

引用格式: SONG Chang, YANG Xiao-jun, ZHAO Wei, *et al.* Depth-micro Laser Drilling Methods Based on Spatial Light Modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8):0814001

宋昶, 杨小君, 赵卫, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光深微孔加工方法[J]. 光子学报, 2020, 49(8):0814001

基于空间光调制器的飞秒激光深微孔加工方法

宋昶^{1,2}, 杨小君¹, 赵卫¹, 段雨飞^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对飞秒激光振镜加工系统中聚焦透镜焦距短等原因导致微孔加工深度不足的问题, 提出了一种基于高损伤阈值空间光调制器加载菲涅尔透镜相位进行焦点轴向调控的加工方法. 通过加载不同焦距的菲涅尔透镜相位图, 控制焦点以 100 μm 为间隔进行焦点轴向位移, 随着加工深度的增加控制焦点向下移动, 并开展了相应的实验加工和测试. 实验结果表明, 采用该方法在保证高加工质量的前提下, 在厚度为 2 mm 的不锈钢样件上实现了直径约为 330 μm 的微孔加工. 该方法开辟了二维振镜系统实现超深微孔加工的新探索, 在激光加工领域有较好的应用前景.

关键词: 高损伤阈值空间光调制器; 飞秒激光; 微孔加工; 相位调制; 焦点控制

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204908.0814001

Depth-micro Laser Drilling Methods Based on Spatial Light Modulator

SONG Chang^{1,2}, YANG Xiao-jun¹, ZHAO Wei¹, DUAN Yu-fei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the galvo scanning laser drilling systems, the depth of processing is usually limited due to the short focal length. To solve this problem, a method based on high damage threshold spatial light modulator loading Fresnel lens phase is proposed. The focal length of the Fresnel lens is adjusted to change the position of the focus. As the machining depth increases, the focus position moves downward. Then the experiment processing and testing were carried out. The experimental results show that a high quality microhole with a diameter of about 330 microns was machined on stainless steel sample by using the method. The new method uses galvo scanning laser drilling systems and spatial light modulator to process microhole, which has a good application prospect in the field of laser processing.

Key words: High damage threshold spatial light modulator; Femtosecond laser; Laser processing; Phase modulation; Focus control

OCIS Codes: 140.7090; 350.3390; 320.7090

0 引言

随着航空、航天、计算机、汽车等领域的飞速发展,对材料加工提出了更高的要求,飞秒激光作为一种先进的加工技术,具有极高的峰值功率和极短的脉宽,且能实现相对意义上的“冷”加工,对周围材料影响极小,加工精度极高,备受加工制造领域关注^[1-2].

基金项目: 国家重点研发计划(No.2018YFB1108000)

第一作者: 宋昶(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光微加工. Email:songchang2017@opt.cn

导师: 杨小君(1978-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学工程. Email:yxj@opt.ac.cn

收稿日期: 2020-04-09; 录用日期: 2020-05-21

<http://www.photon.ac.cn>

飞秒激光振镜加工系统采用计算机控制激光光束扫描实现微孔加工,但是受聚焦光束焦深的局限,难以实现超过其焦深尺寸的微孔加工,目前采用振镜加工系统进行微孔加工时,在保证高加工质量的条件下,深径比能达到3:1,因此亟需提高其加工深度.目前已有多种方法实现更深的微孔加工.例如:采用轴棱锥、无衍射光束等方法得到长焦深聚焦光束实现微深孔加工^[3-4],2014年,法国BHUYAN M K小组^[3]在熔融石英玻璃上使用平凸锥透镜产生啁啾控制的飞秒激光贝塞尔光束得到深径比为几百的微纳米通道;2014年,北京理工大学姜澜小组^[22]利用贝塞尔光束结合电子调控的方法在PMMA材料上得到深径比超过400:1的深小孔.但这些方法因光束无法在材料内部传输,在非透明材料加工方面,超高倍数焦深拉伸较难达到预期加工效果.采用多焦透镜、长焦深光学元件等扩展透镜焦深方法^[5-7]能提高微孔加工深度,采用分区域加载不同焦距菲涅尔透镜、利用迭代算法实现长焦深光束仿真等方法,实现了焦深2~5倍的拉伸,但这些方法会因旁瓣、边缘杂光等的存在导致加工精度下降.利用大功率脉冲激光进行冲孔加工也是实现高深径比微孔加工的方法之一,但利用冲孔的方式加工时微孔的内部不同位置处的尺寸一致性较差,只适用于材料粗加工.2017年,张艳杰等基于飞秒激光成丝技术^[8]在聚甲基丙烯酸甲酯材料上实现了2 mm厚度的微孔加工,但其对激光能量的利用率较低,且对材料有选择性.

