

# CO<sub>2</sub> 激光直写 PMMA 微通道工艺改进的实验研究

申雪飞 陈 涛

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 采用 CO<sub>2</sub> 激光直写加工技术在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基片表面直写微通道,分析了 CO<sub>2</sub> 激光扫描速度和加工次数对加工质量的影响。在加工次数相同的情况下,微通道宽度和深度与扫描速度成反比,在一定速度范围内,微通道深度与扫描速度呈近似线性关系;在扫描速度一定的情况下,微通道的深度和宽度随着加工次数的增加逐渐增大,微通道宽度与加工次数呈不规则幂函数关系。分别在表面光滑、表面打毛和表面附着水膜的基片上加工微通道,并对通道的几何尺寸和粗糙度进行了比较分析。在 2 种不同实验条件下加工出水力直径为 80 μm 的微通道,并对微通道的相对粗糙度进行比较,发现通过在基片表面附着水膜的方法可以有效地降低相对粗糙度。这种工艺改进,能够使采用 CO<sub>2</sub> 激光直写法加工 PMMA 基微流控芯片更可行。

**关键词** 激光技术;微通道;CO<sub>2</sub> 激光;直写烧蚀;相对粗糙度

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603030

## Improvement of Processing Technique of CO<sub>2</sub> Laser Direct Writing on PMMA Microchannels

Shen Xuefei Chen Tao

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** CO<sub>2</sub> laser direct-writing ablation micromachining technique is used to fabricate the microchannel on the polymethyl methacrylate (PMMA) substrate. The correlation between the process parameters (the beam translational velocity and the processing number of times) and the micromachining quality (the width and the depth of the microchannel) is investigated. For a given processing times, the depth and width of microchannel both decrease along with the enhancement of beam translational velocity. At fixed beam translational velocity, the depth and width are direct proportion to the processing times, respectively. The microchannel is fabricated on different PMMA substrates with smooth surface, rough surface and surface adhering water. The micromachining quality and the surface roughness of the microchannel are compared. The microchannel with a hydraulic diameter of 80 μm is fabricated under two experimental conditions, and the comparative experiment has been performed on the microchannel with the relative roughness. It is found that the relative roughness is minished effectively when a laser is used to make ablation of the microchannel on the PMMA substrate with surface adhering water. The improved fabrication procedure will be used to increase the availability of CO<sub>2</sub> laser direct-writing ablation technique on the micromachining of the PMMA microfluidic chip.

**Key words** laser technique; microchannel; CO<sub>2</sub> laser; direct-writing ablation; relative roughness

**OCIS codes** 140.3390; 140.3470; 160.5470

## 1 引 言

随着零件小型化、集成化的进程,各种微通道已

被广泛应用在航空航天、生物医疗、自动控制等领域,特别是基于微电子机械系统技术发展起来的微

收稿日期: 2011-03-23; 收到修改稿日期: 2011-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(50875007)和北京市属市管高等学校人才强教计划资助课题。

作者简介: 申雪飞(1982—),男,硕士研究生,主要从事激光微加工工艺和机理等方面的研究。

E-mail: xuefeishen@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 陈 涛(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事激光微技术、生物芯片技术和光学工程等方面的研究。

E-mail: chentao@bjut.edu.cn

流控芯片(LOC)领域,微流控芯片基底材料是多样的,不仅有传统的硅片、玻璃<sup>[1~5]</sup>等材料,还多选用热导率较低和材料特性较宽的高分子聚合材料。其中又以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的选用较为广泛,这是因为PMMA价格低廉,且具有良好的光学性能和兼容性。而制作微流控芯片的主要工作之一则是加工微通道。关于在PMMA材料上加工微通道的方法,目前主要包括光刻、湿法刻蚀、干法刻蚀、模塑法、软刻蚀、热压法、激光刻蚀法和深刻模造技术等<sup>[6~9]</sup>。相较于其他几种方法前期复杂的工作过程,激光刻蚀法因其高柔性、加工速度快和操作简单等优点,而成为一种极适于实验室研究阶段的微加工方法,能够明显降低研发成本,且快速有效。目前,常用于微加工的激光器有准分子激光器、CO<sub>2</sub>激光器等<sup>[10]</sup>。其中用准分子激光加工微通道<sup>[11]</sup>的技术已经相当成熟,但其加工时间较长,成本较高,无法满足快速、小批量的实验使用要求。而与准分子激光器相比,CO<sub>2</sub>激光器价格较低,且加工速度较快,但有加工表面粗糙、重铸区较厚等缺点<sup>[12]</sup>,从而增加了微通道内的层流流动阻力,影响了通道内液体的流动。

