

超快激光制备 PMMA 微流道机理及工艺研究

王中旺^{1,2}, 汪帮富^{1,2}, 丁雯钰^{1,2}

(1. 苏州科技大学机械工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州市高效与精密加工技术重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 由于传统加工方法不能解决 PMMA 微流道的加工质量不好和效率低的问题, 本文对超快激光直写 PMMA 制备微流道的烧蚀机理和工艺参数进行了研究。根据实验分析不同的激光功率、加工速度和加工次数对微流道的宽度和横截面的影响规律, 利用超快激光加工系统制备微流道, 并采用超景深三维显微镜观测微流道的表面形貌。实验结果表明, 当超快激光的加工速度为 20 mm/s 时, 激光功率为 1.5 W 时, 制备的微流道的宽度较小、宽度趋势比较平稳; 当超快激光作用 PMMA 的次数一样, 由于加工速度逐渐增加, 制备的微流道其宽度和激光的加工速度保持线性增加。当加工速度越大时, 微流道的宽度较小、且壁面趋势相对平缓, 而当加工速度一定, 超快激光的输出功率在 1.5 W 时, 微流道内壁区域不易出现残渣堆积和气泡隆起现象。本文通过优化超快激光加工系统的工艺参数, 从而加工出尺寸精度高、表面光滑、宽度为 20~90 μm 的微流道芯片。

关键词: 超快激光; 激光烧蚀; 烧蚀阈值; PMMA 微流道

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2019.08.004

Research on ablation mechanism and process parameters of PMMA microchannels by ultrafast laser

WANG Zhong-wang^{1,2}, WANG Bang-fu^{1,2}, DING Wen-yu^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;
2. Suzhou Key Laboratory of Precision and Efficient Machining Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Since the traditional processing methods cannot solve the problem of poor quality and low efficiency of PMMA micro-channel processing, the ablation mechanism and process parameters of preparing PMMA microchannels with ultrafast laser direct-writing were studied in this paper. The effects of laser power, processing speed and processing times on the width and cross-section of the micro-channel were analyzed based on experiments. The microchannels were fabricated by ultrafast laser processing system, and the surface morphology of the microchannels were observed by three-dimensional microscopy (VHX-5000). The experimental results show that when the processing speed of ultrafast laser is 20 mm/s and the laser power is 1.5 W, the width of the microchannels are smaller and the trend of the width is relatively stable. When the number of times of ultra-fast laser acting on PMMA is the same, the width of the prepared microchannels and the processing speed of the laser increase linearly as the processing speed increases gradually. When the processing speed is higher, the width of the microchannels is smaller and the wall trend is relatively flat. However, when the processing speed is constant and the output power of ultrafast laser is 1.5 W, the phenomenon of residue accumulation and bubble bulge is not easy to occur in the inner wall of microchannels. In this paper, by optimizing the technological parameters of ultrafast laser processing system, microchannel chips with high dimensional accuracy, smooth surface and width of about 20~90 μm are fabricated.

Key words: ultrafast laser; laser ablation; ablation threshold; microchannel of PMMA

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (No. KYCX18_2552) 资助。

作者简介: 王中旺 (1994 -), 男, 硕士研究生, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: maxwang_zw@126.com

通讯作者: 汪帮富 (1978 -), 男, 博士, 主要从事飞秒激光微/纳加工。E-mail: sunboy02@126.com

收稿日期: 2019-01-07

1 引言

因为信息化技术和微生物仿生机械集成技术的日益发展,越来越多的人研究微流控集成芯片,其尺寸微小、功能集成、性能稳定等,现在主要运用于生物、机械、材料等方面^[1-2]。PMMA 是一种特殊的聚合物,热导率小、方便加工、成本较低,所以其本身的材料特性很好,PMMA 更多地被应用于制备微流控芯片^[3]。飞秒激光器在材料加工方面,其几乎不产生热影响区域(烧蚀碳化区域)及加工精度高等众多优越的加工性能,为微流道加工提供了极好的选择,从而引起国内外学者的广泛关注,目前在这一方面的研究主要是根据数值模拟和具体实验方法^[4-6]。超快激光加工会受到激光波长、脉宽、功率等激光参数的影响,其中激光功率影响的是加工中非线性效应的程度以及激光热影响区的温度和大小,激光功率对加工质量的影响比较明显^[7-8]。当下很多国内外学者研究超快激光作用高分子聚合物,采用超快激光加工系统来实现 PMMA 的焊接、切割等加工工艺,以解决传统加工技术所存在的问题,目前研究最多的还是利用超快激光制备微流道和聚合物材料表面改性技术^[9-11]。

