

# 激光工艺参数对玻璃陶瓷孔锥度和热影响区的影响

牛威杨, 于爱兵, 吴剑钊, 洪鑫, 何源

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 通过析因设计实验,研究了工艺参数对氟金云母玻璃陶瓷激光加工孔锥度和热影响区(HAZ)的影响,建立了孔锥度和HAZ厚度与工艺参数之间的回归方程,并对工艺参数进行了优化。实验结果表明,激光加工工艺参数对孔锥度和HAZ的影响程度按强弱依次为电流、离焦量、脉宽和重复次数。此外,孔锥度和HAZ还受电流和离焦量、电流和脉宽之间交互作用的影响。建立的回归方程能够较好地描述孔锥度和HAZ厚度与工艺参数之间的关系,由此获得了最优的激光加工工艺参数:电流150 A,脉宽2 ms,重复次数3次,离焦量2.18 mm。

**关键词** 材料; 激光加工; 玻璃陶瓷; 锥度; 热影响区; 工艺参数

**中图分类号** TN249; TB321 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.031601

## Influence of Laser Process Parameters on Taper and Heat Affected Zone of Glass Ceramic Hole

Niu Weiyang, Yu Aibing, Wu Jianzhao, Hong Xin, He Yuan

*Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*

**Abstract** With the factorial design experiment, the influences of laser process parameters on hole taper and heat affected zone (HAZ) of fluorophlogopite glass ceramic are studied. Regression equations between taper, HAZ thickness and laser process parameters are established and the process parameters are optimized. The experimental results show that the laser process parameters are in the order of the current, defocusing amount, pulse width, and repetition number based on their influence degree on taper and HAZ. In addition, the taper and HAZ thickness are also influenced by the interactive effects of the current and defocusing amount, and the current and pulse width. The established regression equation can describe the relationships between the taper, HAZ thickness and laser process parameters. From the regression equation, the optimized laser process parameters are obtained as follows: 150 A of current, 2 ms of pulse width, 3 of repetition number and 2.18 mm of defocusing amount.

**Key words** materials; laser processing; glass ceramics; taper; heat affected zone; process parameter

**OCIS codes** 160.2750; 140.3390; 350.339

## 1 引言

氟金云母玻璃陶瓷具有绝缘性能好、高频介质损耗低、耐高温、抗腐蚀等优良性能,在国防、航空航天和医疗器械等领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。例如,飞行器中的微波输能窗和导弹头部的雷达天线罩<sup>[4-5]</sup>,航空、航海及太空导航系统中的陀螺仪<sup>[6]</sup>,用于高温高湿场合的电子元器件<sup>[7]</sup>,以及与骨组织产生骨性结合的生物活性陶瓷<sup>[8]</sup>等都用到了氟金云母玻璃陶瓷。

通常情况下,在陶瓷零件的关键连接部位和摩擦副表面上需要加工出高质量孔,以实现特定功能<sup>[9]</sup>。氟金云母玻璃陶瓷的膨胀系数可以调节到接近于金属的膨胀系数,在其表面加工孔后嵌入各种金属,可与多种金属和陶瓷相连接。激光打孔高效快捷,但会在陶瓷材料表面产生热影响区(HAZ)和带有锥度的孔缺

**收稿日期:** 2016-09-28; **收到修改稿日期:** 2016-11-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175270)

**作者简介:** 牛威杨(1991—),男,硕士研究生,主要从事表面工程方面的研究。E-mail: 13607693065@163.com

**导师简介:** 于爱兵(1968—),男,博士,教授,主要从事表面工程方面的研究。E-mail: yuaibing@nbu.edu.cn(通信联系人)

陷<sup>[10-11]</sup>,这些缺陷会影响衔接部位孔的使用。为改善陶瓷材料激光加工孔质量,研究人员进行了相关研究。Wang等<sup>[12]</sup>在碳化钛陶瓷上进行了激光加工孔实验,分析了单因素激光工艺参数对孔锥度和孔形貌的影响。Zhang等<sup>[13]</sup>利用飞秒激光加工碳化钛陶瓷,发现在不同激光能量下可得到不同的孔锥度。Mishra等<sup>[14]</sup>采用有限元法和人工神经网络耦合的方法对激光加工氧化铝陶瓷孔工艺参数进行了模拟优化,降低了孔的锥度和HAZ。Yan等<sup>[15]</sup>应用单因素激光工艺参数进行了模拟和加工孔实验,获得了低锥度和少飞溅沉积的氧化铝陶瓷孔。

