

基于双振镜组的微孔激光旋切加工系统

龙宙¹, 秦应雄^{1,2*}, 许文强¹, 秦庆全¹, 肖金陵¹, 童杰², 段光前²¹华中科技大学光学与电子信息学院激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074;²江苏先河激光技术有限公司, 江苏 宿迁 223800

摘要 为实现孔径和锥度可调的微孔加工,设计研制了一种基于双振镜组联动与Z轴上下移动的五轴四联动激光旋切系统。建立了微孔激光旋切物理模型,首先利用边缘轮廓确定微孔形状,再通过分层回型填充方法确定每个激光作用点的位置;然后基于聚焦光束不被遮挡和振镜偏转整体运动量少的原则,确定四个振镜的偏转角度;通过改变边缘轮廓端点数据,可分别实现方孔尺寸和锥度的灵活可控。采用15 W紫外皮秒激光器、两套相同的振镜和焦距为32 mm的远心透镜,配合三维平移工作台,搭建了激光旋切硬件系统,自主开发了多边形激光旋切控制软件。实验采用分层降焦打孔的方式,在厚度为250 μm的氮化硅材料上实现了55 μm×55 μm规格的正锥、零锥、负锥方形微孔的加工,并且还实现了不同孔径(30~80 μm)零锥方形微孔和三角形、五边形、六边形等其他形状微孔的加工。

关键词 激光技术; 激光旋切; 微孔加工; 双振镜组; 分层填充; 锥度调节

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221165

1 引言

微孔结构被广泛应用在航空涡轮叶片、芯片探针卡、汽车发动机喷油器喷嘴等器件上^[1-3]。随着器件性能的进一步提高,制造过程中微孔的加工要求也相应提高,传统机械打孔方法加工出的微孔出入口孔径大小很难调节,已无法应用于对微孔锥度有要求的器件加工。因此,业内发展出了许多新的精密微孔加工方法,如电火花打孔^[4]、电化学打孔^[5]、激光打孔^[6]等。与其他两种方法相比,激光打孔具有效率高、加工精度高、与材料无接触、无化学污染等优点^[7-9]。因此,在微孔加工领域,激光打孔方法发展迅速。

激光打孔技术经过近六十多年的发展,现已发展出了单脉冲打孔、多脉冲打孔、环切打孔、旋切打孔^[10]。脉冲打孔采用单个或多个脉冲对材料同一位置进行冲击加工^[11],在薄板上进行加工时,孔径与光斑大小有关,而对于厚板加工,加工的微孔则会存在较大锥度。环切打孔则是通过环形移动激光束对材料进行加工得到微孔^[12],相当于切割制孔。这三种激光打孔都很难精确控制和调节微孔的锥度,而旋切打孔则是在加工过程中同步控制光束的聚焦位置和入射方位,进而实现微孔孔径和锥度的精准调节,是未来高精度高质量微孔加工的发展趋势^[13]。上海交通大学沈洪团队通过建立工件坐标与加工坐标的关系,提出了一种利用工件倾斜和激光旋转的锥形微孔加工方法^[14]。中国科学

院西安光学精密机械研究所赵华龙团队通过使用光楔加平行平板的方式开发出了一种倒锥微孔加工系统^[15]。德国LMTB公司在2011年采用聚焦光学元件和光楔的组合进行旋转加工,开发出了一种圆孔的加工设备^[16],所能加工的微孔孔径为50~1000 μm,径深比为12:1,设备旋进频率为175 Hz。Fraunhofer公司在2013年采用楔形板和偏转镜配合道威棱镜旋转的方式,推出了螺旋光学打孔系统^[17],所能加工的微孔孔径为50~1000 μm,径深比为20:1,设备旋进频率为175 Hz。上述加工方式都是通过带动光束旋转对材料进行加工,因此,一般只适合加工圆孔。对于异形微孔的加工,国际上领先的激光加工厂家都在抓紧研发相关的设备。德国Arges公司推出的Precession Elephant 2微加工系统采用平行平板加振镜的组合,通过振镜扫描对不同形状的微孔进行加工,所能加工的微孔孔径为20~700 μm,径深比为12:1,设备旋进频率为200~600 Hz。德国SCANLAB公司使用两个振镜对光束进行控制,开发了五轴微加工系统,所能加工的微孔孔径为20~1000 μm,径深比为10:1,设备旋进频率小于600 Hz。

为了在氮化硅材料上加工出探针卡所需要的零锥方形的微孔,本文自主设计研制了一种基于双振镜组的微孔旋切加工系统。本文第一节介绍微孔加工的相关背景;第二节介绍了激光旋切分层物理模型以及振镜对光束入射方位的控制公式;第三节介绍了所搭建

