

飞秒激光螺旋加工小孔几何参数演化实验研究

李效基, 董一巍, 殷春平, 赵奇, 尤延铖

厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361005

摘要 为了研究飞秒激光螺旋加工工艺参数对小孔成形过程的影响,以 304 不锈钢为靶材,选取飞秒激光螺旋钻孔工艺的主要参数,基于 $L_{25}(5^6)$ 正交表设计了 5 因素 5 水平正交实验,分析单脉冲能量、重复频率、旋转速率、焦点下移速率、吹气压力对烧蚀深度影响的显著水平;基于反向传播(BP)神经网络建立这 5 个因素与材料烧蚀深度之间的关系模型,并利用正交实验数据对网络进行训练,通过附加钻孔实验数据对所建立网络的泛化能力进行测试,结果表明所建立的模型预测误差在 3% 以内;针对螺旋钻孔的特征参数——焦点下移速率设计单因素实验,得到了飞秒激光螺旋钻孔过程中焦点下移速率对小孔成形影响的规律。

关键词 激光光学; 激光制造; 小孔演化过程; 正交实验; 飞秒激光螺旋钻孔; 神经网络

中图分类号 V261.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0502008

Geometric Parameters Evolution Experiment of Hole During Femtosecond Laser Helical Drilling

Li Xiaoji, Dong Yiwei, Yin Chunping, Zhao Qi, You Yancheng

School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract To investigate the effect of femtosecond laser helical processing parameters on the evolution of hole formation process, we use 304 stainless steel as the target material, select main parameters of the helical drilling by femtosecond pulsed laser, and design orthogonal experiments with 5 factors and 5 levels based on $L_{25}(5^6)$ orthogonal table. The significance levels of the ablation depth affected by 5 main parameters, such as the single pulse energy, repetition frequency, rotation rate, rate of focus down, and the air-blowing pressure, are analyzed. Based on the back propagation (BP) neural network, we establish the relationship model between the 5 main parameters and the ablation depth of the laser drilling. The data obtained from the orthogonal experiment are used to train the neural network. The generalization ability is tested by additional experiments. The results show that the prediction error of the relationship model is less than 3%. Moreover, the single factor experiment is designed to analyze the influence of the rate of focus down during the helical drilling. The effect of the different rates of focus down on the hole formation during the femtosecond laser helical drilling process is obtained.

Key words laser optics; laser manufacturing; evolution processing of small hole; orthogonal experiment; femtosecond laser helical drilling; neural network

OCIS codes 140.3390; 320.7090; 320.2250

1 引 言

飞秒激光自诞生以来,就因其无材料选择性、无机械与大面积热应变^[1]、可实现极小化重铸层、极小

化微裂纹^[2]等加工特点,被广泛应用于小孔的加工制造^[3]。目前在飞秒激光钻孔工艺中,主要有单脉冲加工、叩击式加工、环切加工和螺旋加工 4 种工艺方式^[4]。Kamlage 等^[5]采用叩击式加工的方法,研

收稿日期: 2017-12-01; 收到修改稿日期: 2018-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51705440)、广东省自然科学基金(2014A030310004)、福建省高校产学研合作重大项目(2015H6023)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XMU, 20720180072)

作者简介: 李效基(1993—),男,硕士研究生,主要从事超快激光加工方面的研究。E-mail: xiaojilee@foxmail.com

导师简介: 董一巍(1982—),男,博士,助理教授,硕士生导师,主要从事航空先进制造工艺力学方面的研究。

E-mail: yiweidong@xmu.edu.cn(通信联系人)

究了不同环境下激光重复频率对出、入口孔径的影响;Wang 等^[6]采用环切加工的方式在氧化铝陶瓷基板上进行了打孔研究,建立了不同焦点位置、不同环切路径等参数对出、入口孔径及热影响区的影响规律;王砚丽^[7]研究了激光与材料之间相对运动方式对于小孔成形的影响,指出环切打孔可不受孔径限制,并可有效改善小孔质量;姜靖^[8]基于实验证实了螺旋钻孔工艺的激光焦点线性下移量对孔壁重铸层与微孔质量具有较大影响;曹婷婷^[9]采用螺旋钻孔的方式对飞秒激光加工小孔过程进行研究,分别对不同的焦点进给距离进行实验,发现焦点进给距离对孔的圆度影响较大;Lee 等^[10]采用一种自下而上的飞秒激光在铝硅酸盐玻璃基板上进行螺旋钻孔实验,获得了圆度小于 20 μm 的通孔。螺旋钻孔工艺是目前实现高深径比孔加工的最佳方式^[11],但螺旋钻孔过程中小孔成形的几何演化过程与主要加工参数之间的关系尚不明晰,实际生产加工中主要参数的确定方法仍以经验试凑为主,致使加工过程易出现背壁损伤或盲孔等加工缺陷。为探究加工指标与激光加工参数之间的映射关系,优化激光加工参数,一些学者基于反向传播(BP)神经网络对激光加工中的工艺参数展开了研究。Zhang 等^[12]利用遗传算法优化的 BP 神经网络对激光焊接过程中的熔池外观与熔池阴影特征参数之间的关系进行建模,实现了焊缝质量的实时评估;郭亮等^[13]将激光着色过程中的重复频率、扫描速度、脉冲能量等参数作为 BP 神经网络的输入向量,将颜色色相、饱和度等指标作为输出向量建立了激光加工工艺参数与着色效果关系的数学模型;丁华等^[14]通过 BP 神经网络建立了激光重复频率、激光功率、离焦量三个工艺参数与孔表面粗糙度的神经网络预测模型,该模型可以准确预测激光打孔孔表面的粗糙度大小,从而缩短激光打孔作业的准备周期。可见,BP 神经网络可以作为解决激光加工过程中工艺参数与加工指标之间非线性映射问题的有效工具,并应用于其研究过程中。