根据超快激光输出脉冲时光束具有热效应, M. I. Mohammed 等^[12]使用飞秒激光直写的方法来实验分析由 PMMA 制备的芯片微通道的烧蚀机理; C. K. Chung 等^[13]同样采用了激光直写的方法烧蚀 PMMA 加工微结构通道,分析激光的光斑直径对微通道宽度、深度的影响;相恒富等^[14]建立激光烧蚀 PMMA 的瞬态模型,数值模拟其烧蚀模型和温度场分布,讨论了激光作用 PMMA 微流控芯片的烧蚀机理。这一类的激光直写微流道的优点很明显,例如加工效率高、生产成本不高,但是激光直写烧蚀所加工的微流道尺寸精度和形状难以控制,容易导致微流道的堵塞,表面质量较低,对未来应用激光直写微纳加工的微流道受到一定的挑战^[15-16]。目前,尽管利用飞秒激光在透明介质材料的内部进行微纳加工的研究进展很大,但是对于飞秒激光微纳加工聚合物的质量控制很存在很多问题,并且难以控制超快激光加工聚合物的微流道的尺寸精度^[17-18]。

本文针对超快激光辐照 PMMA 基体材料建立了超快激光作用 PMMA 的理论模型,并且推导激光功率和 PMMA 基体材料其融化温度之间的关系表

达式和烧蚀阈值,研究其对 PMMA 烧蚀的作用机理和优化工艺参数。

2 超快激光作用 PMMA 烧蚀机理

超快激光直写 PMMA 加工微流道时,其精度高、热影响区小并且三维加工能力好,并且超快激光的能量密度高(约 1022 W/cm^2)、作用空间小(约 10^{-10} m)、时间尺度小(约 10^{-15} s)和被加工材料吸收能量的可控尺度(电子层面)难,所以超快激光加工时的烧蚀机理和物理效应和常规的加工方法有很大的区别,特别是在微流道的应用上面^[19]。超快激光微纳加工微流道的方法是采用超快激光的光束能量烧蚀 PMMA,当超快激光的光束汇聚在 PMMA 的表面时,由于激光和聚合物之间存在非线性吸收和雪崩电离,超快激光的能量都汇聚在较小范围内,PMMA 表面吸收激光光束的能量并将之转化为热量,导致 PMMA 材料中化学键急剧断裂,而且迅速气化成含有金属性能的等离子体。与此同时,PMMA 吸收激光的能量后受热膨胀,会导致出现瞬态的压力波,相反产生的压力波也会对 PMMA 造成大量的等离子体,它们在高温下发生喷溅,因此可以烧蚀 PMMA 以制备微流道^[20-21]。

3 超快激光制备 PMMA 微流道的烧蚀阈值

超快激光具有高斯分布的能量,以脉冲形式辐照材料,可以推导出其激光能量密度的分布 $\phi(r)$ 是^[22-23]:

$$\phi(r) = \phi_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1)$$

式中: ω_0 是高斯光束束腰半径 (μm); ϕ_0 是高斯光束的中心能量密度 (J/cm^2); r 是到光束中心的距离 (μm)。

根据文献[22],把激光辐照在 PMMA 上发生烧蚀现象时的超快激光能量密度设定是烧蚀阈值,若激光光束中心以 r 为半径范围内发生烧蚀,则 $\phi(r)$ 是 PMMA 的烧蚀阈值,此时为 ϕ_{th} 。假设烧蚀直径为 D ,可以得到烧蚀直径 D 和激光的烧蚀阈值 ϕ_{th} 的关系是:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\phi}{\phi_{th}}\right) \quad (2)$$

激光的平均能量密度 ϕ_{av} 和输出功率 P 的关系式是:

$$\phi_{av} = \frac{P}{\pi\omega_0^2 f} \quad (3)$$

式中, f 是激光的频率(Hz)。

将式(2)和式(3)结合可得:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln(P) - 2\omega_0^2 \ln(P_{th}) \quad (4)$$

