

薄板陶瓷微孔的激光加工工艺研究

肖磊^{1,2} 赵建涛² 闫振峰² 姚勇^{1*}

(¹ 哈尔滨工业大学深圳研究院电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055)
(² 深圳市大族激光科技股份有限公司精密切割事业部, 广东 深圳 518057)

摘要 主要研究薄板陶瓷微孔的激光精密加工工艺。具体采用 CO₂、光纤激光器以脉冲打孔和切割技术,通过优化激光器功率、占空比、重复频率、离焦量、辅助气体类型、气压等工艺参数,旨在改善激光加工陶瓷微孔的热影响、锥度和提高激光加工效率满足工业应用的要求。实验结果表明:采用 CO₂ 激光能够加工出孔径为 80~200 μm 的微孔,其效率达 18 hole/s,热影响也得到了明显改善;而采用光纤激光单脉冲方式打孔速度达 300 hole/s,其微孔锥度可控;切割方式打孔速度达 6~8 hole/s,且能够获得孔径为 100 μm 的直微孔的稳定激光微加工。

关键词 激光技术;陶瓷;激光微加工;激光钻孔;精密加工

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.s114012

Technologic Investigation of Laser Micro-Drilling on the Thin Ceramic Plate

Xiao Lei^{1,2} Zhao Jiantao² Yan Zhenfeng² Yao Yong¹

¹ Department of Electronic and Information Engineering, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

² Precision Cutting Division, Han's Laser Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract The laser precision micromachining processes on the thin ceramic plate are investigated. By taking pulse laser drilling as well as laser cutting technology, this work aims at improving the heat affected zone of laser processing as well as the conicity of microhole and increasing laser processing efficiency to satisfy the industrial requirement. The laser process parameters including laser output power, duty cycle, repeated frequency, the offset of focus spot, the type of assistant gas and gas pressure are optimized in the experiments. The results show that the microholes with diameter of 80~200 μm are obtained by using CO₂ laser drilling on ceramic plate and its efficiency up to 18 hole/s; the heat affected zone has also been significantly improved. The conicity controllable microholes are achieved by single pulse drilling technology with fiber laser and its efficiency achieves 300 hole/s. The stable laser precision micromachining on the ceramics for the straight microholes with diameter of 100 μm is also obtained by laser cutting technology using fiber laser and its efficiency achieves 6~8 hole/s.

Key words laser technique; ceramics; laser micromachining; laser drilling; precision machining

OCIS codes 140.3390; 140.6810; 140.3070; 350.3390

1 引 言

陶瓷材料具有高硬度、高强度、耐高温、耐酸碱腐蚀、化学稳定性高等优点,广泛应用于机械、电子、航空航天、生物工程等领域,因此陶瓷加工市场需求巨大。因陶瓷材料的高硬度、高脆性等特点,使得其

加工困难,传统的加工方法不能够进行有效的加工,例如采用高硬度的金刚石钻头,成本高、效率低,且难以完成深径比大于 10 的微孔加工。因此传统的加工方法难以保证精度要求,加工效率低、成本高,所以陶瓷材料的高精度加工具有重大意义^[1-2]。

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-05-13

基金项目: 哈工大-大族激光博士后创新实践基地项目(LRB12-518)

作者简介: 肖磊(1977—),男,博士,工程师,主要从事材料的激光精密加工技术方面的研究。

E-mail: lei.xiao@hanslaser.com

* 通信联系人。E-mail: yaoyong@hit.edu.cn

激光加工具有无接触加工、无作用力作用于工件;易于导向,可实现柔性加工;可加工高硬度、高熔点、高脆性材料;生产效率高、加工质量稳定可靠等优点,已经广泛应用于工业加工^[3]。CO₂激光及光纤激光是当前工业激光加工中使用最广泛的两类激光器,以CO₂激光和光纤激光作为激光器的激光加工设备在激光精密切割、打孔、焊接、标记、快速成型等激光加工领域获得了广泛使用,并且未来在陶瓷材料的精密切割、打孔方面具有广泛的应用空间。文献[4-6]研究了激光加工陶瓷材料的微裂纹,对激光加工陶瓷热应力及裂纹进行了理论分析和实验研究。文献[7]讨论了各种激光加工陶瓷材料的优缺点,并对激光加工陶瓷的发展前景进行了评述。文献[8]介绍了倾斜回转法进行陶瓷精密打孔的方法,减少了陶瓷打孔的锥度。文献[9]采用Nd:YAG激光器对陶瓷喷嘴进行打孔研究;文献[10]采用连续CO₂激光对氮化硅陶瓷进行打孔实验研究,并获得深径比18.75的孔。

本文分别采用CO₂、光纤激光器以脉冲打孔和切割技术,通过优化激光器功率、占空比、重复频率、离焦量、辅助气体类型、气压等工艺参数,旨在改善激光加工陶瓷微孔的热影响、锥度和提高激光加工效率满足工业应用的要求。

2 二氧化碳激光精密加工陶瓷微孔的工艺研究

激光微孔加工和切割设备系统结构如图1所示,激光器输出的激光光束首先经过扩束镜扩束,以压缩激光束的发散角,得到平行光,然后由分光镜进行分光,分光镜对激光的反射率为95%,透射率约为5%,5%的透射光束进入探测器中,探测器实时探测激光器的输出功率,并将采集的数据反馈到计算机,计算机对反馈的数据进行处理,然后发送控制信号到激光器,从而完成对激光器的实时监控功能。95%的反射光束进入聚焦镜,聚焦后的激光束经过保护镜片后进入气嘴。保护镜对激光高透射,用于防止灰尘污染聚焦镜,从而增加聚焦镜的使用寿命。聚焦后的激光束从气嘴中心射出,焦点位于陶瓷材料附近,激光束和与其同轴的高速辅助气体,对陶瓷材料进行加工,高速辅助气体能够在激光熔化材料后,将熔融物吹除,如果使用氧气进行加工,气体还能够促进材料在激光辐照下的反应,从而为激光加工提供部分能量。为了防止灰尘污染保护镜片,还

