

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.009

基于飞秒激光加工的环烯烃聚合物微通道制备与应用

武凯超, 魏娟, 孙明凯, 王春雨, 郑宏宇

(山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000)

摘要: 环烯烃聚合物(COP)在微流控领域具有广阔的应用前景。研究了飞秒激光加工 COP 微通道的制备工艺。通过单脉冲烧蚀实验研究了 COP 的消融特性,并使用面积外推法将平均功率和对应的凹坑直径进行联立计算,最终确定激光光斑半径为 4.47 μm , COP 烧蚀阈值为 9.4 J/cm²。在 5.3~7.2 mW 的激光平均功率范围内,探究了激光聚焦位置、激光扫描速度和激光扫描次数对 COP 微通道形貌与尺寸的影响。结果表明,在聚焦位置(-200~200) μm 范围内 0 μm 处的微通道深度最大,向两侧偏移时微通道深度逐渐减小,且 200 μm 处微通道底部形貌完整性优于-200 μm 。激光扫描速度每增加 0.025 mm/s,微通道深度减少 10%;随着激光加工次数的增加,微通道深度增加,加工 2 次时深度增加约 20%,加工 3~6 次时,每次深度约增加 10%。此外,设计了一款可实现浓度混合的双螺旋结构微混合器,通过 COMSOL6.2 分析了混合时微通道不同位置截面的浓度混合状态,并通过热压法对芯片基板和盖板进行封合测试,结果表明微流控芯片混合器密封良好,无漏液现象。得到的实验参数和规律,能够为飞秒激光加工 COP 微通道提供技术支持。

关键词: 飞秒激光;环烯烃聚合物;微通道;混合器;双螺旋螺旋结构

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0065-08

Fabrication and application of cycloolefin polymer microchannels based on femtosecond laser processing

WU Kaichao, WEI Juan, SUN Mingkai, WANG Chunyu, ZHENG Hongyu

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract : Cyclic olefin polymers (COP) have broad applications in the field of microfluidics. The fabrication processes of COP microchannels using femtosecond laser processing were investigated. The ablation characteristics of COP were studied through single pulse ablation experiments, and the average power and corresponding pit diameter were simultaneously calculated using the area extrapolation method. The laser spot radius was finally determined to be 4.47 μm , and the ablation threshold of COP was 9.4 J/cm². The effects of laser focusing position, laser scanning speed, and laser scanning times on the morphology and size of COP microchannels were investigated within the average laser power range of 5.3-7.2 mW. The results show that within the range of (-200-200) μm of the focal position, the microchannel depth is the highest at 0 μm , and gradually decrease as it shift towards both sides. Moreover, the integrity of the microchannel bottom morphology at 200 μm is better than that at -200 μm . For every 0.025 mm/s increase in laser scanning speed, the microchannel depth decreases by 10%. With the increase of laser processing times, the depth of microchannels increases. When processed twice, the depth increases by about 20%, and when processed 3-6 times, the depth increases by about 10% each time. In addition, an equidistant spiral structure micro mixer was designed to achieve concentration mixing. The concentration mixing state of microchannels at different positions during mixing was analyzed using COMSOL6.2, and the sealing test of the chip substrate and cover plate was conducted using hot pressing method. The results show that the microfluidic chip mixer has good sealing and no leakage phenomenon. The experimental parameters and patterns obtained in this article can provide technical support for femtosecond laser processing of COP microchannels.

Keywords : femtosecond laser ; cyclic olefin polymer ; microchannel ; micromixer ; double-helix structure

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4600402, 2022YFE0199100), 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE130, ZR2021QF007, ZR2021MF030), 山东省泰山学者基金项目(tsqn202306192)

通信作者: 魏娟, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为聚合物微流控芯片设计、制备与应用

收稿日期: 2024-12-03

引用格式: 武凯超, 魏娟, 孙明凯, 等. 基于飞秒激光加工的环烯烃聚合物微通道制备与应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2):65-72.

WU Kaichao, WEI Juan, SUN Mingkai, et al. Fabrication and application of cycloolefin polymer microchannels based on femtosecond laser processing[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2):65-72.