式中, P_{th} 是 PMMA 达到烧蚀阈值的激光输出功率。

4 实验方法

超快激光直写 PMMA 制备微流道的试验加工系统主要包括激光光源、光束参数控制、光路系统、激光聚焦物镜以及计算机控制的三维精密移动平台。超快激光脉冲是由一套 Origami-10XP 飞秒激光系统发出的(Onfive 公司), 它的技术性能参数主要是: 激光的脉冲宽度 $\tau = 400$ fs, 激光的波长 $\lambda = 1030$ nm, 激光的输出频率 $f = 1$ kHz, 激光最大输出功率 4 W, 超快激光的光束能量满足高斯分布。该实验系统的关键光学元件是聚焦物镜, 它决定了聚焦光斑的大小和最小加工精度。整个系统加工平台是选用分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 三维精密移动平台, 通过 CCD 摄像机和功率计对整个加工系统进行实时监控。图 1 是超快激光直写 PMMA 加工微流道的实验系统示意图。

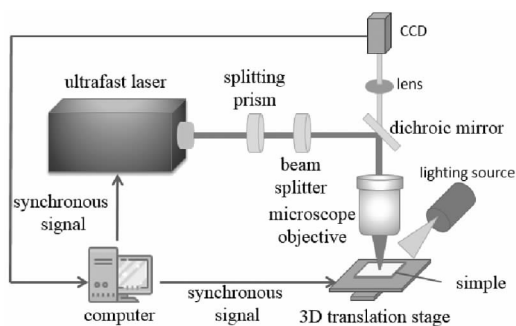


图 1 超快激光直写 PMMA 加工微流道的实验系统示意图
Fig. 1 Diagram of an experimental system for ultrafast laser direct writing PMMA micro-channel fabrication

本实验中的样件是 $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的 PMMA 的试验件, 其热物理参数如表 1 所示。

表 1 PMMA 热物理参数

Tab. 1 Thermophysical parameters

Thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Heat capacity $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	Density $/(kg \cdot m^{-3})$	Heat distortion temperature range/ $^{\circ}C$
0.19	1420	1190	105 ~ 140

通过改变超快激光的加工速度和加工次数, 研究其加工功率在 1 W、1.5 W、2 W 时, 超快激光的加工速度和加工次数对其制备出的微流道的横截面形貌、圆度和微流道气化残渣的影响规

律。本次实验采用的超快激光输出功率是 1 W、1.5 W、2 W, 加工速度是 10 mm/s、15 mm/s、20 mm/s, 加工扫描次数是 2、6、10。实验结果可以采用日本基恩士超景深三维显微镜(VHX-5000)和白光干涉仪来观察试件的形貌特征及表面质量。

5 实验结果和分析

超快激光开始微纳加工微流道时, 激光在 PMMA 表面辐照, 当激光功率和作用时间逐渐增加, 激光的光束光斑作用在 PMMA 上出现材料熔化, PMMA 在光束的光斑中心处慢慢地出现熔化后的液态状, 但是激光光束的光斑辐照范围外的 PMMA 表面形态几乎不变^[11,24]。通过控制三维精密移动平台, 实现超快激光微纳加工微流道, 课题组利用超快激光在 PMMA 内制备的苏州科技大学 USTS 的校名显微形貌如图 2 所示。

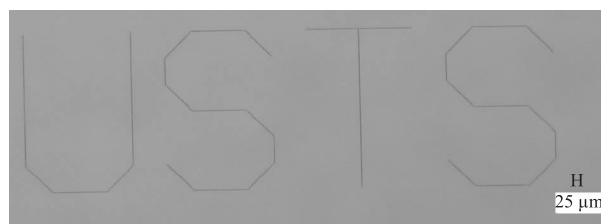
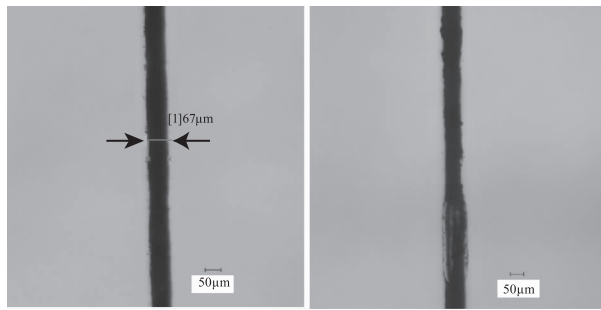