在保护镜片下方的侧面吹入保护气体,能够使灰尘难以接近保护镜片。

激光微孔加工的基本原理如下:高能量的激光束聚焦后入射到材料表面,焦点处的温度可在短时间内急速上升,材料会产生气化或者熔化,气化或熔化后的材料在激光和辅助气体的作用下,会喷射出来,随着材料不断被去除,孔逐渐加深,随着直径和深度的不断增加,最后形成深孔。激光切割的原理则是,在通孔形成之后,随着被加工材料和激光束之间的相对运动,在相对运动轨迹周围的材料不断被去除,最终形成切缝。

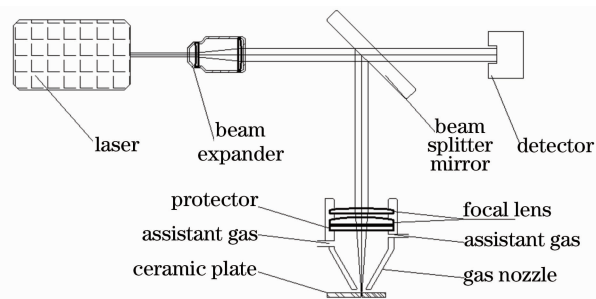


图1 激光打孔和切割设备系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of laser drilling and cutting equipment system

激光光束经过透镜将光斑聚焦于加工材料上,焦点中心位置的激光能量呈高斯分布且焦斑直径最小,而远离焦点中心位置时光斑尺寸变大;输出激光除了基模之外,还有高阶模,焦点中心位置处的能量密度最大,远离焦点中心位置时因激光高阶模会迅速展宽而导致能量密度下降。因此,高能量密度的激光焦斑将材料迅速熔融形成孔状熔池,另外在孔加深的过程中,孔内材料表面不再平整,且会有熔融材料向上喷射,向上喷射的熔融材料会吸收部分激光能量,因此随着孔的深度增加,实际作用到孔内材料的激光能量密度发生改变,远离焦点中心位置时激光焦斑尺寸变大,进而形成的熔池尺寸也相应变大,与光束同轴的高压气体将熔融物吹走,所以激光加工的微孔会呈现一定的锥度。现在以倾斜角度 A 表征微孔的倾斜程度:

$$A = \arctan\left(\frac{D-d}{2L}\right), \quad (1)$$

式中 D 为材料表面较大的孔直径, d 为另一面较小的孔径大小, L 为材料厚度,所研究的Al₂O₃陶瓷材料厚度为0.38 mm。

本实验采用射频激励快轴流CO₂激光器,其中心波长为10.6 μm,平均输出功率为400 W。

2.1 CO₂ 激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔加工的影响

为了减小像差,得到最小的聚焦光斑,实验采用双组合聚焦镜,聚焦镜焦距为 50 mm,设激光焦点中心位置在陶瓷材料下表面时离焦量为 0,激光焦点中心位置向上,离焦量为正值,激光焦点中心位置向下,离焦量为负值。采用氧气为辅助气体,气压为 1.0 MPa,占空比为 10%,重复频率为 100 Hz,此时实际使用功率为 104 W,通过实验研究激光焦点中心位置离焦量对陶瓷微孔加工效果的影响。因聚焦透镜的焦距为 50 mm,波长为 10.6 μm,理论估算该聚焦透镜的焦深在 ±0.21 mm(即在焦点中心位置 ±0.21 mm 内被认为在焦深范围内)。由图 2 所示,实验结果表明:当激光焦点中心位置离焦量在 0~0.4 mm 范围内,这个范围略小于焦深的范围,即激光焦点中心位置最低位于材料下表面,最高位于材料上表面的范围内,微孔的上表面孔径大小基本稳定,而且微孔下表面孔径大小也基本相同,因此微孔的倾斜角度 A 比较接近。实验获取的焦深和理论值基本相符,同时当离焦量为 0.2 mm 时,0.38 mm 厚度的薄板完全置于聚焦透镜的焦深范围之内,为了允许焦深中心位置变动范围较大的同时确保孔的锥度尽可能小,在后续 CO₂ 激光打孔的实验中离焦量统一取 0.2 mm。

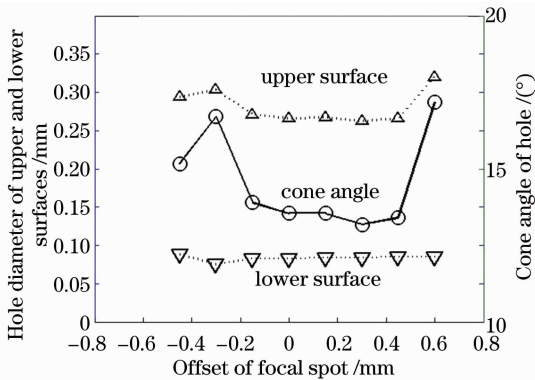


图 2 CO₂ 激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔加工的影响

Fig. 2 Impact of focus spot's offset on ceramic micromachining using CO₂ laser

2.2 辅助气体压强对陶瓷微孔加工的影响

为了提高微孔加工质量,激光陶瓷微孔加工必须使用高速辅助气体,实验采用氧气作为 CO₂ 激光加工陶瓷微孔的辅助气体。实验设置激光脉冲的占空比为 8%,重复频率为 100 Hz,此时实际使用功率为 83 W,激光焦点中心位置的离焦量为 0.2 mm,通

