

CO₂激光加工微孔膜关键加工参数

张铎¹, 卢立新^{1,2}, 周丹¹

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 解决 CO₂ 激光加工微孔膜实际生产中难以快速、精确地确定不同孔径微孔加工参数的问题, 指导微孔膜包装材料的工程应用。 **方法** 在激光功率为 6~30 W、打孔时间为 0.4~4 ms 的条件下, 加工厚度为 0.04, 0.06, 0.07 mm 的 PP 包装薄膜和厚度为 0.035, 0.05, 0.07 mm 的 PE 包装薄膜, 测量微孔孔径、孔长, 分析处理试验数据。 **结果** 在厚度为 0.035~0.07 mm 的 PP/PE 薄膜上加工出了直径为 50~400 μm 微孔, 在厚度为 0.06 mm 的 PP 薄膜上加工出了直径为 53~257 μm、孔长为 100~161 μm 的微孔。 **结论** 激光加工微孔膜, 孔径随激光功率、打孔时间的增加而增大, 调节激光功率和打孔时间均可获得不同孔径微孔; 加工 PE 薄膜所需的激光能量显著大于 PP 薄膜; 薄膜厚度越大, 打孔所需的激光能量越高; 微孔孔长相对于薄膜厚度有所增加, 且微孔孔径越大, 孔长增量越大。

关键词: 微孔膜; 激光打孔; 气调包装; 微孔测量; 孔长特性

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0125-05

The Key Parameters for Processing Microporous Film by CO₂ Laser

ZHANG Duo¹, LU Li-xin^{1,2}, ZHOU Dan¹

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the parameters for processing the micro-pores of different sizes cannot be quickly and accurately determined in the actual production of processing microporous films by CO₂ laser and to guide the application of microporous film packaging materials in the engineering. When the laser was 6~30 W and the drilling time was 0.4~4 ms, PP packaging films that were 0.04, 0.06 and 0.07 mm thick and PE packaging films that were 0.035, 0.05 and 0.07 mm thick were processed. The diameter and length of the micro-pores were measured and the test data were analyzed. The micro-pores with diameter of 50~400 μm on the PP/PE films whose thicknesses were 0.035~0.07 mm and the micro-pores with diameter of 53~257 μm and pore length of 100~161 μm on the PP films that were 0.06 mm thick were processed. As for the microporous films processed by laser, the pore diameter is increased with the increase in the drilling time. Micro-pores of different diameters can be obtained by adjusting laser power and drilling time. The laser energy required to process PE films is significantly greater than that required by PP films. The thicker the film, the higher the laser energy required by drilling. The length of micro-pore is increased relative to the film thickness. Moreover, the larger the micro-pore diameter is, the longer the pore is.

KEY WORDS: microporous film; laser drilling; MAP; microporous measurement; feature of pore length

微孔膜气调包装是目前行之有效的果蔬保鲜包装技术之一, 利用包装膜上的微孔增加包装透气性, 从而延长高呼吸速率果蔬产品的保存期^[1]。目前微孔膜的加工方法有机械穿孔、电火花打孔和激光打孔等^[2]。激光加工微孔膜具有无接触力作用于材料、加工效率高、易于实现自动化等优点, 是目前优选的微孔膜加

工方式。激光加工包装薄膜目前已有广泛应用, 如激光切割、激光打孔、激光热封等^[3-4]。包装薄膜加工技术的精度、速度和质量因激光的使用有了很大的提升。如使用 50 W 的 CO₂ 激光可热封合尼龙-EVOH 和聚丙烯、PET, 不仅使封合过程无接触力作用于材料, 而且热封速度和强度相对于传统热压封合有了很大

收稿日期: 2016-03-17

作者简介: 张铎 (1989—), 男, 江南大学硕士生, 主攻包装系统与装备。

通讯作者: 卢立新 (1966—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为食品包装技术与安全、包装系统与装备等。

提高^[5-6];使用功率为 5 W、波长为 1064 nm 和 515 nm 的激光可快速切割 PP、PE、铝、纸单层及其复合的薄膜^[7];能量为 150 mJ 的 YAG 激光脉冲在 PP、PET、PE 薄膜上可加工出直径为 50 μm 左右的微孔,有效增加了薄膜的透气性^[2];振镜控制的激光束在包装材料上能够快速标刻出图案、文字等信息,相比于传统印刷有图案精细、不易擦除等优势^[8]。