本文旨在利用小型CO<sub>2</sub>激光加工设备在PMMA基片上直写烧蚀微通道,并通过2个实验对其加工工艺进行优化研究,达到在加工过程中降低底面粗糙度和减少边沿重铸物的目的,并讨论底面粗糙度对微流控芯片性能的影响。

## 2 实验

### 2.1 仪器设备及实验材料

光学显微镜;三维表面结构测量仪;悍马“奔放”系列F1激光雕刻机(CO<sub>2</sub>,北京海目激光与数控发展有限公司)。配置:CO<sub>2</sub>激光(UL-50-OEM, Universal Laser Systems),激光波长为10.6 μm,连续输出激光功率为50 W,输出光斑直径为(4±1) mm,光束发散角(全角)为(5±1) mrad。最小刻蚀线宽为80 μm,最大直线扫描速度为1000 mm/s。材料选用厚度为2 mm的PMMA。

### 2.2 CO<sub>2</sub>激光加工微通道实验原理

CO<sub>2</sub>激光直写加工微通道时,激光器发射出连续的、波长为10.6 μm的红外光束并聚焦在PMMA基片表面,PMMA基片表面迅速熔化,部分产生气化,并迅速膨胀而产生瞬态的压力波。瞬态的压力波将熔化的物质向外喷溅,从而达到刻蚀通道的目的<sup>[13]</sup>。其原理图如图1所示,其中 $D$ 和 $W$ 分别为

微通道的深度和上端的宽度。

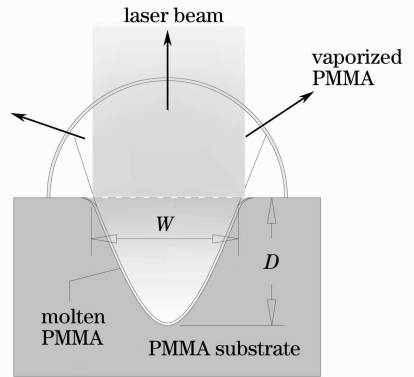


图1 CO<sub>2</sub>激光加工PMMA原理图

Fig. 1 Ablation mechanism of CO<sub>2</sub> laser on PMMA substrate

### 2.3 微通道的加工

实验1——改变激光参数实验:首先将基片放在去离子水中超声清洗5 min后,再经过大量重蒸水冲洗,吹干后,将基片固定在工作台上,同时调整好激光系统的焦点位置,随后通过计算机设定好CO<sub>2</sub>激光系统的扫描路径、输出功率和扫描速度。对激光功率为1、2、3、4.5、6、9 W,激光扫描速度为76.2 mm/s条件下加工的微通道进行分析,发现选择的激光功率过大,会导致烧熔现象明显和通道宽度增加;选择的激光功率过小,则会使加工效率变低,且会因激光能量不均匀而得不到连续且均匀的微通道。因此,选用激光功率为3 W和4.5 W,扫描速度为76.2~203.2 mm/s,加工次数为1~5次。

实验2——改变基片表面状态:用800目(18 μm)04# W10的砂纸在PMMA板表面上均匀打毛,然后把基片放在去离子水中超声清洗5 min,再经过重蒸水冲洗,吹干后,将基片固定在工作台上,调整好焦点位置后进行烧蚀加工,选择激光功率为3 W,扫描速度为101.6 mm/s,加工次数为3次;喷洒一定厚度的低温去离子水在均匀打毛后的PMMA板上,以同样的参数进行加工。

对于相同的工艺参数,分别进行2次加工实验,然后在加工的通道上随机取5个位置进行形貌测量和粗糙度测量,并以平均数作为最终评价数值。

## 3 实验结果与分析

在用CO<sub>2</sub>激光直写加工PMMA微通道时,微通道加工质量与激光扫描速度、激光功率以及加工次数有着密切的关系。由于实验选择了固定的激光功率,图2,3分别给出了在激光功率为3 W,激光光

束移动速度为 76.2~203.2 mm/s 时,刻蚀得到的微通道宽度和深度与激光扫描速度及加工次数之间的关系。

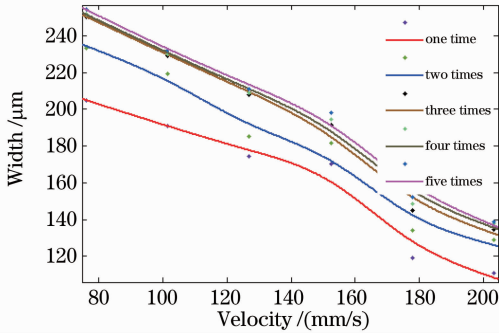


图 2 微通道宽度与激光扫描速度及加工次数之间的关系

Fig. 2 Variation of width of the microchannel on beam translational velocity and processing times

