

紫外激光微铣削 Al_2O_3 陶瓷盲孔的工艺研究

刘晓东, 陈亮, 王曦照*, 熊政军

中南民族大学激光与智能制造研究院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对目前陶瓷材料功能性结构的高质量成型需求, 探究了纳秒短脉冲紫外激光在 Al_2O_3 陶瓷基板上微铣削盲孔的激光加工工艺。分别采用不同焦距的场镜来进行铣削实验, 研究了激光能量密度、振镜扫描速度、重复扫描次数等工艺参数对盲孔成型的锥度和底部粗糙度的影响规律。实验结果表明, 在上述加工参数中, 场镜的焦距对盲孔锥角的影响最为显著, 其他参数则起到优化加工质量的效果。因此合理地选择场镜焦距, 能够有效地改善盲孔的锥角。在场镜焦距 $f=160$ mm, 激光脉冲能量密度为 25.80 J/cm^2 , 扫描速度 1000 mm/s , 重复扫描次数为 400 次的条件下, 能够获得较好的加工质量, 盲孔深度为 0.83 mm 、锥角为 5.4° , 其底部粗糙度为 $2.48 \mu\text{m}$ 。

关键词 激光加工; Al_2O_3 陶瓷; 盲孔; 锥角; 粗糙度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514005

Micromilling Blind Holes in Al_2O_3 Ceramics Using UV Laser

Liu Xiaodong, Chen Liang, Wang Xizhao*, Xiong Zhengjun

*Institute of Laser and Intelligent Manufacturing Technology, South-Central University for Nationalities,
Wuhan, Hubei 430074, China*

Abstract To realize high-quality functional structures in ceramic materials, a short-pulse ultraviolet nanosecond laser was used to study the application of laser micromilling technology in the fabrication of blind holes in Al_2O_3 substrates. The influence of the laser-pulse energy density, scanning speed of scanner, and total number of repeat scanning on the taper angle of the hole and bottom surface roughness was investigated using field lenses of different focal lengths in the milling experiment. The experimental results show that the focal length plays a significant role in the micromilling process, while the other parameters can be used for optimizing the processing quality. Therefore, appropriate selection of the optical focal length can effectively improve the processing quality of micromilling blind holes, in particular, their taper angle. A blind hole with minimum taper angle of 5.4° , a hole depth of 0.83 mm and a bottom surface roughness of $2.48 \mu\text{m}$ was achieved at a focal length of $f=160 \text{ mm}$ with a laser-pulse energy density of 25.80 J/cm^2 , a scanning speed of 1000 mm/s , and a total number of repeat scanning of 400.

Key words laser processing; Al_2O_3 ceramic; blind-hole; taper angle; roughness

OCIS codes 140.3390; 140.5960; 350.3390

1 引言

凭借高硬度、高强度、耐高温、化学性能稳定及

良好的电绝缘性等优点^[1-3], 陶瓷材料在能源、机械电子、航空航天、计算机、生物工程等领域得到了广泛的应用^[4-6]。特别是在通信、电子封装等领域, 常常需

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-07-31; 录用日期: 2020-08-12

基金项目: 中南民族大学中央高校基本科研业务费专项(CZZ19002, YZZ17005)、中南民族大学校科学基金项目(YZZ18012, CZP20009)

*E-mail: wangxizhao@scu.ec.edu.cn

要在陶瓷材料表面加工孔、槽等典型微结构,加工结构的尺寸精度对电子器件的性能有较大影响。以陶瓷介质滤波器为例,近年来的研究结果表明加工尺寸误差在 ± 0.01 mm时,频率误差小于3 MHz^[7]。

陶瓷材料的高硬度和高脆性,使其成型加工成为传统加工制造业的难点^[8-10]。激光加工具有功率密度高、无接触和无加工作用力等特点,该技术为陶瓷材料表面的成型加工提供了很好的解决方案^[11-13]。国内外学者围绕着实际应用较为广泛的 Al_2O_3 陶瓷材料表面微孔、微槽等典型结构开展了激光微铣削加工的研究,并积累了一定的研究数据。Kuar等^[14-15]研究了 Al_2O_3 陶瓷材料的激光微钻孔工艺,获得了热影响区宽度为0.1683 mm,锥度角为 2.7° 的通孔。国内,袁根福等^[16]利用毫秒级脉冲激光研究了不同的加工参数对 Al_2O_3 陶瓷铣削深度、宽度及表面粗糙度的影响规律。许兆美等^[17]利用纳秒脉冲激光微铣削 Al_2O_3 陶瓷,优化实验后的表面粗糙度与铣削深度分别为 $10.835\ \mu\text{m}$ 和 $131.277\ \mu\text{m}$ 。在现有的激光加工技术下,对于陶瓷材料表面通孔的激光刻蚀加工取得了一定的突破,能够获得热影响小、内壁光滑、无锥度的通孔。随着器件集成化程度要求越来越高,在陶瓷基材上进行异形结构、非通透盲孔的加工需求也逐步增多。