环烯烃聚合物(COP)作为一种新型塑料,具有低吸水性、高化学稳定性和良好的生物相容性等优良性能,在光学、医疗等领域应用广泛^[1-3]。特别是在微流控领域,相较于传统的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)等材料,COP凭借其出色的耐腐蚀性,能够在更为严苛的条件下发挥出色的表现,因此,探索不同方法以加工COP微通道具有重要意义^[4-5]。

目前微流控芯片的制作包括3D打印^[6-8]、注射成型^[9-11]以及激光烧蚀法^[12-15]等多种方法。其中,3D打印技术虽然能够通过逐层叠加材料的方式构建三维结构,但其加工时间长、效率低,且制得的微通道表面粗糙度较大,限制了其应用。注射成型法虽然能够批量生产出具有模腔形状的微流控芯片,但模具成本高昂且模具类型单一,难以快速适应不同结构的芯片制作需求。而激光烧蚀法,则以其加工速度快、操作简单、成本低廉、可调节性高等优势,在微流控芯片制作领域展现出了广阔的应用前景。通过调节加工参数和图形模型,激光烧蚀法能够轻松实现不同结构类型的微流控芯片的制作。为了探究激光对微流控芯片微通道的影响,研究者们已经进行了许多研究。例如McCann等^[14]提出了一种快速且经济的方法,使用皮秒激光器在基于COP的微流控通道上加工出不同等级和厚度的通道模型。Chen等^[15]提出了一种胶带粘附激光切割和密封集成(TLCSI)的方法,仅利用CO₂激光器和一块双面胶带在几分钟之内就可加工完成芯片。Teixidor等^[16]通过使用纳秒激光对PMMA进行微通道加工,并发现在1064 nm波长下加工会呈现弱吸收。Liu等^[17]使用CO₂激光器加工COP聚合物并对不同能量和速度下微通道的深度进行了详细研究。尽管当前关于皮秒、CO₂激光器加工微流控芯片微通道的研究已经取得了诸多进展,但COP在飞秒激光消融作用下,如何实现尺寸的精确控制仍是一个亟待解决的问题。

笔者聚焦于飞秒激光技术在COP材料微通道加工中的应用,通过调整激光聚焦位置、平均功率、扫描速度及加工次数开展了一系列实验。分析了单脉冲下COP材料的烧蚀阈值和连续激光下不同工艺参数对微通道深度影响,从而实现对微通道深度的精确调控。通过COMSOL6.2仿真软件进一步评估微通道的流体混合性能,对不同位置处的混合

效果进行了模拟分析。采用了热压技术来封合微流控芯片,并对封合后的芯片进行了密封性测试,以确保其在实际应用中的可靠性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

COP:1420R,日本瑞翁公司;

红蓝色染料:墨水,上海英雄(集团)有限公司。

1.2 仪器与设备

飞秒激光器:CARBIDE-CB5,立陶宛莱特激光公司;

光学显微镜:BX53MTRF-S,日本奥林巴斯公司;

超声波清洗机:F-030,深圳福洋科技集团有限公司;

公司;

平板热压机:CREE-6140D-4,东莞科锐仪器科技有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050,上海善治仪器设备有限公司;

可编程双通道注射泵:Pump 11 E1,苏州汶颢微流控技术有限公司;

5倍显微物镜:MY5-802,日本三丰公司。

1.3 实验原理

烧蚀阈值是激光加工材料的一个重要因素,为确定后续激光参数加工范围提供重要依据。实验通过单脉冲烧蚀凹坑并采用面积外推法^[18]进行计算,具体计算公式见式(1)。

$$D^2 = 2\omega_0^2 \left[\ln P_{\text{avg}} + \ln \frac{2}{\pi f \omega_0^2 \varphi_h} \right] \quad (1)$$

式中: D 为激光单脉冲烧蚀区域直径; P_{avg} 为激光平均功率; f 为激光的重复频率; ω_0 为激光光斑半径; φ_h 为实现该材料烧蚀去除的最小激光光束能量密度,即材料的烧蚀阈值。

根据材料烧蚀阈值定义可知,材料表面形成最小凹坑的激光能量密度即为材料的烧蚀阈值。通过实验测量不同激光平均功率对应的单脉冲烧蚀凹坑直径并带入式(1)中进行计算。通过直线拟合的方法,可推算出被烧蚀材料的烧蚀阈值。高斯激光经过物镜聚焦后的光斑半发散角 θ 如图1所示。

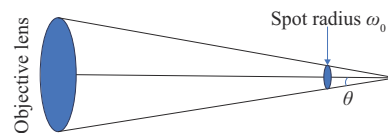


图1 激光聚焦图

Fig. 1 Laser focusing diagram

半发散角 θ 计算公式见式(2)。

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (2)$$

式中: λ 为激光波长; M 为光束质量,理想状态下设定为1。

通过激光半径计算出高斯光束的半发散角 θ ,由此可以计算离焦时样品表面的光斑半径。

激光能量密度公式见式(3)。

$$\varphi_0 = \frac{2P_{\text{avg}}}{\pi f \omega_0^2} \quad (3)$$

式中: φ_0 为激光能量密度。

激光烧蚀原理是激光在单位时间内进行多个脉冲加工,而微通道的深度与激光脉冲点的重叠有关。

激光单位面积下的脉冲数见式(4)。

$$N = \frac{2\omega_0}{v} f \quad (4)$$

式中: N 为有效脉冲数; v 为激光扫描速度。

1.4 COP微混合器结构设计

设计了一款具备浓度混合功能的双螺旋结构微混合器,由基板(微通道层)和盖板(密封层)封合而成,尺寸为 $2.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$,如图2所示。该双螺旋结构利用微通道两侧液体的角速度变化促进溶液充分混合。微混合器包括两个溶液进样口和一个溶液出样口,通过微注射泵使两种不同颜色墨水经由两个进样口注入,经过四圈螺旋结构进行混合,其中螺旋的直径比为 $1:3:5:7$,最后通过出样口进行流出,进样口的混合角度为 90° 。