激光打孔是激光重要的应用领域,激光可在金属、陶瓷、半导体、纸张、皮革、高分子甚至细胞膜上打孔^[9-11]。一般将激光功率密度、打孔时间、离焦量等作为可控的工艺参数来研究如何获得较好的打孔效果^[9]。针对薄型材料的激光打孔试验证明,激光脉冲频率对打孔几乎无影响,而激光能量、离焦量对打孔影响较大^[12-13]。截止目前,针对激光加工微孔膜的研究甚少,尤其缺乏 CO_2 脉冲激光加工微孔膜的研究,且对孔的评价只局限于孔径大小,未考虑对微孔透气性影响较大的微孔孔长特征,限制了 CO_2 激光加工微孔膜的发展,也限制了微孔膜的应用效果。为进一步探索 CO_2 激光加工微孔膜加工工艺,文中基于试验研究,采用不同加工参数,打孔加工 PP、PE 薄膜,测定微孔特征参数,分析激光功率、打孔时间对微孔孔径的影响,研究显著影响微孔透气性的微孔孔长特征,以期对激光加工微孔膜提供指导。

1 激光打孔试验

1.1 材料

因激光加工包装薄膜材料的机理较为复杂,薄膜种类、厚度、均匀性等都会影响薄膜对激光的反应^[3]。PP/PE 薄膜常用于气调包装,也常作为复合膜的基材使用,故选取目前市场上最为常用的、厚度为 0.04, 0.06, 0.07 mm 的 PP 薄膜和厚度为 0.035, 0.05, 0.07 mm 的 PE 薄膜(江苏申凯包装高新技术股份有限公司),研究二氧化碳激光打孔工艺。

1.2 主要仪器设备

仪器选用 CO_2 激光打标机(型号: Flying30C, 华工激光有限公司),显微镜(型号: BMM-55E, 上海比目仪器有限公司)。打标机和材料加工位置见图 1。

打标机激光器输出激光波长为 10.55~10.63 μm , 功率为 30 W, 功率稳定性 $\pm 5\%$, M^2 (激光光束质量

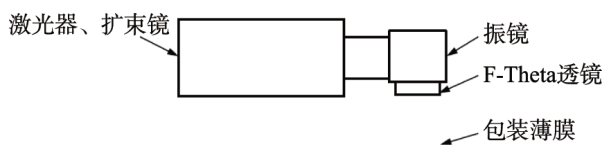


图 1 加工设备与材料位置

Fig.1 Schematic diagram of processing equipment and materials

因子) <1.2 ,束腰直径为 (1.8 ± 0.2) mm,全角发散角为 (7.5 ± 0.5) mrad,频率为 0~25 kHz,占空比为 0~100%DC,扩束镜扩束倍数为 5, F-Theta 透镜焦距为 160 mm。

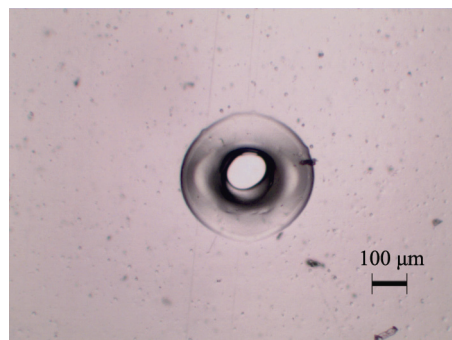
1.3 试验设计

激光加工参数主要有激光功率、打孔时间、离焦量、激光脉冲频率等,其中,激光功率和打孔时间决定了作用于包装材料的激光能量大小,决定了材料的物理变化,是最重要的 2 个加工参数^[14],故文中针对 CO_2 激光功率和打孔时间研究加工参数对包装薄膜打孔影响。试验设置薄膜离焦量为 0,激光频率为 25 kHz,使用不同激光功率、打孔时间对不同薄膜进行激光复制法打孔试验。试验使用激光功率为 6~30 W,步距为 0.6 W,打孔时间为 0.5~2 ms,步距为 0.1 ms,打孔厚度为 0.04, 0.06, 0.07 mm 的 PP 薄膜;使用激光功率为 6~30 W,步距为 0.6 W,打孔时间 1.3~4 ms,步距为 0.1 ms,打孔厚度为 0.035, 0.05, 0.07 mm 的 PE 薄膜。