与通孔加工不同的是,在盲孔、盲槽的激光加工过程中,产生的熔融物难以直接从底部排除,未能及时排除的熔融物易在盲孔、盲槽的底部和内壁形成重熔层,从而导致设计尺寸与实际加工尺寸之间存在偏差,进而影响器件的性能指标。如何在陶瓷材料表面加工高质量、小锥度的盲孔成为激光加工中新的技术难点。为探究 Al_2O_3 陶瓷材料盲孔的铣削工艺,本文主要采用不同焦距场镜来完成对 Al_2O_3 陶瓷的加工,分析了盲孔加工过程中聚焦场镜焦距对加工结果的影响机制。

2 实验设备及方案

实验选用的激光器为Spectra-Physics公司生产的半导体泵浦固体激光器,重复频率为200 kHz,波长为355 nm,脉冲宽度为5 ns,最大输出功率为45 W。通过调节电流占空比和衰减器实现了激光功率的精密控制;通过三维移动加工平台搭配高速振镜系统控制激光加工参数,控制参数有扫描速度、重复加工次数、加工路径等。实验中分别选取焦距为 $f_1=100$ mm、 $f_2=160$ mm和 $f_3=250$ mm的

场镜来完成对激光束的聚焦。加工系统的整体结构示意图如图1所示。

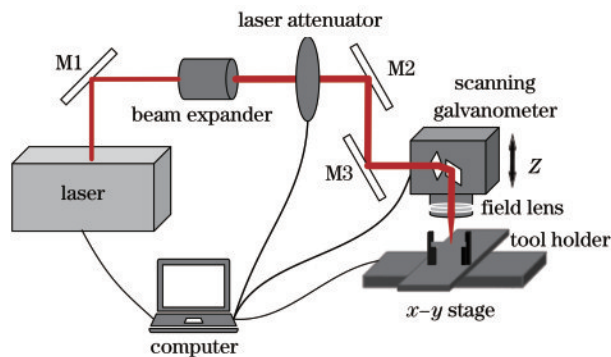


图1 紫外(355 nm)纳秒激光加工实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for micro-milling processing with a UV nanosecond laser

实验加工对象为厚度1 mm的 Al_2O_3 陶瓷基板,其基本性能参数如表1所示。

表1 Al_2O_3 陶瓷的基本性能参数

Table 1 Basic parameters of Al_2O_3 ceramics

Parameter	Value
Alumina content / %	≥ 96
Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	≥ 3.6
Rockwell hardness(HRA)	≥ 80
Compressive strength / MPa	≥ 850
Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	20
Thermal expansion coefficient / K^{-1}	7.2×10^{-6}

假定待加工的 Al_2O_3 陶瓷盲孔的入口宽度为 d_1 ,底部宽度为 d_2 ,盲孔深度为 h ,其理论截面形状如图2所示,则盲孔的锥角 θ 可表示为

$$\theta = \arctan \frac{d_1 - d_2}{2h} \quad (1)$$

本文中盲孔的实际加工要求为入口宽度 d_1 为 $1\ \text{mm} \pm 0.05\ \text{mm}$,深度为 $0.85\ \text{mm} \pm 0.05\ \text{mm}$,锥角小于 6° 。经过基础的优化实验,采用横向直线填充和半圆形弧度组合填充的扫描加工方式,具体的加工过程为首先完成横向的扫描加工,然后加工半圆形弧度,所得填充间距均为 $5\ \mu\text{m}$,填充扫描示意图如图3所示。

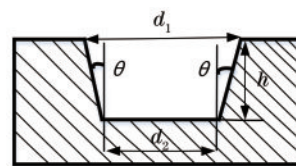


图2 Al_2O_3 陶瓷盲孔理论截面示意图

Fig. 2 Schematic cross-section of a Al_2O_3 ceramic blind hole

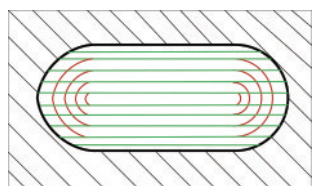


图 3 扫描填充示意图

Fig. 3 Scanning diagram of the laser beam

3 实验结果与讨论

利用上述紫外激光微加工系统,按照图 3 所设计的扫描填充方式进行 Al_2O_3 陶瓷的微铣削加工实验。通过激光共聚焦显微镜(基恩士 VK-X250)对加工实验结果进行微观形貌测量,包括盲孔的入口宽度、底部宽度、加工深度以及粗糙度等。场镜焦距分别为 $f_1=100\text{ mm}$ 、 $f_2=160\text{ mm}$ 以及 $f_3=250\text{ mm}$ 下的最佳加工质量结果如图 4 所示,对应的锥角分别为 9.6° 、 5.4° 和 6.4° 。