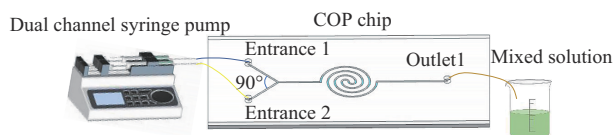


图2 微混合器的结构

Fig. 2 Structure of micro mixer

1.5 COP芯片微通道加工与制备

微通道通过飞秒激光加工,激光加工系统如图3所示。飞秒激光由Yb:KGW激光器的二次谐波产生,中心波长为 515 nm ,脉冲宽度为 217 fs ,最大重复频率为 60 kHz 。激光束由激光器发出,经过镜子折射激光的能量连接,通过半波板、偏振分束器、扩束器之后,通过数值孔径为 0.14 的5倍显微物镜聚焦到基板上,并计算机连接CCD相机来观测。其中半波板和偏振分束器用于调节输出激光的能量,激光参数通过计算机来调节。

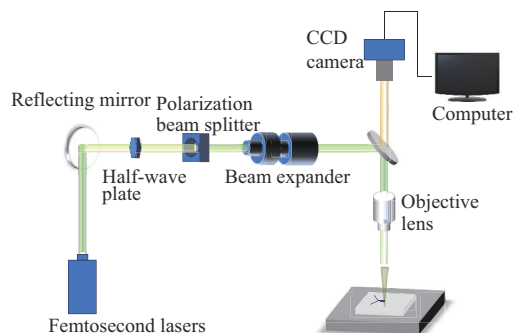


图3 飞秒激光器工作流程图

Fig. 3 Working principle of femtosecond laser

采用热压的方法将COP芯片基板和盖板进行封合。热压的原理是将COP加热到玻璃化转变温度附近,然后施加压力进行封合。为使其具有良好的密封性能,通过一系列参数测试最终选用在 120°C 的温度和 7.35 MPa 的理想压强下进行封合。加工方法如下:第一步,将芯片置于热压机的加工平台中,在压强为 2.45 MPa 的状态下使热压机温度提升至 110°C 对芯片进行预热。第二步,当预热温度达到 110°C 后,将压强升高至 7.35 MPa 同时将温度升至 120°C ,保持 10 min 。第三步,压力保持不变,使热压机温度逐渐降低至室温后卸去压力完成封合。

1.6 仿真模拟

通过COMSOL6.2中的稀物质传递和层流模块进行混合仿真分析,条件设置如下:

(1)微通道模型设置为三维,流体选择水,流速为 $0.1 \mu\text{L}/\text{min}$ 。

(2)选择稀物质传递物理场,分别设定两个入口处流体的初始浓度为 $C_1=4 \text{ mol}/\mu\text{L}$ 和 $C_2=2 \text{ mol}/\mu\text{L}$,出口处不设压力。

(3)通道边界设置为不可滑移边界,流体设置为连续介质,不可压缩的流体。

1.7 密封测试

在微混合器封合完成后,为了观察芯片的密封性将微混合器与 1 mL 的针管通过圆形软管连接,并通过微量泵将黄色溶液和蓝色溶液注入微通道中进行混合来验证其密封性(如图2所示),注射泵设定流量为 $0.1 \mu\text{L}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 单脉冲烧蚀阈值实验

在单脉冲烧蚀阈值实验中将激光重复频率设置为 1 kHz ,脉宽为 217 fs ,扫描速度设置为 $0.1 \text{ mm}/\text{s}$,

将激光平均功率设置为3.16~9.98 mW进行实验,如图4所示。图4中显示了当平均功率为3.16 mW时出现直径为3.85 μm 的凹坑。随着激光平均功率从3.71 mW增至6.74 mW,凹坑的直径也逐渐增加,并且当平均功率增加至6.74 mW时,凹坑直径增加至14.3 μm ,增加了300%。