收稿日期: 2022-08-18; 修回日期: 2022-10-20; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 宿迁市科技计划项目(H202009)

通信作者: *qyx@hust.edu.cn

的微孔旋切加工系统的硬件系统与控制软件;第四节介绍了微孔旋切加工系统所实现的微孔效果;第五节为结论。

2 激光旋切模型

2.1 旋切分层填充模型

旋切分层填充模型的原理是根据微孔轮廓特征确定微孔各角的位置,在保证聚焦光束不被材料遮挡的前提下,控制光束反向偏移,再通过分层回型填充方法

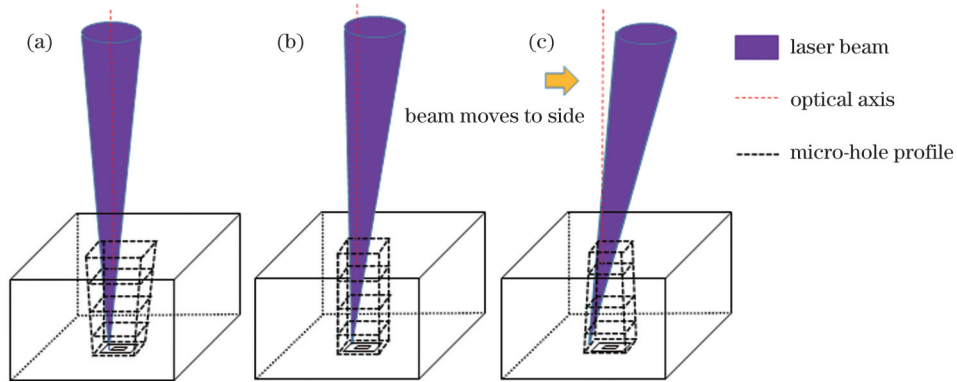


图 1 不同锥度微孔的分层填充模型示意图。(a)正锥;(b)零锥;(c)负锥

Fig. 1 Schematics of layered filling models for different taper micro-holes. (a) Positive taper; (b) zero taper; (c) negative taper

图 1(a)表示正锥微孔的分层填充模型,光束在光轴两侧的宽度基本相等;图 1(b)表示零锥微孔的分层填充模型,焦点聚焦在光轴的左边,光束向焦点位置的反方向偏移,光束一侧垂直于孔壁;图 1(c)表示负锥微孔的分层填充模型,光束朝焦点位置反方向偏移更多距离,同时光束倾斜入射到材料中。在加工下层材料时,光束在经过微孔表面时应该避免与入口材料发生接触,从而减少入口的烧灼痕迹,保证微孔的质量。

在对微孔轮廓进行加工前,聚焦光斑对微孔轮廓内部按“回”形进行填充,填充的圈数根据微孔孔径大小进行相应的调整。先去除轮廓内部材料,避免加工轮廓时光束被内部材料遮挡;对材料的厚度进行分层,在加工完上层材料后,将焦点移到下层材料上继续加工,使得焦点始终作用在材料上。采用填充与分层的方式进行加工,有助于加工过程中等离子体和残渣的排出,使得激光束的能量被充分利用,提高加工效率。

2.2 双振镜组旋切实验系统

为了精准控制光束的入射方位,本文设计了一套双振镜组微孔加工系统。微孔加工系统的结构示意图如图 2 所示。

双振镜组旋切加工系统由振镜组一、振镜组二、Z轴移动装置和聚焦透镜等光学部件组成。振镜组一由 X1、Y1 两个振镜组成,振镜组二由 X2、Y2 两个振镜组成。其中,振镜组二和聚焦透镜被固定在 Z 轴移动装置上,在加工时 Z 轴移动装置带动三者移动,进而改变

确定加工过程中每个激光作用点的位置,精准控制聚焦光斑在微孔内部不同位置时光束的聚焦形态。

通过坐标化微孔轮廓特征,将微孔的孔径大小转换成各个顶角的坐标位置。控制微孔角的个数,确定加工微孔的类型;再通过调节微孔各角的坐标位置控制光束的偏移角度,进而完成对微孔孔径大小的控制;改变光束偏移的距离,控制光束会聚到焦点的形状,进而完成对微孔锥度的调节。不同锥度微孔的分层模型示意图如图 1 所示。

