

基于改进型控制变量法的脉冲激光打孔研究

李涛*, 夏凯波**, 任乃飞, 高福强, 张文, 田佳男, 范永胜

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 使用毫秒脉冲激光精密打孔系统, 在厚度为 2 mm 的镍基高温合金 GH4037 上进行通孔加工。针对传统控制变量法中通孔加工脉冲个数设定值过盈会造成诸多不利影响等问题, 利用穿透检测技术建立脉冲个数阈值的数学模型, 并使用基于此模型得到的改进型控制变量法研究了激光的离焦量、扩束比和脉冲重复频率对出入口孔径、锥度和打孔效率的影响。研究表明, 当离焦量为 $-2 \sim 0$ mm、扩束比为 $2 \sim 4$ 、重复频率为 $45 \sim 85$ Hz、辅助气体为氧气时能够得到较高的打孔效率, 与传统控制变量法相比, 打孔效率最高可提升 89.09%。

关键词 激光光学; 脉冲激光; 冲击打孔; 穿透检测; 改进型控制变量法

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191403

Study on Pulse Laser Drilling Based on Improved Parameter Control Method

Li Tao*, Xia Kaibo**, Ren Naifei, Gao Fuqiang, Zhang Wen, Tian Jianan, Fan Yongsheng

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract Via-hole processing was carried out in the 2 mm thick nickel-base superalloy GH4037 by the millisecond pulse laser precision drilling system. In order to solve the problem that the overflow of the set number of via-hole machining laser pulses in the traditional control variable method might cause many adverse effects, the mathematical model of the threshold number of laser pulses was established by the penetration detection technology. The influence of the defocusing amount, the beam expanding ratio and the pulse repetition frequency of the laser on the inlet and outlet aperture, the taper and the drilling efficiency was studied by the improved control variable method based on the mathematical model. The results indicated that when the defocusing amount was -2 mm to 0 mm, the beam expanding ratio was 2 to 4 , the repetition frequency was 45 Hz to 85 Hz, and the auxiliary gas was oxygen, the drilling efficiency could be improved by 89.09% compared with the traditional control variable method.

Key words laser optics; pulse laser; percussion drilling; penetration detection; improved parameter control method

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 160.3900

1 引言

高温合金因具有优异的高温强度、疲劳性能、断裂韧性、良好的抗氧化和抗热腐蚀性等综合性能, 而被广泛用于航空发动机涡轮叶片上^[1-6]。实际工作中, 涡轮叶片承受着燃烧后的高温高压燃气冲击, 工作环境温度可超过高温合金材料的熔点, 为此, 必须进行连续不断的冷却^[7-8]。目前, 气膜冷却技术因其冷却能力强, 可大大提高发动机性能, 而成为了航空

航天领域主流的冷却技术。然而, 涡轮叶片型面空间角度复杂, 为保证冷却性能, 还需在其上精确加工大量的气膜孔, 因此气膜孔的加工制造成为涡轮叶片制造的关键技术之一^[9-13]。当前, 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔的加工一般采用电火花加工、电液束加工、激光加工三种方式。其中, 激光打孔因效率高、精度高、无机械应力及无工具损耗而被认为是最合适的航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔的加工方法^[14-16]。

近年来针对高温合金的激光打孔的研究较多,

收稿日期: 2019-12-17; 修回日期: 2020-02-06; 录用日期: 2020-02-24

基金项目: 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX17-1763)

* E-mail: 17315763228@163.com; ** E-mail: xiakaibowu@126.com

由于影响打孔质量的因素众多,因此大多数采用控制变量法研究工艺参数对微孔质量的影响。黄建伟等^[17]采用控制变量法研究了激光输出功率、脉冲频率、辅助气体等对激光打孔孔径的影响;王广安等^[18]采用控制变量法研究了离焦量对空气中纳秒激光打孔效率的影响;Silvennoinen 等^[19]采用控制变量法研究了不同脉冲能量和脉冲个数对水下和空气中激光打孔的影响;Yan 等^[20]采用控制变量法研究了激光峰值功率、脉冲占空比、脉冲重复频率对厚氧化铝板材激光打孔孔径的影响。但是控制变量法通常将脉冲个数设定为一个定值,并没有考虑形成通孔后后续脉冲激光对打孔质量的影响。事实上,脉冲个数对通孔是否恰好形成有直接影响,因此该阈值必须首先给定,然后再进行各种因素对制孔质量的影响规律研究,此即为改进型控制变量法,目前这方面的研究尚不多见。

因此,本文选择高温合金 GH4037 作为实验材料,利用穿透检测得到改进型控制变量法,并建立了脉冲个数阈值的数学模型,利用此模型和改进型控制变量法进行Nd:YAG脉冲激光打孔实验研究,分析离焦量、