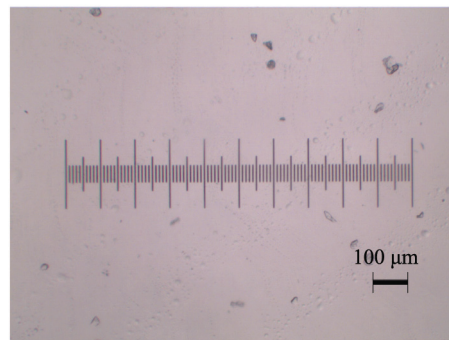
1.4 测量方法

1.4.1 微孔孔径测量方法

由于微孔尺寸小,试验利用显微镜观察微孔并拍摄微孔数字图像,在计算机中处理图像得到微孔尺寸信息,具体做法为,使用显微镜拍摄微孔数字图像,并在相同的放大倍数下拍摄相同分辨率的测微尺图像,微孔图像和测微尺图像见图 2,2 张图像中每个



a 微孔图像



b 测微尺图像

图 2 微孔直径的测量

Fig.2 Measurement of micro-hole diameter

像素对应的实际尺寸是相同的。在图像处理软件中选取测微尺图像中一片正方形区域,读取其包含的像素数量和其边长对应的测微尺长度,即可经计算得到图像中每个像素代表的实际面积。在图像处理软件中选取微孔数字图像中孔的部分,读取其像素数量,利用上述实际面积与像素面积对应的比例关系,可得微孔部分的实际面积,将微孔实际面积带入圆面积公式,将得到的微孔当量直径作为评价微孔大小的参数。

1.4.2 微孔孔长测量方法

试验使用孔的截面,观察孔长度方向上的形貌特征,从而评价孔长。具体做法是,首先加工一块布,其上面有直线排列微孔的薄膜试样,微孔的加工参数相同,用刀片沿着与孔排列方向呈小角度的切痕压断试样,由此获得若干微孔截面(见图 3),利用显微镜拍摄这些截面的图像,选出孔中间截面的图像(见图 4),利用相同放大倍率下拍摄的测微尺图像测量该截面的尺寸,得到孔长度方向上的尺寸信息。

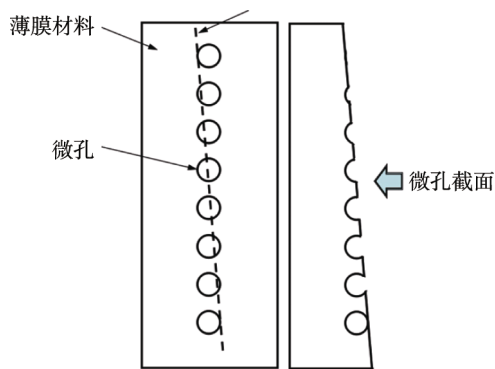


图 3 微孔截面获得方法

Fig.3 Method of obtaining micro-hole section

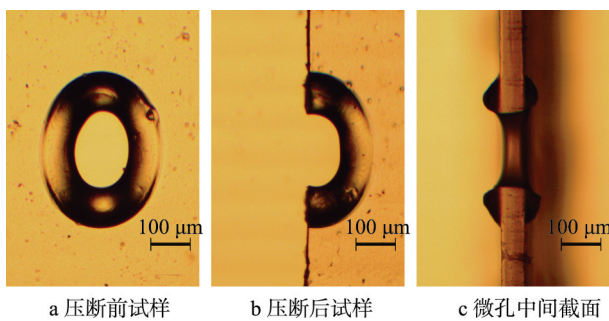


图 4 孔与孔中间截面图像

Fig.4 Image of micro-hole and section in the middle of micro-hole

2 结果与讨论

2.1 加工参数对孔径的影响

由试验得到微孔当量直径与激光功率、打孔时间的对应关系,应用 MATLAB 软件进行线性回归数值计算,得到激光功率和打孔时间对孔径影响规律的经验公式。式(1)—(3)分别为厚度为 0.04, 0.06, 0.07 mm