虽然研究人员开展了氟金云母玻璃陶瓷切削加工方面的研究工作<sup>[16-17]</sup>,但关于氟金云母玻璃陶瓷的激光加工的研究相对较少。析因设计<sup>[18]</sup>是一种考虑多因素的实验设计方法,通过析因设计可以确定出主要影响因素和次要影响因素之间的交互作用。本文以氟金云母玻璃陶瓷孔的激光加工为例,通过析因设计实验方法,分析了激光工艺参数对孔锥度和HAZ的影响,并建立了孔锥度和HAZ与激光加工工艺参数之间的回归方程;通过优化激光加工工艺参数,为氟金云母玻璃陶瓷激光加工孔工艺参数的选择提供了依据。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

采用人工晶体研究院研制的氟金云母玻璃陶瓷作为实验材料,其主要性能为:密度 $2.67\text{ g/cm}^3$ ,热导率大于等于 $1.7\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,弯曲强度大于等于 $108\text{ MPa}$ ,冲击韧性大于等于 $2.45\text{ kJ/m}^2$ 。采用电镀金刚锯片将棒料切割,在数控车床上进行端面车削,刀具为硬质合金刀具,再用金相砂纸打磨试件平面,试样直径为 $40\text{ mm}$ ,长度为 $12\text{ mm}$ 。通过激光焊接机(YAG-WF200B型,大族激光科技股份有限公司,中国)在氟金云母陶瓷试件表面进行加工孔实验,用三维数码显微镜观察和测试玻璃陶瓷孔的表面形貌和孔锥度。

### 2.2 实验设计

选择激光器的电流 $i$ 、脉宽 $\tau$ 、重复次数 $n$ 和离焦量 $\delta$ 为实验影响因素,分别以孔的锥度和HAZ的厚度为响应,应用分式析因设计方法进行二水平四因素实验设计,实验因素水平见表1。

表1 分式析因设计实验的因素和水平

Table 1 Factors and levels in fractional factorial design experiment

Parameter	Level	
	-	+
Current $i$ / A	150	210
Pulse width $\tau$ / ms	2	5
Number of repetition $n$	1	3
Defocusing amount $\delta$ / mm	-1	2.5