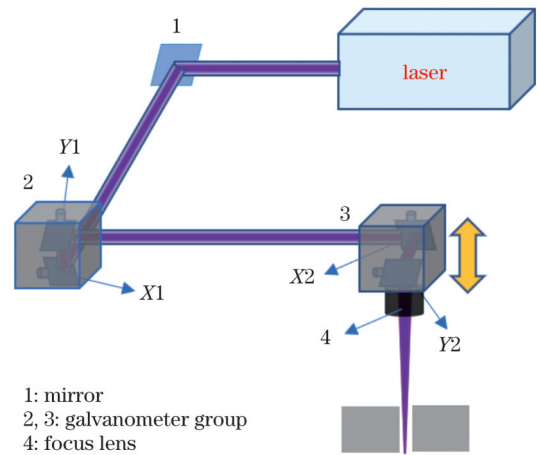


图 2 双振镜组微孔加工系统的结构图

Fig. 2 Structural diagram of micro-hole processing system with double galvanometer groups

聚焦光斑的位置。两个振镜组和 Z 轴移动装置采用一套独立的控制系统进行控制,保证加工时系统运行的同步性。

2.3 双振镜控制光束的原理

整个系统使用两个振镜组共四个振镜对光束进行控制,将加工平面分成 X、Y 两个方向,每个方向使用两个振镜对光束进行控制,精准地控制光束在不同方向上的偏移距离和偏移角度,从而完成对微孔孔径和锥度的控制。图 3(a)表示在 X 方向上使用两个振镜对光束进行控制。

光束在通过振镜 X1 时产生偏角,在传输到振镜 X2 的过程中光束由于此偏角与光轴发生偏移;在光

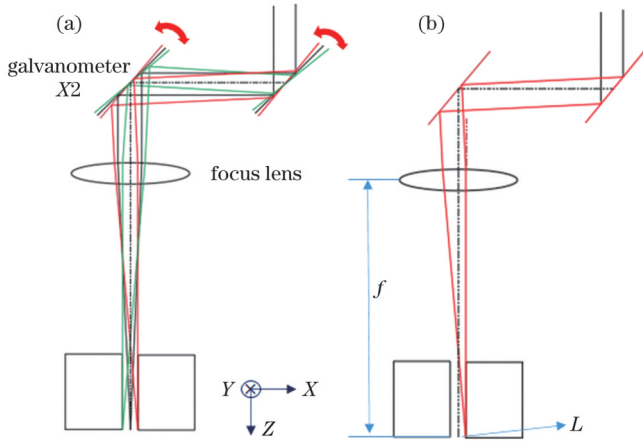


图 3 振镜对光束的控制示意图。(a)三种光束聚焦形态;(b)聚焦位置示意图

Fig. 3 Schematics of controlling beam by using two galvanometers. (a) Three types of beam focusing patterns; (b) schematic of focusing position

束通过振镜 X2 后,先对前面经过振镜 X1 时产生的偏角进行补偿,使光束以一个新的偏角入射到聚焦透镜。

通过改变振镜 X1 的摆动角度,控制光束入射到聚焦透镜上的位置,从而改变光束从聚焦透镜到焦点的会聚形状,进而对所加工微孔的锥度进行控制。

利用振镜 X2 对光束进行补偿后,光束的角度发生改变。通过改变振镜 X2 的摆动角度,控制光束入射到聚焦透镜的角度,由于不同角度下聚焦光斑出现在不同的位置,因此可控制加工微孔的孔径大小,如图 3(b) 所示。具体表现为

$$L = f \cdot \theta, \quad (1)$$

式中: L 为聚焦光斑与光轴的偏移距离; f 为透镜焦距; θ 为光束的入射角度。

光束在到达聚焦透镜之前,既有相对光轴的偏移,也有相对光轴的偏角,因此通过调节加工过程中振镜的角度,可对微孔的孔径和锥度同时进行控制。

通过旋切模型得到微孔角的位置坐标,通过对传输的距离和振镜偏转的角度进行计算,得到在加工每个微孔角时振镜的偏转角度,再通过控制系统依次连接微孔每个角上的端点,完成对微孔轮廓的加工。 X 、 Y 两个方向联动的控制公式可以描述为

$$\begin{cases} (\theta_{x1} + \theta_{x2}) f = X \\ \theta_{x1} L_{x1x2} + (\theta_{x1} + \theta_{x2}) L_{x2f} = -\frac{X}{a} d \\ (\theta_{y1} + \theta_{y2}) f = Y \\ \theta_{y1} L_{y1y2} + (\theta_{y1} + \theta_{y2}) L_{y2f} = -\frac{Y}{b} d \end{cases}, \quad (2)$$

式中: θ_{x1} 、 θ_{x2} 、 θ_{y1} 、 θ_{y2} 分别表示四个振镜 X1、Y1、X2、Y2 的偏转角度; d 表示光束的偏移距离; L_{x1x2} 、 L_{y1y2} 分别表示 X 、 Y 方向上第一个振镜到第二个振镜的距离;

