

皮秒贝塞尔光束切割化学强化玻璃

杨泽齐, 段军*, 陈航, 刘朋, 陈乔丹, 徐新科

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 化学强化玻璃被广泛应用于电子产品屏幕, 但很难被切割加工。利用皮秒激光高峰值功率、超短脉冲及贝塞尔光束长焦深的特点, 在化学强化玻璃内加工出一个狭长的改性截面, 利用强化玻璃本身的应力与皮秒激光诱导的应力, 使强化玻璃精准地沿着改性截面自动断开, 并获得了切割速度高达 400 mm/s, 切割面粗糙度为 395 nm 的切割分离效果。实验结果表明, 影响切割速度和质量的主要参数是单脉冲能量和脉冲改性间距。

关键词 激光光学; 化学强化玻璃; 皮秒激光; 贝塞尔光束; 玻璃切割

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102010

Chemically Strengthened Glass Fabricated by Picosecond Bessel Beam Cutting

Yang Zeqi, Duan Jun*, Chen Hang, Liu Peng, Chen Qiaodan, Xu Xinke

Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Chemically strengthened glass is widely used in electronic device display screens; however, they are difficult to cut. With the high peak power of a picosecond laser and long focal depth of a Bessel beam, a narrow-modified plane is machined inside the chemical glass. Owing to its original stress and stress induced by the picosecond laser, chemically strengthened glass accurately self-breaks along the modified plane with cutting speed of 400 mm/s and surface roughness of 395 nm. Experimental results show that pulse energy and pulse modification spacing are the main parameters affecting cutting speed and quality.

Key words laser optics; chemically strengthened glass; picosecond laser; Bessel beam; glass cutting

OCIS codes 140.3390; 140.7090; 160.2750

1 引言

化学强化玻璃是通过离子交换工艺将玻璃表面体积较小的钠离子置换为体积较大的钾离子, 在玻璃表面形成深度为几十微米压应力层的一种特殊玻璃^[1-2]。与普通玻璃相比, 化学强化玻璃具有更高的机械强度和热稳定性, 被广泛应用于手机、平板电脑等电子设备的显示屏^[3-4]。但正因为这层表面压应力, 采用传统机械切割^[5]或水射流切割^[6]加工强化玻璃时, 极易使强化玻璃崩边爆裂。通常, 在生产各种形状和尺寸强化玻璃的工艺流程中, 切割分离加工必须在化学强化步骤之前完成, 这不但导致加工过程繁琐, 效率较低^[7], 而且一旦化学强化工艺完成, 强化玻璃便无法进行切割加工处理, 工艺灵活性

极差。

激光切割技术是一种无接触、热损伤小、加工灵活的精密加工技术, 是加工透明材料的最佳选择^[8-9]。超快激光以其脉冲极短(皮秒、飞秒)、峰值功率极高的特点, 在超薄材料的切割分离方面得到了广泛应用^[10]。采用超快激光切割化学强化玻璃时, 高峰值功率密度的激光会引起强烈的非线性吸收, 导致焦点附近的材料发生改性, 改性区沿着激光扫描方向延伸, 从而使得玻璃可以沿着改性截面断裂^[11]。但由于高斯光束的焦点深度较小, 改性区的深度无法覆盖玻璃的厚度, 导致玻璃断裂面偏离改性截面, 无法实现精确的切割分离路径控制^[12]。

贝塞尔光束又称“无衍射光束”^[13-14], 其横向光场分布不随光束的传播而变化, 主瓣直径可小到几

收稿日期: 2019-05-26; 修回日期: 2019-07-01; 录用日期: 2019-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(51675205)

* E-mail: duans@mail.hust.edu.cn

微米,但焦深可达几毫米,因此贝塞尔光束常被用于加工高深径比的光波导^[15]或微通道^[16]。有些学者利用贝塞尔光束这一特点,采用贝塞尔超快激光束切割分离厚度为0.1~10 mm的玻璃,获得了较高的切割分离质量,但需要施加外力才能使激光改性截面处的玻璃分离^[17-18]。这种方法同样会导致加工过程繁琐,而且还会受到切割加工图形的限制。本文利用皮秒激光贝塞尔光束切割分离化学强化玻璃,在合适的皮秒激光脉冲能量作用下,不需要施加任何外力,就可使化学强化玻璃沿着激光扫描路径自动分离,不但有效简化了工序,提高了强化玻璃的切割加工效率,而且不受切割加工图形的限制,提高了激光切割加工的适应性和灵活性。

