

文章编号 1004-924X(2016)增-0224-05

CO₂激光在 PET 基板加工微通道的工艺优化

陈雪叶*, 沈杰男, 胡增亮, 陈 静

(辽宁工业大学 机械工程和自动化学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要: 为了提高微通道表面的加工质量, 研究了 CO₂ 激光在聚乙烯对苯二甲酸酯(PET) 基板上加工微通道的工艺。通过正交试验法研究了激光功率、加工速度、通道长度和加工次数对微通道宽度的影响, 并且进行了工艺参数优化。然后, 通过金相显微镜和粗糙度测量仪对加工结果进行了实验分析。结果表明, 正文试验获得的最佳加工参数如下: 激光功率为 10 W, 扫描速度为 6 mm/s, 通道长度为 80 mm, 加工次数为 3 次。在此加工参数下对通道表面的粗糙度(Ra) 的算数平均值可以达到 170 nm。由此证明使用 CO₂ 激光在 PET 基板上加工微米级通道的方法是完全可行的。

关键词: CO₂ 激光; 聚乙烯对苯二甲酸酯; 正交试验; 算术平均粗糙度

中图分类号: O345 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0224

Optimization of processing micro-channels with CO₂-laser on polyethylene terephthalate(PET) sheet

CHEN Xue-ye*, SHEN Jie-nan, HU Zeng-liang, CHEN Jing

(Faculty of Mechanical Engineering and Automation,
Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

* Corresponding author, E-mail: xuye-chen@126.com

Abstract: In order to improve the processing quality of micro-channels, the fabrication technology of micro-channels on polyethylene terephthalate(PET) substrate using CO₂ laser was researched. The effects of the processing parameters, including laser power, processing speed, channel length and processing times, on the width of micro-channel were analyzed and optimized through orthogonal tests. Furthermore, the processing results under the optimal parameters were tested by using metallographic microscope and roughness tester. The results show that the arithmetic average value of roughness (R_a) on the surface of channel can reach 170 nm, when the laser power is 10 W, scanning speed is 6 mm/s; channel length is 80 mm and processing times is 3. Therefore, the method of processing micron-size channel on PET substrate by using CO₂ laser is completely feasible.

Key words: CO₂ laser; polyethylene terephthalate; orthogonal test; arithmetic average roughness

收稿日期: 2016-05-27; 修订日期: 2016-06-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51405214); 辽宁省博士启动基金资助项目(No. 20141131); 辽宁省教育厅基金资助项目(No. L2014241); 辽宁工业大学校基金资助项目(No. X201301)

1 引言

聚合物微流控芯片具有良好机械和化学性能、更好的生物相容性和更高的灵活性,且成本低、易于制造,所以受到了越来越多的关注^[1-3]。许多学者和研究机构对微技术和商业产品的发展做出了很大的贡献^[4]。Girault 等人^[5]提出了使用紫外激光烧蚀法在 PET 基板芯片上制造小型化液体处理系统的方法。Liu A L 等人^[6]介绍了一种在玻璃基板上覆盖 PET 薄膜,然后进行激光消融来制作微流控芯片的方法,降低了制造时间和成本。Dadsetan M 等人^[7]报道了一种采用 CO₂脉冲激光在 PET 基板接枝共聚方法来改善亲水性。Yolanda H 等人^[8]报道了一种针对聚乙烯对苯二甲酸酯微流控芯片表面改性技术的改进方法。Hillman J 等人^[9]探索了在 PET 芯片中制造多波混合动力的柔性电子电路的方法。此外,将各种类型的 CO₂激光用于加工生产中是比较普遍的方法。本文使用 CO₂激光制造了高质量的微米尺寸通道。芯片的材料是 PET,通过正交试验法研究了激光功率、激光扫描速度、通道长度和加工次数对通道宽度精度的影响。实验结果证明,PET 片材可通过 CO₂激光进行简单快速的制造。

2 材料与方 法

2.1 材料

PET 是最常见的热塑性聚合物,经常使用在纤维服装中,也被制作成液体和食物的容器。图 1 为 PET 的化学结构,其化学式为(C₁₀H₈O₄)_n。该 PET 片材来自信达塑胶材料公司,其原材料是从台湾进口的。该材料相关实验表明该材料的连续使用温度为 50 ℃ 以下,玻璃转化点温度为 69 ℃。当温度达到 240 ℃ 以上时,PET 板变成了黏性流体。PET 的杨氏模量、拉伸强度、吸水率分别为 2 900 MPa、65 MPa、0.16%;透光率约为 90%,便于进行 CO₂激光处理。