过实验研究辅助气体的气压对陶瓷微孔加工的影响,如图 3 所示,实验结果表明:当采用低于 0.8 MPa 的气压时,由于压力太小,难以将厚度为 0.38 mm 的陶瓷穿透,当辅助气体压力为 0.8~1.6 MPa 时,微孔下表面的直径大小基本相同,但是当辅助气体压力高于 1.2 MPa 时,随着压力增大,微孔上表面的孔径逐渐变大。这是由于上表面的陶瓷材料被熔化之后,被高压辅助气体吹除形成的。当辅助气体压力为 1 MPa 时,微孔的倾斜角最小,效果最佳。

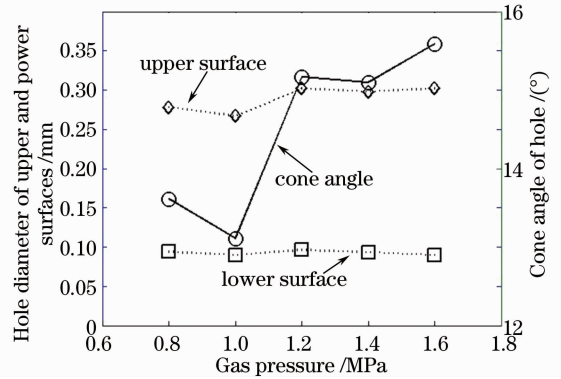


图 3 辅助气体压强对 CO₂ 激光陶瓷微孔加工的影响

Fig. 3 Impact of assistant gas pressure on ceramic micromachining using CO₂ laser

2.3 CO₂ 激光占空比对陶瓷微孔加工的影响

实验设置重复频率为 100 Hz,采用氧气作为辅助气体,气压为 1.0 MPa,激光焦点中心位置的离焦量为 0.2 mm,通过实验研究 CO₂ 激光占空比对陶瓷微孔加工的影响,如图 4 所示,实验结果表明:材料上、下表面孔径大小基本随着 CO₂ 激光占空比,即激光能量的增大而线性增大。但微孔倾斜角度随激光占空比的增大,先减小,再增大,所以当激光占空比为 8% 时,微孔的倾斜角度最小。

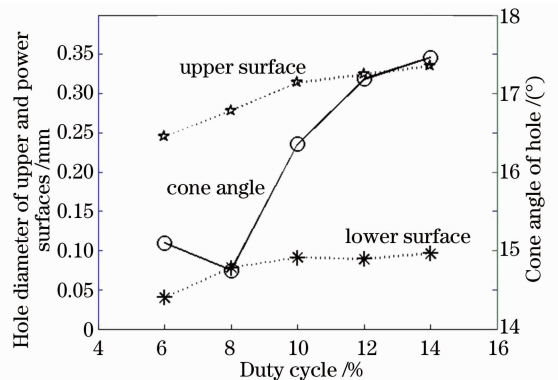


图 4 CO₂ 激光占空比对 CO₂ 激光陶瓷微孔加工的影响

Fig. 4 Impact of duty cycle on ceramic micromachining using CO₂ laser

2.4 CO₂ 激光频率对陶瓷微孔加工的影响

实验采用氧气作为辅助气体,气压为 1.0 MPa,激光焦点中心位置的离焦量为 0.2 mm,通过实验研究改变 CO₂ 激光频率对陶瓷微孔加工的影响,如图 5 所示,实验结果表明:随着激光频率增加,陶瓷上、下表面的微孔孔径呈减小趋势,这是因为当激光占空比不变时,频率越低,单脉冲能量越大,所以微孔直径越大,随着频率增加,单脉冲能量减小,微孔直径减小。微孔的倾斜角度随着频率的增大,先减小,然后增大,所以在激光频率为 100 Hz 时,倾斜角度最小,效果最佳。

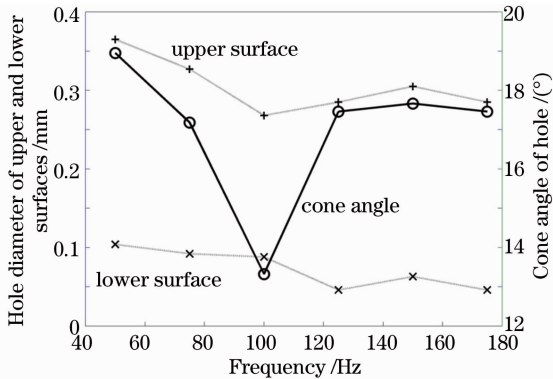


图 5 CO₂ 激光频率对 CO₂ 激光陶瓷微孔加工的影响

Fig. 5 Impact of frequency on ceramic micromachining using CO₂ laser

2.5 CO₂ 激光陶瓷微孔加工效果的改善

工艺参数优化前、后,CO₂ 激光陶瓷微孔加工的效果分别如图 6、7 所示。在工艺参数优化前,实验设置重复频率为 80 Hz,占空比为 14%,此时实际使用功率为 146 W,采用氧气作为辅助气体,气压为 1.4 MPa,激光焦点中心位置的离焦量为 0,微孔倾斜角度比较大,陶瓷材料上表面的微孔孔径约 0.2580 mm,下表面微孔孔径约 0.1271 mm。薄板陶瓷微孔的上、下表面边缘及剖面上,热影响区严重,出现明显的“喇叭口”现象。