2 实验设备及方法

2.1 实验设备

图1(a)给出皮秒贝塞尔光束切割实验装置。实验所用光源为Edgewave公司生产的皮秒激光器,中心波长为1064 nm,脉冲宽度为10 ps,重复频率为1~50 MHz,经过扩束后的高斯光束直径为

12 mm。使用一个底角为5°的锥透镜(Thorlabs AX255-C)将高斯光束转换为初始的贝塞尔光束。透镜L1(焦距150 mm)与透镜L2(焦距20 mm)组成一个4*f*系统,该系统可将贝塞尔光束的中心主瓣直径压缩到约2.71 μm。贝塞尔光束的无衍射传输距离约为2.67 mm^[19-21],其横纵截面的光场强度分布如图1(b)、(c)所示,*r*表示径向距离,*z*表示轴向距离,有 $r^2 = x^2 + y^2$ 。由于贝塞尔光束的有效传输距离远大于同等尺寸下高斯光束的焦深,因此加工时不需要上下移动焦点就可以使激光中心主瓣能量覆盖整个材料的厚度。XY二维位移工作台带动实验样品沿预设的切割路径移动,进行复杂曲线的切割分离加工。

2.2 实验材料及检测仪器

实验切割分离的材料为0.7 mm厚的铝硅强化玻璃(Corning Gorilla Glass 3)。该化学强化玻璃的上下表面各有一层厚度约为50 μm的强化层(压应力层,可承受的压应力约为950 MPa),而玻璃内部则存在相对较弱的拉应力,从而可使表面的压应力与内部的拉应力形成静态平衡^[22]。

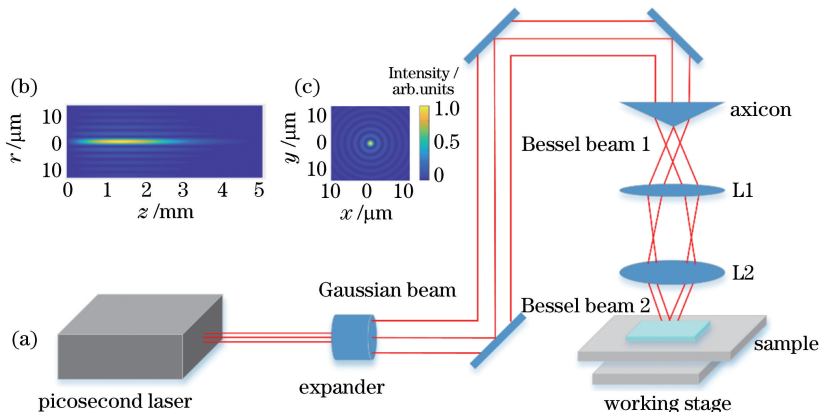


图1 产生贝塞尔光束的实验装置及贝塞尔光束的轮廓。(a)实验装置;(b)贝塞尔光束纵截面的光场强度;(c)贝塞尔光束横截面的光场强度

Fig. 1 Experimental setup for generating Bessel beam and profile of Bessel beam. (a) Experimental setup; (b) longitudinal intensity distribution of Bessel beam; (c) lateral intensity distribution of Bessel beam

采用光学显微镜(Nikon Epiphot)和扫描电子显微镜(Nova NanoSEM)观察玻璃切割分离的表面形貌;采用台阶仪(Veeco Dektak)测量切割面的表面粗糙度。

2.3 实验方法及参数

采用皮秒贝塞尔光束固定不动,XY二维工作台带动强化玻璃沿着切割分离轨迹运动的方式实现对强化玻璃的切割分离。通过调节镜头的高度,可使贝塞尔光束覆盖整个玻璃的厚度。通过

改变皮秒激光的重复频率 f_0 、单脉冲能量 E 和扫描速度 v ,研究不同的加工参数组合对强化玻璃切割分离质量的影响规律。为了方便起见,引入脉冲改性间距参数 d ,即两个相邻皮秒激光脉冲与化学强化玻璃相互作用的距离,该距离为皮秒激光的重复频率与扫描速度的比值: $d = v/f_0$ 。通过观察强化玻璃在皮秒激光扫描后能否自动断裂分离来探究单脉冲能量和脉冲改性间距的可行性参数区间。实验参数见表1。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

| Parameter | Value |
|---|------------|
| Laser repetition rate f_0 /kHz | 20, 80 |
| Single pulse energy E / μ J | 120-210 |
| Laser scanning speed v /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$) | ≤ 400 |