2.2 CO₂激光系统和通道的生产工艺

本研究中使用的 CO₂激光器型号为 LCJG-

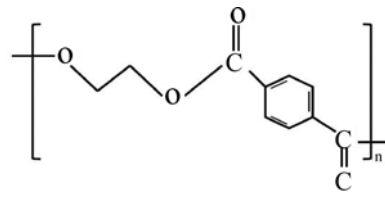


图 1 PET 的化学结构

Fig. 1 Chemical structure of PET

1290,来自于江苏南京 Latron 激光技术有限公司。它由一个数控平台和 CO₂激光器组成。该数控平台的特点是将编程系统和 CAD 技术相结合,可以通过绘图软件进行通道网络设计,然后直接导入配套的软件中即可以实现加工,效率极高。图 2 为 CO₂激光在 PET 基板上加工微通道的实际图。由于 PET 板材的厚度为 1 mm,经过初步实验得出其功率应该在 3~15 W 之间,加工速度应该在 3~9 mm/s。激光器的控制面板包括电源控制键、扫描速度按钮,总电源指示灯、紧急停止按钮及伺服电源按钮。操作面板非常清晰,而且很容易操作。

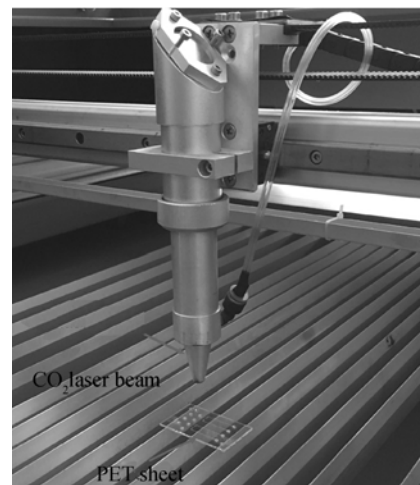


图 2 CO₂激光加工 PET 基板示意图

Fig. 2 Laser fabricating process of microchannel on PET sheet

2.3 评价参数

在激光加工的过程中,加工参数的变化会影响微通道的宽度。为了研究激光各参数和微通道宽度之间的相互关系,在各信道的不同位置进行宽度测量。每个通道的宽度精度的评价指标可表示为:

$$WP = \frac{E_{\max}}{W_{\max}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中:WP 表示加工的稳定性, E_{max} 是在同一因素下通道宽度的最大差值, W_{max} 是相应的最大宽度。

3 结果与讨论

3.1 CO₂激光参数对微通道的影响

本文使用正交试验的方法^[10]来研究激光功率、激光扫描速度、通道长度和加工次数的稳定性。在正交试验中,激光功率、激光扫描速度、通道长度和加工次数被选为通道宽度的因素。表 1 中列出了正交的水平 and 因素。如表 2 所示,激光功率为 7.5 W,激光扫描速度为 5 mm/s 时,通道长度为 60 mm,加工次数为 3 对加工稳定性的影响最大。

表 1 正交实验水平及其因素

Tab. 1 Levels and factors in orthogonal experiments

| 水平 | 因素 s | | | |
|----|--------------|---------------------------------|---------------|--------|
| | A | B | C | D |
| | (激光功率) /W | (扫描速度) /mm · s ⁻¹ | (通道长度) /mm | (加工次数) |
| 1 | 5 | 5 | 40 | 1 |
| 2 | 7.5 | 6 | 60 | 2 |
| 3 | 10 | 7 | 80 | 3 |

表 2 正交实验的结果

Tab. 2 Results of orthogonal experiment

| 试验编号 | A | B | C | D | 宽度精度 WP/% |
|-------|------|------|------|------|-----------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 40.7 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 19.7 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 32.6 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 43.9 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 21.0 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 30.3 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 23.8 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 18.3 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 23.8 |
| T_1 | 31.0 | 36.1 | 29.8 | 28.5 | |
| T_2 | 31.7 | 19.7 | 29.1 | 24.6 | |
| T_3 | 22.0 | 28.9 | 25.8 | 31.5 | |
| R | 9.7 | 16.4 | 4.0 | 6.9 | |