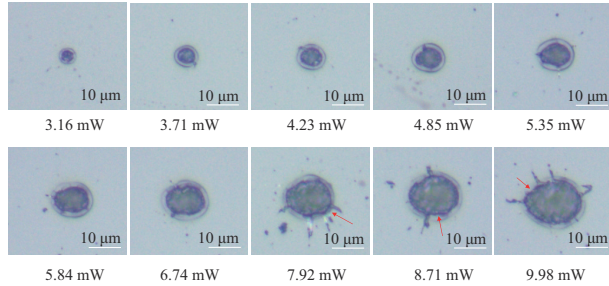


图4 不同激光功率下单脉冲烧蚀凹坑形貌

Fig. 4 Morphology of single pulse ablation pits under different laser powers

在激光平均功率增长过程中,凹坑边缘的热影响区并未发生显著变化。这归因于飞秒激光的超短持续时间及独特的加工机制,即直接将材料从固态升华至气态,避免了熔化过程及伴随的热传导效应。因此平均功率在一定范围内增大并不会导致热影响区有明显变化。平均功率在7.92~9.98 mW时,凹坑的直径继续扩大且边缘开始出现烧蚀物,导致边缘变得粗糙。这一现象归因于过高的激光平均功率在加工瞬间于烧蚀区域产生了额外的潜热,使原本的热影响区吸收了更多热量而发生烧蚀,从而破坏了凹坑边缘的光滑性。为了获得边缘更加光滑且宽度更适宜的微通道,选择在5.3~7.9 mW的范围内进行连续激光下的工艺探索。

对飞秒激光凹坑烧蚀实验数据进行整理计算,拟合出了激光烧蚀凹坑直径的平方 D^2 与激光平均功率 P_{avg} 的关系曲线,如图5所示。 D^2 与 P_{avg} 呈线性

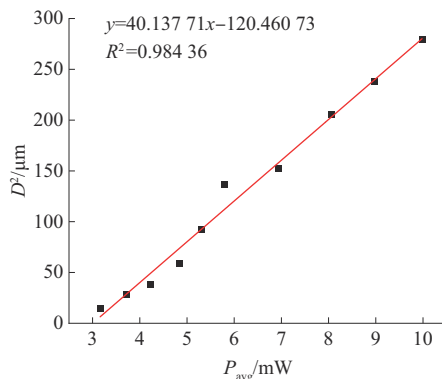


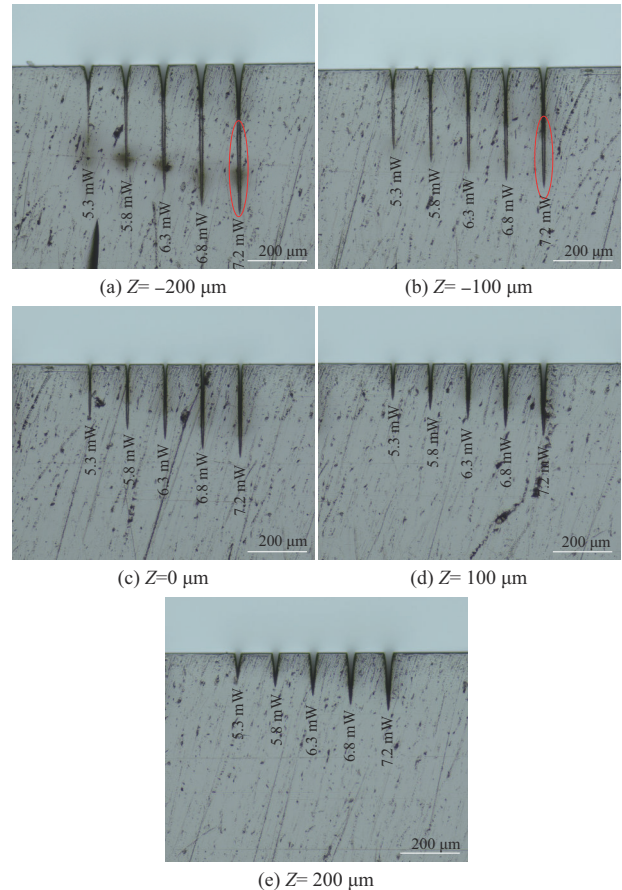
图5 D^2 与 P_{avg} 的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between D^2 and P_{avg}

增加的关系。由于直线的斜率 k 与 ω_0 符合 $k=2\omega_0^2$ 的关系,因此通过计算得出激光光斑半径 $\omega_0=4.47 \mu\text{m}$ 。图5中 R^2 表示数据的拟合准确度。将 ω_0 带入式(1)中,当 $D=0$ 时,得出 $P_{\text{avg}}=3.01 \text{ mW}$,最终计算可得到COP的飞秒激光单脉冲烧蚀阈值 $\varphi_h=9.4 \text{ J/cm}^2$ 。