扩束比、脉冲重复频率对通孔出入口直径和锥度的影响,并与传统控制变量法就打孔效率进行比较。

2 实验

2.1 实验设备与材料

本实验所使用的毫秒脉冲激光精密打孔系统结构示意图如图 1 所示,该系统主要由毫秒脉冲 Nd:YAG 激光器、光学系统以及定位系统组成。

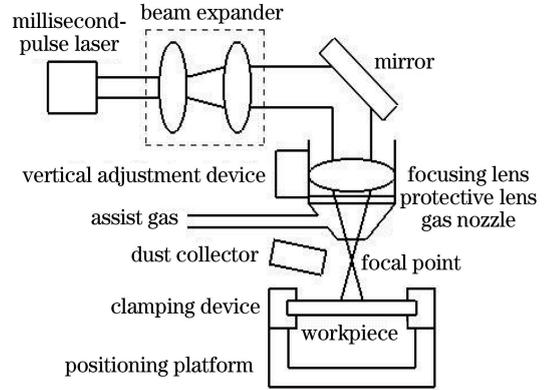


图 1 毫秒脉冲激光打孔系统示意图

Fig. 1 Schematic of millisecond pulse laser drilling system

本文选取 2 mm 厚 GH4037 板材作为实验材料,化学成分如表 1 所示。

表 1 镍基高温合金 GH4037 的化学成分

Table 1 Chemical composition of nickel-based superalloy GH4037

Composition	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	V
Mass fraction /%	0.03-0.1	13-16	Allowance	5-7	2-4	1.7-2.3	1.8-2.3	0.1-0.5
Composition	Fe	B	Ce	Mn	Si	P	S	Cu
Mass fraction /%	≤5	≤0.02	≤0.02	≤0.5	≤0.4	≤0.015	≤0.01	≤0.07

实验结束后,采用 KEYENCE VK-X250 激光共聚焦显微镜观测微孔的质量(上下孔径、孔口堆积物、截面等),测量入口直径、出口直径以及计算通孔锥度的理论值,锥度的理论值是将通孔视为圆锥形通过计算得到的(实验结束后对通孔进行剖切,通孔实际锥度与理论值近似),如图 2 所示, β 为孔的锥度, d_1 为上孔径尺寸, d_2 为下孔径尺寸, h 为孔深。公式表示为

$$\beta = \arctan\left(\frac{d_1 - d_2}{2h}\right). \quad (1)$$

2.2 实验方法

2.2.1 穿透检测

在激光打通孔的过程中,研究将材料打通的脉冲个数阈值十分重要。图 3 为穿透检测原理示意图。如图 3(a)所示,利用内置于光学系统中的光强度传感器来测量打孔过程中材料表面的反射光强

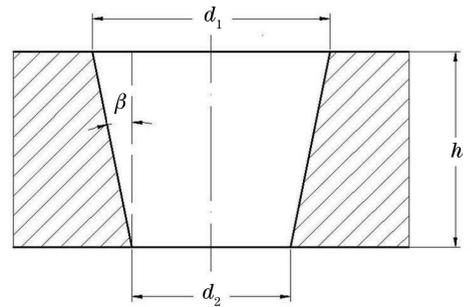


图 2 通孔锥度的计算

Fig. 2 Calculation of via-hole taper

度,通过反射光强度的变化来判断材料是否被打通。如图 3(b)所示,打孔开始的时间点为 t_0 ,材料被打通前,大量的光向上反射,反射光强度高;材料被打通的时间点为 t_1 ,此后材料被打通,向上反射的光急剧减少并趋于平稳,反射光强度低。通过 t_1 与 t_0 相减得到激光打通孔所需时间 t ,进一步结合实验

中所使用的脉冲重复频率 f 即可求得激光打通孔所需脉冲个数阈值 N 。脉冲个数阈值的计算公式为

$$N = (t_1 - t_0) \cdot f \quad (2)$$

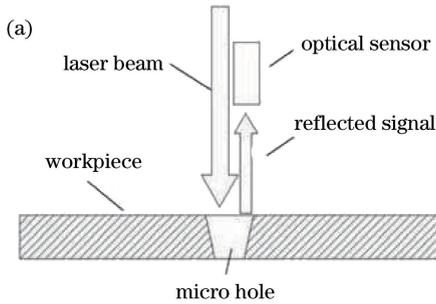


图3 穿透检测原理示意图。(a)检测装置示意图;(b)脉冲信号示意图

根据脉冲个数阈值大小可以判断打孔效率的高低。脉冲个数阈值越大,表示材料越难被打通,打孔效率越低;脉冲个数阈值越小,表示材料越容易被打通,打孔效率越高。

Fig. 3 Schematic of penetration detection principle. (a) Schematic of detection device; (b) schematic of pulse signal