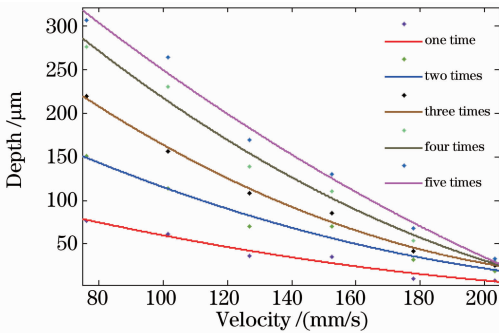


图 3 微通道深度与激光扫描速度及加工次数之间的关系

Fig. 3 Variation of depth of the microchannel on beam translational velocity and processing times

由图 2 可知,在加工次数相同的情况下,微通道宽度随着扫描速度的增大而逐渐减小,在速度为 120~160 mm/s 时,有一个微弱的凸起趋势,表示在此速度范围内,微通道宽度的减小趋势变缓;在扫描速度一定的情况下,微通道的宽度随着加工次数的增加而增加,但增加量急剧减小,在重复加工 5 次以后,宽度的增加变得非常微弱,由此可见,微通道宽度与加工次数呈不规则幂函数关系。

由图 3 可知,在加工次数相同的情况下,微通道深度随扫描速度的增加而逐渐减小,在一定的速度范围内,微通道深度与扫描速度呈近似线性关系;在扫描速度一定的情况下,微通道深度随着加工次数的增加而增加,但是由于焦点位置逐渐偏离作用面,所以深度增加的程度最终是逐渐减小的,与文献 [14,15] 的理论分析和实验结果基本一致。不管通道的宽度和深度如何变化,CO<sub>2</sub> 激光束烧蚀加工的

通道轮廓总是服从高斯分布(这是由实验件材料的热扩散率和激光束的强度分布决定的),且在通道两侧有重铸物(见图 4)。

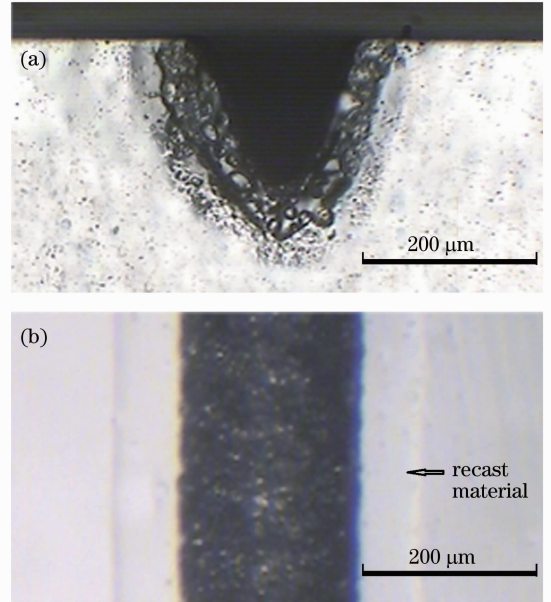


图 4 微通道横截面(a)与底面(b)形貌

Fig. 4 (a) Cross-section and (b) bottom surface of microchannel

实验 2 中,打毛基片表面主要有 2 个目的,首先是作为参照,观察它对微通道加工质量的影响;其次是为了使基片表面能够均匀附着水层。实验通过改变基片的表面状态来影响粗糙度和微通道的尺寸,实验件尺寸和底部粗糙度用三维表面结构测量仪测量,数据如表 1 所示。

表 1 微通道几何尺寸及绝对粗糙度

Table 1 Geometry and absolute roughness of microchannel

Substrate surface	W / $\mu\text{m}$	D / $\mu\text{m}$	Roughness / $\mu\text{m}$	Height of recasting / $\mu\text{m}$
Smooth	190.78	170.87	2.87	2.00
Rough	191.12	171.23	2.78	2.20
Adhering water	176.34	160.71	1.70	1.10

从表 1 可以看到表面打毛的基片和表面光滑的基片相比,几何尺寸有微弱的增加,底部粗糙度没有太大的变化;表面附着水层的基片和表面光滑的基片相比,通道宽度和通道深度均减小,同时底部粗糙度减小了 40%,通道形貌更加平整(见图 5),且在加工完成后,水层表面出现少量白色漂浮物,可能是水膜浮力使一些物质及时地漂浮出来,使之不在微通道的内壁或两侧冷凝、堆积。

