

# Nd:YAG 脉冲激光环切打孔正交实验及方差分析

任乃飞, 张丽\*, 王后孝, 夏凯波, 石春辉

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用四因素四水平的田口正交阵列法,在厚度为 3 mm 的高温合金上进行了 Nd:YAG 激光脉冲环切打孔实验,分析了脉冲能量、离焦量、环切圈数及环切速度对小孔锥度和圆度的影响,并对工艺参数进行了优化,得到了最小的微孔锥度和较好的微孔圆度。结果表明,激光环切打孔时,脉冲能量、离焦量、环切圈数和环切速度对微孔圆度影响不大,但离焦量对微孔锥度影响最大;得到最小孔锥度所用的最佳工艺参数组合为:环切圈数 6,环切速度 6 mm/min,脉冲能量 1.5 J,离焦量 -0.5 mm;孔出口处的圆度比孔入口处的圆度好。

**关键词** 激光技术; 激光环切打孔; 田口正交阵列法; 孔锥度; 孔圆度; 高温合金

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.061408

## Orthogonal Experiments and Variance Analysis in Nd:YAG Pulsed Laser Trepanning Drilling

Ren Naifei, Zhang Li, Wang Houxiao, Xia Kaibo, Shi Chunhui

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

**Abstract** The Taguchi's orthogonal array method with four factors and four levels is used to carry out the experimental investigation of the Nd:YAG pulsed laser trepanning drilling of the superalloys with the thickness of 3 mm. The influences of pulse energy, defocusing amount, number of trepanning and trepanning speed on hole taper and hole circularity are analyzed. The laser processing parameters are also optimized and the minimum microhole taper and the relatively better microhole circularity are obtained. The results show that the influences of pulse energy, defocusing amount, number of trepanning, and trepanning speed on microhole circularity are not significant during the laser trepanning drilling process, while the influence of defocusing amount on microhole taper is the most. Moreover, the minimum microhole taper is obtained when using the optimal laser processing parameters as the number of trepanning of 6, trepanning speed of 6 mm/min, pulse energy of 1.5 J, and defocusing amount of -0.5 mm. In addition, the hole circularity at exit is better than that at entry.

**Key words** laser technique; laser trepanning drilling; Taguchi's orthogonal array method; hole taper; hole circularity; superalloy

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900

## 1 引言

激光作为热源在材料上打孔时,材料会产生熔化或汽化,并伴随固态颗粒喷出。随着分裂物向外喷射,汽化以恒定速度在材料内部发生,材料以汽化的形式被去除,小孔被逐渐加深。分裂物随着小孔深度和直径的增加相继被蒸汽带走,最后形成深孔<sup>[1-2]</sup>。相对于传统的机械钻孔方式,激光打孔具有效率高、速度快、成本低、应用范围广泛,且几乎不受材料限制,清洁无污染等优点,适用于密度高、数量多的群孔加工,该技术目

**收稿日期:** 2017-01-10; **收到修改稿日期:** 2017-02-22

**基金项目:** 国家 973 计划(2011CB013004)、江苏省自然科学基金(BK20161348)、江苏省高校自然科学基金项目(11KJA460003,15KJD460002)、江苏省科技支撑计划(工业)(BE2015037)、江苏省高校优势学科建设工程(1033000005)、江苏省“六大人才高峰”项目(2013-ZBZZ-025)、江苏省现代农业装备与技术协同创新中心资助项目(NZXT01201603)

**作者简介:** 任乃飞(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造方面的研究。E-mail: rnf@ujs.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: 1484919757@qq.com

前被广泛地应用于航天工业中<sup>[3-5]</sup>。

激光打孔主要分为激光冲击打孔和激光环切打孔两种类型。激光冲击打孔是指激光束重复照射材料且激光束和工件位置保持静止不动,包括单脉冲和多脉冲打孔。激光环切打孔是激光打孔技术与激光切割技术相结合,先通过冲击打孔方式制出一个初始孔,随后激光束沿着工件上的环形轨道进行移动或者旋转工件,扩大初始孔,最终获得所需的孔径。与激光冲击打孔相比,环切打孔虽然需要更多的加工时间,但是更适于制造高质量、高精度的孔<sup>[6]</sup>。为了打出高质量、高精度的孔,学者们已经开展了先进的激光打孔系统的研究<sup>[7-9]</sup>。