空间光调制器(Spatial Light Modulators, SLM)可以将信息加载到二维光学数据场中,是一种对光束进行调整的器件.通过控制加载到SLM上的灰度图,SLM可以实现光场的相位、振幅等参数的调控,被广泛应用于各个领域^[9-13],如:微纳结构加工、光波导、透明材料内部三维加工等.利用空间光调制器也可以实现对焦点的灵活调控^[14].

针对非透明材料微深孔加工,结合空间光调制器和振镜加工系统,提出了一种基于高损伤阈值空间光调制器加载菲涅尔透镜相位进行焦点轴向调控的加工方法,通过焦点的轴向调控,拓展了激光加工区域.该方法在保证高加工质量的条件下,提高了微孔加工深度,实现了振镜系统深微孔加工.

1 实验设计

1.1 实验装置

实验系统如图1所示,实验所采用的光源为掺Yb介质飞秒激光器(Light Conversion,立陶宛),中心波长为1 030 nm,脉宽为200 fs,最大功率为20 W,最大单脉冲能量达到0.2 mJ,重复频率采用200 kHz.激光光束经扩束系统扩束准直后,变为准直高斯光束,再经两片高反镜M1和M2以小角度入射空间光调制器,通过空间光调制器实现光场的灵活实时调控;之后经M3进入振镜(SCANLAB AG,德国施肯拉公司,SCANcube),振镜系统由两片反射镜组成,两片反射镜分别控制光束在互相垂直的两个方向上的移动,在实验过程中振镜系统采用填充扫描圆环的方式进行扫描光束再经F-Theta透镜聚焦于加工材料表面,本实验

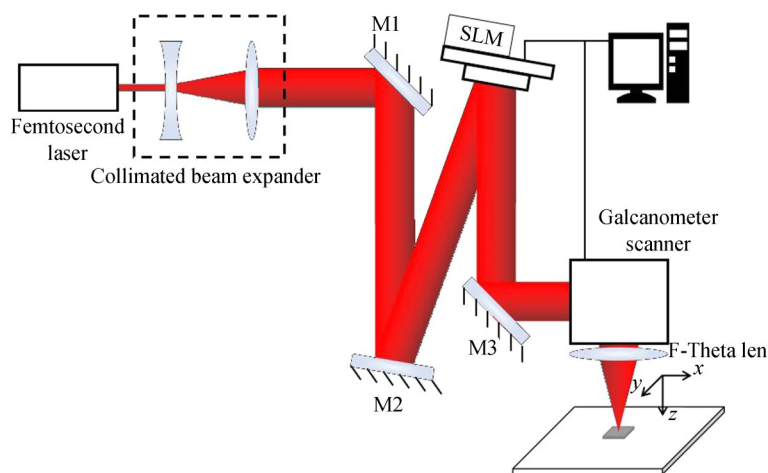


图1 基于高损伤阈值空间光调制器微孔加工光路图

Fig.1 Schematics of microhole machining system based on SLM

中聚焦镜焦距为 150 mm;实验样品为不锈钢片。

1.2 实验原理

1.2.1 高损伤阈值液晶空间光调制器

液晶空间光调制器利用液晶分子基于光电信号改变自身光学性质的特点来实现对照射在液晶分子上的光波进行调制,一般由一个个独立的液晶像素单元排列成一维或二维阵列,每个像素单元均可单独接收光信号或者电信号.通过控制每个液晶单元的输入信号,使液晶分子的排列发生改变,从而改变折射率,进而实现对光束的相位调制^[15].