图 2 超快激光制备微流道实验效果图

Fig. 2 Experimental results of micro-channel fabrication by ultrafast laser

5.1 不同的加工参数对微流道表面形貌的影响

超快激光加工系统制备 PMMA 微流道后, 采用超景深三维显微镜来测量在不同加工速度、加工功率和加工次数下制备出的微流道的宽度和横截面形貌图。图 3(a) 是加工速度 10 mm/s、激光功率 2 W、加工次数 10 次, 图 3(b) 是加工速度 20 mm/s、激光功率 2 W、加工次数 10 次。根据图 3 分析得到, 保证加工次数一定, 如果加工速度越大, 制备出的微流道的宽度和粗糙度也就越大。当加工速度越大时, 微流道的宽度较小、且壁面趋势相对平缓, 而当加工速度一定, 超快激光的输出功率在 1.5 W 时, 微流道内壁区域不易出现残渣堆积和气泡隆起现象。主要因为当加工速度一定时, 超快激光的输出功率增加导致其 PMMA 在激光辐照下, 加工区域立即升温、迅速突破 PMMA 的熔点和沸点, 导致 PMMA 的加工区域发生熔化和气化等现象, 加工速度比较低时还会出现喷溅现象^[25]。



(a) 激光扫描速度 10 mm/s (b) 激光扫描速度 20 mm/s

图 3 不同加工速度时超快激光制备微流道的形貌轮廓图

Fig. 3 Morphology of micro-channel fabricated by ultra-fast laser at different processing speeds

采用低速锯和表面抛光机来对制备出的微流道进行后处理,图 4 是超景深三维显微镜测得的微流道横截面的形貌图,能够发现超快激光制备的微流道端面比较规整,通道直径在 157 μm 左右。并且微流道的边缘处出现明显的气泡和黑色残渣堆积物。这是因为超快激光和 PMMA 相互作用时,激光辐照在 PMMA 加工区域,激光的能量被材料吸收,PMMA 内部的化学键发生断裂。但是随着激光功率和加工次数的增加,加工区域的温度迅速升温至熔点,就会导致 PMMA 受热分解出等离子体,进而伴随着温升喷溅出去,但由于对流的存在,导致喷溅出的等离子体冷却凝固而堆积在微流道的两侧。

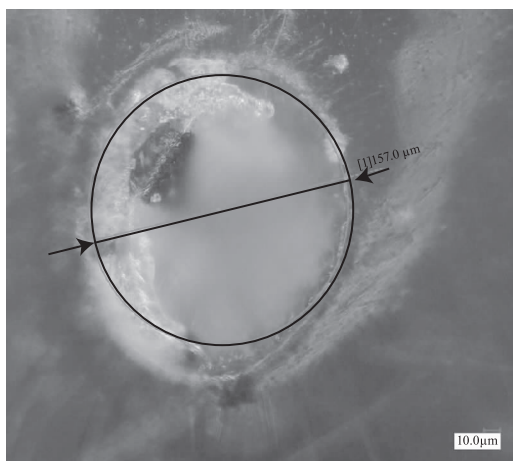


图 4 超快激光制备微流道的横截面形貌图

Fig. 4 Cross-section morphology of micro-channel fabricated by ultrafast laser

5.2 不同的加工参数对微流道尺寸参数的影响

超快激光作用 PMMA 制备微流道后采用超景深三维显微镜(VHX-5000)测量其微流道,图 5 是超快激光在不同加工参数下制备出的微流道其宽度

变化曲线,结果显示:保证加工次数此参数一定,超快激光的输出功率逐渐变大,制备出的微流道的宽度越大;而当加工速度一定时,超快激光的输出功率逐渐变大,制备出的微流道的宽度同样越来越大。保证其他参数不变的前提下,激光的输出功率 2 W 时,其宽度急剧增加;输出功率一定时,加工速度越低,其宽度变化越陡峭。根据文献资料分析其加工速度保证一定时,逐渐增加超快激光的输出功率,激光光束作用 PMMA 后,PMMA 上激光光斑所在范围的温度急剧升高,达到其烧蚀阈值、熔点甚至是沸点,所以使得 PMMA 渐渐出现熔化、气化以及喷溅现象。而激光的输出功率在一定时,由于加工速度的不同,PMMA 在受到激光辐照的同时,会发生粒子的气化和喷溅,粒子在加工过程中会反作用 PMMA,导致其再次吸收了激光的部分能量^[26]。因为加工速度比较低,所以在激光制备微流道时,PMMA 气化后被对流和辐射因素而冷却成残渣,残渣留在制备的微流道的两侧,导致微流道的宽度变大以及通道横截面质量下降。