本文选取飞秒激光螺旋钻孔工艺过程中的主要参数,基于正交实验研究激光单脉冲能量、重复频率、旋转速率、焦点下移速率、吹气压力对烧蚀深度的影响,建立以这些参数为输入、以烧蚀深度为输出的 BP 神经网络模型,利用所获取的实验数据作为训练样本对神经网络模型进行训练,利用附加钻孔实验所得的实验数据测试神经网络的泛化能力。针对飞秒激光螺旋钻孔工艺过程中的特征参数——焦

点下移速率,进行单因素实验研究,通过设置不同的焦点下移速率,以不同的加工时间加工成排小孔,测量每个孔的孔深,分析不同焦点下移速率下的小孔演化成形过程,得到飞秒激光螺旋钻孔过程中小孔的成形演化规律。

2 实验设备与方法

采用 KH7040A-1 型五坐标超快激光小孔加工机床(福建科涵激光公司)进行小孔加工实验。激光器及机床主要参数如表 1 所示,加工系统结构如图 1 所示。根据姜靖^[8]和 Kraus 等^[15]的研究结论可知,激光的偏振态主要对加工孔的圆度及表面精度产生影响,且在螺旋钻孔工艺中,径向偏振光和角向偏振光对钻孔质量的影响并无显著差异。由于本研究主要探究激光螺旋钻孔中参数对加工效率和小孔成形的影响,因此并未考虑激光偏振态的影响,实验中均采用 1/4 波片 B 将激光转换为圆偏振光后再聚焦到试件表面进行钻孔。为实现激光光束以螺旋轨迹运动,采用四光楔旋转系统 E 对激光束进行偏转,实现激光束平面螺旋运动;由四光楔旋转系统 E、聚焦透镜 F 和激光射头 G 组成的旋切加工模块 H 在垂直于材料表面的方向上运动,通过控制旋切加工模块 H 的升降,可实现激光焦点下移速率的控制,与平面螺旋运动相结合,实现螺旋钻孔。

表 1 激光器及机床相关参数

Table 1 Related parameters of laser and machine

Parameter	Range
Pulse width /fs	250
Wavelength /nm	1064
Repetition rate /kHz	60-600
Average power /W	0-15
Rotation rate /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	600-2400
Air-blowing pressure /MPa	0-0.5
Spot radius / μm	15-25

选取实验试件时,较厚的试件小孔打通时间过长,较薄的试件在装夹过程中容易变形,因此本实验选择厚度为 1 mm、边长为 50 mm 的 304 不锈钢试板。实验拟加工孔径为 1 mm 的小孔,由于飞秒激光器平均功率较低,若采用环切方式钻孔将导致钻孔时间过长,因此根据文献[16]中所采用的螺旋加工方式以及实际加工经验,将激光螺旋扫描路径设定为 50 圈,且最外圈至中心点的距离为 0.5 mm,扫描路径如图 2 所示,其中实线表示光斑从中心点运动到最外圈的轨迹,虚线表示光斑从最外圈返回中心点的轨迹。

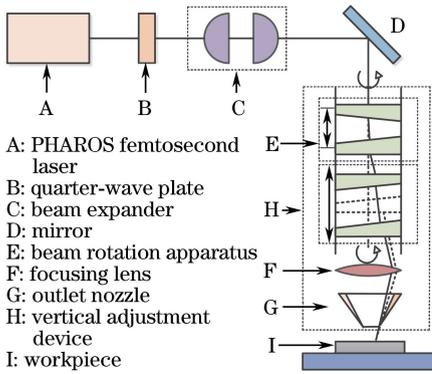


图 1 飞秒激光加工系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of femtosecond laser machining system

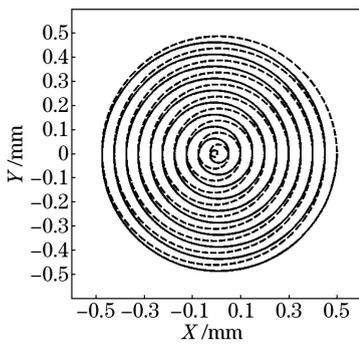


图 2 激光螺旋扫描轨迹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser helical scanning path

探究小孔成形规律需要观测小孔形貌与孔深,而实验加工的大部分小孔并非通孔,且孔径较小,无法直接测量孔深。若采用线切割将小孔沿直径剖开后测量,则不易保证金属丝沿小孔直径等分切割,且线切割过程易产生热作用导致小孔形貌被破坏。因此本研究采用在试件拼接缝隙上直接钻孔的方式,首先用中走丝将 1 mm 厚的不锈钢坯料切割成 (50×50) mm 的不锈钢片,然后对钢片的 4 个侧边进行化学腐蚀处理,使其表面粗糙度低于 Ra3.2 (Ra3.2 的意思是采用不同方法加工所得表面粗糙度, Ra 的上限值为 3.2 μm); 然后将两块不锈钢试板拼接在一起,通过自主设计的夹具夹持两块不锈钢试板,以保证缝隙在夹紧力的作用下紧密贴合,如图 3 所示;最后在激光加工机床上将激光焦点的圆心(图 4 中黑色十字的中心)定位在拼接缝隙上进行钻孔。试板拼合后的缝隙及激光焦点定位方法如图 4 所示。