目前受液晶材料自身吸收特性^[16]的限制,液晶空间光调制器还主要应用于低功率密度和低光通量条件.为提高空间光调制器的承受能力,从以下几个方面进行优化改进:1)增加SLM的通光尺寸允许照明分布在更大的区域,一定程度上降低能量密度;2)优化SLM的电极涂层以限制吸收^[17-18],提高反射率;3)提高液晶材料的损伤阈值^[18-19],防止因能量密度过高对液晶材料造成破坏;4)增加冷却系统^[18-19],缓解热效应,保证相位调制量的稳定性.在本实验中为空间光调制器搭载了外部风冷系统,同时设计了尺寸合适的入射光斑,冷却系统保证其在工作过程中温度基本保持不变,使液晶空间光调制器能保证在飞秒激光器大功率长时间照射下稳定正常工作;较大光斑尺寸在获得更好的调制效果的同时能使空间光调制器承受更高功率.

1.2.2 菲涅尔透镜相位图设计

激光器发出的光束一般为基模高斯光束,在垂直于 z 轴的 $x-y$ 平面上,高斯光束的复振幅分布可表示为^[20]

$$E(x, y) = A \exp \left[- \left(\frac{1}{\omega^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right) (x^2 + y^2) \right] \quad (1)$$

式中, A 为常数因子, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数, $\omega(z)$ 和 $R(z)$ 分别为高斯光束的 z 处的截面半径和波面曲率半径.

当该光束经扩束准直系统进行准直后,其高斯光束束腰处与透镜之间的距离很远,即经扩束准直系统后光斑曲率半径 $R(z_1) \rightarrow \infty$,光束截面半径为 $\omega(z_1) = 4 \text{ mm}$.SLM与透镜之间的距离为 $d_0 = 150 \text{ mm}$,F-Theta扫描透镜的焦距为 $F = 150 \text{ mm}$.在这种情况下高斯光束传输方式可近似采用近轴光学相关理论进行计算^[20].

当焦点位置轴向移动 Δz 时,SLM上加载的菲涅尔透镜的焦距 f 为

$$f = - \left(d_0 + F \frac{F + \Delta z}{\Delta z} \right) \quad (2)$$

设 $\omega(z_2)$ 为透镜前表面光斑半径, $\omega'(z_2)$ 为透镜后表面光斑半径,则

$$\omega'(z_2) = \omega(z_2) = \frac{f - d_0}{f} \omega(z_1) \quad (3)$$

则经聚焦后的焦点光斑半径 ω'_0 为

$$\frac{\omega'^2(z_2)}{\omega'^2} - \left(\frac{\lambda z_2}{\pi \omega'^2} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

化简为

$$\omega'_0 = \left[\frac{2 \left(\frac{\lambda z_2}{\pi} \right)^2}{\omega'^2(z_2) + \sqrt{\omega'^4(z_2) - 4 \left(\frac{\lambda z_2}{\pi} \right)^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

由式(2)和式(5)可计算出随着焦点位置轴向发生位移时,空间光调制器所需加载的菲涅尔透镜焦距,以及焦点处光斑尺寸.图2给出了当 Δz 发生变化时焦点光斑半径的变化趋势.当 Δz 的变动范围在 -5 mm 到 5 mm 之间时,焦点处光斑尺寸变化在 $1 \mu\text{m}$ 以内,基本保持不变.

当SLM未加载任何相位图时,其经聚焦镜聚焦后焦深 Δf 为^[21]