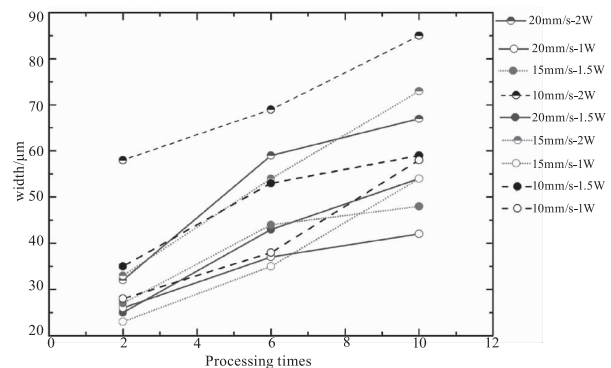


图 5 超快激光在不同加工参数制备的微流道宽度变化图

Fig. 5 Microchannel channel width varies with different processing parameters by ultrafast laser

从图 5 中得到超快激光的输出功率 1 W 时,加工速度在 10 mm/s 以上,制备的微流道的宽度较小,并且宽度趋势比较平稳。由于超快激光的加工速度较慢,而逐渐增大其激光功率会导致 PMMA 受到的辐照温度迅速上升至熔点,激光的单脉冲能量密度远远超过 PMMA 的烧蚀阈值,因此 PMMA 表面会形成许多高温高密的等离子体,导致激光发生自持暴轰波,那么 PMMA 会吸收许多的激光能量^[19]。但是超快激光出现的自持暴轰波强烈程度是和激光本身所输出的能量密度成正比,也说明直接作用到母材的能量却很少。

6 总 结

(1)为了解决传统加工技术存在加工效率低、加工精度差等问题,本文研究了超快激光在不同参数制备 PMMA 微流道,分析了加工速度、激光功率和加工次数对微流道尺寸精度的影响。

(2)随着激光功率以及加工次数的增加,相同的加工速度下其微流道宽度逐渐增加。超快激光的输出功率是 1 W 时,加工速度在 15 mm/s 左右,制备的微流道的宽度较小,并且宽度趋势比较平稳。

(3)设计超快激光加工微流道系统,并且优化超快激光的加工工艺参数,从而制备出尺寸精度高、表面光滑、宽度为 20 ~ 90 μm 左右的微流道芯片,本文的实验研究为超快激光制备 PMMA 微流道领域提出了更精密的加工参数要求。

(4)本文研究发现微流道内部通道质量主要由激光功率、加工速度和加工次数影响,可以优化激光能量密度和加工速度之间关系,提高制备微流道的加工效率。在保证超快激光的输出功率一定时,单脉冲能量密度相对于烧蚀阈值,合理控制其加工速度,从而减少加工次数,达到提高加工效率的目的。

参考文献:

- [1] DONG Shenghua, ZHANU Jing, GE Shengxiang. Microfluidic chips for cell capturing and separation[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2016, 43(11): 1103 - 1111. (in Chinese)
董盛华,张晶,葛胜祥.微流控芯片细胞捕获分离方法概述[J].生物化学与生物物理进展,2016,43(11): 1103 - 1111.
- [2] LIU Wenting, CHEN Hongmei, NIE Fuqiang. Cell migration with microfluidic chips[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(3): 364 - 373. (in Chinese)
刘雯婷,陈红梅,聂富强.基于微流控芯片的细胞迁移[J].科学通报,2016,61(3): 364 - 373.
- [3] Michael Mickic, David Uaudiosi, Kyunbum Kim, et al. Ultrafast fiber laser platform for advanced materials processing[J]. Journal of Laser Micro/Nano Engineering, 2010, 5(1): 54 - 58.
- [4] Wei Di, Cheng Ping, et al. Study on femtosecond laser processing of nonmetal vascular stent[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50: 1 - 5.
- [5] LEI Jianbo, WANG Zhen, WANG Yunshan, et al. Experiment study of laser transmission welding of polymethacrylate[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006. (in Chinese)
雷剑波,王镇,王云山,等.激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究[J].中国激光,2013,40(1): 0103006.
- [6] Mohammed M I, Ahraham E, Desmulliez M P Y, et al. Rapid laser prototyping of valves for microfluidic autonomous systems[J]. J Micromech Microeng, 2013, 23(6): 035034.
- [7] ZHENG Chou. 3D internal hollow microstructures manufacturing technology by femtosecond laser[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
郑崇.飞秒激光内加工三维空腔微结构技术研究[D].北京:北京工业大学,2016.
- [8] Labutin T A, Lednev V N, Ilyin A A, et al. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2016, 31(1): 90 - 118.
- [9] TAN Wensheng, ZHOU Jianzhong, ZHU Weili, et al. Simulation and experiment of laser melting-forming for polymer micro component (PMC)[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0103004. (in Chinese)
谭文胜,周建忠,朱炜立,等.微型塑料件激光融化成型数值模拟和实验[J].中国激光,2015,42(1): 0103004.
- [10] TAN Wensheng, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Experiment of laser melting-forming for PMMA microstructure parts[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703009. (in Chinese)
谭文胜,周建忠,黄舒,等.PMMA微结构件激光融化成型实验[J].中国激光,2014,41(7): 0703009.
- [11] TAN Wensheng, ZHOU Jianzhong, et al. Analysis on melting morphology and tissue features of PMMA laser irradiation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1206002. (in Chinese)
谭文胜,周建忠,等.PMMA激光辐照融化形貌和组织特征分析[J].红外与激光工程,2016,45(12): 1206002.
- [12] Yuan Dajun, Da Suman. Experimental and theoretical analysis of direct-write laser micromachining of polymethyl methacrylate by CO₂ laser ablation[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(9): 024901.
- [13] C K Chung, Y J Syu, H Y Wang, et al. Fabrication of flexible light guide plate using CO₂ laser LIGA-like technology[J]. Microsyst Technol, 2013(19): 439443.