图1所示为激光加工的陶瓷孔试件,HAZ厚度 $t$ 的计算方法为

$$t = \frac{d_{\text{HAZ}} - d_{\text{T}}}{2}, \quad (1)$$

式中 $d_{\text{HAZ}}$ 为HAZ直径, $d_{\text{T}}$ 为孔直径。

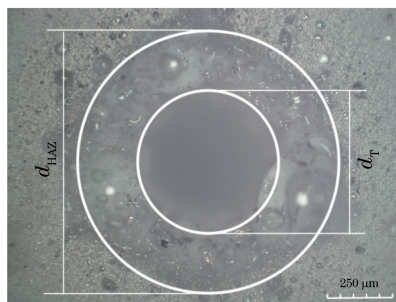


图1 玻璃陶瓷 HAZ 的直径和孔的直径

Fig. 1 Diameters of HAZ and hole of glass ceramic

图 2(a)为氟金云母玻璃陶瓷激光加工孔的剖面轮廓图,简化成图 2(b),孔锥度  $\theta$  的计算方法为

$$\frac{\theta}{2} = \arctan \frac{d_T - d_B}{2h}, \quad (2)$$

式中  $d_B$  为孔底部直径,  $h$  为孔的高度。

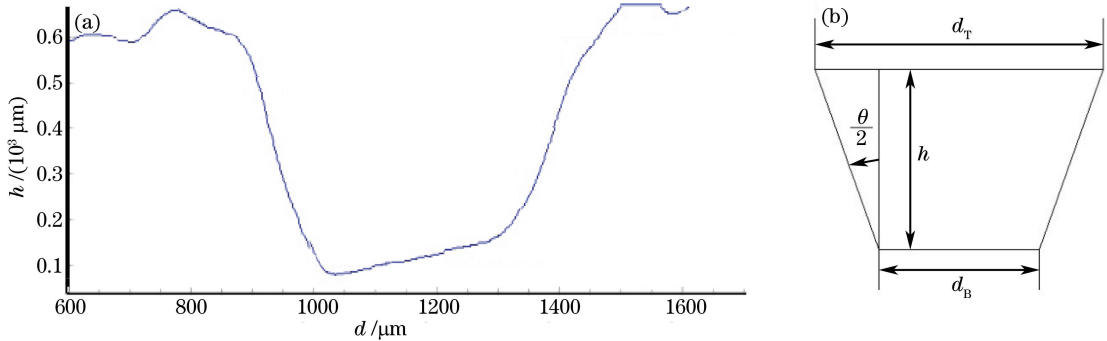


图 2 玻璃陶瓷孔剖面轮廓图。(a)形貌轮廓图;(b)计算简图

Fig. 2 Cross-section contour of glass ceramic hole. (a) morphology contour; (b) calculation diagram

应用 Minitab 软件设计出分式析因设计实验,按照运行顺序和标准顺序进行两次加工实验,计算均值,结果见表 2。

表 2 分式析因设计实验参数

Table 2 Parameters of fractional factorial design experiment

Standard order	Running order	$i / \Lambda$	$\tau / \text{ms}$	$n$	$\delta / \text{mm}$	$\theta / (^{\circ})$	$t / \mu\text{m}$
13	1	150	2	1	-1	57.0	118.3
5	2	150	5	1	-1	48.5	88.1
8	3	210	5	3	2.5	24.0	243.6
4	4	210	2	3	2.5	30.0	180.1
3	5	150	5	3	-1	53.9	126.2
11	6	150	5	1	2.5	43.0	173.9
7	7	210	2	1	2.5	45.6	193.9
14	8	210	5	1	2.5	35.0	242.3
1	9	150	2	1	2.5	34.7	160.2
15	10	210	2	3	-1	44.0	120.5
16	11	210	2	1	-1	39.8	134.7
9	12	150	2	3	-1	51.0	121.2
2	13	150	5	3	2.5	39.0	144.7
10	14	150	2	3	2.5	32.0	136.1
6	15	210	5	3	-1	26.0	237.4
12	16	210	5	1	-1	25.0	206.8

### 3 结果与讨论

#### 3.1 工艺参数对孔锥度的影响

对表 2 中的数据进行方差分析,获得孔锥度的方差分析表,结果见表 3,其中  $\times$  表明两个因素之间存在交互作用;  $P$  表示样本间抽样误差所致概率的假设检验,当  $P < 0.01$  时影响为极显著,当  $P < 0.05$  时影响为显著<sup>[18]</sup>。由于电流的  $P$  值小于 0.01,因此电流对孔锥度的影响是极显著的,而离焦量的  $P$  值等于 0.01,说明其对孔锥度的影响也是极显著的,即电流和离焦量在研究区间变化时锥度的产生几率最大。脉宽的  $P$  值小于 0.05,表明其对孔锥度的影响是显著的,即当脉宽在研究区间变化时,锥度也会发生变化,但变化程度低于电流和离焦量的影响程度。重复次数的  $P$  值大于 0.05,表明与电流、离焦量和脉宽相比,重复次数对锥度的影响不显著。根据表 3 所示的显著水平  $F$  值,确定出工艺参数对孔锥度影响程度按强弱依次为电流、离焦量、脉宽和重复次数。