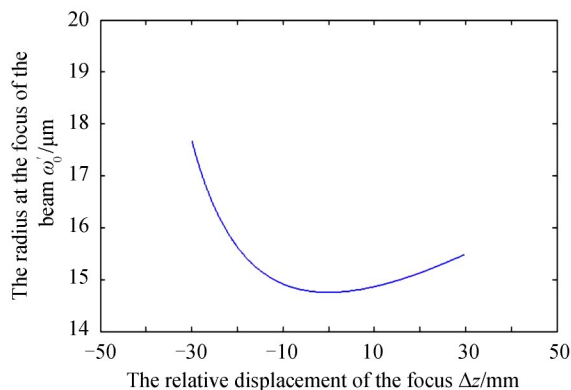


图2 焦点移动至不同位置处的焦斑半径

Fig.2 Focal spot size when the focus is moved to different position

$$\Delta f = 0.32 \frac{\pi \omega_0'^2}{\lambda} = 220 \mu\text{m} \quad (6)$$

在焦深范围内,光斑半径和能量分布基本保持一致,因此以小于焦深大小的某一尺寸作为步进间隔均可用于加工,通过对其焦深尺寸判断,Δz取值间隔小于200 μm即可,为了方便操作本实验中将步进间隔设置为100 μm.以±2 mm为例,通过计算得出不同Δz情况下,所需添加的菲涅尔透镜的焦距f如表1所示,对应的菲涅尔透镜相位分布如图3所示,图4为当未加载相位图和加载f=-22.8 m的菲涅尔相位图时其焦点

表1 菲涅尔透镜焦距随Δz变化

Δz/μm	-1 000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100
f/m	22.2	24.7	27.8	31.84	37.2	44.7	55.95	74.7	112.2	224.7
Δz/μm	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
f/m	-225.3	-112.8	-75.3	-56.55	-45.3	-37.8	-32.4	-28.4	-25.3	-22.8

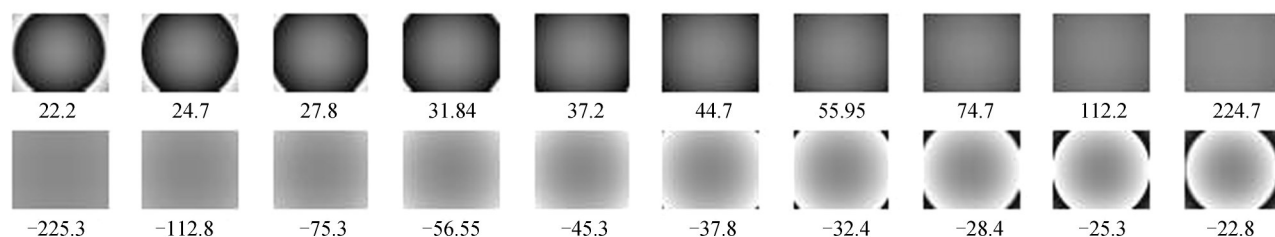


图3 菲涅尔透镜相位图(单位:m)

Fig.3 Phase diagram of Fresnel lens (unit:m)

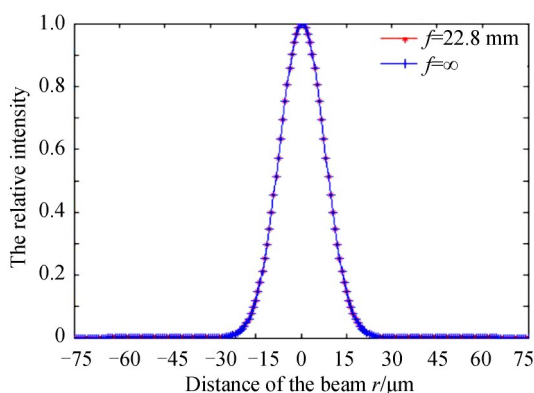


图4 焦点移动至不同位置的光强分布

Fig.4 Surface of intensity distribution when the focus is moved to different position

截面处沿 x 或 y 轴向的光强分布,可以发现其光强分布基本保持一致.

1.3 实验过程

本实验中激光器功率设置为 5 W,采用空间光调制器配合振镜加工系统进行加工.实验装置图如图 1 所示,实验过程为:

1)在激光焦点位置处对 0.1 mm 厚的样件进行微孔加工,判断激光焦点处穿透 0.1 mm 后样件所需时间 t_0 ,设置不同扫描时间,对样件进行加工,并得出完全穿透时所需时间 t_0 , t_0 为 2.1 s.

2)进行对比实验,将空间光调制器处于未通电状态,即此时空间光调制器等效为反射镜,在焦点位置处以及离焦位置处分别进行加工,振镜加工系统以填充扫描圆环的方式进行扫描,加工时间由样件厚度而定,样件厚度选为 2.0 mm(加工时间为 42 s)和 1.0 mm(加工时间为 21 s).