的 PP 薄膜对应的经验公式, P 的范围是 6~30 W, t 的范围是 0.5~2 ms; 式(4)—(6)分别为厚度为 0.035, 0.05, 0.07 mm 的 PE 薄膜对应的经验公式, P 的范围是 6~30 W, t 的范围是 1.3~4 ms。

$$d_s = -0.72P^2 - 138t^2 + 44P + 611t - 3.5Pt - 650 \quad (1)$$

$$d_s = -0.64P^2 - 151t^2 + 40P + 648t - 3.2Pt - 711 \quad (2)$$

$$d_s = -0.64P^2 - 140t^2 + 42P + 639t - 4Pt - 747 \quad (3)$$

$$d_s = -0.56P^2 - 40t^2 + 31P + 294t + 1.6Pt - 664 \quad (4)$$

$$d_s = -0.75P^2 - 56t^2 + 45P + 447t - 2.6Pt - 972 \quad (5)$$

$$d_s = -0.71P^2 - 34t^2 + 43P + 322t - 1.9Pt - 837 \quad (6)$$

式中: d_s 为微孔当量直径(μm); P 为激光功率(W); t 为打孔时间(ms)。

上述经验公式的使用需具有相应的条件, 首先, 经验公式应在试验所涉及的加工参数范围内使用, 其次, 采用某一功率激光加工微孔, 存在可加工出微孔所需打孔时间的最小值(见图 5), 经验公式中的打孔时间应大于最小值。

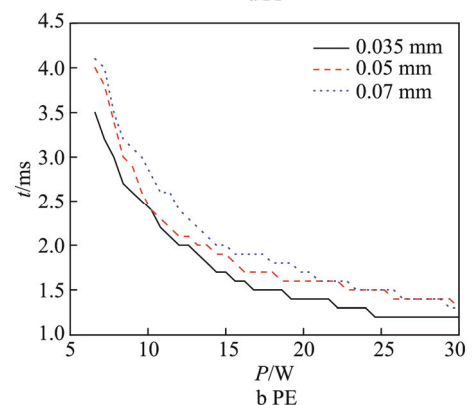
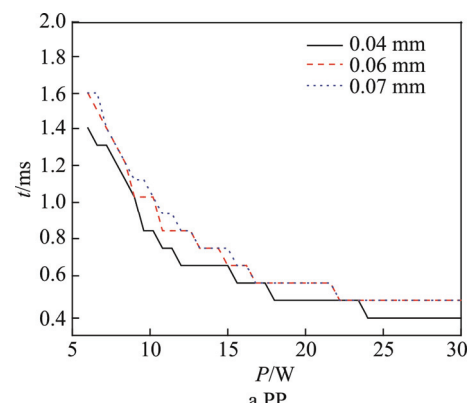


图 5 打孔时间最小值

Fig.5 Shortest perforated time

进一步假设相同加工参数下微孔当量直径随薄膜厚度线性增加, 则一定加工参数下厚度介于 0.04 和 0.07 mm 的 PP 微孔当量直径, 可由该加工参数下厚度为 0.04 mm 的 PP 微孔当量直径与厚度为 0.07 mm 的 PP 微孔当量直径而得。即若设某 PP 薄膜厚度 δ 介于 0.04 和 0.07 mm 之间, 一定加工参数下厚度

为 0.04 和 0.07 mm 的 PP 微孔当量直径分别为 d_{s40} 和 d_{s70} , 则厚度为 δ 的 PP 薄膜在该加工参数下微孔当量直径 $d_{s\delta}$ 有:

$$d_{s\delta} = d_{s70} + \left[(d_{s40} - d_{s70}) \frac{0.07 - \delta}{0.07 - 0.04} \right] \quad (7)$$

若将厚度为 0.04 和 0.07 mm 的 PP 经验公式 (1)~(3) 看做某加工参数下的微孔当量直径, 则由式 (2)~(10) 可得:

$$d_{s\delta} = (-0.83 + 2.7\delta)P^2 + (-139 - 67\delta)t^2 + (47 - 67\delta)P + (547 + 930\delta)t + (-2.8 - 17\delta)Pt + (-520 - 3200\delta) \quad (8)$$