关于加工出更高质量微孔的参数优化的研究已有报道。Choudhury等<sup>[10-12]</sup>使用正交实验法对激光环切打孔时的工艺参数进行优化,通过方差分析研究了各参数对微孔质量的影响程度并得出最佳参数组合。Goyal等<sup>[13]</sup>在1.4 mm厚的Ti-6Al-4V合金板上进行激光环切打孔实验,采用人工神经网络(ANN)和遗传算法(GA)相结合的方法进行建模和优化,得到了最小锥度微孔,优化后的参数组合为:脉冲宽度0.8 ms,重复频率20.4 Hz,气压10 kg/cm<sup>2</sup>,环切速度0.1 mm/s。2016年,他们又用相同的方法对孔圆度进行了优化<sup>[14]</sup>。王禹茜等<sup>[15]</sup>研究了不同能量密度和辅助气压对TiC陶瓷微孔加工的影响,微孔锥度最小时的参数为:能量密度0.51 J/cm<sup>2</sup>、辅助气体压力0.3 MPa。汪军等<sup>[16]</sup>在丁腈橡胶阻尼材料上制孔,研究了不同脉宽条件下孔形貌的变化规律。本课题组任乃飞等<sup>[17-18]</sup>先在铝合金板上进行激光打孔实验,研究了脉冲宽度、脉冲重复频率和离焦量对打孔规律的影响,后又在20Cr13不锈钢板材上采用正交实验法进行了脉冲激光打孔实验。从上述文献可以看出,正交实验法是通过正交表来研究和分析多种因素的一种设计方法,即依据正交性选出部分具有代表性的水平组合来进行实验,分析这部分实验数据,找出最优或较优的水平组合。正交实验法具有齐整可比性和均匀分散性的特点,能减少实验次数且不失一般性,提高了实验效率<sup>[19]</sup>。

本文选择GH4037高温合金作为激光打孔的实验材料,采用正交实验法,进行Nd:YAG脉冲激光环切打孔实验研究,小孔直径为0.3 mm。通过方差分析工艺参数(环切圈数、环切速度、脉冲能量和离焦量)对微孔质量(锥度和圆度)的影响规律,并进一步优化工艺参数,得到了激光打孔的优化工艺参数组合。

## 2 实验工作

### 2.1 实验设备及工件材料

实验采用德国DMG公司生产的LASERTEC 80 PowerDrill数控精密激光加工中心,配备德国森精机公司生产的波长为1064 nm的Nd:YAG激光器(型号为FLS352A-307),具有波长较长、脉宽较大和性能稳定的特点。该加工中心适用于涡轮部件(如燃烧室、涡轮叶片等)的精密激光打孔和焊接。微孔形貌的观察与测量采用日本基恩士KEYENCE VK-X250激光扫描显微镜。

实验选取尺寸为28 mm×3 mm的GH4037镍基高温合金为实验材料,GH4037被广泛应用于制造航空发动机涡轮工作叶片,可以在800~850 °C条件下长期使用<sup>[20]</sup>,其化学成分见表1。

表1 GH4037高温合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of GH4037 superalloy (mass fraction, %)

Element	C	Cr	Ni	W	Mo	Al	Ti	V
Content	0.03-0.1	13-16	Bal.	5-7	2-4	1.7-2.3	1.8-2.3	0.1-0.5
Element	Fe	B	Ce	Mn	Si	P	S	Cu
Content	≤5	≤0.02	≤0.02	≤0.5	≤0.4	≤0.015	≤0.01	≤0.07

### 2.2 实验设计

田口正交法已被证明是一种可靠的能同时评估多个控制因素的方法,并且能有效减少实验次数<sup>[21-22]</sup>。实验选择环切圈数、环切速度、脉冲能量、离焦量4个参数作为影响微孔质量的因素,在每个因素下设置4个水平,因素水平表见表2。在上述水平范围内,选择孔锥度和圆度作为实验的考察指标,采用L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)(5列4因素4水平,共16组实验)的正交表安排实验,实验时未考虑各因素的交互作用。其他的常数参数如下:脉冲宽度为0.6 ms,重复频率为50 Hz,扩束比为5,辅助气体为氮气,气体压力为0.3 MPa。