- [14] Wu D, Xu J, Niu L-G, et al. In-channel integration of designable microoptical devices using flat scaffold-supported femtosecond-laser microfabrication for coupling-free optofluidic cell counting[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(1): e228.
- [15] Becker H, Heim U. Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2000, 83(1): 130 - 135.
- [16] Julien Gihnz, Thierry Cnppnnex, Patrice Mele. Microinjection molding of thermoplastic polymers: A review[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(6): 96 - 109.
- [17] C Liu, J M Li, J S, et al. Deformation behavior of solid polymer during hot embossing process[J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 2(87): 200207.
- [18] G Z Zhuang, Z Zhang, J S Guo, et al. A new ball milling method to produce organo-montmorillonite from anionic and nonionic surfactants[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 104(104): 18 - 26.
- [19] LIU Fangxiang, SUN Shufeng, WANG Dexiang, et al. Research on technology with femtosecond laser direct-writing on PMMA microchannels[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 442 - 446. (in Chinese)
刘方祥, 孙树峰, 王德祥, 等. 飞秒激光直写 PMMA 制备微流道的工艺技术研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(3): 442 - 446.
- [20] LI Xiaoyu, CHEN Jimin, LIU Furong, et al. Microchannel fabrication with CO₂ laser ablation of polymethyl methacrylate[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, (4): 59 - 64. (in Chinese)
李晓宇, 陈继民, 刘福荣, 等. CO₂ 激光刻蚀 PMMA 制备微流道的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, (4): 59 - 64.
- [21] DING Wenyu, WANG Bangfu, WANG Zhongwang. Study on thermal relaxation in the process of copper sheet ablation by high frequency femtosecond laser[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(5): 544 - 549. (in Chinese)
丁雯钰, 汪帮富, 王中旺. 高频飞秒激光对铜片烧蚀过程热弛豫现象研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(5): 544 - 549.
- [22] ZHANU Liwei. Research on processing of silica fiber ceramic based on the femtosecond laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
郑立威. 基于飞秒激光的氧化硅纤维陶瓷加工研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [23] SHASHI Prakash, SUBRATA Kumar. Experimental and theoretical analysis of defocused CO₂ laser micro-channeling on PMMA for enhanced surface finish[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(2): 025003.
- [24] MUHAMMAD Imran, ROSLY A R, MUKHTAR Ahmad, et al. Fabrication of microchannels on PMMA using a low power CO₂ laser [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(9): 096101.
- [25] TAN Dekun, LIU Ying. Effects of wall roughness on pressure-driven liquid flow in microchannels[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(9): 1210 - 1214. (in Chinese)
谭德坤, 刘莹. 壁面粗糙度效应对微流体流动特性的影响[J]. *中国机械工程*, 2015, 26(9): 1210 - 1214.
- [26] YE Jiaming, ZHANU Wei, ZHANG Yulong, et al. Fabrication of PMMA microfluidic chip by CO₂ laser direct-writing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(s1): 102 - 105. (in Chinese)
叶嘉明, 张维, 张玉龙, 等. CO₂ 激光直写加工 PMMA 微流控芯片[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(s1): 102 - 105.