钻孔结束后,将试板从夹具上取下,放入超声波清洗机中用质量分数为 95% 的乙醇溶液清洗 15 min,随后取出并风干,用 VHX-1000 型超景深三维显微镜和 SUPRA 55 型场发射扫描电子显微

镜(SEM)观测孔壁样貌并记录每个孔的孔深及出、入口孔径。

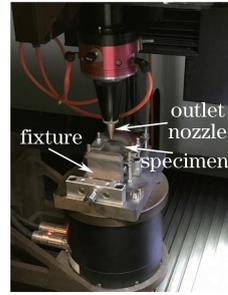


图 3 自主设计的夹具系统

Fig. 3 Self-designed fixture system

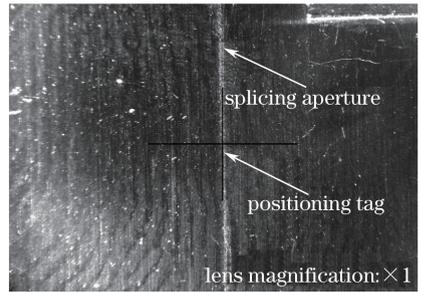


图 4 钢片拼合后的缝隙及激光焦点定位

Fig. 4 Aperture after the steel sheet is spliced and laser focus location

2.1 探究多个参数对烧蚀深度的影响

为探究飞秒激光螺旋钻孔过程中各主要参数对材料烧蚀深度的影响,对选取的加工参数均取 5 个水平,因素水平如表 2 所示。以烧蚀孔的深度作为考察指标,采用 $L_{25}(5^6)$ 的正交表进行了 25 组实验,每组实验的小孔加工时间均为 15 s,为减小实验随机误差,每组实验均重复 3 次。实验结束后,利用 VHX-1000 超景深三维显微镜对小孔两侧的孔壁形貌进行观测,并对孔深进行测量,记录数据。

表 2 正交实验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

Factor	Process parameter	Level	Level	Level	Level	Level
		1	2	3	4	5
A	Single pulse energy /μJ	20	22	24	26	28
B	Repetition rate /kHz	100	200	300	400	500
C	Air-blowing pressure /MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
D	Rotation rate / (r·min ⁻¹)	600	1050	1500	1950	2400
E	Rate of focus down / (mm·s ⁻¹)	0	0.005	0.01	0.015	0.02

2.2 探究焦点下移速率对小孔成形过程的影响

在激光螺旋钻孔中,沿激光传输方向的进给量,即激光焦点的下移速率是该方法最主要的参数,目前鲜有文献针对该参数与小孔成形过程之间的关系进行探究。本研究通过改变激光焦点的下移速率,探究不同焦点下移速率时的小孔成形演化过程。根据实际加工经验,选定激光重复频率为 100 kHz,光斑旋转速率为 2400 r/min,平均功率为 10 W,吹气压力为 0.5 MPa。在此加工参数下进行钻孔测试,发现 100 s 时孔基本加工完成,此时的小孔形貌可视为演化过程终止的形貌,因此将最长钻孔时间取为 100 s。离焦量是指激光焦点与作用材料表面之间的距离,当激光焦点位于工件上方时为正离

焦,反之则为负离焦,由于所选取的实验试件厚度为 1 mm,为确保正离焦和负离焦的情况在实验中均有出现,分别选取焦点下移速率为 0, 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 mm/s 设计 5 组实验。同时,为观测小孔成形演化过程,在每组实验中分别以不同的加工时间在材料的拼接缝隙上加工 15 个孔,实验安排如表 3 所示。在每组实验开始时,均需进行激光对焦操作,使光斑初始位置位于待加工材料表面。为了减小实验随机误差,每组实验均重复 3 次。实验结束后,利用 VHX-1000 超景深三维显微镜和 SUPRA 55 场发射扫描电子显微镜对小孔两侧的孔壁形貌进行观测,并对孔深和出入口孔径进行测量,记录数据。

表 3 焦点下移实验安排表

Table 3 Schedule of focus down test

Rate of focus down / (mm·s ⁻¹)	Drilling time / s														
	Hole 1	Hole 2	Hole 3	Hole 4	Hole 5	Hole 6	Hole 7	Hole 8	Hole 9	Hole 10	Hole 11	Hole 12	Hole 13	Hole 14	Hole 15
0	1	2	3	6	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.005	1	2	3	6	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.010	1	2	3	6	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.015	1	2	3	6	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.020	1	2	3	6	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100

3 实验结果与分析

3.1 正交实验

3.1.1 极差与方差分析

飞秒激光螺旋钻孔是一个多参数耦合的非线性过程,探究耦合作用下各参数对烧蚀深度的影响以及加工参数和烧蚀深度之间的映射关系是建立飞秒激光螺旋钻孔成形演化模型的关键。本研究首先对正交实验结果进行极差分析和方差分析。