3.1 不同场镜焦距对陶瓷盲孔锥度的影响

场镜焦距是影响聚焦光斑内能量密度分布的主要因素。同时,场镜也影响着激光的加工作用方向。如图 5 所示, L 为光束到场镜中心的距离, R 为预设加工尺寸,则有

$$\tan \alpha = \frac{R - L}{f}, \quad (2)$$

式中 α 为激光束入射到样品表面的角度。

图 6 表示在不同场镜焦距下 ($f_1=100\text{ mm}$ 、 $f_2=160\text{ mm}$ 和 $f_3=250\text{ mm}$) 盲孔锥角变化示意图。对比场镜焦距 $f_1=100\text{ mm}$ 和 $f_2=160\text{ mm}$, 焦距变长, 加工盲孔的锥角变小。其中, 在 $f_2=160\text{ mm}$ 下, 盲孔的锥角可低至 5.4° 。在 $f_3=250\text{ mm}$ 下, 盲孔的锥角略微变大。这是因为在不同的场镜焦距下入射到样品表面的激光能量密度随着焦距的增加而减小。激光光斑直径 d 与场镜焦距 f 的关系可表示为

$$d = \frac{2\lambda M^2 f}{\pi \omega_s}, \quad (3)$$

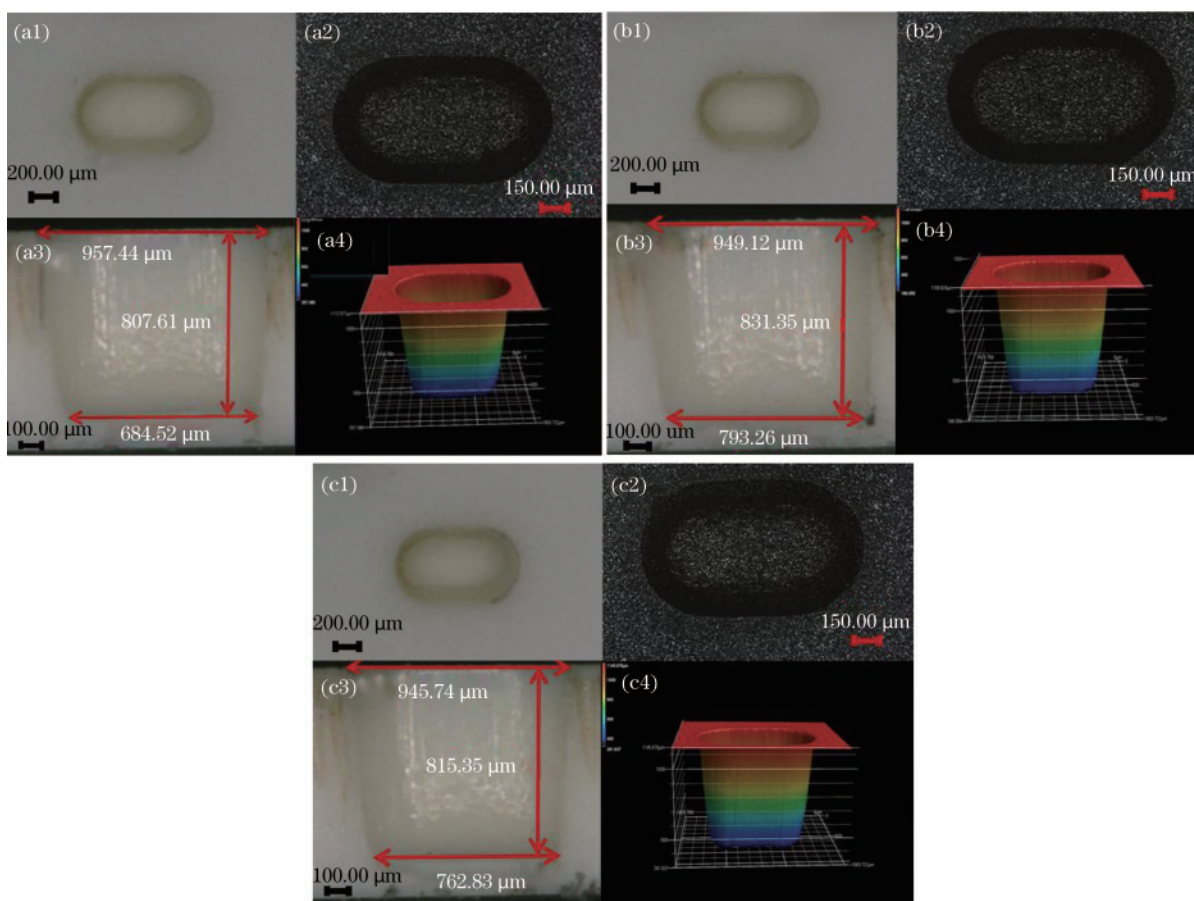


图 4 最佳加工质量结果图(1:实物图,2:微观图,3:剖面图,4:3D 形貌图)。(a1)~(a4) $f_1=100\text{ mm}$; (b1)~(b4) $f_2=160\text{ mm}$; (c1)~(c4) $f_3=250\text{ mm}$