3 实验结果

实验结果表明,小于中心主瓣直径的脉冲改性间距($d < 3 \mu\text{m}$)极易导致化学强化玻璃断裂,甚至爆裂。当皮秒激光重复频率 $f_0 = 20 \text{ kHz}$ 、单脉冲能量 $E = 120 \mu\text{J}$ 时发现,改变扫描速度(即改变脉冲改性间距 d)不能使化学强化玻璃自动断裂分离。由图 2 可见:当单脉冲能量增加到 $150 \mu\text{J}$,脉冲改性间距 $d \geq 3 \mu\text{m}$ 时,化学强化玻璃才会准确地沿着激光扫描路径自动断裂分离;随着改性间距增大,切割面的表面粗糙度逐步减小;当 $d > 5 \mu\text{m}$ 时,化学强化玻璃不会自动断裂分离。

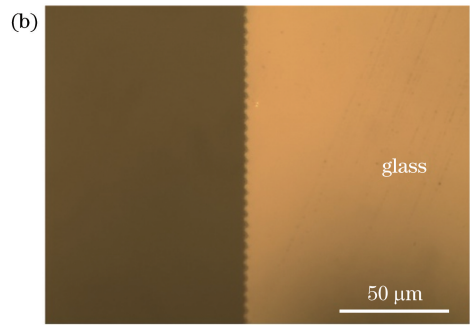
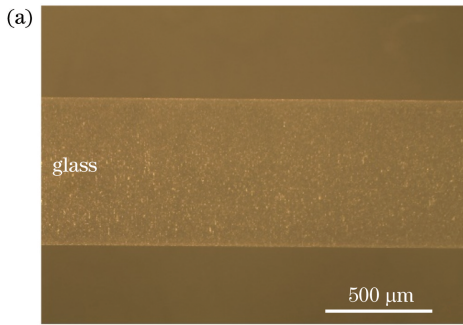


图 3 自动断裂后的化学强化玻璃。(a)切割面;(b)表面的边缘

Fig. 3 Chemically strengthened glass after self-breaking. (a) Cutting plane; (b) edge of the surface

通过扫描电子显微镜进一步观察切割面的微观形貌(如图 4 所示),也未发现化学强化玻璃切面割上有任何微小的破碎和微裂纹缺陷的存在,但周期

为 $5 \mu\text{m}$ 的梳状结构贯穿了整个玻璃切割面,并且在上下表面附近深度约 $50 \mu\text{m}$ 处的化学强化层内的梳状结构要比玻璃中间清晰很多。

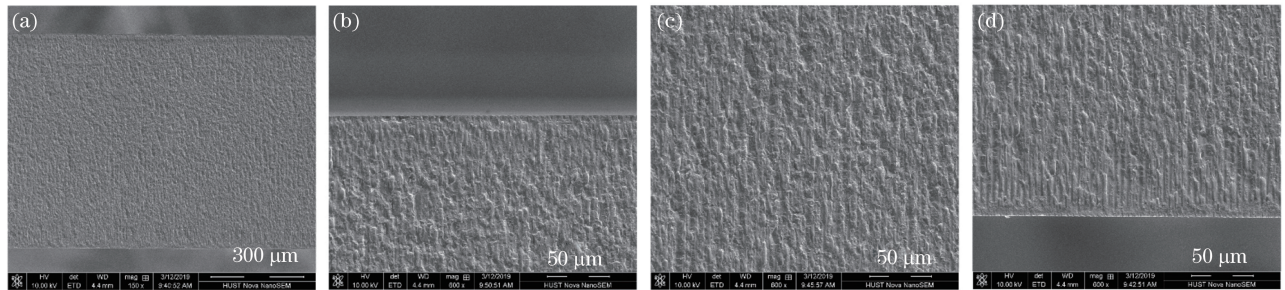


图 4 玻璃切割面的电镜照片。(a)切面全貌;(b)上边缘;(c)中间部分;(d)下边缘

Fig. 4 SEM images of glass cutting plane. (a) Full view of cutting plane; (b) top edge; (c) central part; (d) bottom edge