3)利用控制软件令空间光调制器以 t_0 时间为间隔,按照预设顺序更换不同焦距的非涅尔透镜相位图,实现焦点在样件上的轴向移动,振镜加工系统以填充扫描圆环的方式进行扫描,从而在厚度为 2.0 mm(加工时间为 42 s)和 3.0 mm(加工时间为 63 s)的样件上进行微孔加工.

4)通过光学显微镜对微孔进行观察和检测.

2 实验结果

当高损伤阈值空间光调制器处于未通电状态时,在 2.0 mm 的样件上的加工效果如图 5(a)、(b)所示,微孔直径约为 330 μm ,图 5(a)为样件正面加工情况,图 5(b)为样件背面加工情况,孔 1 为焦点在样件表面上方 0.2 mm 处,孔 2 为焦点在样件表面处,孔 3 为焦点在距样件表面下方 0.2 mm 处,可以看出背面均无任何加工痕迹.在 1.0 mm 的样件上的加工效果如图 5(c)、(d)所示(注:样品表面颜色有差异是因为在打孔前未对该样件表面进行打磨处理),微孔直径约为 330 μm ,图 5(c)为样件正面加工情况,图 5(d)为样件背面加工情况,孔 4 为焦点在样件表面上方 0.2 mm 处,孔 5 为焦点在样件表面处,孔 6 为焦点在距样件表面下方 0.2 mm 处,图 5(e)为 6 号孔内部结构(注:微孔内部呈椭圆状的原因是在打磨时端面与微孔不平行导致),在 21 s 的加工时间条件下,可以看出背面有加工痕迹,微孔未穿透,有烧蚀现象,且微孔加工深径比仅能达到 3:1.