由于微通道内的流动特性和常规尺寸通道的流

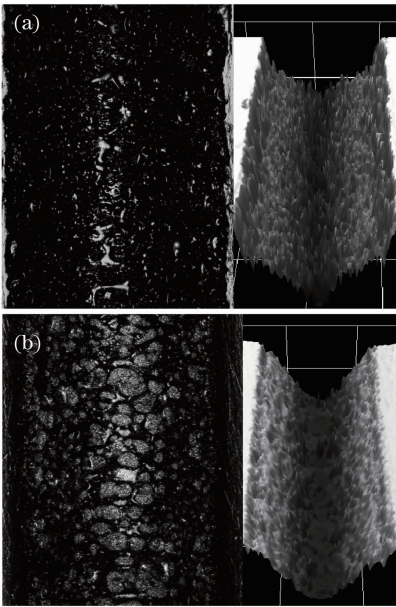


图 5 表面光滑基片加工出的微通道(a)和表面附着水层基片加工出的微通道(b)

Fig. 5 Microchannel fabricated on PMMA substrates with (a) smooth surface and (b) surface adhering water layer. 众多文献研究表明,壁面粗糙度对微通道内的层流区流动会产生重要影响。水

在层流区的摩擦阻力系数比传统的理论值要高,而摩擦阻力系数随着相对粗糙度( $e/D_h$ )增大而增大。 $e$ 为绝对粗糙度, $D_h$ 为水力直径<sup>[16]</sup>。所以在水力直径一定的情况下,降低通道壁面的绝对粗糙度,能够有效地减少相对粗糙度,进而减小摩擦阻力系数。假设现实需用制作水力直径  $D_h = 80 \mu\text{m}$  的微通道,根据水力直径的计算公式( $D_h = 4A/L$ 。其中  $A$  为微通道横截面的面积, $L$  为横截面的湿周)和高斯型近似湿周公式

$$L = W + 2 \int_0^{W/2} \sqrt{1 + 4 \left[ x + \left( \frac{D}{W} - \frac{W}{4} \right) \right]^2} dx \quad (1)$$

及高斯型近似截面积公式

$$A = 2WD - 2 \int_0^{W/2} \left[ x^2 + 2 \left( \frac{D}{W} - \frac{W}{4} \right) x \right] dx \quad (2)$$

可知,当通道宽度和深度为  $170 \mu\text{m}$  和  $160 \mu\text{m}$  时水力直径为  $80 \mu\text{m}$ 。因此,参照实验测得的数据,可选用 2 种实验条件来实现:第一种,激光功率为  $4.5 \text{ W}$ ,扫描速度为  $76.2 \text{ mm/s}$ ,加工 1 次;第二种,激光功率为  $3 \text{ W}$ ,扫描速度为  $101.6 \text{ mm/s}$ ,加工次数为 3 次且基片表面附着水层。2 种实验条件下,实验件尺寸和底部粗糙度如表 2 所示。

表 2 微通道几何尺寸及相对粗糙度

Table 2 Geometry and relative roughness of microchannel

Conditions	$W / \mu\text{m}$	$D / \mu\text{m}$	Roughness $/ \mu\text{m}$	Relative roughness $e/D_h / \%$	Height of recasting $/ \mu\text{m}$
First	175.31	158.91	2.83	3.4	1.58
Second	176.34	160.71	1.70	2.1	1.10

Pfund 等<sup>[17]</sup>研究发现相对粗糙度较大( $e/D_h > 3\%$ )的微通道在层流区的摩擦阻力系数要明显高于相对粗糙度较小( $e/D_h < 3\%$ )的微通道。所以选用第二种实验条件加工微通道,可以有效地减少微通道的摩擦阻力系数。

## 4 结 论

系统地分析了  $\text{CO}_2$  激光的扫描速度和加工次数对微通道加工尺寸的影响:在加工次数相同的情况下,微通道的深度和宽度均与激光扫描速度成反比;而在激光扫描速度一定的情况下,在一定范围内,通道宽度和深度均随着加工次数增加而增大。其中宽度与加工次数呈不规则幂函数关系,而深度与加工次数呈近似线性关系,但超过一定范围后将会趋于不变。对  $\text{CO}_2$  激光器加工机理进行了分析,并对 2 种实验条件下加工出的微通道的几何尺寸和相对粗糙度进行了对比研究,研究表明在基片表面附着水层和选择适当的加工参数,可以得到符合尺

寸要求的较光滑微通道,且能够直接应用于微流控芯片。因此,使用  $\text{CO}_2$  激光进行微通道的加工,快速简单,成本低廉,在减小了通道表面的粗糙度之后,这种微通道加工方法将更适合微流控芯片的制作。