选取间隔为30°的6个直径的平均值,如图1所示。基于直径的测量,孔锥度的计算公式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_{\text{entry}} - d_{\text{exit}}}{2t}\right), \quad (1)$$

式中  $\theta$  为孔锥度, 在实验结果中锥度取绝对值;  $d_{\text{entry}}$  为孔入口处直径;  $d_{\text{exit}}$  为孔出口处直径。圆度的定义为最小直径与最大直径的比值。理想条件下的圆度值为 1.0 或 100%。孔入口处圆度  $C_{\text{entry}}$  和出口处的圆度  $C_{\text{exit}}$  的计算公式为

$$C_{\text{entry}} = \frac{(d_{\min})_{\text{entry}}}{(d_{\max})_{\text{entry}}}, C_{\text{exit}} = \frac{(d_{\min})_{\text{exit}}}{(d_{\max})_{\text{exit}}}, \quad (2)$$

式中  $d_{\max}$  和  $d_{\min}$  分别为 6 个测量直径值中的最大值和最小值。正交实验后的锥度值和圆度值见表 3。

表 2 正交实验因素水平

Table 2 Factors and levels in orthogonal experiments

Factor	Process parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A	Number of trepanning	3	4	5	6
B	Trepanning speed / (mm/min)	6	18	30	42
C	Pulse energy / J	1	1.5	2	2.5
D	Defocusing amount / mm	-1	-0.5	0	0.5

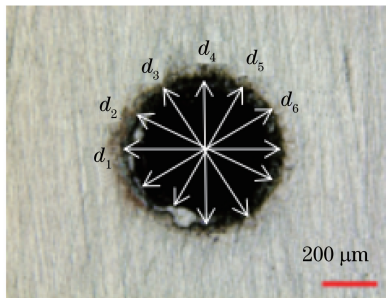


图 1 孔直径的测量

Fig. 1 Measurement of hole diameter

表 3 实验的田口设计和锥度与圆度数据

Table 3 Taguchi design, taper and circularity data in experiments

Experiment No.	Factor				Hole circularity		Hole taper / (°)
	A	B	C	D	Entry	Exit	
1	1	1	1	1	0.904	0.902	1.243
2	1	2	2	2	0.863	0.910	0.240
3	1	3	3	3	0.882	0.936	0.975
4	1	4	4	4	0.856	0.914	1.037
5	2	1	2	3	0.858	0.942	0.763
6	2	2	1	4	0.836	0.933	1.366
7	2	3	4	1	0.94	0.942	0.591
8	2	4	3	2	0.914	0.930	0.568
9	3	1	3	4	0.908	0.920	0.941
10	3	2	4	3	0.902	0.927	0.877
11	3	3	1	2	0.922	0.932	0.450
12	3	4	2	1	0.888	0.924	0.450
13	4	1	4	2	0.894	0.967	0.329
14	4	2	3	1	0.937	0.921	0.186
15	4	3	2	4	0.941	0.935	0.505
16	4	4	1	3	0.895	0.912	0.966

### 3 结果与讨论

图 2 所示为在没有经过任何处理的情况下通孔的入口端和出口端的表面形貌, 可以清晰地看到孔周围的一层熔融物和溅射物, 入口端相对于出口端更粗糙。由于借助辅助气体和材料蒸发时的压力, 在出口边缘处会形成较高的毛刺沉积。

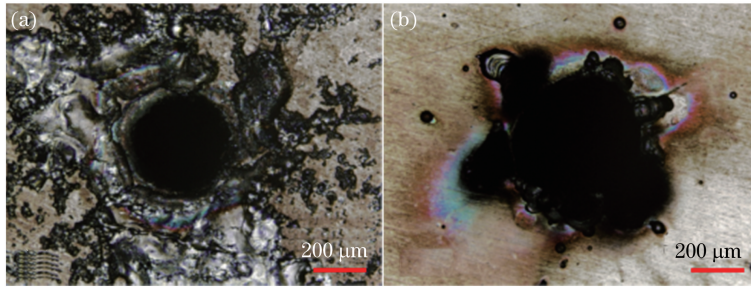


图2 微孔表面形貌。(a)入口;(b)出口

Fig. 2 Surface morphology of microhole. (a) Entry; (b) exit

信噪比( $R_{SN}$ )和平均响应值是田口方法中衡量质量特性的重要指标,统计分析实验结果后,得出稳定、可靠的工艺参数组合。根据实际工业生产中的需要,信噪比可分为望小特性、望大特性和望目特性这三种。在本研究中,孔锥度越小,表明激光打孔的质量越好。因此,对于孔锥度,信噪比应采用望小特性。望小特性的计算公式为