表3 孔锥度方差分析结果  
Table 3 Variance analysis results of hole taper

Source	Degree of freedom	Sequential sum of squares	$F$	$P$
$i$	1	502.88	33.45	0.002
$\tau$	1	98.51	6.55	0.051
$n$	1	51.48	3.42	0.123
$\delta$	1	239.48	15.93	0.010
$i \times \tau$	1	218.30	14.52	0.012
$i \times n$	1	12.43	0.83	0.405
$i \times \delta$	1	236.39	15.73	0.011
$\tau \times n$	1	8.27	0.55	0.492
$\tau \times \delta$	1	86.03	5.72	0.062
$n \times \delta$	1	89.78	5.97	0.058
Residual error	5	75.16	-	-

激光冲击陶瓷材料时,高能激光束在极短时间内集中作用于工件的极小范围内,被照射区域在极短时间内吸收热量升温,温度瞬间达到熔点和沸点,工件表面材料熔化和蒸发进而形成孔。此时形成的孔有锥度,且孔的周围产生了HAZ<sup>[10,14]</sup>。根据表3可知,电流和离焦量对孔锥度的影响极为显著。这是因为激光束的能量主要取决于电流,当电流较大时产生的热能较高,较大的激光束能量聚集到工件表面,工件表面材料立即熔化,剩余的激光束能量通过渗透作用熔化底层材料;随后激光束能量逐渐变小,渗透作用减弱,产生较大的锥度<sup>[19]</sup>。同时,离焦量也会影响孔的锥度,较大的离焦和入焦都会产生较大的锥度。例如,当激光作用于工件表面稍微偏上的位置时,孔的入口直径较小,会形成锥度较小的孔<sup>[20]</sup>。脉冲宽度对孔锥度的影响程度低于电流和离焦量的。窄脉冲激光能量密度集中,渗透速度高于宽脉冲激光的,因此,当激光的脉冲宽度较窄时会产生较小的锥度<sup>[21]</sup>。重复次数对孔锥度的大小也有一定的影响,当激光多次作用于工件时,重复打孔会使孔内未凝固的材料二次熔化,从而减少了孔的锥度。

### 3.2 工艺参数对热影响区的作用

对表2中的HAZ数据进行方差分析,获得HAZ的方差分析表,见表4,电流、脉宽和离焦量对HAZ厚度的影响均是极其显著的。由 $F$ 值可知,工艺参数对HAZ的影响程度按强弱依次为电流、离焦量、脉宽和重复次数。在激光加工孔的过程中,电流决定着激光束的能量,对HAZ的作用较大,因此,HAZ的厚度与电流的增加成正比例关系。离焦量的正负决定了孔径的大小,进而影响了HAZ的厚度,正离焦时产生的HAZ厚度较小,负离焦时产生的HAZ厚度较大。脉冲宽度决定了激光束的能量密度,脉宽越窄,能量密度越大,孔周围的HAZ直径越大<sup>[19-21]</sup>。

表4 HAZ方差分析结果  
Table 4 Variance analysis results of HAZ

Source	Degree of freedom	Sequential sum of squares	$F$	$P$
$i$	1	15043.0	46.82	0.001
$\tau$	1	5550.3	17.28	0.009
$n$	1	4.4	0.01	0.911
$\delta$	1	6464.2	20.12	0.006
$i \times \tau$	1	5768.4	17.95	0.008
$i \times n$	1	16.4	0.05	0.830
$i \times \delta$	1	0.0	0.00	0.994
$\tau \times n$	1	506.2	1.58	0.265
$\tau \times \delta$	1	54.8	0.17	0.697
$n \times \delta$	1	948.6	2.95	0.146
Residual error	5	1606.4	-	-

### 3.3 工艺参数之间的交互作用

孔锥度和HAZ还受到激光加工参数之间交互作用的影响。交互作用是一个工艺参数的水平响应随着其他工艺参数水平的变化而变化。例如,在表3中,电流和离焦量之间的交互作用、电流和脉宽之间的交互

