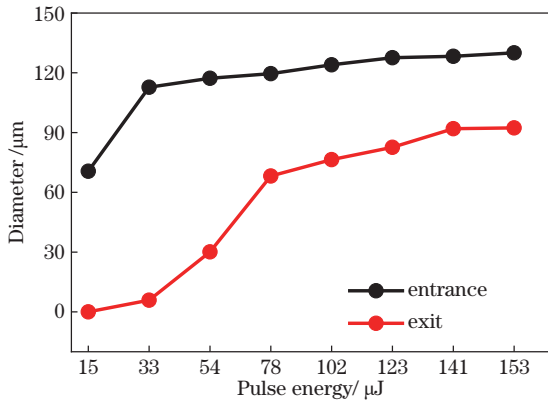


图4 出、入口孔径与脉冲能量的关系

Fig. 4 Relationship between pulse energy and diameters of entrance and exit

单脉冲激光有效烧蚀作用光斑的直径 D_a 与激光光束的峰值能量密度 φ_0 的关系可以表示为^[15-16]

$$D_a^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right), \quad (1)$$

式中: ω_0 为激光光束的束腰半径; φ_{th} 是材料的损伤阈值。如图5(a)所示(图中 r 为测量点到光斑中心的距离, φ 为激光脉冲峰值能量密度),当加工材料一定时,激光的脉冲能量密度越大,光斑烧蚀作用就越大。微孔成型的旋切加工路径如图5(b)所示(图中 D 为激光光斑扫描的直径),作用尺寸 D_a 的增大,将直接导致加工微孔的直径增加。

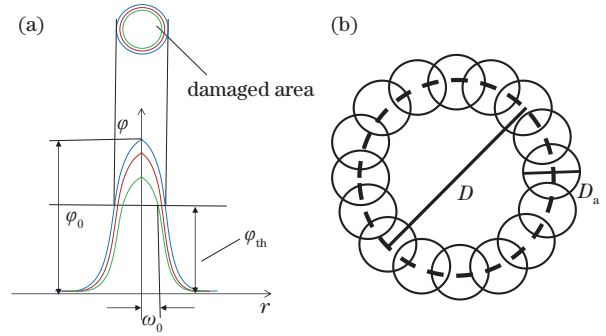


图5 脉冲激光加工方式。(a)高斯光束能量密度分布; (b)旋转激光光斑扫描轨迹

Fig. 5 Ways of pulse laser processing. (a) Energy density distribution of Gaussian beam; (b) trajectory of laser spot scanning by helical drilling method

3.1.2 离焦量对微孔成型的影响

加工微孔出、入口孔径与离焦量的关系如图6所示,此时设定楔形棱镜1偏转角为 -10° ,反射镜 M_2 平移在 1 mm 位置处,离焦量以 0.1 mm 的增量在区间 $[-0.5, 0.5]$ 变化,激光脉冲能量为 $135\text{ }\mu\text{J}$ 、重复频率为 66.67 kHz 、旋转速度为 4000 r/min 。当 $\Delta f > 0$ 时,即处于正离焦时,在不锈钢板材上加工的微孔呈倒锥形,且随着正离焦量增大,出口尺寸的增长快于入口尺寸,即倒锥角在逐步增大;随着激光加工负离焦量的增大,入口尺寸呈增大趋势,出口尺寸呈减小趋势,微孔的正锥角逐步增大。图7(a)~7(e)表示离焦量分别为 $-0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4\text{ mm}$ 条件下加工微孔的横向剖面图。