$$R_{SN} = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (3)$$

式中  $n$  为实验的重复次数( $n=4$ );  $y_i$  为实验的孔锥度。平均响应值计算公式为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}. \quad (4)$$

### 3.1 孔锥度

基于信噪比和平均响应计算的每个因素对孔锥度影响的重要性分别见表4和表5。根据信噪比分析,对孔锥度的影响大小的主次排序为离焦量、环切速度、环切圈数和脉冲能量。而根据平均响应分析,对孔锥度的影响大小的主次顺序为离焦量、脉冲能量、环切圈数和环切速度。图3和图4分别显示了在4个水平下的各因素的信噪比和平均响应。通过信噪比的计算,各水平的最佳组合为  $A_2B_1C_4D_4$ , 即环切圈数为4,环切速度为6 mm/min,脉冲能量为2.5 J,离焦量为+0.5 mm;根据平均响应的计算,最佳组合为  $A_4B_3C_2D_2$ , 即环切圈数为6,环切速度为30 mm/min,脉冲能量为1.5 J,离焦量为-0.5 mm。为了制造更多的圆柱形孔,根据信噪比分析,实验需要适中的环切圈数,较低的环切速度,较大的脉冲能量和离焦量;而另一方面,根据平均响应分析,实验则需要更多的环切圈数,适中的环切速度、脉冲能量和离焦量。

表4 孔锥度的信噪比分析

Table 4 Signal-to-noise ratio analysis for hole taper

Level	A	B	C	D
1	2.6027	2.6611	5.6594	6.0561
2	2.2804	6.3591	6.9038	13.4752
3	8.8849	9.4145	5.0677	1.0025
4	7.6251	2.9584	3.7622	0.8594
Residual error	6.6045	6.7534	3.1416	12.6157
Order	3	2	4	1

表5 孔锥度的平均响应分析

Table 5 Mean response analysis for hole taper

Level	A	B	C	D
1	0.8738	0.8190	0.9050	0.6175
2	0.8220	0.6673	0.4895	0.2955
3	0.5783	0.5290	0.6675	0.8953
4	0.4965	0.7552	0.7085	0.9622
Residual error	0.3733	0.2900	0.4155	0.6667
Order	3	4	2	1