L_{x2f} 、 L_{y2f} 分别表示 X 、 Y 方向上第二个振镜到聚焦透镜的距离; a 、 b 表示所要加工的微孔孔径在 X 、 Y 方向的半径; X 、 Y 表示此时激光焦点在微孔内部的横、纵坐标,两者的值分别要小于等于 a 和 b 。

其中 $-\frac{X}{a}d$ 和 $-\frac{Y}{b}d$ 表示在加工 (X, Y) 位置时光束在 X 和 Y 方向上所偏移的距离。光束的偏移量随着焦点位置坐标的变化而逐渐变化,振镜在这个过程中逐渐偏转,使得整体运动量较小。通过控制光束的偏移距离 d ,改变光束会聚到焦点的形状,完成对微孔锥度的调节。图 4 为光束的偏移距离 d 对微孔锥度的影响情况。

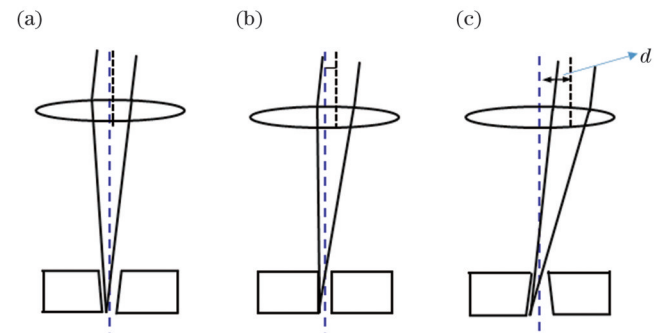


图 4 光束的偏移距离对微孔锥度的影响。(a) d 小于光束宽度;(b) d 等于光束宽度;(c) d 大于光束宽度

Fig. 4 Effect of shift distance of beam on micro-hole taper. (a) d is smaller than beam diameter; (b) d is equal to beam diameter; (c) d is larger than beam diameter

将加工过程中路径上的点所对应的位置信息代入式(2)进行计算,得出相应的振镜镜片偏转角度,再由控制系统对振镜的运动进行控制。通过调节 a 和 b 的数值对 X 、 Y 方向上的微孔孔径大小进行控制,通过调节光束的偏移距离 d 的大小来实现对微孔锥度的控制。

3 激光旋切实验系统和旋切软件

我们搭建了双振镜组微孔加工系统,并开发了相关的控制软件。双振镜组微孔加工系统的实物图如图 5 所示。

控制部分选用以 TMS320DM6437 为核心的数字信号处理(DSP)控制卡,采用嵌入式编译器+实时操作系统的开发环境,开发专用的激光旋切控制软件,实现对四个振镜偏转角度的同步控制及 Z 轴移动和激光器开关光的控制,同时对振镜安装误差导致的光束偏转进行校正,并借助 NDK 模块实现网络通信,使用超文本标记语言(HTML)设计了网页用户控制界面。

实验材料为 0.25 mm 厚的氮化硅材料,激光器为 15 W 皮秒紫外激光器,波长为 355 nm,脉冲频率在 50~500 kHz 范围内可调,振镜组为通光孔径为 10 mm 的扫描振镜,聚焦透镜为焦距为 32 mm 的远心透镜,