Fig. 4 Results of optimal processing quality(1: photos of the hole; 2: microscopic diagram; 3: section diagram; 4: 3D morphology diagram). (a1)~(a4) $f_1=100\text{ mm}$; (b1)~(b4) $f_2=160\text{ mm}$; (c1)~(c4) $f_3=250\text{ mm}$

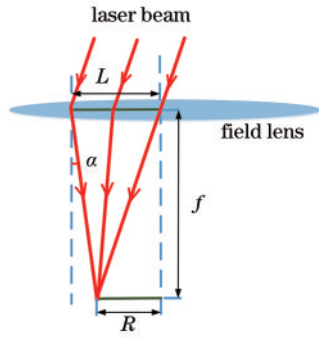


图 5 场镜聚焦示意图

Fig. 5 Schematic diagram of a field lens focusing

其中, λ 是激光的波长, M^2 是激光束的质量因子, ω_0 是入射光至场镜前的光斑半径。由图 4(b3) 和图 4(c3) 可知, $f_2=160$ mm 时入口宽度为 949.12 μm , 底部宽度为 793.26 μm , $f_3=250$ mm 时入口宽度为 945.74 μm , 底部宽度为 762.83 μm , 入口宽度的减小值明显低于底部宽度减小值, 锥角增至 6.4°。

在场镜焦距 $f_2=160$ mm 的条件下, 盲孔的锥角与激光脉冲能量密度、扫描速度、重复扫描次数之

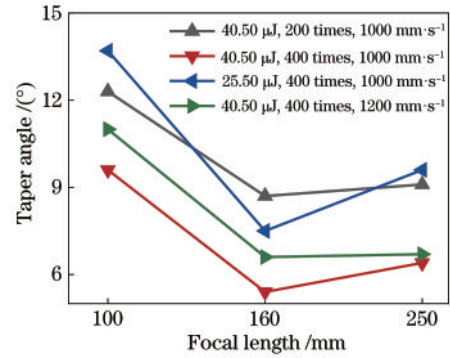


图 6 不同场镜焦距对盲孔锥角的影响

Fig. 6 Influence of focal length on taper angle

间的规律如图 7 所示。图 7(a) 的扫描速度 $v=1000$ mm/s , 在激光能量密度为 30.57 J/cm^2 、重复扫描次数 $N=400, 500, 600$ 时为通孔点。图 7(b) 的重复扫描次数 $N=400$, 在激光能量密度为 28.34 J/cm^2 和 30.57 J/cm^2 、扫描速度 $v=600$ mm/s 时为通孔点。当激光脉冲能量密度为 25.80 J/cm^2 、振镜扫描速度 $v=1000$ mm/s 、重复扫描次数 $N=400$ 时, 可得最小盲孔锥角为 5.4°。

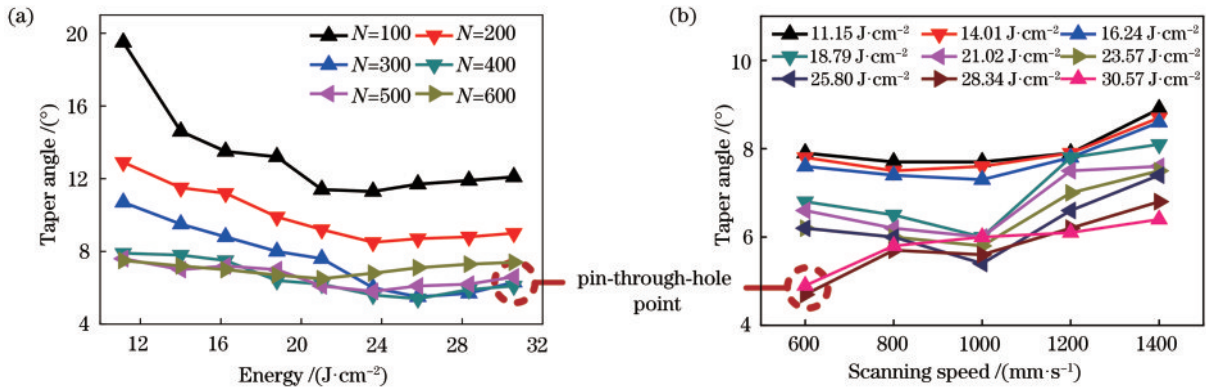


图 7 不同激光参数对盲孔锥角的影响。(a) 锥角随激光能量密度的变化; (b) 锥角随扫描速度的变化

Fig. 7 Influence of laser parameters on the taper angle. (a) Variation of taper angle with laser energy density; (b) variation of taper angle with scanning speed