通过台阶仪测得化学强化玻璃切割面的粗糙度曲线如图 5 所示。测量结果显示,在单脉冲能量为 $150 \mu\text{J}$ 、脉冲改性间距为 $5 \mu\text{m}$ 的实验条件下,

0.7 mm 厚的化学强化玻璃切割面粗糙度的算术平均值为 395 nm 。

随着单脉冲能量的增加,玻璃自动断开分离所

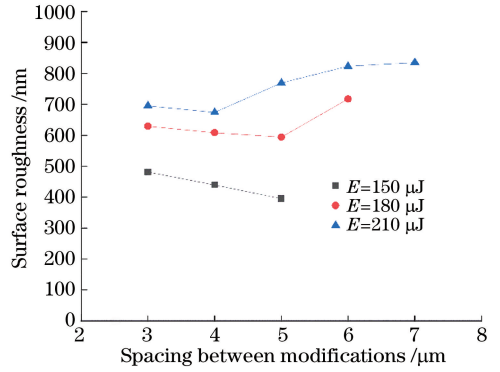


图 2 切割面的表面粗糙度随脉冲能量和脉冲改性间距的变化规律

Fig. 2 Variation in roughness of cutting surface with pulse energy and pulse modification spacing

图 3 给出化学强化玻璃在 $150 \mu\text{J}$ 单脉冲能量和 $5 \mu\text{m}$ 脉冲改性间距条件下的自动断开分离效果。化学强化玻璃准确地沿着激光扫描路径断成两半,切割分离表面没有任何较大的碎屑和裂纹存在,表面的边缘损伤宽度小于 $2 \mu\text{m}$ 。

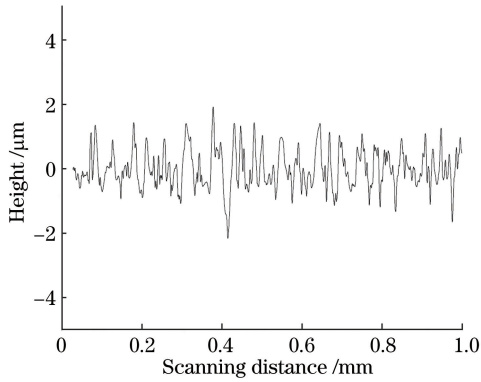


图5 化学强化玻璃的切面粗糙度

Fig. 5 Roughness of the cutting plane of chemically strengthened glass

允许的脉冲改性间距越来越大,但切割面的粗糙度也越来越大,并呈现随脉冲改性间距增加而先下降后上升的变化规律,如图2所示。当皮秒激光单脉冲能量达到最大值 $210 \mu\text{J}$ 时,能使玻璃自动断开的脉冲改性间距可以增加至 $7 \mu\text{m}$,但切割面的平均粗糙度将大于 700 nm 。图6给出了化学强化玻璃自动分离可行性皮秒激光参数区间。实验结果表明,在单脉冲能量为 $150 \mu\text{J}$ 和脉冲改性间距为 $5 \mu\text{m}$ 的条件下,可以获得最佳的自动切割分离质量。基于上述最佳参数匹配,将激光频率提高至 80 kHz ,相应的切割速度可以增加至 400 mm/s (工作台的最大速度)。在此条件下获得的自动切割分离各种形状的化学强化玻璃如图7所示。