极差法是处理正交实验数据时常用的一种数据分析方法,其简单直观,计算量小,能够直观地比较出正交实验中各因素影响的主次顺序,并可以通过简单的对比找出实验参数的最优水平组合。得到的极差分析表如表 4 所示。其中, $\bar{I} \sim \bar{V}$ 所对应的数值分别为相应考察指标在对应因素和对应水平值下的平均值, R 为因素极差,其值越大,则该因素对指标的影响越大。通过比较表中各因素的极差大小,可确定对烧蚀深度影响由大到小的因素为:激光重复频率、单脉冲能量、吹气压力、旋转速率、焦点下移速率。

极差分析法存在无法将偶然误差与条件误差分开考虑的缺点,而方差分析则能克服这一缺点,因此

再对实验数据进行方差分析^[17-18],以便和极差分析结果进行对比,确定加工参数对烧蚀深度的影响次序。建立的方差分析如表 5 所示。在方差分析的 F -检验中,可考虑以下 3 种情况^[19]:

- 1) $F > F_{0.01, (f_f, f_e)}$, 则因素对结果的影响高度显著,记为**;
- 2) $F_{0.01, (f_f, f_e)} \geq F > F_{0.05, (f_f, f_e)}$, 则该因素对结果的影响为显著,记为*;
- 3) $F \leq F_{0.05, (f_f, f_e)}$, 则该因素对结果的影响不显著,不做标记。

其中: f_f 为因素的自由度; f_e 为误差的自由度。

根据以上判定标准,从表 5 中可以看出重复频率对烧蚀深度的影响高度显著,单脉冲能量对烧蚀深度的影响显著,其次为吹气压力、旋转速率以及焦点下移速率,与极差分析结果一致,说明实验结果可靠。

由以上分析可知,在相同的加工时间内,重复频率越高,则作用于材料的脉冲数越多,即在单脉冲能量不变的情况下,高重复频率的激光作用于材料上的总能量更高。因此重复频率对烧蚀深度的影响非常显著。而单脉冲能量直接影响材料所吸收的激光总能量,对烧蚀深度也有显著影响。

表 4 正交实验数据极差分析表

Table 4 Range analysis of orthogonal experimental data

Level	Column number/Factor					
	1/A	2/B	3/C	4/D	5/E	6/None
\bar{I}	207.056	195.378	204.742	206.422	230.002	226.208
\bar{II}	197.594	204.326	205.804	222.628	225.840	223.050
\bar{III}	225.480	207.150	225.068	212.850	222.076	224.577
\bar{IV}	236.082	236.838	233.638	234.718	215.496	209.452
\bar{V}	241.576	264.096	238.536	231.170	214.374	224.196
\bar{R}	43.982	68.718	33.794	28.296	15.628	16.756

表 5 正交实验数据方差分析表

Table 5 Variance analysis of orthogonal experimental data

Source of variation	Sum of squares	Freedom	Variance	F-value	Critical value of F-test	Significance
Single pulse energy	7058.151	4	1764.538	7.515		*
Repetition rate	16164.423	4	4041.106	17.210		**
Air-blowing pressure	4887.327	4	1221.832	5.203	$F_{0.05,(4,4)} = 6.39$	
Rotation rate	2858.244	4	714.561	3.043	$F_{0.01,(4,4)} = 15.98$	
Rate of focus down	891.313	4	222.828	0.949		
Error	939.260	4	234.815			
Total	32798.718	24	1366.613			

在钻孔过程中,被蚀除的材料会在小孔上方形成由蒸气粒子及等离子体组成的粒子云团,对激光有折射、吸收作用,阻碍激光到达待加工材料表面,出现等离子体屏蔽现象^[20],如图 5 所示。在激光钻孔时,通过气嘴向加工区域喷射压缩气体,有助于吹去等离子云团以及沉积在孔内的熔渣。吹气压力越大,对粒子云团和熔渣的去除效果越好,越有利于材料对激光的吸收,因此吹气压力的大小对烧蚀深度也具有一定影响。

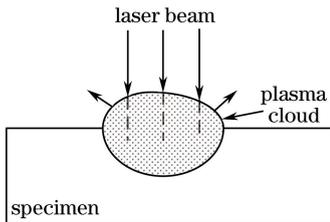


图 5 等离子体屏蔽现象

Fig. 5 Schematic of the plasma shielding phenomenon

旋转速率的改变会引起脉冲累积效应的改变,从而对烧蚀深度产生一定影响。但旋转速率的变化并不改变作用在材料上的脉冲数量与脉冲能量,且在螺旋钻孔中,激光焦点并非始终作用于一点,热累积效应^[8]被极大地减小,因此相比于重复频率、单脉冲能量以及吹气压力,旋转速率对烧蚀深度的影响

较小。

焦点下移速率与加工过程中的离焦量直接相关,且在现有的研究中发现离焦量对叩击加工的效率有一定影响^[21]。本研究中采用螺旋钻孔方式,以最大烧蚀深度作为孔深的测评表征量,激光焦点并非始终作用于一点处,且加工过程中孔的内部呈现出两侧和中心深、其余部分浅的特点,导致加工过程中离焦量具有时变波动特征。因此焦点下移速率不同时,孔底某一点的离焦量变化没有叩击加工时的明显,所以焦点下移速率对烧蚀深度的影响最小。

3.1.2 BP 神经网络建模

飞秒激光螺旋钻孔是一个复杂的非线性过程,难以建立一个严格的数学模型并用具体的数学表达式描述加工参数与烧蚀深度间的映射关系。而 BP 神经网络作为目前应用最广泛的神经网络模型之一,可实现任意非线性函数的映射,因此本研究基于 BP 神经网络对加工参数与烧蚀深度间映射关系进行了表征。