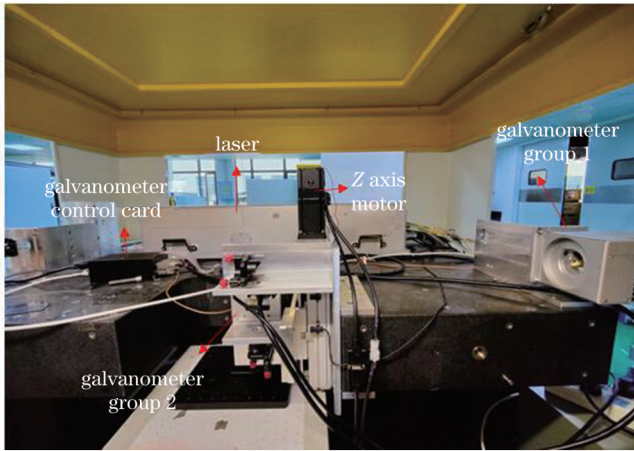


图 5 双振镜组微孔加工系统

Fig. 5 Micro-hole processing system with double galvanometer groups

加工时聚焦光斑从材料表面下降至材料底部,同时通过同轴吹气的方法,将加工过程中产生的熔化物质吹走以辅助加工。加工过程中激光器的功率设定为

12 W,重复频率设定为 50 kHz,振镜的扫描速度为 0.4 m/s,Z轴下降速度为 2 mm/s。

由于X、Y两个方向的规律基本相同,在实验中选择X方向进行实验。

4 微孔加工实验

4.1 不同锥度的微孔加工

我们在X方向上改变光束的偏移距离,对所加工微孔的锥度进行调节。在实验中测量三次微孔出、入口孔径并取平均值。

微孔锥度的计算公式为

$$T = \arctan\left(\frac{D_{in} - D_{out}}{2h}\right), \quad (3)$$

式中: T 表示微孔的锥度; D_{in} 表示入口直径; D_{out} 表示出口直径; h 表示材料的厚度。

孔径大小设置为 55 μm ,调整光束的偏移距离,改变微孔的锥度,所得到的微孔出、入口孔径如表 1 所示,加工所需的时间约为 0.2 s。

表 1 不同光束偏移距离下的微孔孔径和锥度

Table 1 Hole diameters and tapers of micro-holes obtained under different beam shift distances

Shift distance of beam / μm	700	1000	1300	1500	1700	2000
Entrance diameter / μm	52.82	53.63	56.58	55.18	57.86	57.12
Exit diameter / μm	46.82	51.06	54.25	58.00	61.39	63.36
Taper / ($^\circ$)	0.686	0.295	0.256	-0.323	-0.404	-0.715

不同光束偏移距离下得到的微孔正、反面实际效果如图 6 所示。

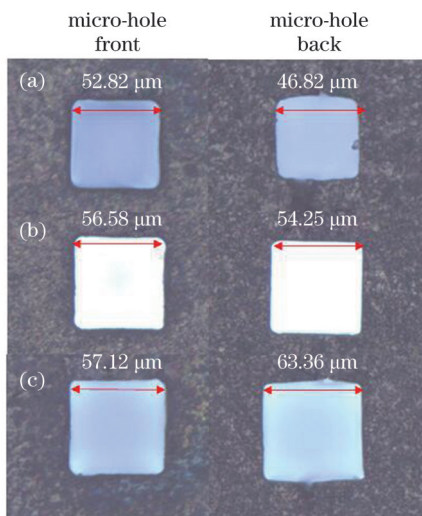


图 6 不同光束偏移距离下不同锥度微孔的正、反面图。(a)正锥, $d=700 \mu\text{m}$; (b)零锥, $d=1300 \mu\text{m}$; (c)负锥, $d=2000 \mu\text{m}$

Fig. 6 Front and back views of micro-holes with different tapers under different beam shift distances. (a) Positive taper, $d=700 \mu\text{m}$; (b) zero taper, $d=1300 \mu\text{m}$; (c) negative taper, $d=2000 \mu\text{m}$

将光束偏移距离为 700、1300、2000 μm 的微孔切开,得到的截面图如图 7 所示。

对式(2)进行求解可得到X方向的两个振镜的偏转角度公式为

$$\begin{cases} \theta_{x1} = \frac{-[x(L_{x2}a + fd)]}{faL_{x1x2}} \\ \theta_{x2} = \frac{x(aL_{x2f} + aL_{x1x2} + fd)}{faL_{x1x2}} \end{cases} \quad (4)$$

当光束偏移距离 d 增加时, θ_{x1} 和 θ_{x2} 的绝对值都会相应增加。当 θ_{x1} 的绝对值增加时,对应光束的偏移量更多,锥度也相应发生改变。在光束偏移距离从 700 μm 逐步增加至 2000 μm 的过程中,光束从聚焦透镜会聚到焦点的形状发生改变,使得正锥微孔变为负锥微孔。