2.2 聚焦位置对微通道的深度消融影响

图6a~图6e展示了在不同聚焦位置参数下COP聚合物微通道的深度变化,每个图中的微通道均按



(a) $Z=-200 \mu\text{m}$ (b) $Z=-100 \mu\text{m}$
(c) $Z=0 \mu\text{m}$ (d) $Z=100 \mu\text{m}$
(e) $Z=200 \mu\text{m}$
(f) Microchannel depth changes

图6 不同聚焦位置(Z)和激光平均功率下的微通道形貌(a~e)及深度(f)变化

Fig. 6 Microchannel morphology(a~e) and depth(f) changes at different focal positions(Z) and laser average power

照 5.3, 5.8, 6.3, 6.8, 7.2 mW 的平均功率从左到右依次进行加工, 重复频率为 1 kHz, 扫描速度为 0.1 mm/s。图 6a~图 6c 中当激光聚焦位置在(-200~0) μm 范围内进行微通道加工时, 微通道底部会出现显著的未完全烧蚀区域。随着聚焦距离的增加, 这一区域逐渐减小。图 6d~图 6e 中, 当聚焦位置调整至 100 μm 和 200 μm 进行加工时, 未完全烧蚀区域完全消失。这是因为当激光聚焦于样品内部进行加工时, 当激光能量密度大于材料烧蚀阈值便开始烧蚀, 而高斯激光具有中间能量强、边缘能量弱的特点, 即使经过一定损耗, 激光光斑中心仍能保持足够能量继续烧蚀材料, 但未能达到材料烧蚀阈值。通过对比图中微通道的形貌可以发现, 当聚焦位置为 0 μm 时, 微通道的宽度最小。随着聚焦位置的偏离, 微通道的宽度逐渐增大。通过图 6f 发现, 在相同平均功率下, 聚焦位置在样品表面 0 μm 时, 微通道的深度达到最大; 随着聚焦位置的偏离, 微通道的深度逐渐减小。这是由于在正离焦状态下, 激光烧蚀微通道宽度增大, 从而导致了深度的减小。通过公式(2)得出高斯激光半发散角 θ 为 2.1°, 进而利用 $\tan\theta$ 计算出在离焦+200 μm 时激光光斑的半径为 11.8 μm 。将光斑半径代入公式(3)得出: 在 5.3~7.2 mW 功率范围内, 激光的能量密度为 2.38~3.23 J/cm^2 。通过分析发现, 连续激光扫描速度过慢会导致激光光斑出现重叠, 进而形成脉冲累积效应。因此连续激光的烧蚀阈值会随着脉冲数的重叠而发生变化。微通道的宽深比是其性能的一个重要影响因素。在 200 μm 的聚焦位置下, 微通道能够获得较好的宽深比并且底部没有未完全烧蚀区域, 选择在此位置进行后续的实验。

2.3 扫描速度对微通道的深度消融影响

图 7a~图 7e 展示了在五种不同扫描速度下, 通过调整激光平均功率进行加工的微通道, 其中其他激光参数与 2.2 部分保持一致。观察图 7f 中的数据可以发现, 在扫描速度为 0.1~0.225 mm/s 的范围内, 随着激光平均功率的逐步增加, 微通道的深度也相应地发生了显著变化, 具体为从 52 μm 增长至 130 μm , 48 μm 至 118 μm , 42 μm 至 106 μm , 38 μm 至 98 μm , 35 μm 至 92 μm 以及 32 μm 至 80 μm 。通过对比发现, 在保持扫描速度不变的情况下, 激光平均功率每增加 0.5 mW, 微通道的深度增加 35%~40%。