2.2.2 改进型控制变量法

研究不同因素对激光打通孔锥度的影响时,必须保证通孔是在脉冲激光作用完恰好形成的,否则通孔形成后,后续脉冲对孔的锥度将造成影响,约有90%的功率被孔壁吸收,增加热影响^[17],且打孔效率也会降低。因此,利用脉冲个数阈值对控制变量

法进行改进,得到了专门为激光打通孔实验设计的改进型控制变量法。以研究离焦量对激光打通孔的影响为例,当其他参数不变时,研究离焦量变化对激光打通孔影响的改进型控制变量法,如表2所示。表2中, $N_1 \sim N_7$ 是与不同离焦量相对应的脉冲个数阈值(由穿透检测获得)。

表2 改进型控制变量法

Table 2 Improved control variable method

Defocusing amount /mm	-2.8	-1.8	-0.8	0	0.8	1.8	2.8
Threshold of pulse number	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7

结合穿透检测实验结果,设置实验参数。结合穿透检测获得的脉冲个数阈值,绘制不同离焦量、扩束比和脉冲重复频率下脉冲个数阈值曲线,并对曲线进行拟合,得到改进型控制变量法数学模型,为实验参数的选取提供初步的参考,进一步提高实验效率。不同离焦量下,脉冲个数阈值的选取模型表示为

$$N = 2.34x^2 + 5.05x + 9.88, \quad (3)$$

式中: N 为脉冲个数阈值; x 为离焦量。 x 的选择范围为-2.8~2.8 mm,适用条件如下:脉冲能量为1.2 J,脉冲宽度为0.8 ms,脉冲重复频率为65 Hz,辅助气体压力为0.2 MPa,扩束比为4,辅助气体为氧气。

不同扩束比下,脉冲个数阈值的选取模型表示为

$$N = 0.09y^3 + 0.6y^2 - 9.21y + 28.8, \quad (4)$$

式中: y 为扩束比。 y 的选择范围为1~5.8,适用条件如下:脉冲能量为1.2 J,脉冲宽度为0.8 ms,脉冲重复频率为65 Hz,离焦量为0 mm,辅助气体压力为0.2 MPa,辅助气体为氧气。

不同脉冲重复频率下,脉冲个数阈值的选取模

型表示为

$$N = 3.69 \times 10^{-4} z^3 - 0.06z^2 + 2.19z + 2.28, \quad (5)$$

式中: z 为脉冲重复频率。 z 的选择范围为15~100 Hz,适用条件如下:脉冲能量为1.2 J,脉冲宽度为0.8 ms,离焦量为0 mm,辅助气体气压为0.2 MPa,扩束比为4,辅助气体为氧气。

3 结果与分析

3.1 离焦量对打通孔的影响

使用脉冲能量为1.2 J,脉冲宽度为0.8 ms,脉冲重复频率为65 Hz,辅助气体压力为0.2 MPa,扩束比为4,辅助气体为氧气,只改变离焦量(离焦量分别为-2.8,-1.8,-0.8,0,0.8,1.8,2.8 mm)。

图4和图5分别是不同离焦量条件下通孔出入口直径的变化曲线和脉冲个数阈值的变化曲线。如图4所示,入口直径随着离焦量的增加,先变小后变大;出口直径随着离焦量的增加,逐渐变大。当离焦量为0时,入口直径最小,这是因为激光焦点位于材料上表面且光斑最小。离焦量的绝对值越大,入口

直径越大,且基本呈对称分布,这是因为当离焦量的绝对值相同时,照射在材料上表面的光斑大小和能量密度是相同的。这说明了入口直径主要是由材料上表面的光斑大小和能量密度决定。而出口直径在靠近离焦量为 0 mm 时最小,焦点此时正好作用于下表面的位置,光斑最小且能量密度最高。当焦点作用位置远离下表面,出口直径变大。这说明了出口直径主要是由作用于材料下表面的能量密度决定。