随着 θ_{x2} 的增加,微孔的入口直径增大。实验结果中微孔的入口直径和出口直径逐渐增大,由于光束形状发生改变,出口直径的增大速度要大于入口直径。

在光束偏移距离等于 1300 μm 时,光束一侧垂直于材料进行加工。截面显示孔壁垂直于材料上下表面,上下表面孔的入口大小基本相等,得到的微孔为零锥孔。

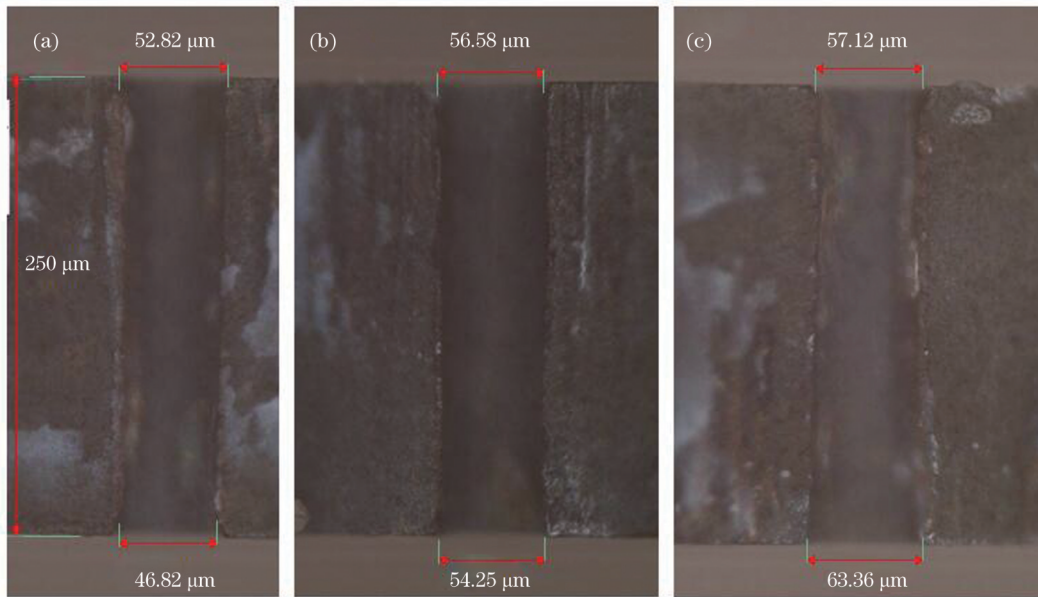


图 7 不同 d 下的微孔截面图。(a) $d=700 \mu\text{m}$; (b) $d=1300 \mu\text{m}$; (c) $d=2000 \mu\text{m}$

Fig. 7 Micro-hole cross sections under different d . (a) $d=700 \mu\text{m}$; (b) $d=1300 \mu\text{m}$; (c) $d=2000 \mu\text{m}$

4.2 不同孔径的微孔加工

通过改变 a 、 b 的值对所加工微孔的孔径进行调节,当 a 、 b 的值变化时,所求得的振镜偏转角也会相应地发生改变。

在之前实验的基础上将光束偏移距离设置为 $1300 \mu\text{m}$,分别调节 a 、 b 的值,得到不同孔径大小的零锥微孔,正反面效果图如图 8 所示,孔径大小分别是 $36 \mu\text{m}$ 和 $72 \mu\text{m}$ 。

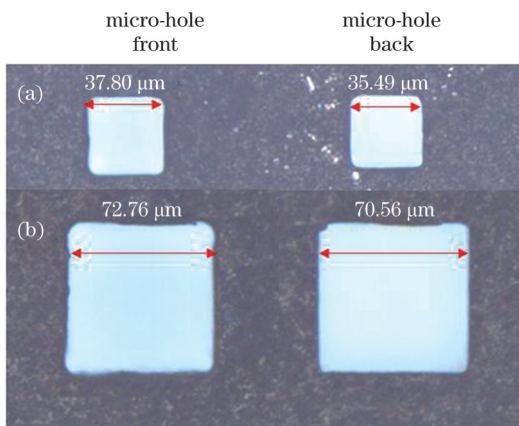


图 8 不同孔径大小的微孔正、反面图。(a) $36 \mu\text{m}$; (b) $72 \mu\text{m}$

Fig. 8 Front and back views of micro-holes with different hole sizes. (a) $36 \mu\text{m}$; (b) $72 \mu\text{m}$

光束经过振镜组一后发生偏移,在到达振镜组二时光束偏离振镜镜片中心,因此振镜组二的镜片大小决定着所能加工的最大微孔孔径和锥度。目前使用的通光孔径为 10 mm 的振镜组,在实际测试中可加工的零锥度微孔的最大孔径大小为 1 mm 。使用通光孔径更大的振镜组系统,能够加工出更大孔径的零锥微孔。

移动焦点至材料底部进行加工时,为了避免微孔入口处的材料遮挡光束,微孔入口孔径必须大于微孔入口处的光束宽度,这限制了加工微孔的最小孔径。目前系统使用焦距为 32 mm 的聚焦透镜,所能加工的零锥微孔的最小孔径大小为 $30 \mu\text{m}$ 。选用焦距更长的聚焦透镜,减少材料入口处的光束宽度,系统可加工更小孔径的零锥微孔。

4.3 异形孔的加工

通过调整微孔的边数和角的位置坐标可实现多边形微孔的加工。基于微孔角的数量确定加工的微孔类型,再根据孔径大小计算出各个端点的坐标位置,调整各个角的坐标,完成对任意多边形轮廓的确定。在之前实验所得到的零锥微孔的加工参数的基础上,按照确定的微孔轮廓进行加工,分别得到三角形、四边形、五边形、六边形等各种异形孔,如图 9 所示。