T_1, T_2 和 T_3 分别表示因素在水平 1, 2, 3 的平均值。例如,在 5 W 激光功率下:

$$T_1 = (40.7 + 19.7 + 32.6) / 3 = 31.0. \quad (2)$$

R 为因素的灵敏度,即有:

$$R = T_{max} - T_{min}. \quad (3)$$

由 CAXA2013 绘制的正交试验示意图如图 3 所示。为了保证实验结果的准确性,每一组参数被加工 3 次,一共 9 组线条。数控机床被用来截断微通道。从 9 组实验中选出 3, 5, 7 组进行测量。例如 3 组在激光功率为 5 W、扫描速度为 7 mm/s、通道长度为 80 mm 加工 3 次的激光参数下加工,然后使用金相显微镜对截面宽度进行测量,结果如图 4(a)所示。图 4(b)和 4(c)显示了 5 组和 7 组的相应位置截面图。清晰可见,在同一渠道中不同位置的宽度是不同的。

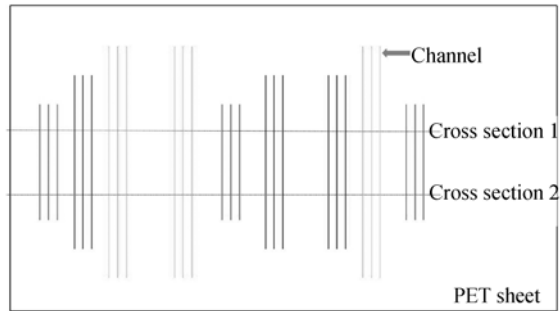


图 3 正交试验示意图

Fig. 3 Schematic of orthogonal experiment

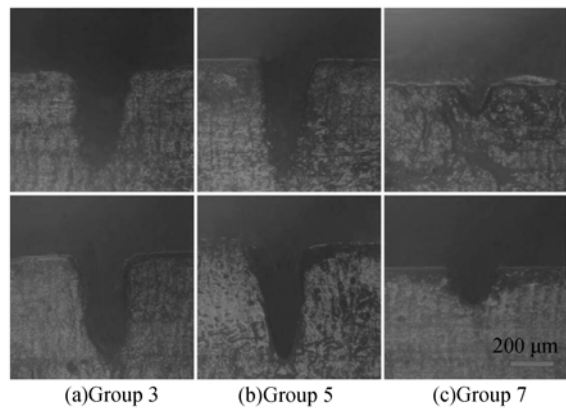


图 4 不同位置的两个通道截面图

Fig. 4 Cross sections of two channels in different positions

根据在表 2 中列出的数据,得到 4 个因素的平均因素值,如图 5 所示,实验中某因素最大值和最小值的差越大,该因素对机器稳定性的影响越大,所以激光扫描速度对稳定性的影响最大。各因素的灵敏度排列顺序为:扫描速度 > 激光功率

>加工次数>通道长度,其最优模型模式是 A₃B₂C₃D₃,即激光功率为 10 W,扫描速度为 6 mm/s,通道长度为 80 mm 和加工 3 次。此时激光可稳定切割信道。

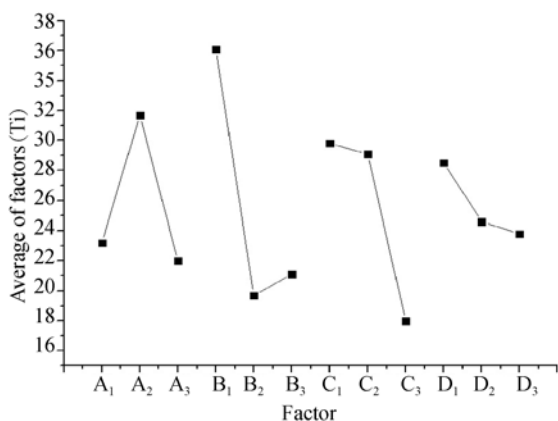


图 5 4 个因素下的平均因素值

Fig. 5 Average of factors(Ti) under four factors

3.2 最佳加工参数下的通道研究

通过上述分析,在激光功率为 10 W,扫描速度为 6 mm/s,通道长度为 80 mm 和加工 3 次的条件下,激光能够加工出最准确的通道。由于通道长度对宽度精度的影响最小,从实际加工制造来看,通道长度是不能随意变化的。图 6(a)是忽略了通道长度的芯片实物图。图 6(b)是由金相显微镜在 100 倍放大倍率下拍摄的通道壁。从图中可以很明显发现最优参数下加工的通道壁的表面是平滑和规整的。图 6(c)是精密表面粗糙度测量仪测量得到的通道表面粗糙度曲线,由图可知 R_a=170 nm。