3.2 激光能量密度对陶瓷盲孔加工质量的影响

当振镜的扫描速度为 $v=1000$ mm/s , 重复扫描的次数为 $N=300$ 时, 不同场镜焦距下, 加工盲孔的锥角和底部粗糙度随激光能量密度的变化规律分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示。

图 8(a) 表明: 在焦距 $f_1=100$ mm , $f_2=160$ mm 的条件下, 盲孔的锥角随着激光能量密度的增加呈现先减小后增大的趋势; 在焦距 $f_3=250$ mm 的条件下, 盲孔的锥角随着激光能量密度的增加呈现减小的趋势。锥角最小处的激光能量密度为 25.80 J/cm^2 。由于激光能量密度增大, 材料的烧蚀深度增加, 盲孔

的锥角变小。而较高能量密度的加工过程会产生大量的等离子体^[18-19], 使得激光束在盲孔内部发生反射、折射, 盲孔吸收大量的激光能量, 从而导致深度的增加值变小。

另外, 根据高斯光斑的能量特性, 基膜的高斯光的能量密度 φ_r 与光束截面半径 r 的关系为^[20]

$$\varphi_r = \varphi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (4)$$

式中, φ_0 为激光光束的峰值能量密度, ω_0 为激光光束的束腰半径。而激光烧蚀有效作用光斑的直径 D 与

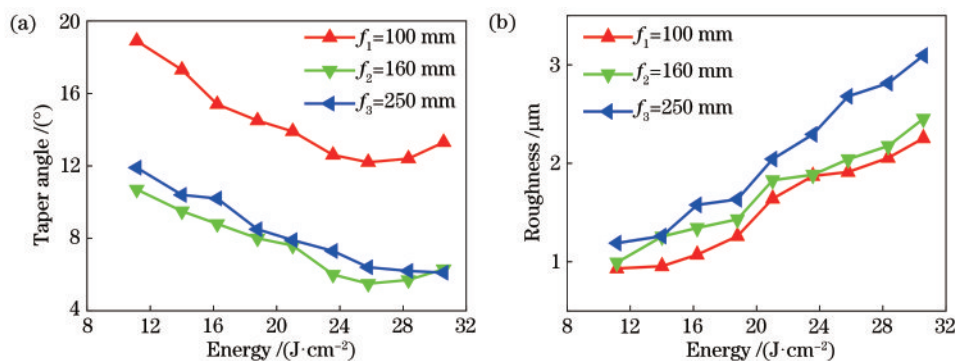


图 8 激光能量密度的影响。(a)锥角随激光能量密度的变化;(b)底部粗糙度随激光能量密度的变化

Fig.8 Influence of the laser energy density. (a)Variation of taper angle with energy density; (b)variation of bottom roughness with energy density

激光光束的峰值能量密度 φ_0 的关系可以表示为^[21]

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right), \quad (5)$$

式中 φ_{th} 是材料达到不可逆损伤时激光能量密度的临界损伤阈值。激光能量密度增大,焦平面处超过 Al₂O₃ 陶瓷损伤阈值的直径 D 增加,如图 9 所示,最终效果使得(1)式中 d_1 的值略有增加。当宽度的增加值大于深度的增加值时,盲孔的锥角呈现上升的趋势。

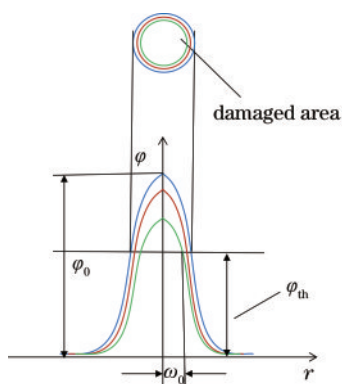


图 9 高斯光束能量密度分布

Fig. 9 Energy density distribution of a Gaussian beam

图 8(b)表明盲孔底部的粗糙度随着激光能量密度的增加呈现增大的规律,并且焦距越短,底部的粗糙度越小,最小值接近 1 μm。随着激光能量密度的增加,在底部脉冲激光烧蚀形成的圆锥孔深度增加,底部的粗糙度增大。而在相同的激光能量密度下,不同焦距的底部微观形貌如图 10 所示。长焦距下焦深也最长,因此在盲孔底部处的激光能量密度较大,加工时产生的熔融现象更加明显,其底部的粗糙度相对较大。