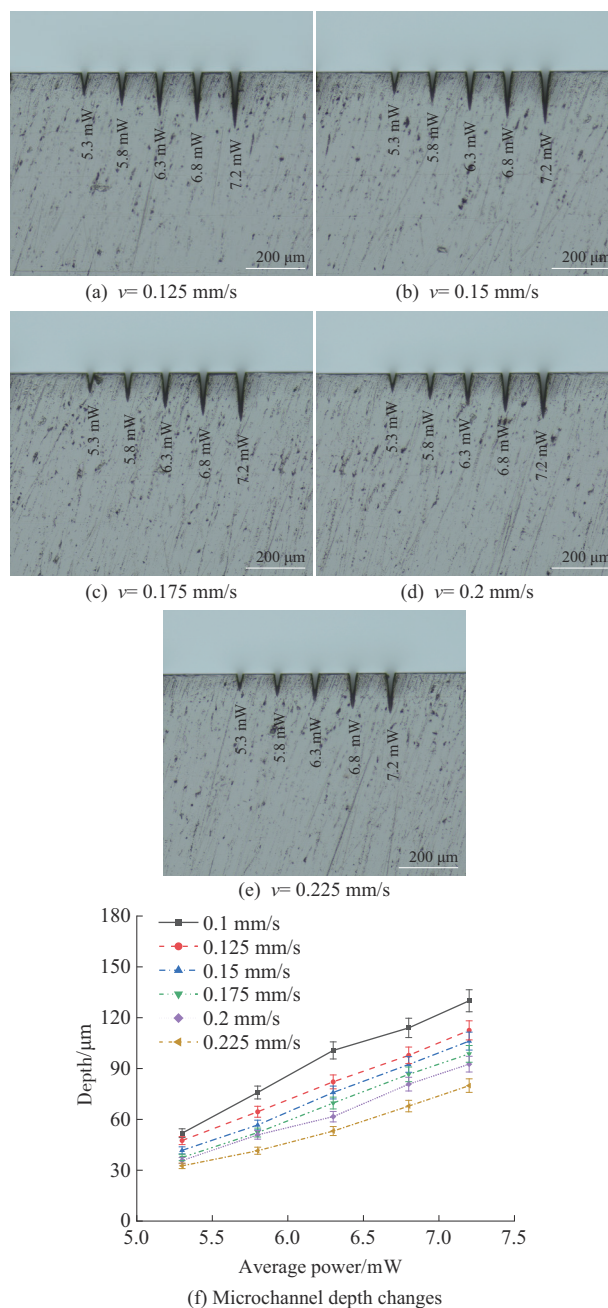


图 7 不同扫描速度(v)和激光平均功率下微通道形貌(a~e)及深度(f)变化

Fig. 7 Microchannel morphology(a~e) and depth(f) changes under different scanning speeds(v) and laser average power

同时, 当扫描速度每提升 0.025 mm/s 时, 微通道的深度则会减少约 10%。利用公式(4)进行计算, 得出了在六种不同扫描速度下, 单位面积内的脉冲数分别为 236, 189, 157, 135, 118 和 105。这一结果表明, 平均功率增大会使所有脉冲激光的能量密度增大, 从而导致微通道深度增大。而随着扫描速度的加快, 单位面积内所接收到的激光脉冲数逐渐减少, 进而导致了微通道深度减小。

2.4 加工次数对微通道的深度消融影响

图8a~图8e展示了在不同加工次数下,COP聚合物微通道的深度变化,其他变量的设置与2.2部分保持一致。图8a中加工2次时微通道深度范围为68~158 μm ,图8b中加工3次时微通道深度为73~174 μm ,图8c中加工4次时微通道深度为80~183 μm ,图8d中加工5次时微通道深度为86~193 μm 。图8e中加工6次时微通道深度为91~208 μm 。图8f

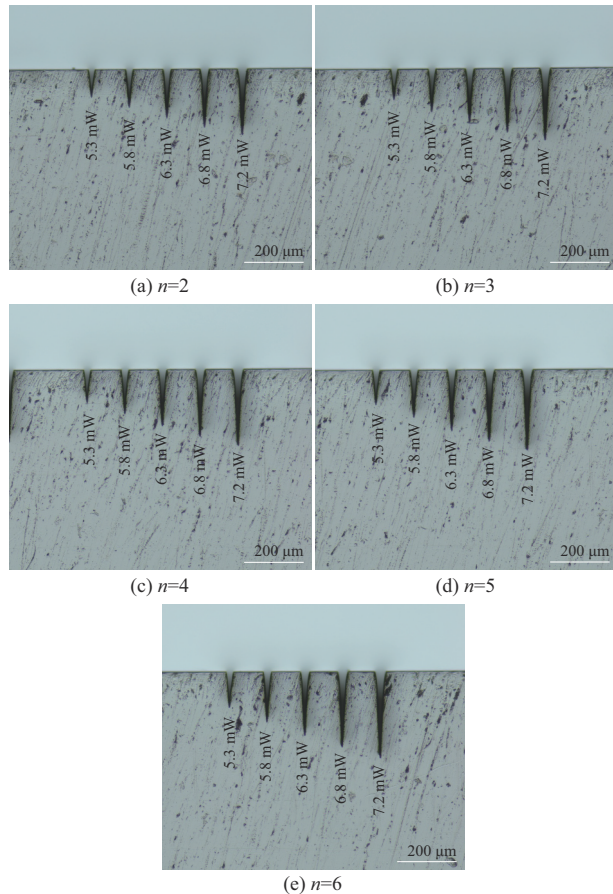


图8 不同激光平均功率和加工次数(n)下微通道形貌(a~e)及深度(f)变化

Fig. 8 Microchannel morphology(a~e) and depth(f) changes under different laser average power and processing times(n)