在根据上述实验研究规律进行参数优化之后,实验采用了射频激励快轴流 CO₂ 激光器,中心波长为 10.6 μm,平均输出功率为 400 W,重复频率为 100 Hz,占空比为 10%,此时实际使用功率为 104 W,采用氧气作为辅助气体,气压为 1.0 MPa,激光焦点中心位置的离焦量为 0.2 mm,微孔上、下表面的边缘及剖面都比较光滑,微孔上表面孔径为 0.082~0.095 mm,微孔下表面孔径为 0.16 mm,微孔倾斜角度较小。另外,热影响区域更小,而且微孔下表面不存在熔渣。图中黑色部分是为了方便仪器检测,

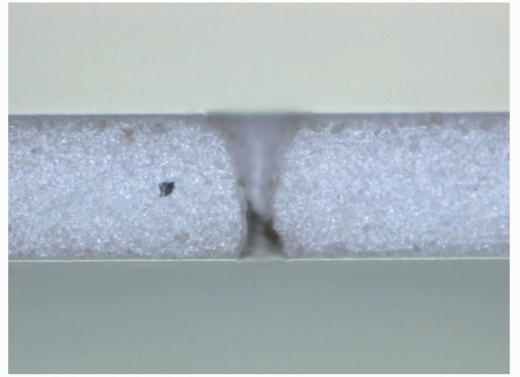


图 6 工艺参数优化前的 CO₂ 激光加工陶瓷微孔剖面图

Fig. 6 Sectional view of ceramic microhole using CO₂ laser before optimization of process parameters

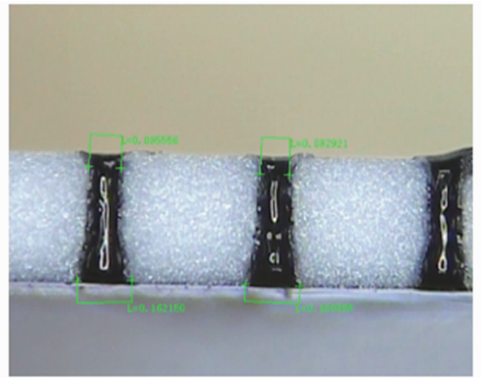


图 7 工艺参数优化后的 CO₂ 激光加工陶瓷微孔剖面图

Fig. 7 Sectional view of ceramic microhole using CO₂ laser after optimization of process parameters

方便观察,而是用油墨将其涂黑,激光加工后的陶瓷材料本身并无变色现象。

激光微孔加工的剖面形状与入射的激光能量有关,优化前的工艺参数中使用的平均功率为 146 W,重复频率为 80 Hz,则优化前的单点能量为 1.825 J;而优化后的工艺参数中使用的平均功率为 104 W,重复频率为 100 Hz,则优化后的单点能量为 1.04 J,对比图 6、7 分别所示的激光入射面的微孔形状,由于优化前的单点能量过大,导致热影响区也很大,图 6 所示的剖面图中,入射面口有明显的熔融凹坑状的“喇叭口”现象,因此激光单点能量是造成陶瓷微孔加工热影响区的重要因素之一。

CO₂ 激光在薄板陶瓷上进行微孔加工本质上是激光与物质的相互作用,激光作用在陶瓷上的时间越长,热影响区就越大,而表征脉冲激光器的激光与陶瓷的作用时间可以用脉宽来表示,激光脉冲的脉宽越大,则说明激光能量作用于材料的时间就越长。优化工艺参数前的重复频率为 80 Hz,占空比为 14%,则激光脉冲的脉宽为 1.75 ms;优化工艺参

数后的重复频率为 100 Hz, 占空比为 10%, 则激光脉冲的脉宽为 1 ms。优化工艺参数后的激光脉冲的宽度明显变小, 所以图 7 所示陶瓷微孔的热影响区明显小于图 6 所示陶瓷微孔的热影响, 因为图 6 有明显的热影响引起的“喇叭口”现象。

聚焦透镜有一定的焦深, 所用的聚焦透镜的焦距为 50 mm, 其焦深的理论计算值为 ± 0.21 mm; 而薄板陶瓷的厚度为 0.38 mm, 如焦点的中心位置与薄板陶瓷材料的中心重合, 则聚焦透镜的焦深能够覆盖整个薄板陶瓷的厚度, 理论上是在该陶瓷上加工出直微孔。设定激光焦点中心位置在薄板陶瓷材料下表面时离焦量为 0, 激光焦点向上, 离焦量为正值, 激光焦点向下, 离焦量为负值。优化工艺参数之前, 激光焦点中心位置的离焦量为 0, 根据假定, 焦点中心位置此时在薄板陶瓷的下表面上, 即焦点的中心位置在薄板陶瓷的下表面上, 处于负离焦状态, 薄板陶瓷的上表面距离焦点中心位置为 0.38 mm, 而焦深为 ± 0.21 mm, 则说明薄板陶瓷材料中从下表面起往上表面的方向有 0.21 mm 的高度置于焦深范围之内, 还有 0.17 mm 厚的陶瓷置于焦深范围之上; 激光通过透镜聚焦于焦点, 焦点中心位置的激光能量呈高斯分布, 在焦点中心位置处, 因腰斑直径最小, 其激光能量密度最大, 当远离焦点中心位置时, 激光的高阶模会迅速展宽而能量密度下降。因此, 离焦量为 0 时, 激光聚焦斑尺寸在薄板陶瓷厚度范围内呈上大下小分布, 而激光能量密度分布则呈上小下大分布, 所以激光入射面的孔径要比激光出射面的孔径要大, 如图 6 所示, CO_2 激光器在这组工艺参数条件下在薄板陶瓷上打出来孔明显上孔径要比下孔径要大, 呈“喇叭口”状。优化工艺参数之后, 其离焦量为 0.2 mm, 则说明焦点中心位置处于距离薄板陶瓷下表面之上 0.2 mm, 即薄板陶瓷的下表面距离焦点中心位置的距离为 -0.2 mm (“-”表示该位置位于焦点中心位置之下), 陶瓷上表面距离焦点中心位置的距离为 $+0.18$ mm (“+”表示该位置位于焦点中心位置之上), 而聚焦透镜的焦深为 ± 0.21 mm, 所以, 0.38 mm 厚的薄板陶瓷完全至于在焦深范围之内, 如图 7 所示, CO_2 激光器在 0.2 mm 的离焦量下能够在薄板陶瓷上打出较小锥度的微孔。