如图5所示,脉冲个数阈值随着离焦量的增加,

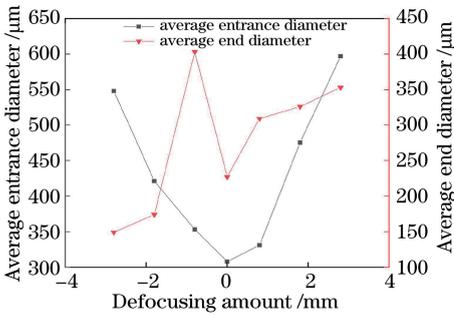


图4 离焦量对通孔入口、出口直径的影响

Fig. 4 Influence of defocusing amount on entrance and end diameters of via-hole

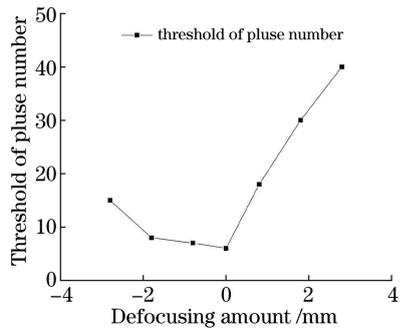


图5 离焦量对通孔脉冲个数阈值的影响

Fig. 5 Influence of defocusing amount on threshold of pulse number

先由大变小,再由小变大。当离焦量为 0 时,脉冲个数阈值最小,打孔效率最高;当离焦量为 2.8 mm 时,脉冲个数阈值最大,打孔效率最低。

图6是不同离焦量条件下通孔的截面图和通孔锥度的变化曲线。如图6(h)所示,当离焦量为 -0.8 mm 和 0.8 mm 时,孔锥度较小,随着离焦量绝对值的增加孔锥度随之变大。孔的截面图按离焦量由小变大排列,将其与通孔锥度的变化曲线进行比较,可以得出,理论计算的通孔锥度变化规律与实际加工的通孔锥度变化规律基本一致。

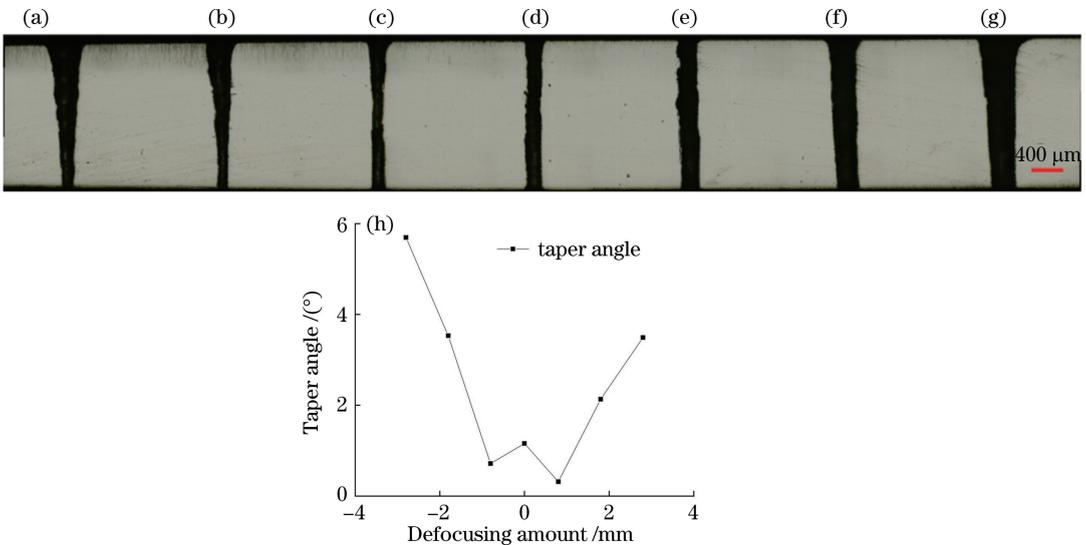


图6 不同离焦量下通孔截面图和通孔锥度变化图。(a) -2.8 mm;(b) -1.8 mm;(c) 0.8 mm;(d) 0 mm;(e) 0.8 mm;(f) 1.8 mm;(g) 2.8 mm;(h)通孔锥度变化图

Fig. 6 Cross sections and taper a change of via-hole drilled under different defocusing amounts. (a) -2.8 mm; (b) -1.8 mm; (c) 0.8 mm; (d) 0 mm; (e) 0.8 mm; (f) 1.8 mm; (g) 2.8 mm; (h) taper change of via-hole

3.2 扩束比对打孔的影响

使用脉冲能量为 1.2 J,脉冲宽度为 0.8 ms,脉冲重复频率为 65 Hz,离焦量为 0 mm,辅助气体压力为 0.2 MPa,辅助气体为氧气,只改变扩束比(扩束比分别为 1、1.8、2.8、3.8、4.8、5.8)。图7为扩束比原理

图,可以看出,图7(a)的扩束比大于图7(b)。扩束比越大,焦点光斑直径越小,焦深越短。

图8和图9分别是不同离焦量条件下通孔入口直径的变化曲线和脉冲个数阈值的变化曲线。如图8所示,入口直径由大变小后趋于不变。理论上,

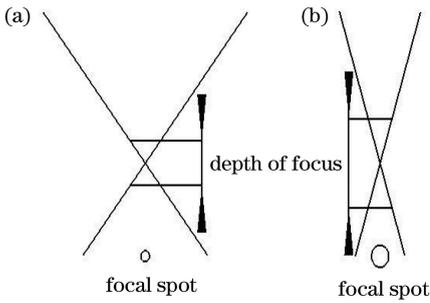


图 7 扩束比原理图

Fig. 7 Schematic of beam expansion ratio

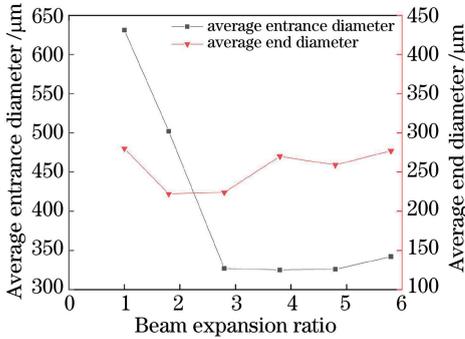


图 8 扩束比对通孔入口、出口直径的影响

Fig. 8 Influence of beam expanding ratio on entrance and end diameters of via-hole