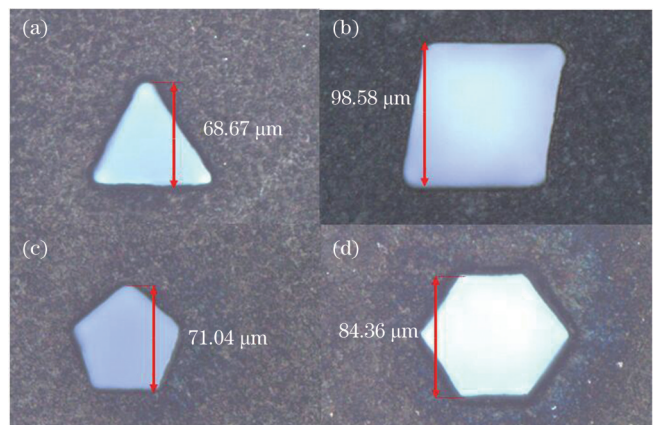


图 9 不同形状的微孔。(a) 三角形; (b) 四边形; (c) 五边形; (d) 六边形

Fig. 9 Micro-holes with different shapes. (a) Triangle; (b) quadrilateral; (c) pentagon; (d) hexagon

5 结 论

设计研制了一个基于双振镜组联动与 Z 轴上下移动的五轴四联动旋切微孔加工系统。建立了旋切物理模型,先通过模型控制微孔的形状,再基于聚焦光束不被遮挡和振镜偏转整体运动量少的原则,调节光束在 X、Y 两个方向上的偏移距离和偏转角度,进而控制微孔的大小和锥度。在厚度为 250 μm 的氮化硅材料上,实现了 55 μm \times 55 μm 规格的正锥、零锥、负锥方形微孔的加工和 30~80 μm 内不同孔径零锥方形微孔的加工,并得到了三角形、四边形、五边形、六边形等多边形微孔。

参 考 文 献

- [1] Okasha M M, Mativenga P T, Driver N, et al. Sequential laser and mechanical micro-drilling of Ni superalloy for aerospace application[J]. CIRP Annals, 2010, 59(1): 199-202.
- [2] Choi W C, Ryu J Y. Fabrication of a Guide block for measuring a device with fine pitch area-arrayed solder bumps[J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(3): 333-339.
- [3] Tong H, Li Y, Zhang L, et al. Mechanism design and process control of micro EDM for drilling spray holes of diesel injector nozzles[J]. Precision Engineering, 2013, 37(1): 213-221.
- [4] Fan Z W, Hourng L W. Electrochemical micro-drilling of deep holes by rotational cathode tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5): 555-563.
- [5] Rajurkar K P, Sundaram M M, Malshe A P. Review of electrochemical and electrodischarge machining[J]. Procedia CIRP, 2013, 6: 13-26.
- [6] Mincuzzi G, Faucon M, Kling R. Novel approaches in zero taper, fast drilling of thick metallic parts by ultra-short pulse laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 118: 52-57.
- [7] Elbandrawy M, Gupta M C. Optical characteristics of femtosecond laser micromachined periodic structures in Si (100) [J]. Applied Optics, 2006, 45(27): 7137-7143.
- [8] 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
Xia B, Jiang L, Wang S M, et al. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0201001.
- [9] 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.
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.
- [10] Chichkov B N, Momma C, Nolte S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63(2): 109-115.
- [11] Zhang Y, He X L, Yu G, et al. Dynamic evolution of keyhole during multi-pulse drilling with a millisecond laser on 304 stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 152: 108151.
- [12] Romoli L, Vallini R. Experimental study on the development of a micro-drilling cycle using ultrashort laser pulses[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 121-131.
- [13] Wang X H, Chen H, Li Z Y, et al. Helical drilling of carbon fiber reinforced polymer by a femtosecond laser[J]. Applied Optics, 2022, 61(1): 302-307.
- [14] Song J C, Shen H, Yao Z Q. A new strategy for laser trepanning of tapered microholes[J]. Journal of Micro and Nano-Manufacturing, 2019, 7(3): 031005.
- [15] 王珊, 赵卫, 赵华龙, 等. 轨迹可控的大深径比倒锥微孔加工系统及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1122002.
Wang S, Zhao W, Zhao H L, et al. Large depth-to-diameter ratio and inverted cone micro-hole machining system with controllable trajectory and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1122002.
- [16] Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, et al. Laser trepanning for industrial applications[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 323-331.
- [17] 阿占文, 陈灵芝, 吴影, 等. 超快激光旋光钻孔孔径和锥度的控制[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802017.
A Z W, Chen L L, Wu Y, et al. Controlling of diameter and taper in ultrafast laser helical drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802017.