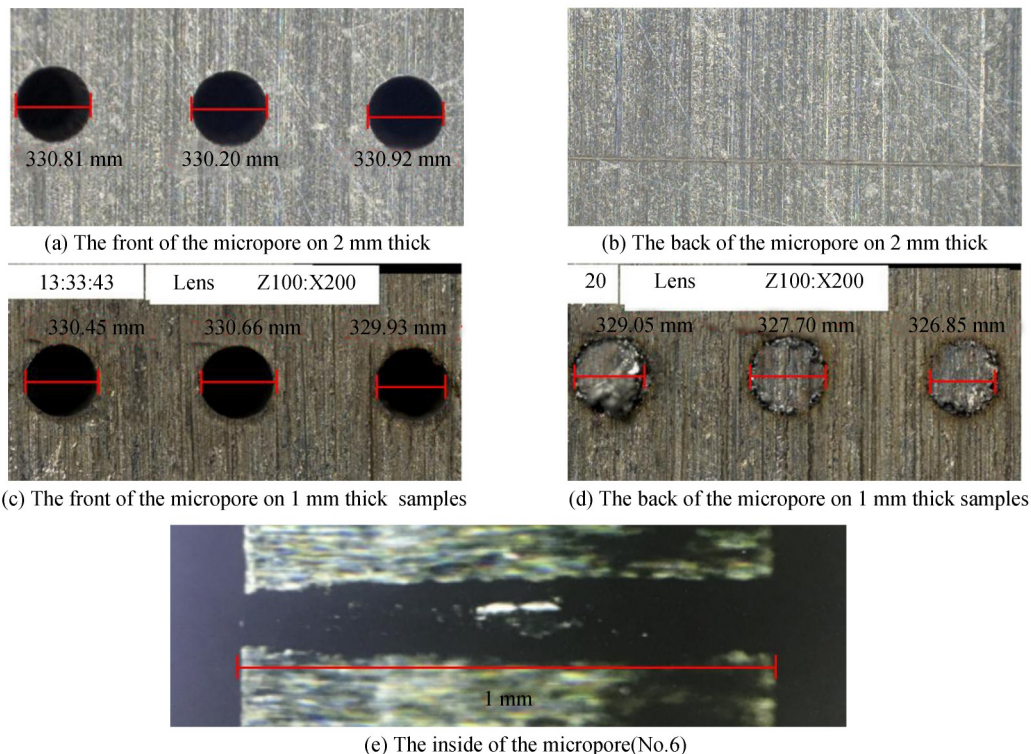


图 5 振镜系统样件微孔加工效果
Fig.5 Micromachining on the sample

当高损伤阈值空间光调制器工作时, 2 mm厚样品微孔加工效果如图6所示, 微孔直径约为330 μm , 图6(a)为样品正面加工情况, 图6(b)为样品背面加工情况, 图6(c)为样品微孔内部加工情况. 可以看出空间光调制器控制焦点轴向位移时, 材料内部加工情况基本一致, 微孔内不同位置处尺寸基本保持一致. 3 mm厚样品微孔加工效果如图7所示, 微孔直径约为330 μm , 图7(a)为样品正面加工情况, 图7(b)为样品背面加工情况, 图7(c)为样品微孔内部加工情况. 可以看出未完成通孔加工, 穿透深度约为2.4 mm, 观察孔内结构, 可以发现其大于2 mm的部分开始出现孔径变小现象. 其可能原因是随着微孔加工的深入, 孔口出现挡光现象, 导致加工无法继续深入.

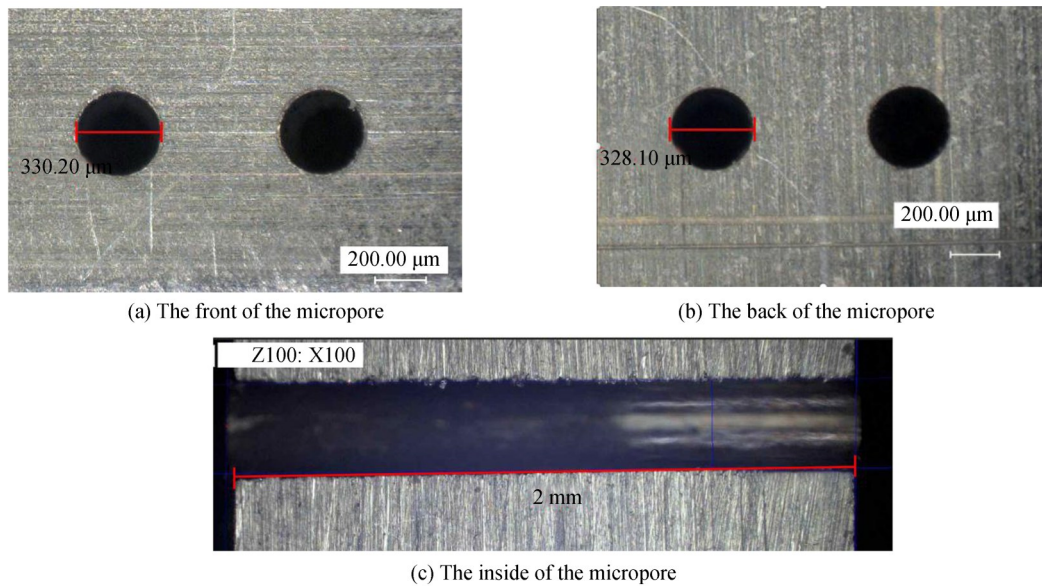


图6 2 mm 样品微孔加工效果图
Fig.6 Micromachining on the sample(2 mm)