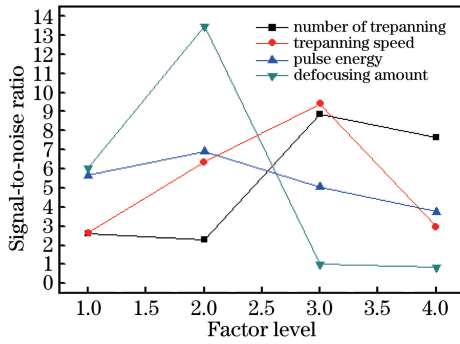


图3 四水平下的各因素的信噪比

Fig. 3 Signal-to-noise ratio of various factors under four levels

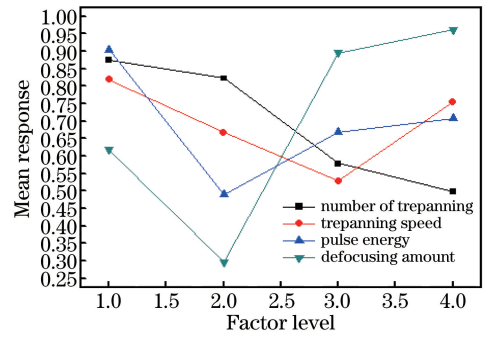


图4 四水平下的各因素的平均响应

Fig. 4 Mean response of various factors under four levels

使用方差分析来评估每个加工工艺参数对孔锥度影响的显著性,结果分别见表6和表7,其中Seq ss为顺序平方和,Adj ss为调整后的平方和,Adj ms为调整后的均方,且75%置信度的临界 $F$ 值 $F_{0.25}(3,3)=2.36$ 。根据信噪比的方差分析,各因素的贡献率分别为:离焦量42.278%,环切圈数15.84%,环切速度13.941%,脉冲能量2.337%;根据平均响应的方差分析,各因素的贡献率分别为:离焦量48.975%,环切次数17.869%,脉冲能量15.421%,环切速度8.36%。离焦量的 $F$ 值大于临界 $F$ 值,所以离焦量属于影响锥度显著的因素。结合以上分析,得出各水平的最佳组合为 $A_4B_1C_2D_2$ ,即环切圈数为6,环切速度为6 mm/min,脉冲能量为1.5 J和离焦量为-0.5 mm,在这种条件下得到的孔锥度为 $-0.221^\circ$ 。

表6 信噪比的方差分析

Table 6 Variance analysis of signal-to-noise ratio

Parameter	Freedom degree	Seq ss	Adj ss	Adj ms	$F$ value	Probability of $P$ -value	Contribution rate /%
Number of trepanning	3	138.57	138.57	41.189	0.81	0.567	15.840
Trepanning speed / (mm/min)	3	121.95	121.95	40.651	0.71	0.607	13.941
Pulse energy / J	3	20.44	20.44	6.814	0.12	0.943	2.337
Defocusing amount / mm	3	422.33	422.33	140.777	2.46	0.239	48.278
Error	3	171.48	171.48	57.161			19.604
Total	15	874.78					100

### 3.2 孔圆度

图5所示为16次正交实验下的孔圆度值,可以看出,出口孔比入口孔更圆。激光能量密度越大,材料吸收的光子能量越多,激光去除材料的能力越强,加工出的微孔圆度也较好。出口处的激光束能量密度比入口处的高,导致出口处的圆度更好。

图6和图7分别为不同水平下的入口圆度和出口圆度的平均响应。从图6看出,随着环切圈数的增加,入口处的圆度增加;而随着离焦量的增加,入口处的圆度呈减小趋势。根据平均响应,各水平的最佳组合为 $A_4B_3C_3D_1$ (此时入口处的圆度为0.952),即环切圈数为6,环切速度为30 mm/min,脉冲能量为2 J,离焦量

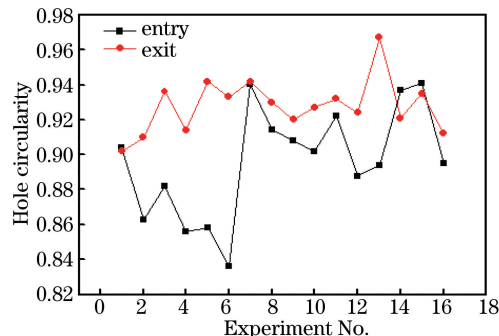


图5 微孔入口圆度及出口圆度(正交实验1~16)

Fig. 5 Microhole circularity at entry and exit in orthogonal experiments 1-16



为 $-1\text{ mm}$ 。从图7中可以看出,在孔出口处,孔圆度随着脉冲能量的增加而增加。各水平的最佳组合为 $A_2B_3C_4D_2$ (此时出口处的圆度为 $0.970$ ),即环切圈数为 $4$ ,环切速度为 $30\text{ mm/min}$ ,脉冲能量为 $2.5\text{ J}$ ,离焦量为 $-0.5\text{ mm}$ 。在孔入口处,脉冲能量相较于其他三种参数对圆度的影响不显著。对于平均响应的方差分析,确定了4个加工工艺参数对孔圆度的贡献率,结果见表8,9。各因素对于孔入口圆度贡献率的主次顺序为:环切圈数( $26.5\%$ )、环切速度( $23.048\%$ )、离焦量( $19.15\%$ )、脉冲能量( $8.759\%$ );各因素对孔出口圆度贡献率的主次顺序为:环切圈数( $29.589\%$ )、环切速度( $19.973\%$ )、脉冲能量( $17.534\%$ )、离焦量( $9.315\%$ )。从临界 $F$ 值可以判断出,这4个加工工艺参数对圆度的影响都不是特别显著,因为实验误差较大且误差自由度小(3),检验的灵敏度低,所以各因素的显著性被掩盖。