Micro-Hole Laser Helical Drilling System Based on Double Galvanometer Groups

Long Zhou¹, Qin Yingxiong^{1,2*}, Xu Wenqiang¹, Qin Qinquan¹, Xiao Jinling¹, Tong jie²,
Duan Guangqian²

¹National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

²Jiangsu Xianhe Laser Technology Co., Ltd., Suqian 223800, Jiangsu, China

Abstract

Objective Micro-hole structures are widely used in devices such as aerospace turbine blades, automotive engine injector nozzles, and probe cards. With the improvement of the device performance requirements, the requirements of diameter and taper for micro-holes are also further raised. Conventional micro-hole processing methods include electrical discharge machining (EDM) and electrochemical machining (ECM). The shape of micro-hole cannot be precisely controlled by EDM, and the micro-hole machining precision is unsatisfactorily controlled by ECM. The general laser drilling methods include single-pulse drilling, multi-pulse drilling, and circular drilling. In all three drilling methods, the focusing position of beam is only controlled, but the beam incidence attitude is not controlled, and there were taper problems for the micro-hole. As an upgrade, the helical drilling can control the diameter and taper of micro-hole by precisely controlling the beam incident position and focusing orientation during the processing procedure. The research on helical drilling and related processing equipment is mainly aimed at the circular hole processing, and the irregular micro-

hole processing still needs to be further studied. To obtain the square holes with adjustable tapers and controllable hole diameters on probe card materials, relevant studies and experiments are conducted in this study.

Methods A new type of laser helical drilling system is presented. The system is composed of four-axis galvanometer groups controlled by linkage and Z axis moving device controlled independently. The processing plane is divided into two directions (X and Y directions) by double galvanometer groups, and the beam focusing position and incident orientation in each direction are controlled by two galvanometers. The physical model of micro-hole laser helical drilling is established. First, a coordinate system is applied to the micro-hole, and the shape of the micro-hole is determined by the edge profile. Second, the micro-hole is processed by a layer-by-layer filling method, while the laser focusing position is determined during processing. Third, the beam is controlled to shift in the opposite direction so that the focused beam is not blocked by the upper layer material during the process, and the minimum deflection motion of the galvanometer is required by optimizing the filling path. According to the above principles, the deflection angles of four galvanometers ($X1$, $Y1$ and $X2$, $Y2$) are determined. Finally, by changing the data of edge profile endpoint, the diameter and taper of micro-hole can be conveniently controlled.

Results and Discussions In this study, a 15 W ultraviolet picosecond laser, two sets of identical galvanometers, a telecentric lens with a focal length of 32 mm, and a three-dimensional translation stage are used to build the laser helical drilling hardware system, and the polygon laser helical drilling control software is developed. The relevant experiments are completed on a 250 μm -thick Si_3N_4 sample. The processing parameters are as follows: the power of the laser is 12 W, the repetition frequency is 50 kHz, the scanning speed of the galvanometer is 0.4 m/s, and the Z -axis movement speed is 2 mm/s. In the experiment, the taper of micro-hole is adjusted by changing the offset distance of the beam, and 55 $\mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$ square micro-holes with positive taper, zero taper, and negative taper are achieved (Fig. 6). The cross sections of the hole wall are observed (Fig. 7). The beam offset distance for the square micro-hole with the zero taper is determined by the taper adjustment, and the 30–80 μm square micro-holes with zero taper are realized by adjusting the data of the edge profile endpoints (Fig. 8). Finally, by adjusting the number of profile endpoints to change the shapes of micro-holes, the triangular, pentagonal, hexagonal and other shapes of micro-holes are realized (Fig. 9).

Conclusions In this study, a new type of laser helical drilling system is presented. The physical model of micro-hole laser helical drilling is established, in which the shape of the micro-hole is determined by edge contours and the laser focusing position is determined by the layer-by-layer filling method. The beam is controlled to shift in the opposite direction so that the focused beam is not blocked by the upper layer material during the process, and the minimum deflection motion of the galvanometer is required by optimizing the filling path. According to the above principles, and the deflection angles of four galvanometers ($X1$, $Y1$ and $X2$, $Y2$) are determined. Finally, by changing the edge profile endpoint data, the size and taper of micro-hole can be conveniently controlled. A 15 W ultraviolet picosecond laser, two sets of identical galvanometers, a telecentric lens with a focal length of 32 mm, and a three-dimensional translation stage are used to build the laser helical drilling hardware system, and the polygon laser helical drilling control software is developed. By adjusting the processing parameters for relevant experiments, the micro-holes with different tapers under the same diameter and the micro-holes with the zero taper and different diameters are realized, and the micro-holes with different shapes are completed.

Key words laser technique; laser helical drilling; micro-hole processing; double galvanometer groups; layer-by-layer filling; taper adjustment