扩束比越大,材料上表面的焦点光斑越小,入口直径应该越小。而本实验的结果是入口直径在扩束比为3~6倍时趋于不变,这是氧气的助燃效应造成的。扩束比越大,虽然聚焦在材料表面的光斑尺寸越小,但光斑的能量密度越高,在氧气的助燃作用下,能量

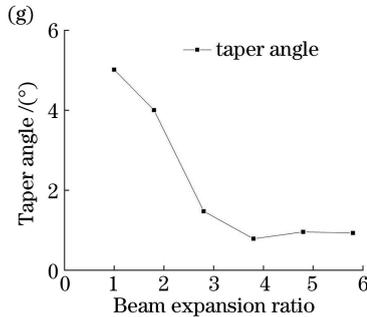
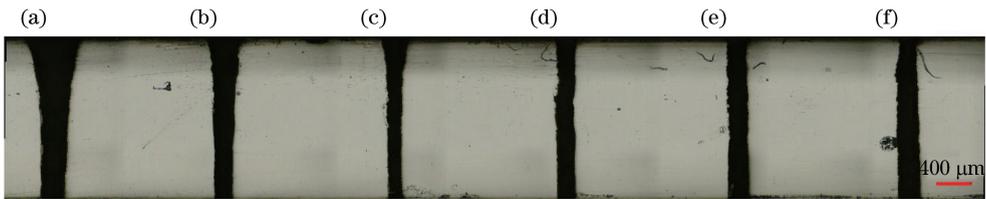


图 10 不同扩束比下通孔截面图和通孔锥度变化图。(a) 1; (b) 1.8; (c) 2.8; (d) 3.8; (e) 4.8; (f) 5.8; (g) 通孔锥度变化图

Fig. 10 Cross sections and taper change of via-hole drilled under different beam expanding ratios.

(a) 1; (b) 1.8; (c) 2.8; (d) 3.8; (e) 4.8; (f) 5.8; (g) taper change of via-hole

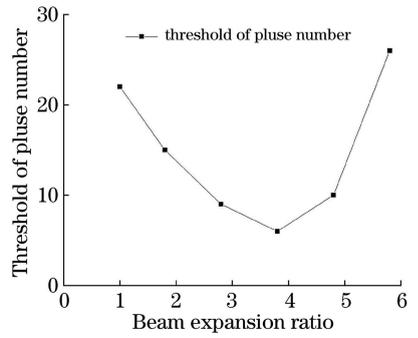


图 9 扩束比对通孔脉冲个数阈值的影响

Fig. 9 Influence of beam expanding ratio on threshold of pulse number

横向传播,使入口直径变大。而出口直径的变化规律并不明显,但总体呈上升趋势,这是由于扩束比越大,作用于下表面的光斑直径越大,导致出口孔径变大。

如图 9 所示,脉冲个数阈值随扩束比的增加,先由大变小,再由小变大。当扩束比为 4 时,脉冲个数阈值最小,此时打孔效率最高;当扩束比为 6 时,脉冲个数阈值最大,此时打孔效率最低。当扩束比为 6 时,焦点光斑半径是最小的,能量密度也是最高的,但加工效率最低。其原因在于,扩束比越大,焦深越小,激光聚焦后发散越快,导致激光难以将较厚的材料打通。

图 10 为不同扩束比条件下通孔的截面图和通孔锥度的变化曲线。如图 10(g) 所示,锥度随扩束比的增加,先由大变小,再由小变大。当扩束比为 4 时,孔的锥度最小;当扩束比为 1 时,孔的锥度最大。

通孔的截面图按扩束比由小变大排列,将其与通孔锥度的变化曲线进行比较,可以得出,通过理论计算的通孔锥度变化规律与实际加工的通孔锥度变化规律基本上是一致的。

为了证明实验结果中入口直径在扩束比为 3~6 倍时趋于不变,是由氧气的助燃效应造成的,并准确得到不同扩束比条件下通孔锥度的变化规律,本文进一步使用氩气作为辅助气体在相同的参数下进行了打孔,实验结果如图 11 所示。使用氩气作为辅助气体时,入口直径随扩束比的增大而变小,说明了入口直径主要是由材料上表面的光斑大小和能量密度决定。与氩气中打孔相比,氧气的助燃效果是显著的,使用氧气作为辅助气体能够极大地提高打孔效率。且通孔锥度随扩束比的增大而减小,这主要是由于使用氩气作为辅助气体时,避免了氧气的助燃效应,入口直径随扩束比的增大而变小。

