

文章编号: 0258-7025(2008)06-0925-06

# 有机玻璃激光气化切割前沿

谢小柱<sup>1</sup> 李力钧<sup>2</sup> 魏 昕<sup>1</sup> 胡 伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006; <sup>2</sup> 湖南大学激光研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 以 PMMA(有机玻璃)为试件,采用 CCD 拍摄到 CO<sub>2</sub> 激光气化切割前沿的照片。研究焦点位置、切割速度和激光功率对切割前沿形状和前沿深度的影响,并建立激光能量耦合模型。结果表明,由于前沿存在多次反射,使得切割深度增加。正离焦切割时,前沿吸收的总激光功率密度减小,切割深度减小;负离焦切割时,最大激光功率密度值的位置下移,使得前沿功率密度分布朝着深部推进,切割深度增加,若负离焦量过大,表面光斑直径和光程增加,更深位置的功率密度减小,切割深度减小;随着激光功率增加、切割速度减小,则前沿弯曲程度减小,被激光直接照射的前沿部位增长,前沿吸收激光功率密度增加,切割深度增加。

**关键词** 激光技术;切割前沿;有机玻璃;弯曲程度;多次反射;理论模型

中图分类号 TG 665 文献标识码 A

## Evaporative Front of Laser Cutting PMMA

Xie Xiaozhu<sup>1</sup> Li Lijun<sup>2</sup> Wei Xin<sup>1</sup> Hu Wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)  
<sup>2</sup> Laser Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** Evaporative cutting front shape of PMMA by CO<sub>2</sub> lasers is photographed through CCD camera. Effects on cutting front shape and depth by cutting parameters as defocus distance, cutting speed and laser power are discussed. An energy coupling model is built up on the front and kerf shape photographed. The results indicate that multiple reflections are favorable to the increase of depth. When the focal position is above the surface, the absorptive intensity on the front decreases, so the cutting depth decreases. When the focal position is below the surface, the position on the front with the maximum power intensity is downward. The intensity distribution is toward the deeper position, the cutting depth increases. But if the negative focal distance is extremely big, the intensity of the deeper position attenuates sharply with the increase of focal radius and light distances, so the depth decreases. With reducing the cutting speed and increasing the laser power, the curvature decreases, the length of front directly irradiated increases, and thus the cutting depth increases.

**Key words** laser technique; cutting front; PMMA; curvature; multiple reflections; theoretical model

## 1 引 言

激光切割过程发生在切口终端处一个接近垂直的表面,称为切割前沿。激光和气流在该处进入切口,激光能量一部分被切割前沿所吸收,一部分穿过切口或经切割前沿向切口空间反射,能量密度高时有时会产生等离子体。激光切割机制是一个很复杂的过程,它涉及到激光的吸收<sup>[1]</sup>、放热反应<sup>[2]</sup>、材料的加热和熔化<sup>[3]</sup>、切口材料的去除<sup>[4]</sup>、动态作用和表面粗糙度<sup>[5]</sup>等因素。而激光的吸收是激光切割中非

常重要的因素,是有效进行激光切割的基础。激光进入切口,三方为材料所包围,其中一方为倾斜的切割前沿,两侧为切口壁面,相对的两切口壁面有波导作用,入射其上的激光朝深部反射。激光的吸收主要在切割前沿进行。激光的吸收取决于切割前沿形状、激光的偏振性、模式、会聚角等一系列因素。实验方面,Fushimi 等<sup>[6,7]</sup>采用 CCD 高速摄影的方式拍摄出氧气辅助激光熔化切割前沿的照片,发现熔化金属的溅射每隔 2 ms 改变一次方向。还研究了