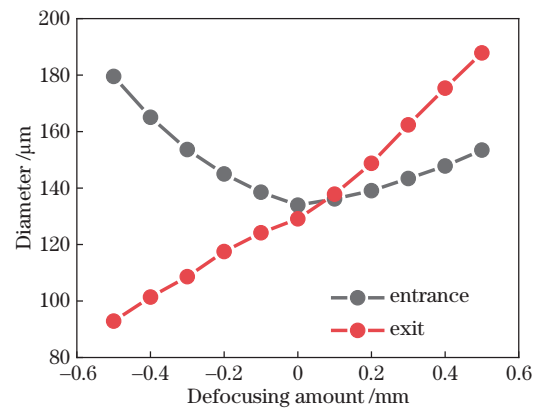


图6 出、入口孔径与离焦量的关系

Fig. 6 Relationship between defocusing amount and diameters of entrance and exit

当 $\Delta f < 0$ 时,如图8(a)所示,激光束在材料的上表面为收敛光束,焦平面上方的材料吸收收敛的激光能量,由于孔壁不能直接接收激光通量,在较大

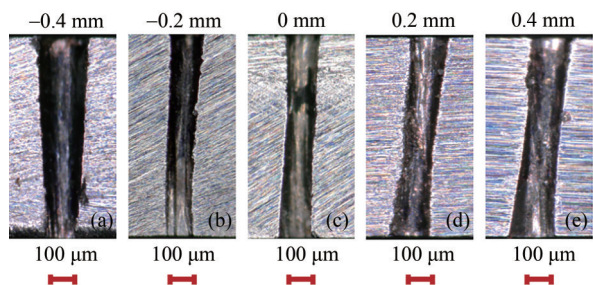


图 7 不同离焦量的微孔剖面图

Fig. 7 Profile of micro-holes under different defocusing amounts

的激光能量下形成了大量的等离子体和熔融金属。等离子体和熔融金属的存在可以阻止激光能量向

下,导致微孔出口处的激光能量减小,进而导致出口直径减小。此外,由于等离子体和熔融金属的大量存在,微孔内部存在较大的压力,当烧蚀材料从孔中喷出时,进一步推动入口孔壁材料从微孔中排出,导致入口直径增大。当 $\Delta f > 0$ 时,如图 8(c) 所示,激光焦点在材料上部,此时破坏机理主要是材料的蒸发,孔入口直径较小。出口的焦径远远大于激光束离散而导致出现零偏焦和负偏焦距,大的聚焦直径和发散的激光束都可以增加出口表面的直径。但是由于大的离焦量会降低激光能量密度,所以更大的离焦量会影响出口的加工质量^[17]。

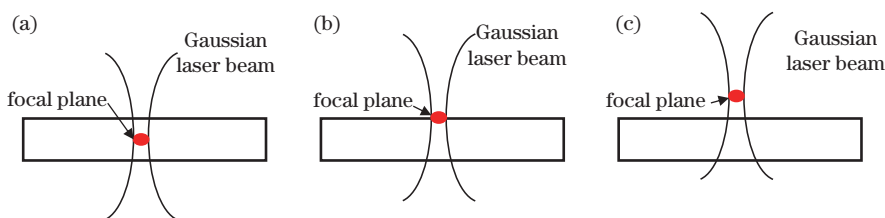


图 8 离焦形式。(a)负离焦;(b)焦点处;(c)正离焦

Fig. 8 Defocus forms. (a) $\Delta f < 0$; (b) $\Delta f = 0$; (c) $\Delta f > 0$

3.1.3 重复频率对微孔成型的影响

在旋切制孔的过程中,当楔形棱镜 1、反射镜 M_2 的位置确定后,旋切的路径就被唯一确定了,此时,

输入的激光脉冲按照旋切的顺序依次沉积在指定的路径中,如图 9 所示。

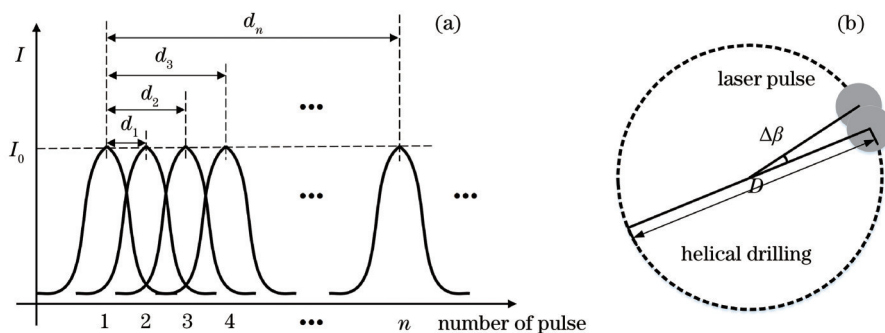


图 9 激光脉冲作用的效果。(a)激光脉冲强度叠加;(b)激光光斑旋切路径

Fig. 9 Effects of laser pulse. (a) Superposition of laser pulse intensity; (b) helical path of laser spot

两个相邻激光脉冲之间的 $\Delta\beta$ 角可表示为

$$\Delta\beta = 2\pi \cdot 2\omega_m \cdot \Delta t = \frac{4\pi\omega_m}{f_{re}}, \quad (2)$$