作用都影响孔锥度;在表 4 中,电流和脉宽之间的交互作用影响 HAZ 厚度。

图 3(a)为孔锥度与电流和离焦量之间的响应曲面图,其中脉宽为 3.5 ms,重复次数为 2 次。当电流为 150 A 时,随着离焦量的增加,孔的锥度减小,如箭头  $A_1$  所示;但当电流增大至 210 A 时,离焦量的变化对孔锥度影响很小,如箭头  $A_2$  所示。上述分析表明,在低电流时孔锥度变化较明显。图 3(b)为孔锥度与电流和脉宽之间的交互作用。当脉宽为低水平时,如脉宽为 2 ms 时,孔的锥度随着电流的增大而变大,如箭头  $B_1$  所示;但当脉宽为 5 ms 时,孔的锥度随电流的增大而减小,如箭头  $B_2$  所示。当电流分别为 150 A 和 210 A 时,随着脉宽的增大,孔的锥度分别呈增大和减小趋势。图 3(c)为 HAZ 厚度与电流和离焦量之间的交互作用,HAZ 厚度受离焦量的影响较明显,如箭头  $C_1$  所示;但受电流的影响相对较小,变化趋势如箭头  $C_2$  所示。

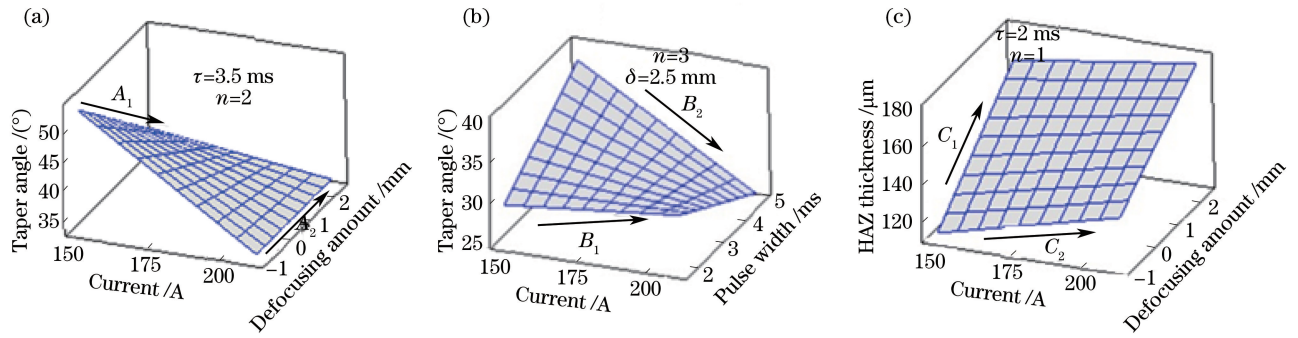


图 3 激光工艺参数之间的交互作用

Fig. 3 Interaction between laser process parameters

陶瓷孔激光加工工艺是一个多参数因素交互作用的过程,单纯考虑某一个因素不利于提高孔的加工质量。实验中电流与其他参数之间的交互作用较为显著,重复次数与其他参数之间无显著交互作用。在激光加工氟金云母玻璃陶瓷孔时,为减小锥度和 HAZ,根据上述实验结果,在选择电流、离焦量和脉宽的基础上,应考虑电流和离焦量、电流和脉宽之间的交互作用。

### 3.4 回归方程与工艺参数优化

对表 2 中的数据进行拟合,应用 Minitab 软件分别获得锥度  $\theta$  和 HAZ 厚度  $t$  与激光加工工艺参数之间的回归方程:

$$\theta = 35.1929 + 0.104256i + 11.50\tau - 15.7738\delta - 0.0820833i\tau + 0.0732143i\delta, \quad (3)$$

$$t = 224.931 - 0.521687i - 70.5048\tau + 22.881\delta + 0.421944i\tau. \quad (4)$$