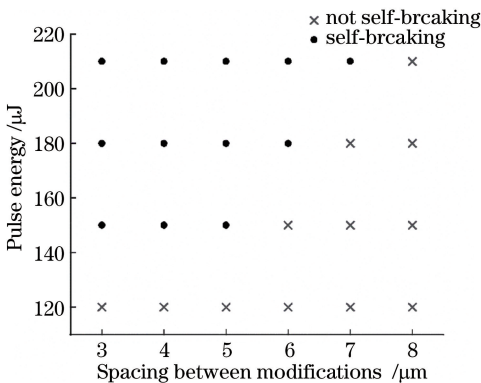


图6 实验得到的可行参数区间

Fig. 6 Range of appropriate parameters obtained by experiment

4 分析讨论

化学强化玻璃在上下表面各有一层厚度为几十微米的压应力层,而玻璃内部存在相对较弱的拉应力,使表面压应力与内部的拉应力形成了静态平衡,如图8(a)所示。

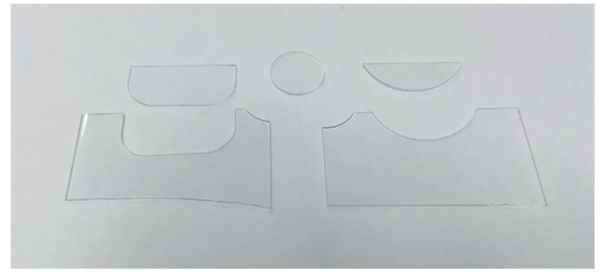


图7 曲线切割得到的化学强化玻璃

Fig. 7 Chemically strengthened glass obtained by curved cutting

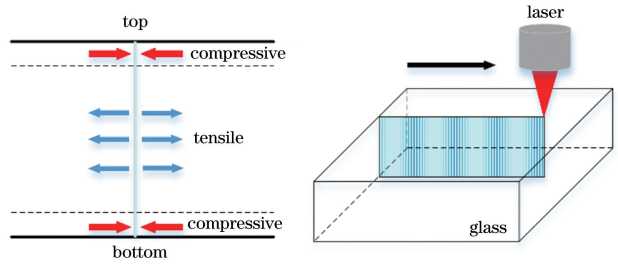


图8 化学强化玻璃的切割原理。(a)化学强化玻璃的应力分布;(b)贝塞尔光束在玻璃内产生一个改性面

Fig. 8 Cutting principle of chemically strengthened glass. (a) Stress distribution of chemically strengthened glass; (b) modified plane of glass generated by Bessel beam

在高功率密度的皮秒贝塞尔光束的作用下,每个脉冲都会在强化玻璃内加工出一条半径约 $1 \mu\text{m}$,覆盖整个厚度的柱状改性微通道,如图8(b)所示,导致强化玻璃上下表面的压应力失去静态平衡。由于强化玻璃表面产生了损伤,损伤点受到周围强烈的压应力作用而产生形变,诱导损伤点之间的区域产生诱导拉应力,如图9所示。一旦诱导拉应力超过玻璃的抗拉强度,玻璃上下表面会产生断裂裂纹;而玻璃内部本身就存在一定的拉应力,因此裂纹迅速沿表面向中心扩展,形成穿透裂纹,从而使强化玻璃精确地沿着激光扫描轨迹自动断开分离。

显然,皮秒激光的单脉冲能量和脉冲改性间距是影响化学强化玻璃能否自动断开以及切割质量的重要因素。当单脉冲能量过小时,柱状改性通道无法形成或形成的直径较小,化学强化玻璃表面无法诱导出足够的拉应力,因而不能产生断裂裂纹,导致化学强化玻璃无法自动断开分离;但当单脉冲能量过大时,又会使柱状改性通道直径较大,导致化学强化玻璃表面损伤宽度增大,玻璃断开后的边缘质量下降,断面粗糙度增加,严重时甚至会导致化学强化玻璃爆裂。脉冲改性间距过小时,同样也会导致玻璃表面损伤宽度增大,降低切割质量,尤其是脉冲改

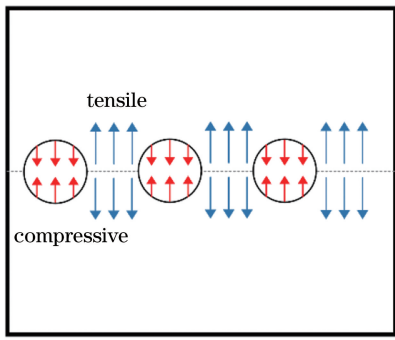


图9 激光扫描后化学强化玻璃的表面应力

Fig. 9 Surface stress of chemically strengthened glass after laser scanning

性间隔小于中心主瓣直径时,强化玻璃会因热积累过大而发生爆裂;而脉冲改性间距过大时,化学强化玻璃又会因诱导拉应力不足而无法自动断开分离。因此,单脉冲能量和脉冲改性间距必须适当匹配才能使化学强化玻璃自动断开,从而可以获得较高的切割质量。

5 结 论

本文利用皮秒激光贝塞尔光束,在未采用任何辅助措施的条件下,实现了化学强化玻璃的自动断开分离,并给出了自动分离可行性皮秒激光参数区间。实验结果表明,在单脉冲能量为 $150 \mu\text{J}$ 和脉冲改性间距为 $5 \mu\text{m}$ 的最佳条件下,切割速度可达到本实验工作台的最大速度 400 mm/s ,并可获得自动断开分离表面损伤小于 $2 \mu\text{m}$ 、切割面粗糙度低至 395 nm 的切割分离质量。这种方法不但能有效提升化学强化玻璃切割的速度与质量,并且可实现任意曲面图形的切割分离,具有较高的实际应用价值。

参 考 文 献

[1] Gy R. Ion exchange for glass strengthening [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2008, 149(2): 159-165.