3 光纤激光精密加工陶瓷微孔的工艺

近年来, 光纤激光器技术发展迅猛, 已经成功开发出了多种覆盖各种应用的新型光纤系统, 越来越

成为工业激光加工中的重要激光器之一。

光纤激光器具有结构紧凑、光电转换效率高、成本适中、易于集成等优点, 更为重要的是, 光纤激光器能够产生高质量的输出光束, 使得聚焦光斑的尺寸减小, 这对高精度的微细激光加工而言至关重要。光纤激光器的光束传输性能好, 可以实现远距离的柔性传输, 另外, 光纤激光器稳定性和可靠性高, 保证了光纤激光在工业加工中的应用。

因光纤激光器聚焦后光斑半径非常小, 可采用脉冲冲孔和环切两种方式加工陶瓷微孔。

3.1 光纤激光脉冲冲孔陶瓷微孔加工的工艺研究

实验使用脉冲光纤激光器, 激光器中心波长为 1070 nm, 平均输出功率为 150 W, 峰值功率为 1500 W, 光束质量因子 $M^2=1.1$, 采用焦距为 100 mm 的准直镜对光纤激光进行准直, 然后采用焦距为 75 mm 的双组合聚焦镜, 该聚焦透镜的理论焦深值为 ± 0.181 mm。采用脉冲光纤激光器, 激光器脉宽为 200 μs , 频率为 300 Hz, 打孔速度为 300 hole/s, 即每一个脉冲加工一个微孔。

3.1.1 光纤激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔加工的影响

设光纤激光的焦点中心位置位于陶瓷材料上表面时, 光纤激光焦点中心位置的离焦量为 0, 激光焦点向下, 离焦量为负值, 反之为正值。实验采用氮气作为辅助气体, 气压为 2 MPa, 通过实验研究光纤激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔加工效果的影响, 如图 8 所示, 实验结果表明: 当光纤激光的焦点中心位置处于陶瓷材料的中间位置, 即当离焦量为 -0.2 mm 时, 微孔的上表面孔径最小而下表面孔径最大, 此时微孔的倾斜角度最小。当离焦量为 -0.2 mm 时, 聚焦透镜的焦深为 ± 0.181 mm, 所以, 薄板陶瓷的下表面距离焦点中心位置的距离为 -0.18 mm (“-”表示薄板陶瓷的下表面在焦点中心位置的下面), 薄板陶瓷的上表面距离焦点中心位置的距离为 $+0.2$ mm (“+”表示薄板陶瓷上表面在焦点中心位置的上面), 所以, 薄板陶瓷上下表面距离焦点中心位置的距离为 $(+0.2$ mm, -0.18 mm), 而焦深为 ± 0.181 mm, 置于焦深范围内的陶瓷部分占整个陶瓷厚度的比例为 95%, 即整个 0.38 mm 厚的薄板陶瓷中有 95% 的陶瓷置于聚焦透镜的焦深范围之内, 而且陶瓷的中心在焦点中心位置之上, 所以上孔径要比下孔径略大, 当离焦量分别为 -0.5 、 -0.4 、 -0.3 、 -0.2 、 -0.1 、 0 mm 时, 0.38 mm 厚的薄板陶瓷的上、下表面距离焦深中心的距离分别为

(+0.5 mm, +0.12 mm)、(+0.4 mm, +0.02 mm)、(+0.3 mm, -0.08 mm)、(+0.2 mm, -0.18 mm)、(+0.1 mm, -0.28 mm)和(+0 mm, -0.38 mm),所以,这些离焦状态时,0.38 mm厚的薄板陶瓷都不能完全置于聚焦透镜的焦深范围(± 0.181 mm)之内,对于0.38 mm厚的薄板陶瓷,其处于焦深范围内的部分和薄板陶瓷整体厚度的百分比分别是:16%、42.4%、68.7%、95%、73.9%、47.6%;离焦量分别为-0.5、-0.4、-0.3、-0.2 mm时,薄板陶瓷中心均位于焦点中心位置之上,故薄板陶瓷的上表面的孔径都要比下表面孔径要大,则陶瓷微孔呈现一定的锥度,对于0.38 mm厚的薄板陶瓷,其处于焦深范围内的部分和薄板陶瓷整体厚度的百分比分别是:16%、42.4%、68.7%、95%,理论上其孔锥度是越来越小,而图8中-0.3 mm离焦量的锥度比-0.4 mm离焦量的锥度要略大,可能原因是上下孔径大小的人为测量误差所致,但锥度的总体趋势是下降的;而离焦量分别为-0.1 mm和0 mm时,薄板陶瓷中心位于焦点中心位置之下,对于0.38 mm厚的薄板陶瓷,其处于焦深范围内的部分和薄板陶瓷整体厚度的百分比分别是73.9%和47.6%,随着焦点中心位置远离薄板陶瓷中心,其锥度是增加的,如图8所示。