表7 平均响应的方差分析

Table 7 Variance analysis for mean response

Parameter	Freedom degree	Seq ss	Adj ss	Adj ms	$F$ value	Probability of $P$ -value	Contribution rate /%
Number of trepanning	3	0.4044	0.4044	0.13479	1.91	0.305	17.869
Trepanning speed / (mm/min)	3	0.1892	0.1892	0.06308	0.89	0.536	8.360
Pulse energy /J	3	0.3490	0.3490	0.11633	1.65	0.346	15.421
Defocusing amount /mm	3	1.1084	1.1084	0.36948	5.22	0.104	48.975
Error	3	0.2121	0.2121	0.07071			9.375
Total	15	2.2632					100

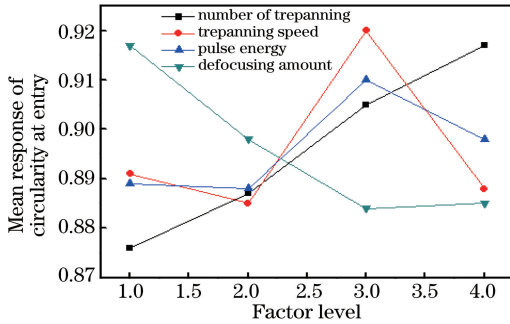


图6 不同水平下的入口圆度的平均响应

Fig. 6 Mean response of circularity at entry under different levels

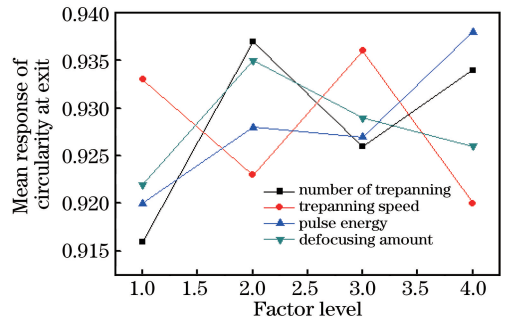


图7 不同水平下的出口圆度的平均响应

Fig. 7 Mean response of circularity at exit under different levels

表8 入口圆度平均响应方差分析

Table 8 Variance analysis of mean response of circularity at entry

Parameter	Freedom degree	Seq ss	Adj ss	Adj ms	$F$ value	Probability of $P$ -value	Contribution rate /%
Number of trepanning	3	0.00393	0.00393	0.001310	1.16	0.454	26.5
Trepanning speed / (mm/min)	3	0.003418	0.003418	0.001139	1.01	0.498	23.048
Pulse energy /J	3	0.001299	0.001299	0.000433	0.38	0.775	8.759
Defocusing amount /mm	3	0.00284	0.00284	0.000947	0.84	0.557	19.15
Error	3	0.003396	0.003396	0.001132			23.543
Total	15	0.014883					100

表9 出口圆度平均响应方差分析

Table 9 Variance analysis of mean response of circularity at exit

Parameter	Freedom degree	Seq ss	Adj ss	Adj ms	$F$ value	Probability of $P$ -value	Contribution rate /%
Number of trepanning	3	0.001084	0.001084	0.000361	1.27	0.425	29.589
Trepanning speed / (mm/min)	3	0.000729	0.000729	0.000243	0.85	0.551	19.973
Pulse energy /J	3	0.00064	0.00064	0.000213	0.75	0.591	17.534
Defocusing amount /mm	3	0.000346	0.000346	0.000115	0.4	0.762	9.315
Error	3	0.000855	0.000855	0.000285			23.589
Total	15	0.003653					100

## 4 结 论

采用田口正交阵列法,对 GH4037 板材进行了 Nd:YAG 激光环切打孔实验,得出以下结论。

1) 方差分析结果表明,离焦量是影响孔锥度的主要的因素;环切圈数、环切速度、脉冲能量和离焦量对微孔圆度的影响不大。

2) 当环切圈数为 6、环切速度为 6 mm/min、脉冲能量为 1.5 J、离焦量为 -0.5 mm 时,得到的微孔锥度最小。

3) 与微孔入口圆度相比,微孔出口圆度较好。当环切圈数为 6、环切速度为 30 mm/min、脉冲能量为 2 J、离焦量为 -1 mm 时,得到的微孔入口圆度较好。当环切圈数为 4、环切速度为 30 mm/min、脉冲能量为 2.5 J、离焦量为 -0.5 mm 时,得到的微孔出口圆度较好。