对于一个 3 层或 3 层以上的 BP 网络,只要隐层神经元数目足够多,该网络就能以任意精度逼近一个非线性函数^[12]。本研究采用 3 层神经网络结构,即一个输入层、一个隐层和一个输出层。根据正交实验,加工参数为单脉冲能量、重复频率、吹气压力、旋转速率、焦点下移速率 5 个参数,故输入层的

节点数为 5,以烧蚀深度作为考察指标,即输出层节点数为 1。在 BP 神经网络中,隐层节点数对神经网络的影响很大,当隐层节点数过少时,容易造成网络难以训练,容错性差;当隐层节点数过多时,又易出现“过拟合”现象,导致网络泛化能力降低。目前对于隐层节点数的确定尚未有统一的理论标准,往往基于经验公式并结合试错法确定隐层节点数。本研究根据输入层节点数小于或等于隐层节点数、隐层节点数小于或等于学习样本数减 1 这一经验^[22],将最大隐层节点数设为 24,最小隐层节点数设为 5。选用正切 S 型传递函数作为输入层到隐层的传递函数,选用线性传递函数作为隐层到输出层的传递函数,选用 Levenberg-Marquardt 优化算法作为网络训练函数,选用动量梯度下降算法作为网络学习函

数,并取初始学习速率为 0.01。为提高网络的泛化能力,将正交实验中的 25 组数据进行归一化处理^[23],转化为[0,1]区间的数后,对隐层节点数为 5 到 24 的 20 种网络进行训练,最终选定网络隐层节点数为 19,得到网络拓扑结构为 5-19-1。

针对训练好的网络,需对其预测能力进行测试以保证该网络能够准确表征加工参数与烧蚀深度间的映射关系。本研究额外进行了 5 组钻孔实验,并将 5 组实验的加工参数输入训练好的网络进行仿真,将仿真结果与实验结果进行对比。如表 6 所示,该神经网络对烧蚀深度预测的相对误差绝对值在 3%以内,说明建立的神经网络模型具有良好的泛化能力,可有效表征飞秒激光钻孔过程中的主要加工参数与材料烧蚀深度间的映射关系。

表 6 验证实验数据与网络仿真结果

Table 6 Verification experimental data and network simulation results

Serial number	Single pulse energy / μJ	Repetition rate /kHz	Air-blowing pressure / MPa	Rotation rate / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	Rate of focus down / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ablation depth / μm		Relative error /%
						Experimental value	Simulation value	
1	20	500	0.3	1050	0.010	240.91	235.48	-2.25
2	22	400	0.2	2400	0.015	278.19	276.51	-0.61
3	24	500	0.1	2400	0.020	248.38	250.22	0.74
4	26	400	0.3	1050	0.015	248.64	245.32	-1.34
5	28	200	0.4	600	0.010	182.18	184.35	1.19

3.2 焦点下移速率实验

将钻有成排小孔的试件放置于 VHX-1000 超景深三维显微镜下以观测小孔的成形演化过程,由于不同焦点下移速率下小孔演化规律基本相同,在此仅以焦点下移速率为 0 时所加工的小孔演化结果为例,分析螺旋钻孔过程中小孔的演化规律,而焦点下移速率对小孔成形过程的影响将在后文中进一步说明。如图 6 所示,在螺旋钻孔过程中,孔中心位置的材料烧蚀速率最快,且孔边缘处材料的烧蚀速率仅次于中心点处的材料烧蚀速率,导致两侧出现了环形结构。因此,小孔的演化过程规律为:激光作用于材料表面后,位于孔中心区域的材料烧蚀最快,孔中心点率先被打通,随着加工继续进行,孔边缘处的环形深度也不断增加,当两侧环形深度达到材料厚度时,孔内还未被加工的材料在重力作用下脱落,形成锥度较大的孔,激光继续进行螺旋扫描,将孔壁上的多余材料蚀除,孔的锥度逐渐减小,最后形成符合设计要求的通孔。

在上述过程中,有一部分材料并非直接被激光蚀除,而是类似于激光旋切打孔的方式,将待加工材

料从母体材料上剥离,如图 6 中 13 号孔到 14 号孔的演化过程。导致此现象的原因是激光加工存在一定的累积效应。激光光斑从孔的圆心开始沿螺旋轨迹按逆时针向外旋转,当转到所设定的轨迹最外圈后,按逆时针方向继续向内旋转,直到圆心。此过程视为螺旋扫描的一个周期,随后光斑又开始向外旋转,作周期性循环,直至孔被加工完成。

在一个周期内,位于孔边缘处的材料在较短的时间间隔内被激光照射两次,因此存在累积效应,第 N 个脉冲烧蚀时的烧蚀阈值 $F_{th}(N)$ 与单脉冲烧蚀时的烧蚀阈值 $F_{th}(1)$ 之间存在如下关系^[24]:

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^S, \quad (1)$$

式中: $F_{th}(1)$ 为单脉冲烧蚀时的烧蚀阈值; N 为脉冲数; S 为表征多脉冲效应的累积系数。

由(1)式可知,孔边缘处的材料会有更明显的累积效应,导致其烧蚀阈值降低,烧蚀速率变大,形成较深的环形烧蚀区域。由于靠近中心点处的螺旋轨迹半径小,中心点附近的螺旋轨迹多,即中心点附近作用的脉冲数多,材料吸收的激光能量高于其他区域,导致中心点处材料的烧蚀加快;且在前置周期未到后