式中: Δt 是两个相邻脉冲之间的时间间隔; ω_m 为道威棱镜的旋转速度; f_{re} 为激光的重复频率。

当有 n 个脉冲数时,第一个脉冲到第 n 个脉冲的距离 d_n 可表示为

$$d_n = D \sin\left(\frac{n \cdot \Delta\beta}{2}\right) = D \sin\left(\frac{2\pi n \omega_m}{f_{re}}\right), \quad (3)$$

式中, D 为微孔旋切的直径,则叠加后的激光脉冲强

度可表示为

$$I_s = \sum_{i=1}^{f_{re} \cdot t} I_0 \cdot \exp\left(-2 \frac{d_{i-1}^2}{\omega_0^2}\right) = \sum_{i=1}^{f_{re} \cdot t} I_0 \cdot \exp\left\{-2 \frac{D^2 \sin^2\left[2\pi(i-1) \frac{\omega_m}{f_{re}}\right]}{\omega_0^2}\right\}. \quad (4)$$

而激光旋切加工耦合率^[9]可表示为

$$O_L = 1 - \frac{\pi \cdot D \cdot 2\omega_m}{\omega_{(z)} \cdot f_{re}}, \quad (5)$$

式中, $\omega_{(z)}$ 为在 Z 位置的激光束强度处 $1/e^2$ 的半径。

当楔形棱镜 1 偏转角和反射镜 M_2 均在初始位置时, 设置激光脉冲能量为 $141 \mu\text{J}$ 、离焦量为 $+0.1 \text{ mm}$ 、激光旋转速度为 4000 r/min , 分别在不同重复频率 (f_{re}) 的条件下进行旋切割孔, 加工结果如图 10 所示。重复频率对微孔入口处和出口处的热影响较大, 图 10(a)~10(d) 是在 f_{re} 分别为 250、200、100、66.67 kHz 条件下入口处形貌图,

图 10(e)~10(h) 是相对应的出口处形貌图, 从图中可清楚地看到, 激光的重复频率越高 ($f_{re} = 250 \text{ kHz}$), 加工的微孔入口和出口处的烧蚀痕迹明显, 热影响严重; 而在低的重复频率下 ($f_{re} = 66.67 \text{ kHz}$) 加工的微孔入口和出口处几乎没有明显的烧蚀痕迹, 表面形貌质量好。由(4)和(5)式可以得出, 在其他因素固定的条件下, f_{re} 越大, 叠加后的激光脉冲强度 I_s 和激光旋切加工耦合率 O_L 越大, 激光热累积效应越明显, 后续脉冲作用到先前脉冲的热辐射区, 引起材料表面温度继续上升。

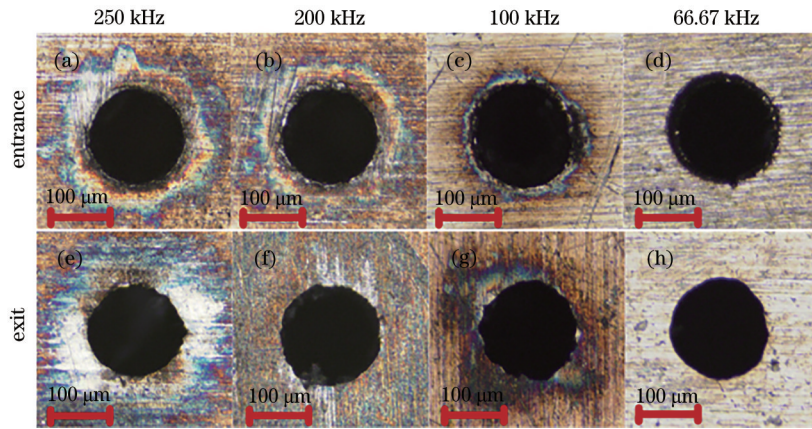


图 10 出、入口显色与重复频率的关系

Fig. 10 Relationship between repetition frequency and color rendering of entrance and exit

3.1.4 激光旋转速度对微孔成型的影响

当楔形棱镜 1 偏转角和反射镜 M_2 均在初始位置时, 设置离焦量为 $+0.1 \text{ mm}$ 、激光重复频率为 66.67 kHz , 在激光脉冲能量分别为 $141 \mu\text{J}$ 和 $153 \mu\text{J}$ 下, 研究激光旋转速度与重铸层厚度的关系。使用共聚焦显微镜对微孔进行局部放大, 观察微孔的重铸层厚度随激光的旋转速度变化如图 11 所示。图 11 中(a)~11(e)是在激光脉冲能量为 $141 \mu\text{J}$ 下的加工结果, 图 11(f)~11(j)是在激光脉冲能量为