参考文献:

[1] BECKER H, LOCASCIO L E. Polymer microfluidic devices[J]. *Talanta*, 2002, 56(2): 267-287.
 [2] BECKER H, GÄRTNER C. Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications [J]. *Electrophoresis*, 2000, 21(1): 12-26.
 [3] SOPER S A, FORD S M, QI S, et al.. Peer reviewed: polymeric microelectromechanical systems [J]. *Analytical Chemistry*, 2000, 72(19): 642 A-651.
 [4] HOFFMANN M A, KOPKA P, VOGES E. Bistable micromechanical fiber-optic switches on silicon

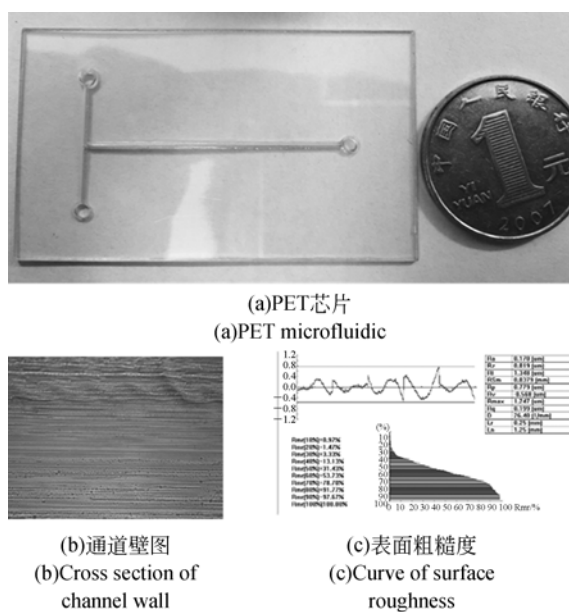


图 6 最佳通道

Fig. 6 Optimal channel on PET

4 结 论

本文在 CO₂激光在 PET 基板上加工微通道时采用正交试验方法研究了影响宽度精度的加工参数,得到激光扫描速度的影响最大,通道长度的影响最小。最优参数如下:激光功率为 10 W,扫描速度 6 mm/s,通道长度为 80 mm 和加工 3 次。本文研究为在此最优的参数下制作了一个简单的 T 型 PET 芯片,并对其通道壁进行了粗糙度测量,其算数平均值粗糙度 R_a=170 nm。CO₂激光加工 PET 通道的工艺参数优化提供了参考。

with thermal actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, 78(1): 28-35.

[5] ROBERTS M A, ROSSIER J S, BERCIER P, et al.. UV laser machined polymer substrates for the development of microdiagnostic systems[J]. *Analytical Chemistry*, 1997, 69(11): 2035-2042.
 [6] LIU A L, HE F Y, HU Y L, et al.. Plastified poly(ethylene terephthalate)(PET)-toner microfluidic chip by direct-printing integrated with electrochemical detection for pharmaceutical analysis[J]. *Talanta*, 2006, 68(4): 1303-1308.
 [7] DADSETAN M, MIRZADEH H, SHARIFI-SANJANI N. Surface modification of polyethylene

terephthalate film by CO₂ laser-induced graft copolymerization of acrylamide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, 76(3): 401-407.

- [8] TENNICO Y H, KOESDJOJO M T, KONDO S, *et al.*. Surface modification-assisted bonding of polymer-based microfluidic devices[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 143(2): 799-804.
- [9] HILLMAN J, SUKHMANN Y, MILLER D, *et al.*. Multi wave hybrid laser processing of micrometer scale features for flexible electronics applications[J]. *SPIE*, 2016, 9736:97360E.
- [10] TAGUCHI G, YOKOYAMA Y. *Taguchi Methods: Design of Experiments*[M]. Amer Supplier Inst, 1993.

作者简介:



陈雪叶(1982—),男,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,主要从事微流控技术方面的研究。E-mail: xueye-chen@126.com



沈杰男(1991—),男,辽宁铁岭人,硕士研究生,2014年于辽宁工业大学获得学士学位,主要研究方向为微流控技术。E-mail: shenjienan2015@163.com