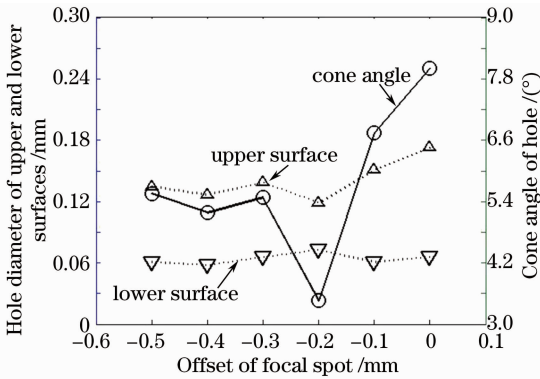


图8 光纤激光焦点中心位置的离焦量对陶瓷微孔加工的影响

Fig. 8 Impact of focus spot's offset on ceramic micromachining using fiber laser

3.1.2 辅助气体压强对陶瓷微孔加工的影响

实验采用氮气作为光纤激光陶瓷微孔加工的辅助气体。光纤激光焦点中心位置的离焦量为-0.2 mm,研究了辅助气体的压强对陶瓷微孔加工的影响,如图9所示,结果表明:随着辅助气体压强的增大,微孔上、下孔径逐渐增大。这是由于辅助气体压强越大,作用于陶瓷材料的压力越大,由激光熔融的材料被吹除的越多,导致微孔孔径变大。当辅助气体压强为2 MPa时,微孔的倾斜角度最小。

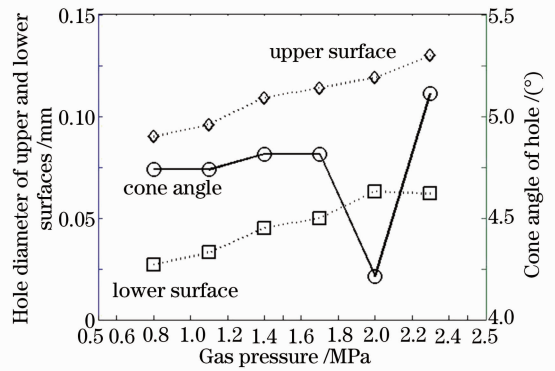


图9 辅助气体压强对光纤激光陶瓷微孔加工的影响

Fig. 9 Impact of assistant gas pressure on ceramic micromachining using fiber laser

3.1.3 光纤激光平均功率对陶瓷微孔加工的影响

实验采用了光纤激光器的平均输出功率为120 W,焦距为100 mm的准直镜,焦距为75 mm的双组合聚焦镜,激光器脉宽为200 μ s,采用氮气作为辅助气体,气压为2 MPa,光纤激光焦点中心位置的离焦量为-0.2 mm,通过实验研究光纤激光的平均功率对陶瓷微孔加工的影响,如图10所示,实验结果表明:材料上、下表面孔径大小基本随着光纤激光的功率的增大而呈现线性增大。但微孔倾斜角度随光纤激光功率的增大,先减小,再增大,所以当光纤激光平均功率为120 W时,微孔的倾斜角度最小。

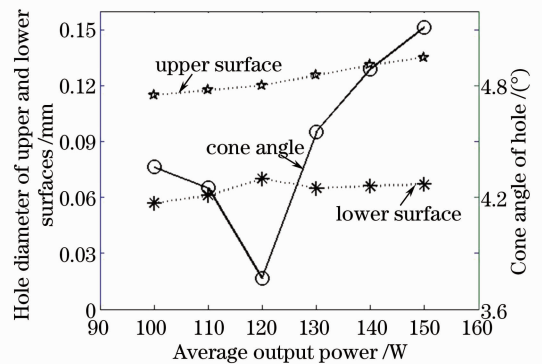


图10 平均功率对光纤激光陶瓷微孔加工的影响

Fig. 10 Impact of average power on ceramic micromachining using fiber laser

3.1.4 光纤激光脉冲冲陶瓷材料的效果

工艺参数优化前、后,光纤激光陶瓷微孔加工的效果分别如图10、11所示。在工艺参数优化前,实验采用了光纤激光器的平均输出功率为110 W,焦距为100 mm的准直镜,焦距为75 mm的双组合聚焦镜,聚焦透镜的焦深为 ± 0.181 mm,激光器脉宽为200 μ s,频率为300 Hz,采用氮气作为辅助气体,

气压为 1.8 MPa, 光纤激光焦点中心位置的离焦量为 0, 如图 11 所示, 实验结果表明: 陶瓷微孔倾斜角度比较大, 陶瓷材料上表面的微孔孔径约 0.132 mm, 下表面微孔孔径约 0.061 mm。微孔上、下表面以及侧面的热影响区严重, 而且在陶瓷上表面, 微孔周围存在喷渣现象, 而在底面则存在熔渣。

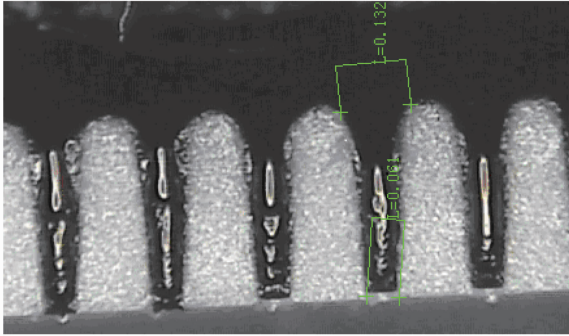


图 11 工艺参数优化前的光纤激光加工陶瓷微孔剖面图
Fig. 11 Sectional view of ceramic microhole using fiber laser before optimization of process parameters