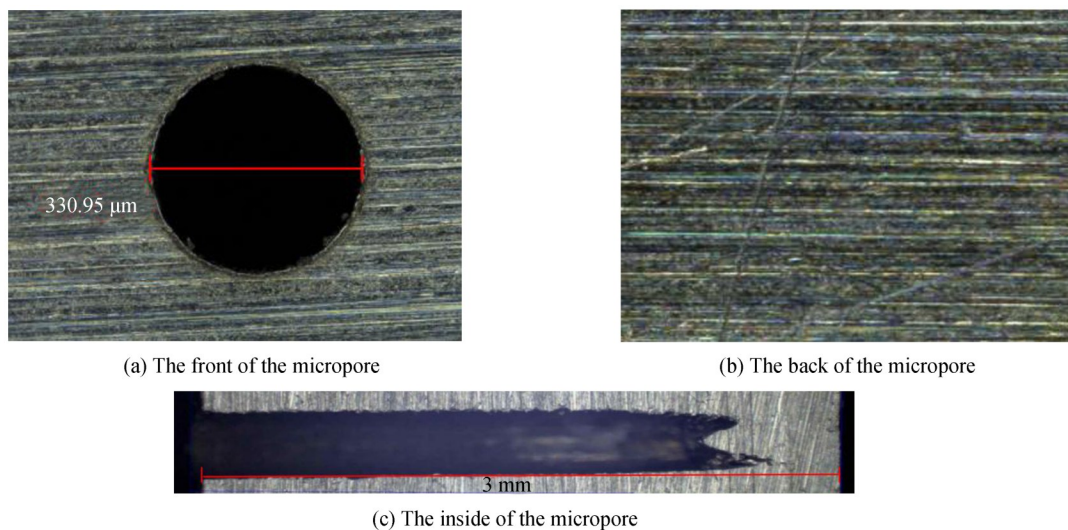


图7 3 mm 样品微孔加工效果
Fig.7 Micromachining on the sample (3 mm)

本实验采用振镜微孔加工系统与液晶空间光调制器相结合的方式进行了微孔加工, 实现深径比为6:1的微孔加工, 微孔表面无微裂纹、内壁无重铸层、几乎无热影响区、无明显分层现象, 在保证高加工质量的前提下实现了更高深径比微孔加工. 二维振镜加工系统因其加工方式的原因较难实现高深径比微孔加工, 该方法克服了二维振镜系统深孔加工能力不足的问题, 在保证飞秒激光高加工质量的条件下, 有效提高了微孔加工深径比. 但观察图5(a)、图6(a)可以发现, 在微孔入口处存在细微的加工痕迹, 这是由于振镜系统

的扫描方式造成的扫边,其扫描方式限制微孔加工深度。

目前通过相同条件下加工测试的方式得出空间光调制器相位图转换的所需时间间隔,后续可以考虑采用实时检测系统对微孔深度进行检测并向空间光调制器反馈信号,实现对光束相位自动化调控,同时也可对其步进轨迹进行优化。另外振镜系统的扫描方式也限制了更深微孔的加工,因此可以考虑将空间光调制器与旋切扫描、螺旋扫描等系统相结合,提高其加工能力。

3 结论

振镜加工系统加工区域受聚焦光束焦深的局限,难以实现超过其焦深尺寸的微孔加工,在保证高加工质量的前提下深径比仅能达到3:1,极大地限制了其加工能力。将振镜微孔加工系统与液晶空间光调制器相结合,利用液晶空间光调制器可实现光束实时灵活调节,通过加载不同焦距的非涅尔透镜相位,实现焦点位置轴向灵活调控,增加了振镜微孔加工纵向深度。并理论分析得到:当焦点移动时,焦斑尺寸在10 mm的范围内基本保持不变,并在此基础上采用振镜加工系统实现了深径比为6:1的微孔加工,微孔内部尺寸基本保持一致。采用该方法实现远大于焦深尺寸的微深孔加工,克服了振镜系统超深孔加工能力不足的问题,使加工深径比从3:1突破到6:1,有效提高了振镜加工系统的微深孔加工能力,大大提高了其加工深径比。研究表明:该加工方法在保证高加工质量的条件下拓展了飞秒激光微孔加工纵向深度,实现了高深径比微孔加工,为飞秒激光微深孔加工提供了新的加工思路。