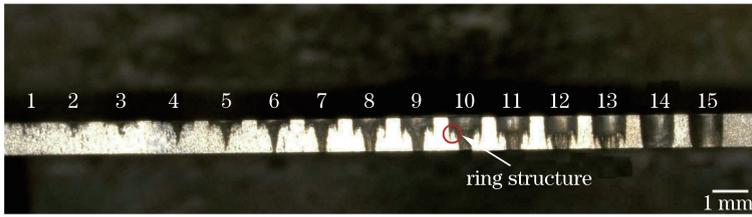


图 6 焦点下移速率为 0 时的小孔演化过程

Fig. 6 Hole evolution process with the focus down rate of 0

置周期初,光斑在较短时间间隔内烧蚀中心点处两次,累积效应明显,导致中心点处的烧蚀深度最大。

本研究将孔内两侧环形烧蚀区域的深度作为孔的烧蚀深度,并以此作为评价指标,观察在不同焦点下移速率情况下小孔烧蚀深度的变化过程,如图 7 所示。

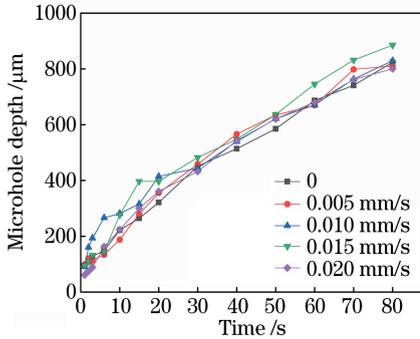


图 7 不同焦点下移速率下小孔深度随时间的变化

Fig. 7 Time-dependent change of microhole depth at different focus down rates

由于第 14 号孔和第 15 号孔的环形烧蚀区域被打通,因此取前 13 个孔的两侧环形深度进行分析。从图 7 中可以看出,在不同的焦点下移速率下,两侧环形深度均随加工时间的增加而增加,在整个过程中,焦点不下移和焦点下移速率为 0.020 mm/s 时的烧蚀速率最慢。将焦点下移速率按静止、中速、高速三个等级进行划分并进行对比,如图 8 和图 9 所示。由图 8 可看出,焦点不下移和焦点高速下移时的烧蚀深度曲线基本重合,且两条曲线都比较平滑,烧蚀深度斜率随着时间的增长呈减小趋势。图 9 中,三条曲线之间存在相互交错的现象,且均存在较明显的波动,但三种不同焦点下移速率情况下的烧蚀速率没有明显差异。

从图 7 中 5 条曲线的状态也可以看出,焦点下移速率对小孔烧蚀深度的影响较小,这与正交实验的结果一致。为了更好地了解焦点下移速率对小孔演化成形的影响,用 SUPRA 55 场发射扫描电子显微镜对不同焦点下移速率下所加工的 15 号孔的剖

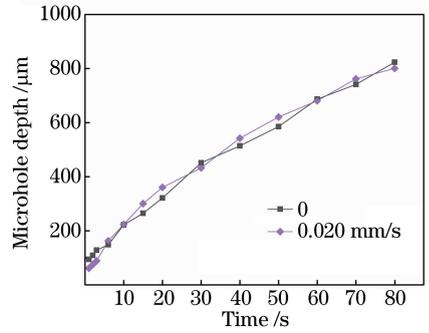


图 8 焦点不下移和焦点高速下移时的烧蚀深度曲线

Fig. 8 Comparison of the ablation depth curve of the focus with and without moving down at a high speed

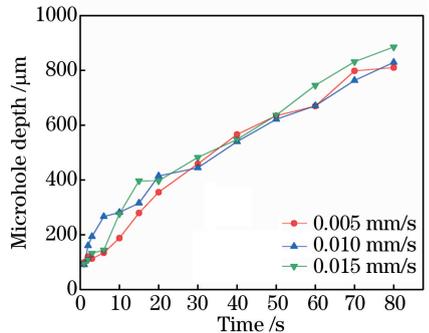


图 9 焦点以三种不同速率中速下移时的烧蚀深度曲线

Fig. 9 Comparison of the ablation depth curve of the focus moving down at three different medium rates

面进行观测,得到小孔形貌如图 10 所示。从图 10 中可以看出,加工 100 s 后,焦点下移速率为 0 和 0.020 mm/s 时所加工的小孔还有材料残留,而焦点下移速率为 0.005, 0.010, 0.015 mm/s 时所加工的小孔没有材料残留,小孔基本成形,且焦点下移速率为 0.010 mm/s 和 0.015 mm/s 时所加工的小孔锥度要好于 0.005 mm/s 时所加工的小孔锥度。15 号孔的电镜观测结果与前述 1~13 号孔的烧蚀深度变化结果一致,由此可得出结论:材料的烧蚀速率先随着焦点下移速率的增加而增加,当焦点下移速率超过某一临界值时,烧蚀速率开始随着焦