图 4 为锥度和 HAZ 厚度的残差分析图,响应参数的真实值基本分布于直线两侧,说明残差呈正态分布<sup>[18]</sup>。利用相关系数检验法对回归方程进行检验,由表 2 数据,可以计算出激光加工陶瓷材料孔锥度模拟值的相关系数  $|r| = 0.5245$ 。本实验共有 16 个数据,查相关系数临界值表<sup>[22]</sup>,当显著水平  $\alpha = 0.05$  时,相关系数  $r$  的临界值为

$$r_{0.05} = 0.49731 < 0.5245, \quad (5)$$

表明回归方程(3)式对实验数据的拟合性较好,孔锥度回归方程的可信赖程度为 95% 以上。同理,可得出激

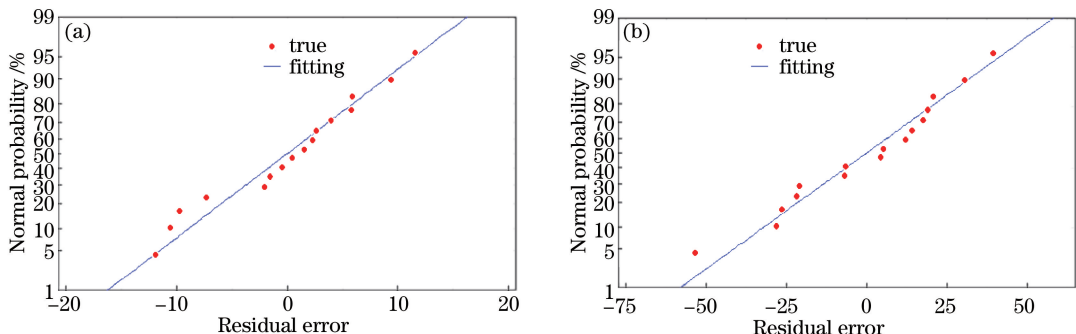


图 4 (a)锥度和(b)HAZ 厚度的残差分析图

Fig. 4 Residual analysis diagram of (a) taper and (b) HAZ thickness

光加工陶瓷材料孔 HAZ 厚度模拟值的相关系数为 0.5426, 相关系数的临界值为

$$r_{0.05} = 0.49731 < 0.5426, \quad (6)$$

表明回归方程(4)式对实验数据的拟合性也较好, 孔 HAZ 厚度回归方程的可信赖程度为 95%。从上述显著性分析的结果来看, 本文建立的回归方程是可信的。

根据建立的回归方程(3)、(4)式, 应用 Minitab 软件进行参数优化, 获得玻璃陶瓷孔较小锥度和 HAZ 厚度的激光加工工艺参数为: 电流 150 A, 脉宽 2 ms, 重复次数 3 次, 离焦量 2.18 mm。

## 4 结 论

以氟金云母玻璃陶瓷孔的激光加工为例, 通过析因设计实验方法, 分析了激光工艺参数对孔锥度和 HAZ 厚度的影响, 得到以下结论:

1) 激光工艺参数对加工氟金云母陶瓷孔锥度和 HAZ 厚度的影响程度按强弱依次为电流、离焦量、脉宽和重复次数。

2) 激光加工氟金云母陶瓷的孔锥度和 HAZ 厚度受到激光工艺参数交互作用的影响, 其中电流和离焦量、电流和脉宽的交互作用影响较大。

3) 建立了激光加工孔锥度和 HAZ 厚度与工艺参数之间的回归方程, 通过工艺参数优化, 发现获得具有较小锥度和 HAZ 厚度氟金云母玻璃陶瓷孔的优化工艺参数为: 电流 150 A, 脉宽 2 ms, 重复次数 3 次, 离焦量 2.18 mm。