$153 \mu\text{J}$ 下的加工结果。从图 11 中可以看出, 重复频率固定时, 增加激光旋转速度可以减少微孔入口处的重铸层厚度。根据(4)和(5)式, 在其他因素固定的条件下, ω_m 越大, 叠加后的激光脉冲强度 I_s 和激光旋切加工耦合率 O_L 越小, 对材料逐层去除时产生的热熔效应越低, 重铸层的厚度就越小。在图 11(e) 和 11(j) 中激光的旋转速度为 8000 r/min 时, 此时配合恰当的激光脉冲能量, 微孔入口处表面将更加光洁。

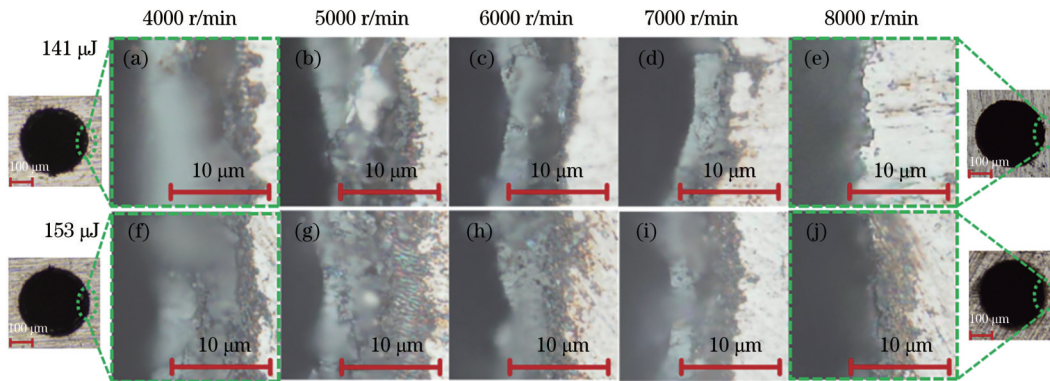


图 11 入口处重铸层与激光旋转速度的关系

Fig. 11 Relationship between recast layer of entrance and laser helical speed

3.2 不同孔径、锥度微孔的可控制备

由前面的实验可知,适当的工艺参数能够获得较好的加工结果。设定激光脉冲能量为 141 μJ 、离焦量为 +0.1 mm、激光的重复频率为 66.67 kHz、旋转速度为 4000 r/min,在此实验条件下,进行不同孔径、锥度微孔的可控制备研究。

3.2.1 微孔的孔径控制

加工微孔的孔径可以通过调节旋转光学系统中楔形棱镜的偏转角来实现。当楔形棱镜的角度以 5° 为步进单位,在 $[-25^\circ, 25^\circ]$ 区间变化时,微孔出、入口孔径与楔形棱镜 1 的偏转角度关系如图 12 所示。微孔的出、入口孔径变化近似关于楔形棱镜 0° 位置呈“W”形对称状,并随着楔形棱镜 1 偏转角增大非线性增大。由图 2 可知,楔形棱镜 1 角度变化将使原激光束偏离主光轴,再通过旋转的道威棱镜后,倾斜的激光束以偏离的主光轴方向呈现圆锥的形状。加工孔径与激光入射角成正切函数关系,因此在 0° 附近的小角度偏转对微孔孔径的影响很小,而楔形棱镜 1 大角度的偏转对微孔孔径影响显著。当激光的旋转速度一定时,加工孔径的增大将导致激光光斑耦合率的减少,从而使得加工质量下降。在 $\pm 25^\circ$ 的偏转角时,微孔入口处的孔径接近 $350 \mu\text{m}$,而在 -25° 时,孔未被击穿,出口孔径为 0。楔形棱镜 1 偏转角度在 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 区间能够获得稳定的加工结果。