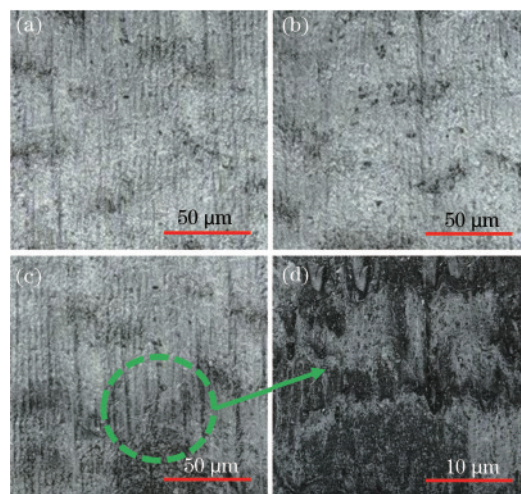


图 10 在不同场镜焦距下,刻蚀盲孔底部的微观形貌图。(a) $f_1=100$ mm ;(b) $f_2=160$ mm ;(c) $f_3=250$ mm ;(d) 图 10(c)中圆圈处的放大图

Fig. 10 Morphology of the hole bottom at different focal lengths. (a) $f_1=100$ mm ;(b) $f_2=160$ mm ;(c) $f_3=250$ mm ;(d) larger view of the circle in Fig. 10(c)

3.3 扫描速度对陶瓷盲孔加工质量的影响

在激光能量密度为 25.80 J/cm²、重复扫描次数 $N=400$ 的条件下,扫描速度对 Al₂O₃ 陶瓷盲孔的锥角和底部粗糙度的变化规律分别如图 11(a)和图 11(b)所示。从图中可以看出,在相同加工速度下,短焦距时加工的锥角较大,约为 9.6°,长焦距时加工的锥角相对较小,约为 5.4°。对于底部粗糙度而言,焦距越长,粗糙度也越大,该变化趋势与图 7 中能量密度变化的趋势基本保持一致。

陶瓷盲孔的加工过程是一个多光斑耦合作用的过程,而扫描速度直接影响沿加工轨迹方向上的激光光斑耦合率。激光光斑的耦合率 η 与扫描速度 v 的关系可表示为

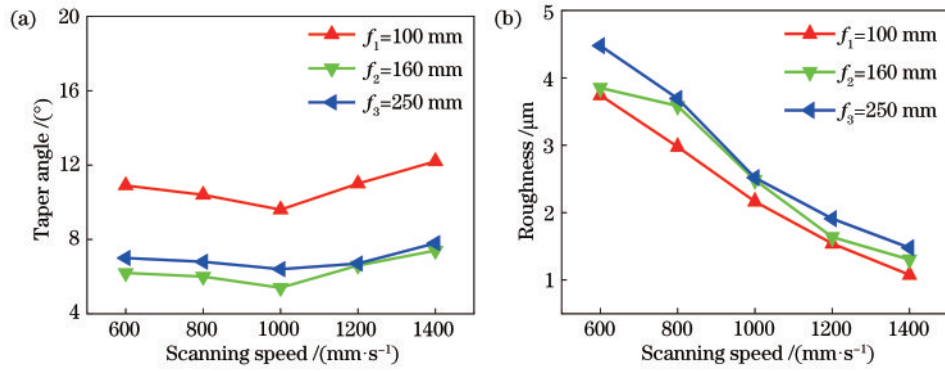


图 11 扫描速度的影响。(a)锥角随扫描速度的变化;(b)底部粗糙度随扫描速度的变化

Fig.11 Influence of scanning speed. (a) Variation of taper angle with scanning speed; (b)variation of the bottom surface roughness with scanning speed

$$\eta = \left(1 - \frac{v}{d \times f_{re}}\right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中 f_{re} 为激光的重复频率。由(6)式可知,当扫描速度较小时 ($v < 1000 \text{ mm/s}$),激光光斑的耦合率较大,单位面积内接收的光斑数越多即加工区域吸收的激光能量增加,容易产生过多不易清除的熔渣,熔渣重铸在盲孔内部,使盲孔锥角变大,同时,在较低的扫描速度下,激光在底部烧蚀剧烈,并伴有较强的融化过程,底部的粗糙度较大。随着扫描速度增加 ($v > 1000 \text{ mm/s}$),激光光斑耦合率不断减小,单位距离上材料吸收激光脉冲数减少,加工区

域吸收的激光能量减少,从而减小了盲孔的加工深度,逐步增加了盲孔的锥角。而此时底部材料的去除是一个累积的过程,产生的熔渣明显变少,底部的粗糙度也随之减小。

3.4 重复加工次数对陶瓷盲孔加工质量的影响

对于单脉冲激光加工来说,其对材料的去除率是一定的,为了达到理想的加工深度,需要进行多次重复刻蚀^[22]。在激光能量密度为 25.80 J/cm^2 、扫描速度 $v = 1000 \text{ mm/s}$ 的条件下,重复扫描次数对 Al_2O_3 陶瓷盲孔的锥角和底部粗糙度的影响如图 12(a)和图 12(b)所示。