## 参 考 文 献

- [1] Garai M, Sasmal N, Molla A R, *et al.* Structural effects of  $Zn^{+2}/Mg^{+2}$  ratios on crystallization characteristics and microstructure of fluorophlogopite mica-containing glass-ceramics[J]. *Solid State Sciences*, 2015, 44: 10-21.
- [2] El-Meliegy E M, El-Bassyouni G T. Study of the bioactivity of fluorophlogopite-whitlockite ceramics[J]. *Ceramics International*, 2008, 34(6): 1527-1532.
- [3] Mukherjee D P, Molla A R, Das S K. The influence of  $MgF_2$  content on the characteristic improvement of machinable glass ceramics[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 433: 51-59.
- [4] Garai M, Sasmal N, Molla A R, *et al.* Effects of nucleating agents on crystallization and microstructure of fluorophlogopite mica-containing glass-ceramics[J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(4): 1612-1623.
- [5] Ma Yingren. Mica-containing glass-ceramics and its application in the field of vacuum science and technology[J]. *Vacuum Science and Technology*, 1985, 5(2): 62-66.  
马英仁. 云母微晶玻璃及其在真空科学与技术领域中的应用[J]. *真空科学与技术*, 1985, 5(2): 62-66.
- [6] Ma Jiajun, Jiang Junbiao. Research on the frequency stabilization properties of total reflection prism laser gyros[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0102002.  
马家君, 蒋军彪. 全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102002.
- [7] Langfeld R, Kunze M, Letz M. Novel glass ceramics for electronic applications[J]. *Materials China*, 2015, 34(7-8): 558-564.  
Langfeld R, Kunze M, Letz M. 新型微晶玻璃在电子领域的应用[J]. *中国材料进展*, 2015, 34(7-8): 558-564.
- [8] Diba M, Goudouri O M, Tapia F, *et al.* Magnesium-containing bioactive polycrystalline silicate-based ceramics and glass-ceramics for biomedical applications[J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2014, 18(3): 147-167.
- [9] Xing Songling, Liu Lei, Zou Guisheng, *et al.* Effects of femtosecond laser parameters on hole drilling of silica glass [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0403001.  
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.
- [10] Bharatish A, Murthy H N N, Anand B, *et al.* Characterization of hole circularity and heat affected zone in pulsed  $CO_2$  laser drilling of alumina ceramics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 53: 22-32.
- [11] Yuan Genfu, Zeng Xiaoyan. Status and prospect of laser machining researches and applications on hard and brittle materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, 39(6): 47-51.

- 袁根福, 曾晓雁. 硬脆性无机材料激光成形加工研究与应用现状[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(6): 47-51.
- [12] 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.
- [13] Zhang Y, Wang Y Q, Zhang J Z, *et al.* Micromachining features of TiC ceramic by femtosecond pulsed laser[J]. Ceramics International, 2015, 41(5): 6525-6533.
- [14] Mishra S, Yadava V. Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of thin aluminum sheet[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 461-474.
- [15] 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.
- [16] Wang Ruigang, Pan Wei, Jiang Mengning, *et al.* Development in machinable ceramics and machining technology of engineering ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2001, 20(3): 27-35.  
王瑞刚, 潘伟, 蒋蒙宁, 等. 可加工陶瓷及工程陶瓷加工技术现状及发展[J]. 硅酸盐通报, 2001, 20(3): 27-35.
- [17] Jiang Wei, Xie Xiaozhu, Wei Xin, *et al.* Pulse fiber laser controlled fracture cutting of ultrathin strontium titanate ceramic substrate[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0503008.  
江伟, 谢小柱, 魏昕, 等. 脉冲光纤激光控制断裂切割超薄钛酸锶陶瓷基片[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503008.
- [18] Montgomery D C. Design and analysis of experiments[M]. 5th ed. Cary: John Wiley & Sons, 2001: 76-86, 170-175, 638-646.
- [19] Kuar A S, Doloi B, Bhattacharyya B. Modelling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia ( $ZrO_2$ ) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12-13): 1301-1310.
- [20] Guan Zhenzhong. Laser processing manual[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007: 84-85, 96.  
关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007: 84-85, 96.
- [21] Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.* Femtosecond laser drilling of micro-hole[J]. Chinese J 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.
- [22] Zhuang Chuqiang, Wu Yasen. Applied mathematical statistics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 321-324, 566.  
庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 321-324, 566.