参考文献

- [1] GU Li, SUN Hui-lai, YU Kai, *et al.* Research progress of micro-nanofabrication by femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(1): 14-18.
顾理,孙会来,于楷,等.飞秒激光微加工的研究进展[J].激光与红外,2013,**43**(1):14-18.
- [2] HE Fei, CHENG Ya. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(5): 595-622.
何飞,程亚.飞秒激光微加工:激光精密加工领域的新前沿[J].中国激光,2007,**22**(5):595-622.
- [3] BHUYAN M. Single-shot high aspect ratio bulk nanostructuring of fused silica using chirp-controlled ultrafast laser Bessel beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(2): 1-4.
- [4] YAN Xue-liang. Microchannels fabrication in transparent dielectric using temporally and spatially shaped femtosecond laser based on electrons dynamics control[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
闫雪亮.电子动态调控时空整形飞秒激光透明介质微通道加工[D].北京:北京理工大学,2016.
- [5] WANG Zhong-xun, PAN Yi-ming, YIN Shao-yun, *et al.* Laser processing lens of long focal depth and high resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 198-202.
王仲勋,潘一鸣,尹韶云,等.长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜[J].光学学报,2013,**33**(2):198-202.
- [6] YU Jin-qing, YIN Shao-yun, YIN Zhi-yong, *et al.* High uniform long working depth laser shaping system design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(8): 80-84.
余金清,尹韶云,殷智勇,等.高均匀长工作深度激光整形系统设计[J].光电工程,2014,**41**(8):80-84.
- [7] LIN Yong, HU Jia-sheng. Method for design of diffractive optical elements with long focal depth[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010, **50**(1): 152-156.
林勇,胡家升.实现长焦深的衍射光学元件设计方法[J].大连理工大学学报,2010,**50**(1):152-156.
- [8] ZHANG Yan-jie, SONG Hai-ying, LIU Hai-yun, *et al.* Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(4): 125-134.
张艳杰,宋海英,刘海云,等.飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J].中国激光,2017,**44**(4):125-134.
- [9] HERMERSCHMIDT A, SVEN K, HAIST T. Holographic optical tweezers with real-time hologram calculation using a phase-only modulating LCOS-based SLM at 1064 nm[C]. SPIE, 2008, **6905**:690508.
- [10] LEONARDO R D, IANNI F, RUOCCO G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1913-1922.
- [11] MA Xiang-ning. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
马向宁.使用液晶空间光调制器实现激光束整形[D].大连:大连理工大学,2013.
- [12] LANE P M, DLUGAN A L P, RICHARDS-KORTUM R, *et al.* Fiber-optic confocal microscopy using a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(24): 1780-1782.
- [13] MATSUDA K. Holographic vibration measurements of rough surfaces using a LCSLM [J]. *Optics Communications*, 2007, **275**(1): 53-56.

- [14] XIE Zhi-kun, QIAN Wei-an, ZHANG Jin-hui, *et al.* Real-time feedback control method and system of beam focusing based on spatial light modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **54**(7): 279-286.
谢志坤, 钱伟岸, 张金辉, 等. 基于空间光调制的光束聚焦实时反馈控制方法及系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, **54**(7): 279-286.
- [15] LU Qiang, SHENG Lei. Investigation on pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(1): 190-196.
鲁强, 盛磊. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. *中国激光*, 2016, **43**(1): 190-196.
- [16] WU S T. Molecular design strategies for high birefringence liquid crystals[J]. *MRS Proceedings*, 2002, **709**: 219-228.
- [17] VIADIMIROV F L, PLETNEVA N I, MORICHEV I E, *et al.* Liquid crystal modulators with improved laser damage resistance[C]. *Proceedings of SPIE*, 1998, **3682**: 176-182.
- [18] ZHOU Zhuang-qi. Research on tolerance high laser power of liquid crystal optical phased array devices[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 61-63.
周庄奇. 高耐受功率液晶光学相控阵器件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 61-63.
- [19] GU D, WEN B, MAHAJAN M, *et al.* High power liquid crystal spatial light modulators [C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 630602.
- [20] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 172-175.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 172-185.
- [21] HUANG Fu-quan, LU Xuan-hui. Analysis of focal depth for Gaussian beam[J]. *Applied Laser*, 1999, **19**(1): 19-21.
黄富泉, 陆璇辉. 高斯光束焦深分析[J]. *应用激光*, 1999, **19**(1): 19-21.
- [22] ZHAO Wei-wei, LI Xiao-wei, XIA Bo, *et al.* Single-pulse femtosecond laser Bessel beams drilling of high-aspect-ratio microholes based on electron dynamics control[C]. *SPIE*, 2014, **9296**: 9296Q.