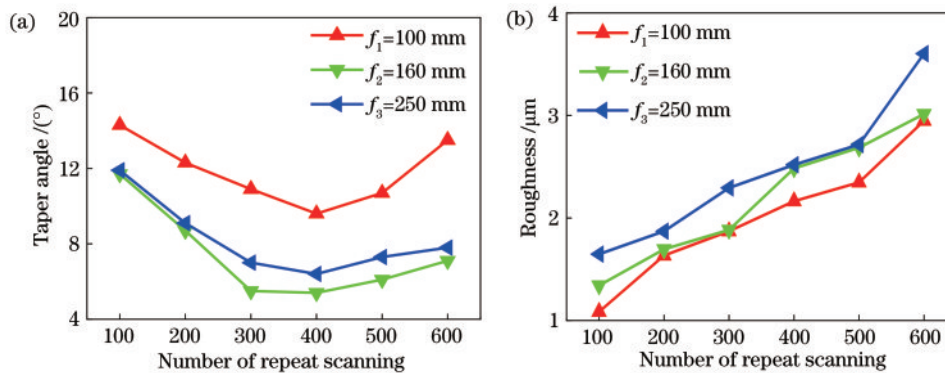


图 12 重复加工次数的影响。(a)锥角随重复扫描次数的变化;(b)底部粗糙度随重复扫描次数的变化

Fig.12 Influence of the number of repeat scanning. (a)Variation of taper angle with the number of repeat scanning; (b) variation of the bottom surface roughness with the number of repeat scanning

图 12(a)表明, Al_2O_3 陶瓷盲孔的锥角 θ 随着重复扫描次数的增加呈现先减小后增加的规律,最小处的重复扫描次数 $N = 400$ 。随着重复扫描次数的增加 ($N < 400$),盲孔深度增加,盲孔宽度变化不大,所以盲孔的锥角减小。随着重复扫描次数持续增加 ($N > 400$),盲孔的锥角反而呈增加趋势,这主要是因为盲孔到达一定的深度后,盲孔内部的残渣排

除需要更长的时间,大部分没来得及排除的残渣最终重铸在盲孔底部和内壁,从而使盲孔锥角的增加。图 12(b)反映了盲孔底部粗糙度随重复加工次数的增加而增大的趋势,重复扫描次数持续增加,底部材料逐步产生过烧现象,这将使得其底部的粗糙度增大。所以当加工深度满足要求时,较少的重复扫描次数能够提高加工的质量和效率。

4 结 论

利用短脉冲紫外激光对 Al_2O_3 陶瓷进行了盲孔微铣削实验。分析了在三种场镜焦距 ($f_1=100\text{ mm}$, $f_2=160\text{ mm}$, $f_3=250\text{ mm}$) 下, 激光能量密度、振镜扫描速度、重复扫描次数对盲孔锥角和底部粗糙度的影响规律。实验结果表明:

1) 场镜焦距对盲孔锥角影响显著, 焦距从 $f_1=100\text{ mm}$ 增至 $f_2=160\text{ mm}$, 盲孔的锥角变小, 持续增加至 $f_3=250\text{ mm}$ 时, 锥角略微变大。因此, 本实验中, 场镜焦距 $f_2=160\text{ mm}$ 时盲孔的锥角效果最佳。

2) 在场镜焦距 $f_2=160\text{ mm}$ 下, 当激光能量密度为 25.80 J/cm^2 , 扫描速度 $v=1000\text{ mm/s}$, 重复扫描次数 $N=400$ 时, 盲孔的整体形貌较好, 底部粗糙度为 $2.48\text{ }\mu\text{m}$, 此时锥角最小, 约为 5.4° 。

3) 利用共聚焦显微镜对 Al_2O_3 陶瓷盲孔底部进行测量, 其底部粗糙度的变化范围约在 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 之间。盲孔底部粗糙度随激光能量密度和重复扫描次数的增大而增大, 随着振镜扫描速度的增大而减小。

本实验获得的 Al_2O_3 陶瓷盲孔加工参数及其对盲孔锥角和底部粗糙度的影响规律, 对陶瓷器件的成型具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] Zhang K, Liu T T, Liao W H, et al. Experiment on selective laser melting forming of Al_2O_3 ceramics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1002007.
张凯, 刘婷婷, 廖文和, 等. 氧化铝陶瓷激光选区熔化成形实验 [J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1002007.

[2] Wang Y X. The study of femtosecond laser processing on TiC ceramic [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
王禹茜. 飞秒激光加工 TiC 陶瓷的工艺研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.

[3] Zhang Z, Chen X X, Li D X, et al. Study on laser preparation of groove surface micro texture of engineering ceramics [J]. Applied Laser, 2018, 38(1): 64-69.
张正, 陈晓晓, 李德鑫, 等. 工程陶瓷凹槽型表面微织构激光制备工艺研究 [J]. 应用激光, 2018, 38(1): 64-69.

[4] Chen Q. Study on micro-drilling technology based on nanosecond pulsed laser [D]. Guangzhou:

Guangdong University of Technology, 2018.