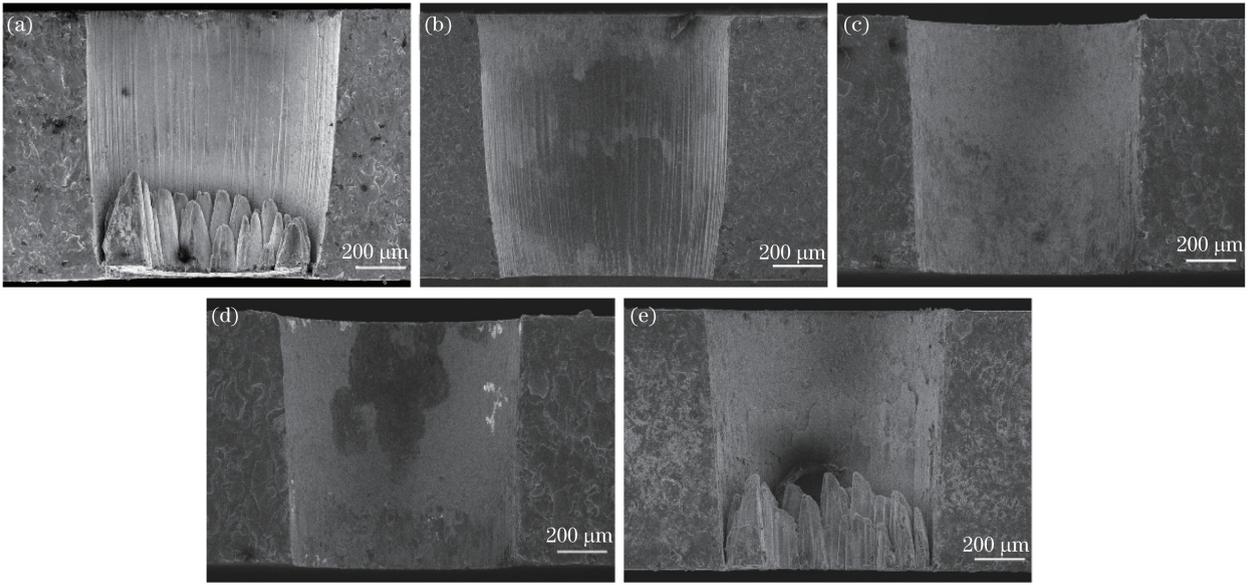


图 10 加工时间为 100 s 时,不同焦点下移速率下所加工小孔形貌的 SEM 图。焦点下移速率:

(a) 0; (b) 0.005 mm/s; (c) 0.01 mm/s; (d) 0.015 mm/s; (e) 0.02 mm/s

Fig. 10 SEM images of the machined holes in different focus down rates with the processing time of 100 s. Focus down rates:

(a) 0; (b) 0.005 mm/s; (c) 0.010 mm/s; (d) 0.015 mm/s; (e) 0.020 mm/s

点下移速率的增加而减小。此外,焦点下移速率还会对小孔锥度产生明显影响。

通过对该实验现象的分析得出:焦点不下移时,随着加工时间的增长,材料烧蚀深度不断增加,光斑与材料间出现正离焦,且离焦量不断增大。由于实验中所使用的飞秒激光为基模高斯光束,根据高斯光束的传输特性^[25],在焦平面处光斑面积最小,能量密度最高,远离焦平面处的光斑面积增大,能量密度减小,如图 11 所示,其中 I 为激光能量密度, z 方向为光束的传播方向, r 方向为光束径向,A-A,B-B,C-C 为光束传播方向上的三个不同截面。因此离焦量越大,激光作用在材料上的能量密度越小,导致烧蚀速率越低。当激光焦点高速下移时,下移速度大于材料烧蚀速度,导致焦点位于材料内部,产生负离焦,此时作用在孔底材料上的光斑面积大于焦斑

面积,烧蚀速率减小。当激光焦点中速下移时,下移速率接近材料的烧蚀速率,离焦量保持在一个较小的范围内,待加工材料表面在较长时间内被小面积光斑照射,能量密度大,因此烧蚀速率高于焦点不下移和焦点高速下移时的材料烧蚀速率。

随着孔深度不断增加,加工过程中产生的熔渣被排出孔外的难度加大,残留的熔渣会使部分激光产生反射并吸收部分激光能量,导致烧蚀速率下降。加工后期,由于孔被打通且出口孔径逐渐扩大,此时熔渣在气嘴射出的高压气体作用下被从孔底面吹出,对激光的反射和吸收作用减小,因此加工后期的烧蚀速率相对于中期有增加趋势。此外在对孔深的测量过程中发现,在材料拼接缝隙上加工成排小孔,由于难以保证缝隙上每一点处的空隙都相等,当在空隙较大的地方钻孔时,会发生漏光,导致出现烧蚀深度大幅增加的情况,对实验数据产生一定的影响。

4 结 论

通过飞秒激光螺旋钻孔实验,发现钻孔过程中小孔形貌演化规律可表述为:小孔中心点处率先被打通,两侧形成环形结构,当两侧环形结构被打通时,孔内剩余材料从母体材料剥离,形成锥度较大的通孔,激光光斑按螺旋轨迹继续扫描,最终将孔壁多余的材料蚀除,形成符合几何设计要求的通孔。在此过程中,5 个主要参数对烧蚀速率影响的主次顺

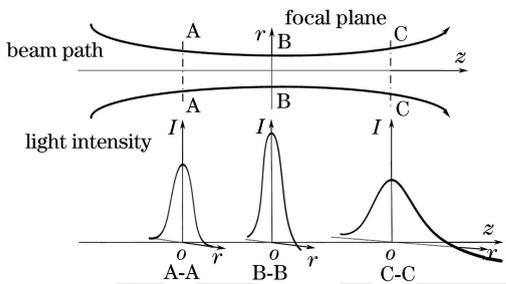


图 11 高斯光束传输特性及光强分布

Fig. 11 Transmission characteristics and light intensity distribution of the Gaussian beam