在根据上述规律进行参数优化之后, 实验采用了光纤激光器的平均输出功率为 120 W, 焦距为 100 mm 的准直镜, 焦距为 75 mm 的双组合聚焦镜, 激光器脉宽为 200 μs , 频率为 300 Hz, 采用氮气作为辅助气体, 气压为 2 MPa, 光纤激光焦点中心位置的离焦量为 -0.2 mm, 如图 12 所示, 实验结果表明: 微孔上、下表面的边缘及剖面都比较光滑, 微孔上表面孔径为 0.119 mm, 微孔下表面孔径为 0.073 mm, 微孔倾斜角度仅有 3.5°。另外, 热影响区极小, 几乎肉眼不可见, 而且微孔底面不存在熔渣。

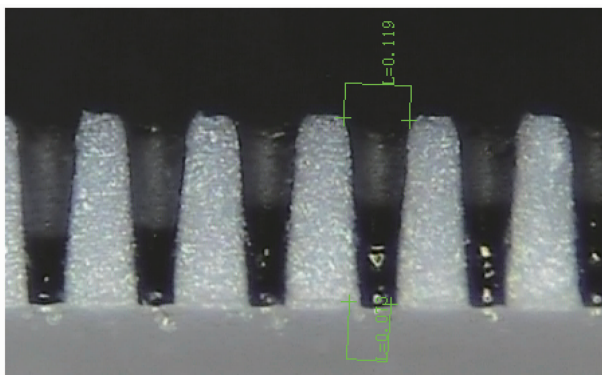


图 12 工艺参数优化后的光纤激光加工陶瓷微孔剖面图
Fig. 12 Sectional view of ceramic microhole using fiber laser after optimization of process parameters

3.2 光纤激光切割方式陶瓷微孔加工的工艺研究

因为光纤激光波长是 CO_2 激光波长的 1/10, 根据衍射理论, 光纤激光的衍射极限非常小, 所以聚焦光斑直径可以达到几十微米量级, 因此可以利用光

纤激光切割的方式进行陶瓷微孔加工。实验采用平均功率最高为 200 W 的脉冲光纤激光器, 光束质量因子 $M^2=1.1$, 脉宽为 500 μs , 频率为 200 Hz。采用焦距为 75 mm 的双组合聚焦镜进行聚焦。

3.2.1 光纤激光平均功率对其切割方式陶瓷打孔的影响

光纤激光的平均功率对切割方式陶瓷打孔的影响如图 13 所示, 随着光纤激光功率的增加, 微孔上、下表面的孔径呈增大趋势。当光纤激光功率为 60~80 W 时, 微孔上表面的孔径较小, 但此时微孔下表面的孔径也很小, 导致微孔的倾斜角度比较大。而当光纤激光功率为 90~100 W 时, 上表面微孔孔径约为 0.12 mm, 下表面微孔孔径约为 0.11 mm, 此时微孔的倾斜角度达到最小, 小于 1.2°。

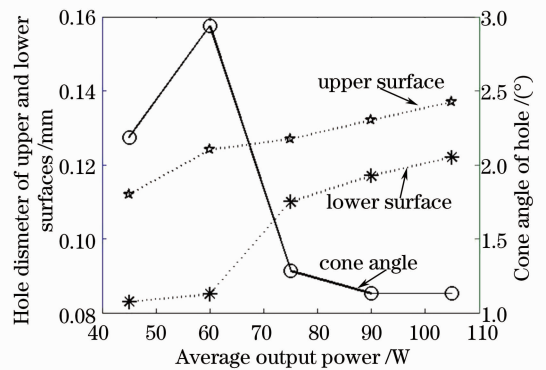


图 13 光纤激光的平均功率对切割方式陶瓷打孔的影响
Fig. 13 Impact of average power on ceramic micromachining using fiber laser cutting

3.2.2 光纤激光切割方式陶瓷微孔加工的效果

采用光纤激光切割方式进行微孔加工, 加工速度达到 8 hole/s, 加工效果如图 14 所示, 相比脉冲打孔方式, 切割方式加工的微孔的倾斜角更小, 陶瓷材料上表面微孔孔径约 0.115 mm, 下表面微孔孔径为 0.100 mm, 且切割方式打孔可通过调节切割图形的大小, 调节微孔的大小。

4 结 论

本文分别采用 CO_2 激光器和光纤激光器对陶瓷微孔进行加工, 但是由于 CO_2 激光波长较大, 相比光纤激光, 采用 CO_2 激光脉冲打孔方式能够获得的最小微孔孔径也比较大, 而且在材料上表面的热影响区域比较大, 导致微孔上表面呈“喇叭形”。