考虑经验公式便利性, 化简公式, 忽略式 (8) 中 δ 对单项式系数影响小于 15% 的部分。则式 (8) 变为厚度介于 0.04 和 0.07 mm 的 PP 薄膜经验公式:

$$d_{s\delta} = (2.7\delta - 0.83)P^2 - 139t^2 + 47P + 574t - (2.8 + 17\delta)Pt - 3200\delta - 520 \quad (9)$$

式中: δ 为薄膜厚度(mm); $d_{s\delta}$ 为微孔当量直径(μm); P 为激光功率(W), $6 \leq P \leq 30$; t 为打孔时间(ms), $0.5 \leq t \leq 2$ 。

同样方法, 计算得到厚度 δ 介于 0.035 和 0.07 mm 的 PE 薄膜经验公式:

$$d_{s\delta} = -0.62P^2 - 37t^2 + (19 + 343\delta)P + 304t + (5.1 - 100\delta)Pt + 4942\delta - 491 \quad (10)$$

式中: δ 为薄膜厚度(mm); $d_{s\delta}$ 为微孔当量直径(μm); P 为激光功率(W), $6 \leq P \leq 30$; t 为打孔时间(ms), $1.3 \leq t \leq 4$ 。

实践中, 若待加工 PP 薄膜厚度为 0.05 mm, 目标加工孔径为 200 μm , 使用激光功率 20 W, 计算打孔所需打孔时间方法如下: 将参数 $\delta=0.05$ mm; $d_{s\delta}=200$ μm ; $P=20$ W 带入式 (9), 得 $139t^2 - 501t + 218 = 0$, 解得 $t_1=3.10$ ms; $t_2=0.51$ ms, 因经验公式应在试验所涉及的加工参数范围内使用, 故剔除解 t_1 , 可得所需打孔时间为 0.51 ms。同理, 若已知打孔时间 t , 也可根据经验公式求得打孔所需激光功率 P 。

总之, 激光功率和打孔时间对微孔大小影响均显著, 激光功率和打孔时间增加, 微孔孔径增大, 调节激光功率和打孔时间均可得到不同大小的微孔。同时, 薄膜种类对打孔的影响大, 加工 PE 薄膜所需的激光能量显著大于 PP 薄膜, 薄膜厚度越大, 打孔所需的激光能量越高。

2.2 微孔孔长变化规律

微孔孔长影响微孔膜透气性, 是微孔膜工程应用的重要参照。典型的激光加工微孔截面见图 6, 可以看出, 薄膜材料堆积在微孔周围, 使孔两侧均形成一圈环形峰状材料, 使微孔孔长相对于薄膜厚度有所增加, 增加部分孔的形状为近似锥台形。激光打孔使薄膜材料发生熔化、汽化, 由于形变、汽化材料喷发形

成的气流等因素^[15], 熔化材料聚集在微孔周围, 待加工结束后重新凝固, 在微孔周围形成一圈环形峰状材料, 导致孔长增加, 且激光射入面材料堆积比激光射出面多, 形成较高的环形峰。

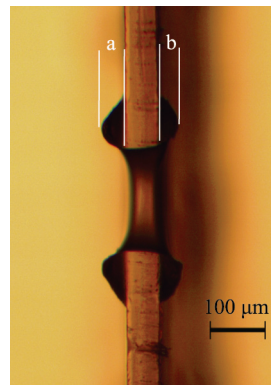


图 6 微孔中间截面

Fig.6 Section in the middle of micro-hole

在厚度为 0.06 mm 的 PP 薄膜上, 分别测量不同当量直径微孔的激光射入面环形峰状材料峰顶至薄膜材料表面的距离 a , 以及激光射出面环形峰状材料峰顶至薄膜材料表面的距离 b , 当微孔当量直径分别为 53, 159, 182, 228, 257 μm 时, a 分别为 20, 41, 44, 45, 52 μm , b 分别为 20, 26, 35, 45, 49 μm 。结果表明, 激光射入面和射出面孔长的增加量均随孔径增大而增加, 增加量相对于薄膜厚度 60 μm 是不可忽略的, 将显著影响基于微孔的内外气体交换。