序为:重复频率、单脉冲能量、吹气压力、旋转速率、焦点下移速率。焦点下移速率作为螺旋钻孔工艺的特征参数,对小孔锥度有明显影响,对烧蚀速率的影响为:烧蚀速率先随焦点下移速率的增加而增加,当焦点下移速率达到某一临界值后,继续增加焦点下移速率将导致烧蚀速率下降。此外 BP 神经网络可以用于预测飞秒激光螺旋钻孔过程中烧蚀深度的变化,其对烧蚀深度预测的相对误差可达到 3%以内,因此在实际工程应用中,可利用 BP 神经网络预测激光钻孔效率,优化加工参数。以上工作对探索飞秒激光螺旋钻孔规律和提高实际生产效率具有重要的影响。

致谢 感谢福建科涵激光公司对本文部分工作提供设备支持,感谢刘华工程师和陈钜工程师对本文的撰写提供帮助。

参 考 文 献

- [1] Harzic R L, Huot N, Audouard E, *et al.* Comparison of heat-affected zones due to nanosecond and femtosecond laser pulses using transmission electronic microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(21): 3886-3888.
- [2] Kautek W, Krüger J, Lenzner M, *et al.* Laser ablation of dielectrics with pulse durations between 20 fs and 3 ps [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69 (21): 3146-3148.
- [3] Xia B, Jiang L, Wang S M, *et al.* Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0201001.
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.
- [4] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 654-662.
- [5] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, *et al.* Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 307-310.
- [6] Wang X C, Zheng H Y, Chu P L, *et al.* Femtosecond laser drilling of alumina ceramic substrates [J]. *Applied Physics A*, 2010, 101(2): 271-278.
- [7] Wang Y L. The research of technology for laser helical drilling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
王砚丽. 激光旋转打孔技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [8] Jiang J. Technical research of picosecond laser micro-drilling on metals [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
姜靖. 皮秒激光对金属材料微孔加工技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [9] Cao T T. Reserch of the hole drilling of K24 superalloy technology by femtosecond laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
曹婷婷. K24 高温合金飞秒激光孔加工技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [10] Lee H M, Choi J H, Moon S J. Determining the machining parameters for femtosecond laser helical drilling of aluminosilicate glass substrate [J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2017, 18(7): 923-930.
- [11] He C, Zibner F, Fornaroli C, *et al.* High-precision helical cutting using ultra-short laser pulses [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1066-1072.
- [12] Zhang Y, Gao X, Katayama S. Weld appearance prediction with BP neural network improved by genetic algorithm during disk laser welding [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2015, 34: 53-59.
- [13] 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.
- [14] Ding H, Li Y W, Yuan D. Roughness prediction of laser microporous based on BP artificial neural networks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011407.
丁华, 李炎蔚, 袁冬. BP 神经网络预测激光微孔表面粗糙度 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011407.
- [15] Kraus M, Ahmed M A, Michalowski A, *et al.* Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22305-22313.
- [16] Shin J, Mazumder J. Shallow angle drilling of inconel 718 using a helical laser drilling technique [J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2016, 139 (3): 031004.
- [17] Li F, Liu W W, Wang D F. Research on parameters optimization in milling of stainless steel based on Taguchi method [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2015, 51(6): 28-31.
李锋, 刘维伟, 王东方. 基于田口法的不锈钢铣削参数优化研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2015, 51(6): 28-31.
- [18] Ren N F, Zhang L, Wang H X, *et al.* Orthogonal

- experiments and variance analysis in Nd:YAG pulsed laser trepanning drilling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061408.
- 任乃飞, 张丽, 王后孝, 等. Nd:YAG 脉冲激光环切打孔正交实验及方差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061408.
- [19] Luo B Y, Ye Y C, Yao N, *et al.* Orthogonal test and variance analysis for sensitivity of factors influencing the width of fractured zone of strip pillar[J]. *Metal Mine*, 2016(11): 49-53.
- 罗斌玉, 叶义成, 姚团, 等. 条带矿柱破裂区宽度影响因素敏感性正交方差分析[J]. *金属矿山*, 2016(11): 49-53.
- [20] Gordienko V M, Zhvaniya I A, Khomenko A S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser[C]. *SPIE*, 2010, 7994: 79940P.
- [21] Wang G A, Zhang Y Z, Ni X W, *et al.* Effect of deviation distance to focal spot on nanosecond-pulsed-laser drilling rates in air [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(12): 1621-1624.
- 王广安, 章玉珠, 倪晓武, 等. 离焦量对空气中纳秒激光打孔效率的影响[J]. *中国激光*, 2007, 34(12): 1621-1624.
- [22] Deng Z Q. Study on the machining technology and neural network simulation of powder mixed EDM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- 邓宗庆. 混粉电火花加工工艺及神经网络仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [23] Liu X L. Study on data normalization in BP neural network[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2010(3): 122-123.
- 柳小桐. BP 神经网络输入层数据归一化研究[J]. *机械工程与自动化*, 2010(3): 122-123.
- [24] Wang W J. Study of shape and morphology control in femtosecond laser fabrication of metals [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- 王文君. 飞秒激光金属加工中的形状及形貌控制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
- [25] Akou H. Effect of various chirped frequency functions on Gaussian laser beam characteristics[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 131: 446-453.