[2] He A L. Study on chemical strengthening of high aluminosilicate glass [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 2-3.
和阿雷. 高铝硅酸盐玻璃化学强化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 2-3.

[3] Hu W, Tan B Q, Qin W C, *et al.* Development and prospects of chemically strengthened glasses [J]. *Glass & Enamel*, 2018, 46(3): 44-50.
胡伟, 谈宝权, 覃文城, 等. 化学强化玻璃的发展现状及研究展望[J]. *玻璃与搪瓷*, 2018, 46(3): 44-50.

[4] Jiang L B, Li L, Zhang G L, *et al.* Progress in research on chemical strengthened aluminosilicate glass[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014, 42(10): 106-112.
姜良宝, 厉蕾, 张官理, 等. 化学强化铝硅酸盐玻璃研究进展[J]. *材料工程*, 2014, 42(10): 106-112.

[5] Zhimalov A B, Solinov V F, Kondratenko V S, *et al.* Laser cutting of float glass during production[J]. *Glass and Ceramics*, 2006, 63(9/10): 319-321.

[6] Yang B J, Xie S D, Dai F. Design of coupling device for laser cutting guided by water beam [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 247-250.
杨保健, 谢顺德, 代福. 微水导激光切割玻璃的耦合装置设计[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 247-250.

[7] Bhuyan M K, Jedrkiewicz O, Sabonis V, *et al.* High-speed laser-assisted cutting of strong transparent materials using picosecond Bessel beams [J]. *Applied Physics A*, 2015, 120(2): 443-446.

[8] Hu X B, Hao Q, Guo Z R, *et al.* Dicing of sapphire wafer with all-fiber picosecond laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102016.
胡小豹, 郝强, 郭政儒, 等. 全光纤皮秒激光切割蓝宝石晶圆的实验研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102016.

[9] Shanguan Y, Liu P, Zhang J J, *et al.* Multi-focus laser separation of thick transparent materials [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1102008.
上官赢, 刘朋, 张军军, 等. 多焦点激光分离厚透明材料[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1102008.

[10] Watanabe W, Li Y, Itoh K. Ultrafast laser micro-processing of transparent material [invited] [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 52-61.

[11] Tsai W J, Gu C J, Cheng C W, *et al.* Internal modification for cutting transparent glass using femtosecond Bessel beams[J]. *Optical Engineering*, 2013, 53(5): 051503.

[12] Park S, Kim Y, You J, *et al.* Damage-free cutting of chemically strengthened glass by creation of sub-surface cracks using femtosecond laser pulses [J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 535-538.

[13] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.

[14] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.

[15] Dharmadhikari J A, Bernard R, Bhatnagar A K, *et al.* Axicon-based writing of waveguides in BK7 glass [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 172-174.

[16] Bhuyan M K, Courvoisier F, Lacourt P A, *et al.* High aspect ratio taper-free microchannel fabrication

-
- using femtosecond Bessel beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 566-574.
- [17] Meyer R, Jacquot M, Giust R, *et al.* Single-shot ultrafast laser processing of high-aspect-ratio nanochannels using elliptical Bessel beams[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4307-4310.
- [18] Bergner K, Müller M, Klas R, *et al.* Scaling ultrashort laser pulse induced glass modifications for cleaving applications[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(21): 5941-5947.
- [19] Zambon V, McCarthy N, Piché M. Fabrication of photonic devices directly written in glass using ultrafast Bessel beams [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7099: 70992J.
- [20] Sun C, He Y L, Chen J, *et al.* Bessel beam generated by linear radial gradient-index lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0802002. 孙川, 何艳林, 陈婧, 等. 线性径向梯度折射率透镜产生贝塞尔光 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802002.
- [21] Hu R, Wu F T, Zhu Q Z, *et al.* Influence of off-axis astigmatism on high order Bessel beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0826002. 胡润, 吴逢铁, 朱清智, 等. 离轴像散对高阶贝塞尔光束的影响 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0826002.
- [22] Abramov A A, Black M L, Scott Glaesemann G. Laser separation of chemically strengthened glass[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 285-290.