3 结语

激光加工微孔膜的微孔孔径随激光功率、打孔时间的增加而增大, 调节激光功率和打孔时间均可获得不同孔径微孔。激光加工微孔膜, 加工 PE 薄膜所需的激光能量显著大于 PP 薄膜, 同时, 薄膜厚度越大, 打孔所需的激光能量越高。CO₂ 激光加工 PP 包装薄膜微孔, 其孔长度相对于薄膜厚度有所增加, 且增加量随微孔孔径增大而增加。

参考文献:

- [1] 李方, 卢立新. 果蔬微孔膜气调包装模型与试验验证[J]. 农业工程学报, 2010(4): 375—379.
LI Fang, LU Li-xin. Theoretical Model and Experimental Validation for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables with Micro Perforated Film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010(4): 375—379.
- [2] WINOTAPUN C, KERDDONFAG N, CHINSIRIKUL W. Nd: YAG Laser Perforation of Plastic Films for Enhanced Breathability[J]. Advanced Materials Research, 2010, 93/94: 79—82.

- [3] 邝贤锋. 激光技术在塑料薄膜加工中的应用[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 76—78.
KUANG Xian-feng. Application of Laser Technology in Polymer Film Processing[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 76—78.
- [4] 邓开发, 陈洪, 是度芳. 现代光学技术在包装与印刷中的应用[J]. 包装工程, 2003, 24(2): 10—12.
DENG Kai-fa, CHEN Hong, SHI Du-fang. The Application of Modern Optics Technology in Packaging and Printing[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(2): 10—12.
- [5] BROWN N, SHI F, KERR D, et al. CO₂ Laser Processing of Multilayer Packaging Films[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, 2005, 219(3): 231—237.
- [6] BROWN N, KERR D, PARKIN R M, et al. Non-contact Laser Sealing of Thin Polyester Food Packaging Films[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1466—1473.
- [7] LUTEY A H A, SOZZI M, CARMIGNATO S, et al. Nanosecond and Sub-nanosecond Pulsed Laser Ablation of Thin Single and Multi-layer Packaging Films[J]. Applied Surface Science, 2013, 285: 300—308.
- [8] 刘东华, 冯树强. 现代激光技术在包装行业中的应用[J]. 株洲工学院学报, 2001, 15(1): 21—23.
LIU Dong-hua, FENG Shu-qiang. Application of Modern Laser Technology to Packaging Industry[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2001, 15(1): 21—23.
- [9] 钱俊, 张光春, 杨健, 等. 晶体硅片上激光打孔的研究[J]. 半导体技术, 2012, 37(5): 375—380.
QIAN Jun, ZHANG Guang-chun, YANG Jian, et al. Study of Laser Drilling on the Crystal Silicon Wafer[J]. Semiconductor Technology, 2012, 37(5): 375—380.
- [10] 邢子红, 张瑞, 杨彬, 等. 渗透泵控释片激光打孔的实验研究[J]. 应用激光, 2011, 31(2): 157—159.
XING Zi-hong, ZHANG Rui, YANG Bin, et al. Experimental Study of Laser Drilling for the Osmotic Pump Control-Releasing Tablets[J]. Applied Laser, 2011, 31(2): 157—159.
- [11] 梁晓轩, 王晶, 张镇西. 纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(10): 107—115.
LIANG Xiao-xuan, WANG Jing, ZHANG Zhen-xi. Nano-Scale Photoporation by Tightly Focused Lasers: A Survey[J]. Journal of Xi'an JiaoTong University, 2012, 46(10): 107—115.
- [12] 韩要轩, 陈培锋, 周卓尤, 等. 水松纸激光打孔技术研究[J]. 激光技术, 2002, 26(5): 330—333.
HAN Yao-xuan, CHEN Pei-feng, ZHOU Zhuo-you, et al. Laser Perforating Technology of Tipping Paper[J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 330—333.
- [13] XIA L, CHEN P, WANG Y, et al. Investigation of Flexible Perforation of Thin Materials Using a Continuous-wave CO₂ Laser[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(6): 1641—1645.
- [14] 陈鹤鸣, 赵新彦. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
CHEN He-ming, ZHAO Xin-yan. Principles and Application of Laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [15] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
GUAN Zhen-zhong. Handbook of Laser Processing Technology[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.