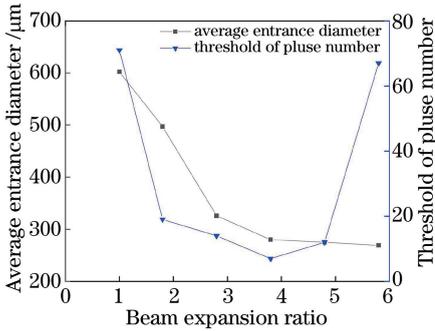


图 11 氩气中打孔的实验结果

Fig. 11 Experimental results of drilling holes in argon

3.3 重复频率对打通孔的影响

脉冲重复频率指的是多脉冲打孔过程中脉冲之间时间间隔的倒数,研究脉冲重复频率对打通孔的影响,实质上是研究脉冲之间时间间隔对激光打通孔的影响。使用脉冲能量为 1.2 J,脉冲宽度为 0.8 ms,离焦量为 0 mm,辅助气体气压为 0.2 MPa,扩束比为 4,辅助气体为氧气,只改变脉冲重复频率(脉冲重复频率分别为 15, 25, 35, 45, 65, 85, 100 Hz)。

图 12 和图 13 分别是不同脉冲重复频率条件下通孔出入口直径的变化曲线和脉冲个数阈值的变化曲线。如图 12 所示,入口直径随脉冲重复频率的增加先变小后变大,这是因为频率较低时,脉冲时间间隔较大,材料较难打通,因而在通孔形成前有较多的脉冲作用于上表面,作用在上表面的总能量变大,导致入口直径较大;当脉冲重复频率增加到一定值时,由于频率较高,单位时间内作用于上表面的脉冲个

数增加,总能量增加,单位时间内能量增加,导致入口直径变大。出口直径随脉冲重复频率的增加主要呈变大趋势,这是由于脉冲重复频率增加,单位时间内作用在孔内的能量越高,导致出口直径变大。

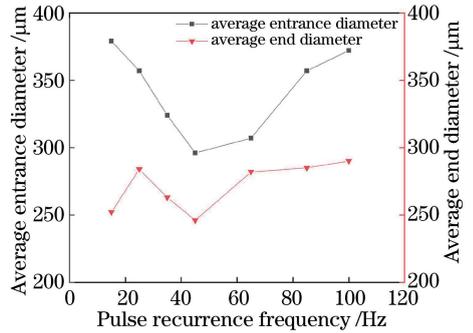


图 12 脉冲重复频率对通孔入口、出口直径的影响

Fig. 12 Influence of pulse repetition frequency on entrance and end diameters of via-hole

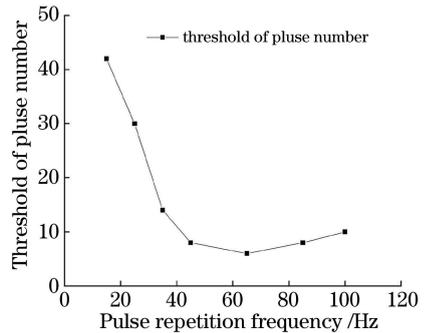


图 13 脉冲重复频率对脉冲个数阈值的影响

Fig. 13 Influence of pulse repetition frequency on threshold of pulse number

如图 13 所示,脉冲个数阈值随着脉冲重复频率的增加是先由大变小,再由小变大的,并且在重复频率为 65 Hz 时脉冲个数阈值最小。这是因为脉冲重复频率较小时,脉冲之间的时间间隔很大,冷却时间过长造成大量的能量耗散,从而难以将材料打穿;当脉冲重复频率较大时,脉冲之间的时间间隔很小,前一个脉冲加热熔化的材料还没来得及从孔口喷出,下一个脉冲就已经施加到了材料上,这样反而会降低打孔效率。

图 14 是不同脉冲重复频率条件下通孔的截面图和通孔锥度的变化曲线。如图 14(h)所示,锥度随脉冲重复频率的增加先变小后变大,在脉冲频率为 65 Hz 时,孔的锥度最小。通孔的截面图按脉冲重复频率由小变大排列,将其与通孔锥度的变化曲线进行比较,可以得出,通过理论计算的通孔锥度变化规律与实际加工的通孔锥度变化规律基本上是一致的。