## 参 考 文 献

- Xing Chen, Dafu Cui, Changchun Liu *et al.*. Microfabrication and characterization of porous channels for DNA purification[J]. *J. Micromech. Microengng*, 2007, **17**(1): 68~75
- P. J. Obeid, T. K. Christopoulos, H. J. Crabtree *et al.*. Microfabricated device for DNA and RNA amplification by continuous-flow polymerase chain reaction and reverse transcription-polymerase chain reaction with cycle number selection[J]. *Anal. Chem.*, 2003, **75**(2): 288~295
- I. Schneegaß, R. Bräutigam, J. M. Köhler. Miniaturized flow-through PCR with different template types in a silicon chip thermocycler[J]. *Lab. Chip.*, 2001, **1**(1): 42~49
- S. F. Li, D. Y. Fozdar, M. F. Ali *et al.*. A continuous-flow polymerase chain reaction microchip with regional velocity control [J]. *J. Microelectromech. Syst.*, 2006, **15**(1): 223~236
- J. Felbel, A. Reichert, M. Kielpinski *et al.*. Reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR) in flow-



- through micro-reactors; thermal and fluidic concepts[J]. *Chem. Engng. J.*, 2008, **135**(s1): 298~302
- 6 A. Gerlach, G. Knebel, A. E. Guber *et al.*. Microfabrication of single-use plastic microfluidic devices for high-throughput screening and DNA analysis[J]. *Microsyst. Technol.*, 2002, **7**(5-6): 265~268
- 7 M. Hashimoto, P. C. Chen, M. W. Mitchell *et al.*. Rapid PCR in a continuous flow device [J]. *Lab. Chip.*, 2004, **4**(6): 638~645
- 8 O. Rötting, W. Ropke, H. Becker *et al.*. Polymer microfabrication technologies [J]. *Microsyst. Technol.*, 2002, **8**(1): 32~36
- 9 A. Costela, I. Garciamoreno, F. Florido *et al.*. Laser ablation of polymeric materials at 157 nm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(6): 2343~2350
- 10 W. Menz, J. Mohr, O. Paul. *Micro Systems Technology*[M]. Wang Chunhai, Yu Jie. Transl.. Beijing: Chemical Industry Publisher, 2003  
门斯, 莫尔, 保罗. 微系统技术[M]. 王春海, 于杰译. 北京: 化学工业出版社, 2003
- 11 Qi Heng, Yao Liying, Wang Tong *et al.*. Excimer laser micromachining of PMMA based on PCR microfluidic biologic chip[J]. *Microfabrication Technology*, 2006, (1): 16~19  
祁恒, 姚李英, 王桐等. PMMA基PCR微流控生物芯片准分子激光加工[J]. *微细加工技术*, 2006, (1): 16~19
- 12 Qi Heng, Wang Xiansong, Chen Tao *et al.*. Fabrication and application of PMMA continuous-flow PCR microfluidic chip with CO<sub>2</sub> laser direct-writing ablation micromachining technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1239~1245  
祁恒, 王贤松, 陈涛等. PMMA基连续流式PCR微流控芯片的CO<sub>2</sub>激光直写加工与应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1239~1245
- 13 Wang Qingyue, Zhang Guoxiong, Ni Xiaochang *et al.*. Micro and nano processing technology of femtosecond laser [C]. Chinese Annual Meeting of Mechanical Engineering Society, 2003  
王清月, 张国雄, 倪晓昌等. 飞秒激光微纳加工技术[C]. 中国机械工程学会年会, 2003
- 14 Fu Jianzhong, Xiang Hengfu, Chen Zichen. Modeling research of CO<sub>2</sub> laser direct writing polymer microfluidic chip [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2004, **25**(s1): 54~56  
傅建中, 相恒富, 陈子辰. CO<sub>2</sub>激光直写加工聚合物微流体芯片的建模研究 [J]. *高等学校化学学报*, 2004, **25**(s1): 54~56
- 15 D. J. Yuan, S. Das. Experimental and theoretical analysis of direct-write laser micromachining of polymethyl methacrylate by CO<sub>2</sub> laser ablation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(2): 024904
- 16 S. G. Kandlikar, S. Joshi, S. Tian. Effect of channel roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes [C]. Proc. of 35th National Heat Transfer Conference, 2001. 1609~1618
- 17 D. Pfund, D. Retor, A. Shekarriz *et al.*. Pressure drop measurements in a microchannel [J]. *AIChE J.*, 2000, **46**(8): 1496~1507