揭示了在不同激光平均功率下,微通道深度随着加工次数的增加而呈现出规律性增长。通过对比在相同平均功率下不同加工次数对应的深度发现:当进行第2次加工时,微通道深度大约增加了20%;而当加工次数超过2次后,每次额外的加工都能使微通道深度再增加约10%。通过分析发现,在首次加工过程中,由于材料表面的激光能量密度超过了其烧蚀阈值,因此导致了较高的烧蚀率。然而在随后的加工中,随着烧蚀区域向材料内部移动,激光光斑的能量密度也相应减小,从而造成了烧蚀率的衰减。特别是当加工次数超过两次后,随着烧蚀区域继续下移,高斯激光光斑的边缘部分能量已经低于材料的烧蚀阈值,这意味着只有微通道的中部区域能够继续被有效烧蚀,而边缘部分则几乎不再发生变化。

2.5 功能测试

双螺旋微通道模型的宽度和深度分别为25 μm 和50 μm ,如图9a所示。为了研究微混合器的混合效果,从模型中选取了5个位置的横截面来探索微混合器的混合机理。图9b展示了5个不同横截面的浓度混合情况。在横截面1处,溶液尚未进入螺

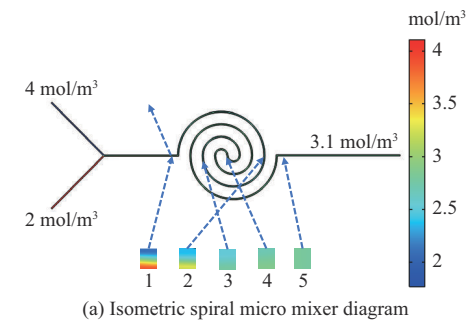


图9 等距螺旋形微混合器示意图及截面混合浓度变化

Fig. 9 Isometric spiral micro mixer diagram and changes in cross-sectional mixed concentration

旋结构之前,浓度值在 $2.1\sim 4\text{ mol/m}^3$ 范围内,其中溶液浓度低的一侧混合速度较快。随着溶液的流动,到达横截面2时,可以观察到混合浓度的差异开始逐渐减小,其范围缩小至 $2.6\sim 3.7\text{ mol/m}^3$ 。进一步流动至横截面3,混合浓度值趋向均衡,混合过程持续进行。最终,在螺旋结构的出口横截面5处,可以看出经过该结构的充分混合,两种原本浓度不同的溶液已几乎完全融合,浓度值稳定在了 3.1 mol/m^3 左右。

对COP微混合器(图10a)进行密封性测试。从图10b可以看出,蓝色溶液和黄色溶液经过Y型入口后开始混合,通过螺旋结构中心处已经呈现绿色溶液(图10c),最后经过螺旋结构后从出口处流出(图10d),测试过程中芯片密封性能良好且无泄漏现象。

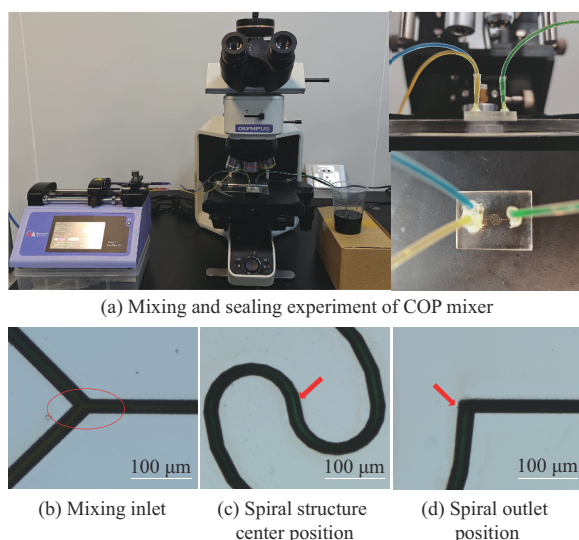


图10 COP微混合器混合与密封实验情况

Fig. 10 Mixing and sealing experiment of COP micro mixer

3 结论

(1)通过飞秒激光在COP表面进行单脉冲试验,得出烧蚀阈值为 9.4 J/cm^2 。通过改变激光聚焦位置和扫描速度进行微通道加工发现,连续激光的烧蚀阈值会随着脉冲数的重叠而发生变化。平均功率不变时,扫描速度越快单位面积下的脉冲数越少。扫描速度不变时,平均功率越大会使单脉冲能量密度增大,进而造成更多的消融率。当增加激光加工次数时,加工2次比加工1次微通道深度增加约20%,加工次数为3~6次时,每次微通道深度增加约10%。

(2)通过仿真模拟微通道各处的浓度混合曲线表明,通过该螺旋结构混合前溶液的浓度值为 $2.1\sim$

4 mol/m^3 ,通过后浓度值稳定在 3.1 mol/m^3 。在 $120\text{ }^\circ\text{C}$, 7.35 MPa 的压强下进行COP微混合器封合,并对双螺旋微混合器进行了密封测试。测试过程中溶液通过螺旋结构进行混合后流出,并且封合后的芯片密封性良好并无泄漏。