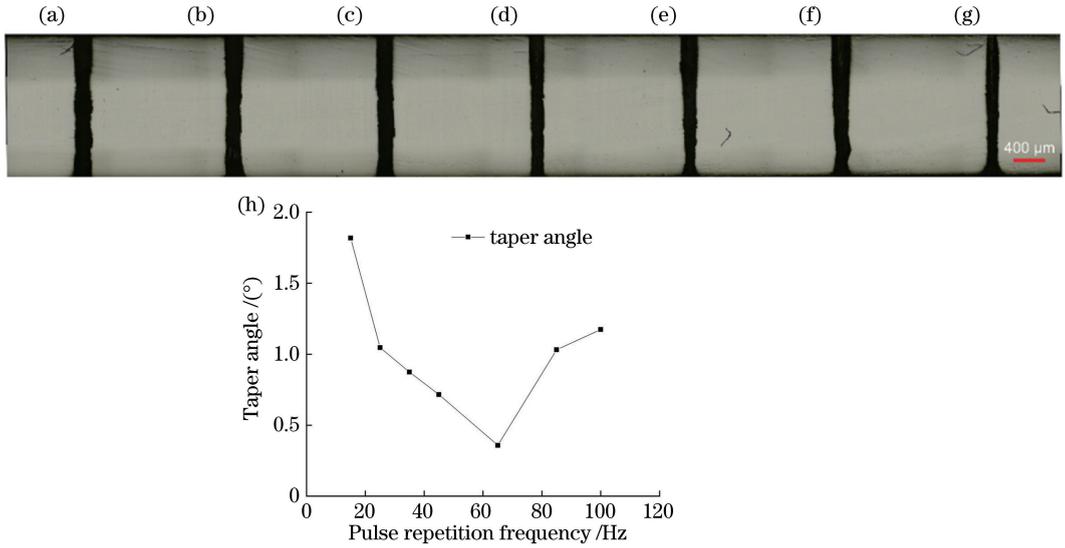


图 14 不同脉冲重复频率下通孔截面图和通孔锥度变化图。(a) 15 Hz; (b) 25 Hz; (c) 35 Hz; (d) 45 Hz; (e) 65 Hz; (f) 85 Hz; (g) 100 Hz; (h)通孔锥度变化图

Fig. 14 Cross sections and taper change of via-hole drilled under different pulse repetition frequencies.

(a) 15 Hz; (b) 25 Hz; (c) 35 Hz; (d) 45 Hz; (e) 65 Hz; (f) 85 Hz; (g) 100 Hz; (h) taper change of via-hole

3.4 改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率比较分析

在传统控制变量法中,研究不同参数对打孔影响时,其他参数常常保持不变,因此在研究离焦量、扩束比和脉冲重复频率对激光打通孔的影响时,脉冲个数设定为一个定值,且确保每组参数下孔都能打通。通过穿透检测实验可知,确保每组参数下孔都能打通的脉冲个数定值至少为 N_t 。因此,以脉冲个数 N_t 为例,对改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率进行比较分析。利用如下公式可以求得改进型控制变量法相对于传统控制变量法打孔效率提高的比率 R 。

$$R = \frac{N_t - N_i}{N_t} \times 100\%, \quad (6)$$

表 3 不同离焦量下改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率对比

Table 3 Comparison of drilling efficiency between improved control variable method and traditional control variable method under different defocusing amounts

Item	Defocusing amount /mm						
	-2.8	-1.8	-0.8	0	0.8	1.8	2.8
N_i	15	8	7	6	18	30	40
N_t	50	50	50	50	50	50	50
$R / \%$	70	84	86	88	64	40	20

4 结 论

使用改进型控制变量法对 2 mm 镍基高温合金 GH4037 板毫秒脉冲激光打孔。研究表明,当

式中: N_i 为改进型控制变量法中的脉冲个数阈值; N_t 为传统控制变量法中的脉冲个数。

不同离焦量、扩束比和脉冲重复频率下改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率对比分析结果如表 3~5 所示。可以发现,当激光脉冲个数是阈值时,即使是正离焦、扩束大、重复频率低,打孔效率也可以提高 20%~40%。当离焦量向 0 变化时,打孔效率逐步提高,并在离焦量为 0 时,其效率提高可达 88%;当扩束比逐渐增大时,打孔效率提高先增大再减小,在扩束比为 3 时,打孔效率提高最明显可达 80%;当重复频率逐渐增大时,打孔效率提高先增大再减小,并在重复频率为 65 Hz 时,其效率提高可达 89.09%。当激光脉冲个数不是阈值时,即使是在负离焦、扩束小、重复频率高的情况下,其加工效率也仅为阈值时的 20%。

离焦量为 -2~0 mm、扩束比为 2~4、重复频率为 45~85 Hz、辅助气体为氧气时,能够得到较高的打孔效率,与传统控制变量法相比,效率提高可达到 89.09%。

表4 不同扩束比下改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率对比

Table 4 Comparison of drilling efficiency between improved control variable method and traditional control variable method under different beam expanding ratios

Item	Beam expanding ratio					
	1	1.8	2.8	3.8	4.8	5.8
N_i	21	15	9	6	10	25
N_r	30	30	30	30	30	30
$R / \%$	30.00	50.00	70.00	80.00	66.67	16.67

表5 不同脉冲重复频率下改进型控制变量法与传统控制变量法打孔效率对比

Table 5 Comparison of drilling efficiency between improved control variable method and traditional control variable method under different pulse repetition frequencies

Item	Pulse repetition frequency /Hz						
	15	28	35	45	65	85	100
N_i	41	30	15	9	6	9	11
N_r	55	55	55	55	55	55	55
$R / \%$	25.45	45.45	72.73	83.64	89.09	83.64	80.00

参 考 文 献

- [1] Zhao S B. Rupture failure analysis of GH4037 stage I turbo blade [J]. Failure Analysis and Prevention, 2007, 2(4): 31-34.