陈强. 基于纳秒脉冲激光的微孔加工技术研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.

- [5] Bao Y M, Wang C W, Jin Z W, et al. Textured surface on a bioceramic coating via a femtosecond laser and its friction and wear properties [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0203003.
鲍雨梅, 王成武, 金志伟, 等. 激光表面织构化生物陶瓷涂层及其摩擦磨损性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0203003.
- [6] Niu W Y, Yu A B, Wu J Z, et al. Influence of laser process parameters on taper and heat affected zone of glass ceramic hole [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031601.
牛威杨, 于爱兵, 吴剑钊, 等. 激光工艺参数对玻璃陶瓷孔锥度和热影响区的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031601.
- [7] Cao L Z, Chen G, Hu H H. Effects of dielectric constant on efficiency of adjusting frequency for dielectric resonators [J]. Electronic Components & Materials, 2005, 24(11): 33-34.
曹良足, 陈刚, 胡鸿豪. 介电常数对介质谐振器调频工作效率的影响 [J]. 电子元件与材料, 2005, 24(11): 33-34.
- [8] Wang A Z, Du B, Hu P, et al. Accurate evaluation of critical flaw size in structural ceramics via femtosecond laser [J]. Ceramics International, 2018, 44(18): 23008-23013.
- [9] Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe901}$ composite coating prepared by laser cladding [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0514001.
周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe901}$ 复合涂层的强化机制及耐磨性 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0514001.
- [10] Zhang C Y, Man W Q, Jie H, et al. Research on the wetting characteristic and micro-and nanostructures of the Al_2O_3 ceramic surface induced by femtosecond laser [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2017, 16(4): 22-26.
张成云, 满文庆, 揭海, 等. 飞秒激光诱导 Al_2O_3 陶瓷表面微纳结构及润湿特性研究 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2017, 16(4): 22-26.
- [11] Ni R P, Qian B, Liu C, et al. Status and prospect of laser additive manufacturing of ceramic materials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011408.
倪荣萍, 钱滨, 刘畅, 等. 陶瓷材料激光增材制造的

- 研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011408.
- [12] Bao J D, Huang Y X, Zhou J, et al. Study on micro-structure of ceramic surface by laser processing[J]. Laser Journal, 2018, 39(3): 114-117.
鲍家定, 黄宇星, 周嘉, 等. 激光加工陶瓷表面微结构技术研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(3): 114-117.
- [13] Liu Z Y, Wei X, Xie X Z, et al. Experimental study about micro texture on ceramic tool surface processed by UV laser [J]. Laser Technology, 2016, 40(4): 550-554.
刘泽宇, 魏昕, 谢小柱, 等. 紫外激光加工陶瓷刀具表面微结构的实验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(4): 550-554.
- [14] 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 and Manufacture, 2006, 46(12/13): 1301-1310.
- [15] Kuar A S, Acherjee B, Ganguly D, et al. Optimization of nd: YAG laser parameters for microdrilling of alumina with multiquality characteristics via grey-taguchi method [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(3): 329-336.
- [16] Yuan G F, Zeng X Y. Experimental study of laser milling on Al_2O_3 ceramics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 467-470.
袁根福, 曾晓雁. Al_2O_3 陶瓷激光铣削试验研究[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 467-470.
- [17] Xu Z M, Meng X K, Qu Y R, et al. Process parameter optimization of Al_2O_3 ceramics milled with nanosecond pulsed laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 231404.
许兆美, 孟宪凯, 屈彦荣, 等. 纳秒脉冲激光铣削 Al_2O_3 陶瓷工艺参数的优化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 231404.
- [18] Luo Y H, Wang X Y. Morphology investigation of removal particles during laser cutting of Al_2O_3 ceramics based on vapor-to-melt ratio [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255: 340-346.
- [19] Zhao W Q, Mei X S, Wang W J. Ultrashort pulse laser drilling of micro-holes (part 1): theoretical study [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0106008.
赵万芹, 梅雪松, 王文君. 超短脉冲激光微孔加工(上): 理论研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0106008.
- [20] Chen G Y, Zhu Z C, Yin J, et al. Experiment on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond laser processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0402001.
陈根余, 朱智超, 殷超, 等. 单晶金刚石飞秒激光加工的烧蚀阈值实验[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0402001.
- [21] Lou D Y, Xiong H, Wu Y G, et al. Damage threshold and drilling mechanism of aluminum plate by nanosecond laser with different pulse widths [J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 427-432.
娄德元, 熊厚, 伍义刚, 等. 不同脉宽纳秒激光致铝材损伤特性与打孔机理[J]. 激光技术, 2017, 41(3): 427-432.
- [22] Zhao W Q, Wang L Z, Yu Z S, et al. A processing technology of grooves by picosecond ultrashort pulse laser in Ni alloy: Enhancing efficiency and quality [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 111: 214-221.