光纤激光切割方式打孔的孔径可以得到光纤脉冲方式打孔的大小, 而且微孔的倾斜角度更小。使用频率为 300 Hz 的脉冲光纤激光器, 采用光纤脉冲

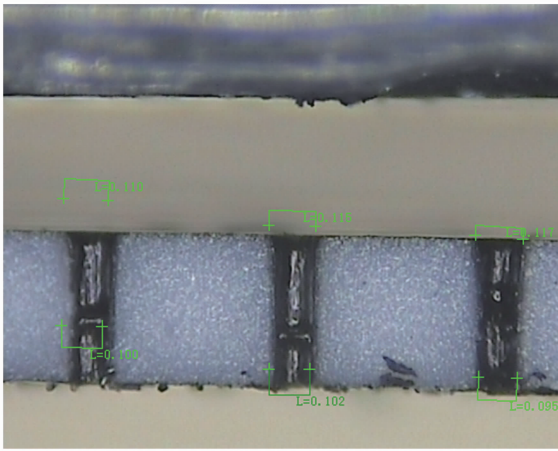


图 14 光纤激光切割方式陶瓷微孔剖面图

Fig. 14 Sectional view of ceramic microhole with fiber laser cutting

打孔的方式可以达到 300 hole/s, 在机床速度满足的条件下, 光纤脉冲打孔的速度与光纤激光器的频率成正比, 即增加激光器的频率, 并同比例增大激光平均输出功率, 此时可同比例提高加工速度, 因此光纤激光脉冲打孔方式可以达到较高的速度。采用光纤激光切割方式打孔达到倾斜角都比较小, 效果更好, 但是效率比较低, 光纤激光切割方式加工孔径为 100 μm , 基本无倾斜角度的微孔, 能够达到 6 hole/s。

总之, 采用 CO_2 激光和光纤激光两种激光, 采用 CO_2 脉冲打孔方式、光纤激光脉冲打孔方式、光纤激光切割方式共 3 种方式对陶瓷材料的微孔精密加工进行了详细的研究。采用 CO_2 激光脉冲打孔方式, 可加工孔径 80~200 μm 的微孔, 加工效率达 18 hole/s, 并改善了其热影响区域。对于光纤激光加工, 采用脉冲打孔方式, 打孔速度达 300 hole/s; 采用切割方式打孔, 速度达 6~8 hole/s, 且能够获得孔径为 100 μm 的直微孔的稳定激光微加工。

致谢 感谢深圳市大族激光科技股份有限公司的机械工程师龚成万、宋世宇、官伟, 电气工程师张善基、杨斌, 软件工程师詹喜录、郑国云, 激光工艺工程师李斌、郭炜、褚志鹏等人在本论文实验过程中的机台准备、电气设计、软件优化及工艺支持等方面提供的帮助。

参 考 文 献

- 1 Luo Zhihai, Yang Runze. Present condition & developments of machining technologies engineering ceramics [J]. *Ceramic*, 2010, (10): 7-10.
罗志海, 杨润泽. 工程陶瓷加工技术的现状与发展[J]. *陶瓷*, 2010, (10): 7-10.
- 2 Zhang Baoguo, Tian Xinli, She Anying, *et al.*. Research progress on principle and application of laser machining for engineering ceramics [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2012, (10): 5-10.
张保国, 田欣利, 余安英, 等. 工程陶瓷材料激光加工原理及应用研究进展[J]. *现代制造工程*, 2012, (10): 5-10.
- 3 Shao Dan, Hu Bing, Zheng Qiguang. *Laser Advanced Manufacturing Technology and Equipment Integration* [M]. Beijing: Science Press, 2009.
邵丹, 胡兵, 郑启光. *激光先进制造技术与设备集成*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 4 Yan Yinzhou, Ji Lingfei, Bao Yong, *et al.*. Theory analysis and experiment verification on crack characters during laser processing ceramics [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1401-1408.
闫胤洲, 季凌飞, 鲍勇, 等. 激光加工陶瓷裂纹行为的理论分析及实验验证[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1401-1408.
- 5 Zhou Jilie, Cheng Yaodong. Thermal stress analysis for structural ceramics during laser beam machining [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(9): 1204-1207.
周继烈, 程耀东. 结构陶瓷激光加工的热应力分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(9): 1204-1207.
- 6 Shi Jin, Li Haitao, Yang Helai, *et al.*. The theoretical research on the microcrack of ceramic material of laser drilling [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2006, (2): 93-94.
史进, 李海涛, 杨贺来, 等. 激光陶瓷打孔微裂纹现象理论研究[J]. *机械设计与制造*, 2006, (2): 93-94.
- 7 Yan Yinzhou, Ji Lingfei, Bao Yong, *et al.*. Research and developments of laser processing ceramics technique [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(6): 5-8.
闫胤洲, 季凌飞, 鲍勇, 等. 高硬脆陶瓷激光加工技术的研究及进展[J]. *激光杂志*, 2008, 29(6): 5-8.
- 8 Shi Jin, Yang Helai, Zhang Xiaobing. Application study on new method of laser precise drilling of ceramic material [J]. *Applied Laser*, 2005, 25(3): 155-157.
史进, 杨贺来, 张晓兵. 陶瓷小孔激光精密加工新方法应用研究[J]. *应用激光*, 2005, 25(3): 155-157.
- 9 Shi Jin, Zhang Xiaobing, Yang Helai. Ceramic nozzle Nd:YAG laser precision drilling applied research [J]. *Machinery Manufacturing*, 2005, 43(8): 36-38.
史进, 张晓兵, 杨贺来. 陶瓷喷嘴 Nd:YAG 激光精密打孔应用研究[J]. *机械制造*, 2005, 43(8): 36-38.
- 10 Chen Kexin, Wang Weixiang, Zhang You, *et al.*. Experimental investigation on laser of Si_3N_4 ceramics with CW CO_2 laser [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science)*, 2000, (1): 59-62.
陈可心, 王卫乡, 张有, 等. 用连续波 CO_2 激光对氮化硅陶瓷打孔的实验研究[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2000, (1): 59-62.

栏目编辑: 何卓铭