赵四辈. GH4037 合金 I 级涡轮叶片断裂失效分析 [J]. 失效分析与预防, 2007, 2(4): 31-34.

- [2] Guo W Y, Wang M C, Zhang X B. Recast layer formed by laser drilling of Ni-based superalloys and progress on its control [J]. Laser Journal, 2003(4): 1-3.

郭文渊, 王茂才, 张晓兵. 镍基超合金激光打孔再铸层及其控制研究进展 [J]. 激光杂志, 2003(4): 1-3.

- [3] Luo Y, Pang S Y, Zhou J X, et al. Numerical simulation of recast layer formation in nanosecond pulse laser drilling on nickel-based high-temperature alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0403007.

罗垚, 庞盛永, 周建新, 等. 镍基高温合金纳秒激光脉冲制孔再铸层形成过程数值模拟 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403007.

- [4] 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.

- [5] Mishra S, Yadava V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of nickel-based superalloy sheet using Nd: YAG laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(6): 681-695.

- [6] Fan Z J, Dong X, Wang K D, et al. Effect of drilling allowance on TBC delamination, spatter and remelted cracks characteristics in laser drilling of TBC

coated superalloys [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 106: 1-10.

- [7] Zhu H N, Qi X X. Development of machining technology gas holes on turbine blades [J]. Aeronautical Manufacturing Gechnology, 2011(13): 71-74.

朱海南, 齐歆霞. 涡轮叶片气膜孔加工技术及其发展 [J]. 航空制造技术, 2011(13): 71-74.

- [8] Rong L R. The laser microhol processing technology and its applications in space navigation field [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(6): 30-33.

荣烈润. 激光微细孔加工技术及其在航空航天领域中的应用 [J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(6): 30-33.

- [9] Yan X G, Gao W B, Yang S Q, et al. Effect of laser pulse and workpiece parameters on microhole quality in laser drilling [J]. Applied Laser, 1994, 14(3): 127-130.

晏绪光, 高文斌, 杨水其, 等. 激光脉冲和工件参数对激光微孔加工质量的影响 [J]. 应用激光, 1994, 14(3): 127-130.

- [10] Chu Q C, Yu G, Lu G Q, et al. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603001.

褚庆臣, 虞钢, 卢国权, 等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603001.

- [11] Liu X Q. Comparative study of quality for conventional machining and laser processing holes [J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(10): 125-127.

- 刘秀清. 传统机械加工与激光加工通孔质量的比较研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(10): 125-127.
- [12] Zang Y N, Ni X W, Chen Y B. Simulation of long pulsed laser drilling on metal based on birth and death method of ANSYS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(6): 0603005.
臧彦楠, 倪晓武, 陈彦北. 基于 ANSYS 生死单元法的长脉冲激光金属打孔仿真[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0603005.
- [13] Zhang T Z, Zhang C, Li J, et al. Formation mechanism of recast layer in millisecond laser drilling of Ti6Al4V alloys[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0214001.
张廷忠, 张冲, 李晋, 等. Ti6Al4V 合金毫秒激光打孔重铸层的形成机制[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0214001.
- [14] Duan W Q, Wang K D, Dong X, et al. Study on machining of high-quality micro-holes by laser trepan drilling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 95-103,112.
段文强, 王恪典, 董霞, 等. 激光旋切法加工高质量微小孔工艺与理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 95-103,112.
- [15] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Laser-beam helical drilling of high quality micro holes[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 661-669.
- [16] Wlodarczyk K L, Brunton A, Rumsby P, et al. Picosecond laser cutting and drilling of thin flex glass[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 64-74.
- [17] Huang J W, Song A P, Zhang L F. Micro-deep holes laser processing method and its application[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(4): 102-104.
黄建伟, 宋爱平, 张礼峰. 微深孔激光加工方法及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2011(4): 102-104.
- [18] 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): 6121-1624.
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): 6121-1624.
- [19] Silvennoinen M, Kaakkunen J J J, Paivasaari K, et al. Water spray assisted ultrashort laser pulse ablation[J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 865-869.
- [20] Yan Y Z, Ji L F, Bao Y, et al. An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick-section alumina[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6): 1257-1270.