参考文献

- [1] NUNES P S, OHLSSON P D, ORDEIG O, et al. Cyclic olefin polymers: emerging materials for lab-on-a-chip applications[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(2-3):145-161.
- [2] BAEK S H, KIM S J, HEO H S, et al. Improving quantum dot stability against heat and moisture with cyclic olefin copolymer matrix[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2024, 41(13): 3 461-3 468.
- [3] KANG H J, YANG N, SONG Y S. Enhanced thermal, mechanical, and optical properties of cellulose nanocrystal embedded cyclic olefin copolymer composite film[J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2024, 36(3):223-230.
- [4] 李常峰,蒋炳炎,申瑞霞,等.微流控芯片超声振动注射成型模具设计[J].*工程塑料应用*, 2010, 38(2):67-71.
LI Changfeng, JIANG Bingyan, SHEN Ruixia, et al. Design of ultrasonic vibration assisted injection mold for microfluidic chip[J]. *Engineering Plastics Application*, 2010, 38(2):67-71.
- [5] 金胜祥,赵南阳,许忠斌,等.超声塑化微注射成型技术研究现状及展望[J].*工程塑料应用*, 2024, 52(2):168-174.
JIN Shengxiang, ZHAO Nanyang, XU Zhongbin, et al. Research progress and prospect of ultrasonic plasticizing micro-injection molding technology[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(2):168-174.
- [6] LI Q, JIANG B Y, LI X L, et al. Investigation of solvent-assisted in-mold bonding of cyclic olefin copolymer (COC) microfluidic chips [J]. *Micromachines*, 2022, 13. DOI:10.3390/mi13060965.
- [7] JIN Y, XIONG P, XU T Y, et al. Time-efficient fabrication method for 3D-printed microfluidic devices[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1). DOI:10.1038/s41598-022-05350-4.
- [8] WU C, SUN J J, YIN B F. Research on integrated 3D printing of microfluidic chips[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7). DOI: 10.3390/mi14071302.
- [9] 舒海涛,刘治华,梁帅,等.基于灰色关联分析法的COC芯片翘曲变形注塑工艺优化[J].*工程塑料应用*, 2020, 48(10):65-70.
SHU Haitao, LIU Zhihua, LIANG Shuai, et al. Optimization of injection molding process for warpage of COC chip based on grey relational analysis[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(10):65-70.
- [10] 谢于锰,徐林龙,张亚军,等.基于微结构复制精度的COC微流控芯片注塑工艺优化[J].*塑料*, 2024, 53(4):102-104, 115.
XIE Yumeng, XU Linlong, ZHANG Yajun, et al. Optimization of injection molding process of COC microfluidic chip based on microstructure repeatability[J]. *Plastic*, 2024, 53(4):102-104, 115.

- [11] ETXEBERRIA L, BADIOLA J H, ASTIGARRAGA M, et al. Comparison between injection molding(IM) and injection-compression molding(ICM) for mass manufacturing of thermoplastic microfluidic devices[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2024, 309(1). DOI:10.1002/mame.202300231.
- [12] ZHONG S Y, XUE L Q, WANG Y, et al. Paper-based microfluidic chips for wide time range fluid control based on knife crafting and laser cutting[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 415. DOI:10.1016/j.snb.2024.135956.
- [13] HAN Y, JIAO Z H, ZHAO J J, et al. A simple approach to fabricate multi-layer glass microfluidic chips based on laser processing and thermocompression bonding[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2021, 25(9). DOI:10.1007/s10404-021-02479-y.
- [14] MCCANN R, BAGGA K, DUAUX G, et al. Taguchi method modelling of Nd: YAG laser ablation of microchannels on cyclic olefin polymer film[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 265–271.
- [15] CHEN X, LI T, GAO Q I. A novel method for rapid fabrication of PMMA microfluidic chip by laser cutting and sealing integration [J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26(8). DOI: 10.1142/S0218625X19500422.
- [16] TEIXIDOR D, THEPSONTHI T, CIURANA J, et al. Nanosecond pulsed laser micromachining of PMMA-based microfluidic channels[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(4): 435–442.
- [17] LIU S H, FAN Y Q, GAO K X, et al. Fabrication of cyclo-olefin polymer-based microfluidic devices using CO₂ laser ablation[J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(9). DOI: 10.1007/s00542-017-3282-3.
- [18] 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):34–41.
- CHEN Genyu, ZHU Zhichao, YIN Jiu, et al. Experimental on ablation threshold of single crystal diamond produced by femtosecond[J]. *China Laser*, 2019, 46(4):34–41.