## 参 考 文 献

- [1] Jackson M J, Neill W O. Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 142: 517-525.
- [2] Hu Fenglan, Dong Lijun, Gao Weiguo. Laser boring technique for small-deep hole[J]. *Tool Technology*, 2009, 43(3): 42-44.  
胡凤兰, 董丽君, 高为国. 微小深孔的激光加工[J]. *工具技术*, 2009, 43(3): 42-44.
- [3] Schuöcker D. Handbook of the EuroLaser academy[M]. New York: Springer, 1998.
- [4] Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan, *et al.* Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. *Chinese J 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.
- [5] Rong Lierun. The laser microhole 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.
- [6] Fohl C, Breitlin D, Jasper K, *et al.* Precise drilling of metal and ceramics with short and ultrashort pulse solid state lasers[C]. SPIE, 2002, 4426: 104-107.
- [7] Ashkenasi D, Kaszemeikat T, Mueller N, *et al.* Laser trepanning for industrial applications[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(1): 323-331.
- [8] Jahns D, Kaszemeikat T, Mueller N, *et al.* Laser trepanning of stainless steel[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 630-635.
- [9] Wang Yanli. The research of technology for laser helical drilling [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & 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.
- [10] Choudhury I A, Chong W C, Vahid G. Hole qualities in laser trepanning of polymeric materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(9): 1297-1305.
- [11] Chien W, Hou S. Investigating the recast layer formed during the laser trepan drilling of Inconel 718 using the Taguchi method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 33: 308-316.
- [12] Bharatish A, Murthy H N N, Anand B, *et al.* Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed CO<sub>2</sub> laser drilling of alumina ceramics[J]. *Optics and Technology*, 2013, 53: 22-32.
- [13] Goyal R, Dubey A K. Hybrid approach for modeling and optimization of hole taper during laser trepan drilling of Ti-6Al-4V alloy sheet[J]. *Procedia Material Science*, 2014, 5: 1781-1790.
- [14] Goyal R, Dubey A K. Modeling and optimization of geometrical characteristics in laser trepan drilling of titanium alloy[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(3): 1281-1293.
- [15] Wang Yuqian, Zhang Junzhan, Liu Yongsheng, *et al.* Effect of femtosecond laser parameters on TiC ceramic micro-hole drilling[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003010.  
王禹茜, 张军战, 刘永胜, 等. 飞秒激光工艺参数对加工 TiC 陶瓷微孔的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003010.

- [16] Wang Jun, Liu Dun, Zhai Zhongsheng, *et al.* Experimental and mechanism analysis of holes drilling on rubber damping material using nanosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0216004.  
汪 军, 刘 顿, 翟中生, 等. 橡胶阻尼材料纳秒激光打孔实验及机理分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0216004.
- [17] Ren Naifei, Xia Kaibo, Wang Houxiao. Investigation on microhole formation characteristics for pulsed laser drilling of aluminum alloy 5052 sheets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 121402.  
任乃飞, 夏凯波, 王后孝. 5052 铝合金板材脉冲激光打孔成形规律的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 121402.
- [18] Ren Naifei, Zhang Wen, Wang Houxiao, *et al.* Process optimization for pulsed laser drilling of 20Cr13 sheets based on orthogonal experiments[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031410.  
任乃飞, 张 文, 王后孝, 等. 基于正交实验的 20Cr13 板材脉冲激光打孔工艺优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031410.
- [19] Fu Lijun, Bao Zhongxu, Chen Zezhong, *et al.* Combination of orthogonal experiment, neural network and genetic algorithm[J]. *Journal of Nanchang University*, 2003, 25(1): 79-82.  
傅立军, 包忠诩, 陈泽中, 等. 正交试验法、神经网络和遗传算法的结合[J]. *南昌大学学报*, 2003, 25(1): 79-82.
- [20] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [21] Ross P J. Taguchi techniques for quality engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [22] Bendell A, Disney J, Pridmore W A. Taguchi method: Applications in world industry[M]. New York: Springer, 1989.