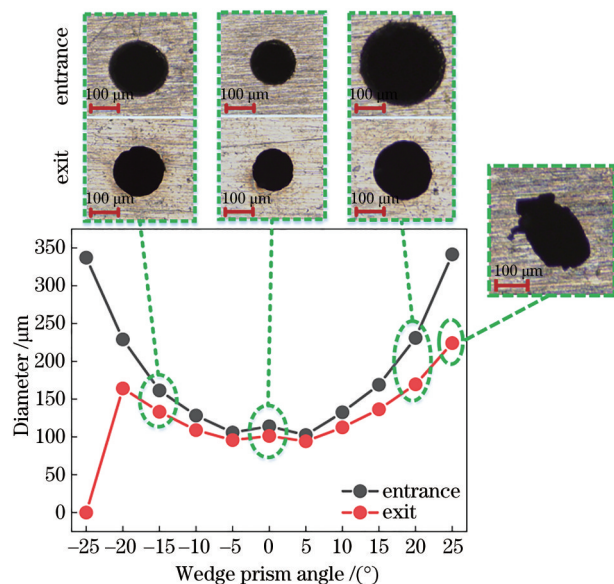


图 12 出、入口孔径与楔形棱镜 1 偏转角度的关系
Fig. 12 Relationship between angle position of wedge prism 1 and diameters of entrance and exit

3.2.2 微孔的锥度控制

调节反射镜 M_2 的平移量能够加工不同锥度的微孔。微孔出、入口孔径与反射镜 M_2 平移量的关系如图 13 所示,此时反射镜 M_2 以 1 mm 为步进单位,在 $[-5, 5]$ 区间运动,激光脉冲能量为 141 μJ 。图 13 表明随着反射镜 M_2 的平移,微孔入口孔径逐渐减小,继续平移后,入口孔径减小缓慢,而出口处孔径呈现出线性增加的趋势。在 1 mm 位置附近时,微孔入口处孔径与出口处孔径相等,呈现出圆柱形。图 14(a)~14(e)分别是在反射镜 M_2 的平移量为 -4、-2、0、2、4 mm 下的微孔剖面图。从图 14 可以看出,微孔入口处的孔径随平移量的增加呈现出先减小后趋于稳定的效果,而出口处孔径呈现出一直增大的效果,且平移量小的微孔剖面质量要优于平移量较大的。

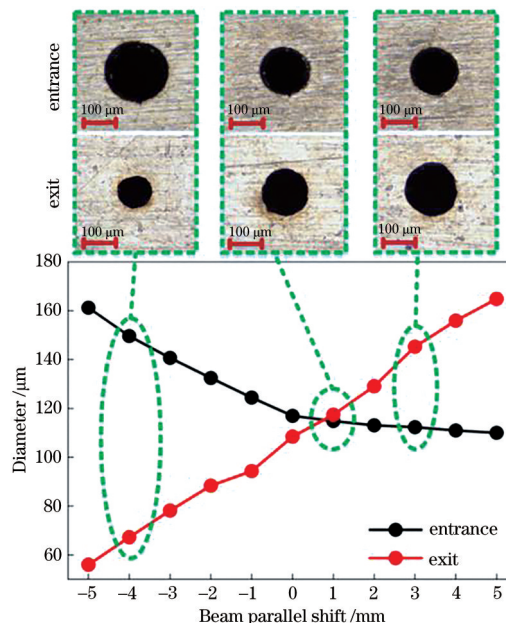


图 13 出、入口孔径与反射镜 M_2 平移量的关系
Fig. 13 Relationship between beam parallel shift of M_2 and diameters of entrance and exit

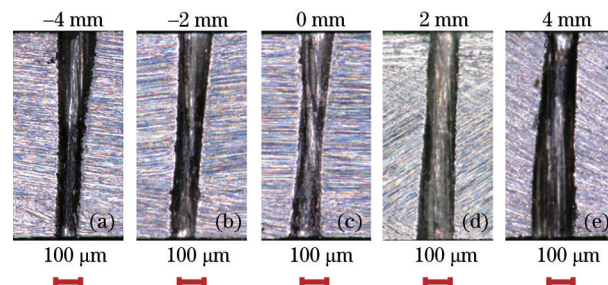


图 14 反射镜 M_2 不同平移量下的微孔剖面图
Fig. 14 Profile of micro-holes under different beam parallel shifts of M_2

4 结 论

采用波长为 1064 nm 的超短脉冲皮秒激光器对金属材料进行旋切钻孔,以激光共聚焦显微镜超景深显微镜为测量工具,研究了激光脉冲能量、离焦量、激光的重复频率和旋转速度对微孔成型的影响,同时探究了旋切系统中楔形棱镜 1 的偏转角和反射镜 M_2 的平移量对微孔孔径与锥度的调控。研究发现:

1) 激光脉冲能量对出口处的孔径影响较为明显,随着激光能量的增大出入口的孔径也增大,出口处孔径变化更为明显;离焦量对微孔的锥度影响显著,随着离焦量的增加(由 -0.5 到 $+0.5$ mm),微孔由正锥孔到直孔再到负锥孔变化;激光的重复频率和旋转速度对微孔出、入口处的显色范围和重融层的厚度有很大的影响,重复频率越高,微孔出、入口的热影响范围越大,在激光重复频率为 66.67 kHz 时,微孔出、入口几乎没有热影响;激光旋转速度的增加能够有效抑制重铸层的增加。

2) 通过改变楔形棱镜 1 的偏转角,能够有效控制微孔孔径,楔形棱镜的偏转角从 -25° 增加至 25° (以 5° 为步进单位),微孔的出、入口孔径近乎是关于楔形棱镜的 0° 位置呈“W”形对称状;通过改变反射镜 M_2 的平移量来控制微孔的锥度,反射镜 M_2 的平移量从 -5 mm 平移至 5 mm 处(以 1 mm 为步进单位),微孔由正锥孔到直孔再到倒锥孔,在 1 mm 位置处近似于直孔。

采用超短脉冲激光器搭载旋切系统的加工方式能够实现对不同锥度微孔的可控制备,在未来钻孔技术行业中具有广阔的研究前景,本文中所得出的一般性规律对后续研究金属微孔的制备具有一定的借鉴作用。

参 考 文 献

[1] Zhang W W, Guo C H, Zhang T R, et al. Advanced film cooling technology of turbine blades and progress in relevant laser drilling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(22): 26-31.
张文武, 郭春海, 张天润, 等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展[J]. 航空制造技术, 2016, 59(22): 26-31.

[2] Wang Y C, Zhao W Q, Wang L Z, et al. Research on drilling of micro-hole in metal by using picosecond ultrashort pulse laser[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(5): 70-74.

王奕潮, 赵万芹, 王凌志, 等. 皮秒超短脉冲激光烧蚀金属的微孔加工[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(5): 70-74.

[3] Sun S F, Liao H P, Wu X H, et al. Experimental study about micro hole processing by picosecond laser[J]. Laser Technology, 2018, 42(2): 234-238.
孙树峰, 廖惠鹏, 吴旭浩, 等. 皮秒激光旋切加工微孔试验研究[J]. 激光技术, 2018, 42(2): 234-238.

[4] Sun R F, Zhang X B, Cao W B, et al. Characteristic of hole wall trepanning by picosecond laser in superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 128-131.
孙瑞峰, 张晓兵, 曹文斌, 等. 高温合金皮秒激光旋切制孔孔壁特征研究(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(S2): 128-131.

[5] Liu H D, Zhao W Q, Wang L Z, et al. Percussion drilling of deep holes using picosecond ultrashort pulse laser in Ni-based superalloy coated with ceramic thermal barrier coatings[J]. Materials, 2020, 13(16): 3570.

[6] Weck A, Crawford T H R, Wilkinson D S, et al. Laser drilling of high aspect ratio holes in copper with femtosecond, picosecond and nanosecond pulses[J]. Applied Physics A, 2008, 90(3): 537-543.

[7] Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 1): theoretical study[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0106008.
赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(上): 理论研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0106008.

[8] Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes(part 2): experimental study[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(2): 0242001.
赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(下): 实验探索[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(2): 0242001.

[9] He C, Buehring J, Zibner F, et al. Ultrafast laser helical drilling of three-dimensional shaped holes using synchronized adaption of energy deposition[J]. Journal of Laser Micro, 2018, 13(1): 31-35.

[10] Foehl C, Dausinger F. High precision deep drilling with ultrashort pulses[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5063: 346-351.

[11] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 661-669.

[12] Kleinbauer J, Knappe R, Wallenstein R. A powerful

- diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(3): 315-320.
- [13] He C, Esch D, Gillner A. Adaption of energy deposition in helical drilling of multidimensional micro holes using ultrashort laser pulses[J]. *Journal of Laser Micro*, 2019, 14(2): 173-178.
- [14] He C, Bühring J, Gillner A. Helical drilling of three-dimensional conical converging-diverging nozzle in steel using ultrashort laser pulses[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 305-309.
- [15] Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2314001.
陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2314001.
- [16] Liu X D, Chen L, Wang X Z, et al. Micromilling blind holes in Al_2O_3 ceramics using UV laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0514005.
刘晓东, 陈亮, 王曦照, 等. 紫外激光微铣削 Al_2O_3 陶瓷盲孔的工艺研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0514005.
- [17] 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.
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.