收稿日期:2007-08-10;收到修改稿日期:2007-12-14

基金项目:国家自然科学基金(50675038),广东省科技计划(2004B10201018)和广州市科技计划(2005J1-C0081)资助项目。

作者简介:谢小柱(1975—),男,湖南人,讲师,博士,主要从事激光加工、精密加工技术方面的研究。

E-mail: xiaozhuxie@yahoo.com.cn

辅助气流对熔化金属动态形成过程的影响。Kovalev 等<sup>[8]</sup>在两块玻璃板之间开窄槽,使槽内充满石蜡,研究热气流扫描过后石蜡熔化、破坏以及被气流夹带的过程,从而达到模拟激光熔化切割金属的过程。理论研究方面,Petring 等<sup>[9]</sup>假设切割前沿宽度与激光束直径相等,前沿在表面内的轮廓线相当于半圆,切割前沿倾角保持不变,计算出了三维激光前沿上前沿倾角对菲涅耳吸收的影响,得出了在一定角度下切割前沿平均激光吸收的关系曲线。Sheng 等<sup>[10]</sup>建立了二维解析模型预测熔化切割前沿形状。Duan 等<sup>[11]</sup>基于能量平衡方程建立了三维稳态模型预测切割前沿形状,模型中考虑了加工参数、多次反射和惰性气体压力对前沿形状的影响。

确定了前沿形状才能确定切割前沿对激光的吸收,目前切割前沿的实验研究主要针对熔化切割模型,且拍摄的前沿照片不太清晰,而对气化切割前沿形状的观测还未见报道。在研究激光切割金属材料和非金属材料时,通常假设切割前沿是一垂直直线或者倾斜一固定角度的直线<sup>[12]</sup>,无论是哪种假设,都可以统一将前沿形状看作是直线的情况。分析表明,前沿吸收的激光能量取决于激光直接入射时的反射吸收,不存在激光在前沿的多次反射吸收。这种假设适用于厚度不大的材料,若切割厚度增加,前沿形状弯曲,这种假设就不能够适用,即使对于激光切割高吸收率非金属材料也是如此。因此,本文选用 PMMA(有机玻璃)作为试件,实验拍摄气化切割有机玻璃前沿的照片,研究焦点位置、切割速度和激光功率对切割前沿形状的影响,建立激光-材料的能量耦合模型,分析激光功率密度在气化切割前沿的分布情况,以及激光参数(焦点位置、功率、切割速度)对前沿吸收功率密度的影响。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。封离型 CO<sub>2</sub> 激光器,功

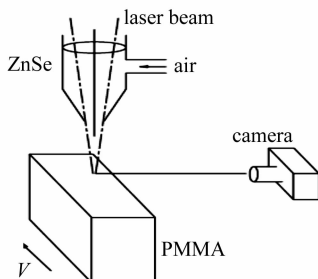


图 1 切割前沿观测装置示意图

Fig. 1 Schematic of the observed cutting front

率 20~70 W,光束直径 10 mm,激光束经焦距为 150 mm 的 ZnSe 透镜聚焦到 PMMA 表面,试件尺寸 200 mm×20 mm×50 mm,放在工作台上并以速度  $V$  移动。采用同轴压缩空气保护透镜,压力 0.15 MPa,喷嘴直径 2 mm。工件表面附有刻度尺,采用 CCD 相机拍摄切割前沿形状。切割前沿的形状和深度采用大型工具显微镜 JX6 测量,测量精度 0.01 mm。选用 PMMA 作为试件主要是由于:1) 气化点低,材料以完全气化的形式去除,可以实现较小的激光功率切割较厚的材料;2) 材料透明,可以清晰地观测到激光气化切割前沿的形状。

## 3 实验结果和分析

### 3.1 离焦量对切割前沿的影响

离焦量对切割前沿几何形状的影响如图 2 所示。图 3 为切割前沿弯曲和离焦量的关系曲线,以焦斑位置深入工件内部为负离焦,反之,则为正离焦。实验条件为:激光功率 42 W,切割速度 54 mm/min。可以看出,正离焦时,切割前沿深度最小,正离焦量越大,切割前沿深度越小;负离焦时,切割前沿深度最大,且随着离焦量的增加而增加。其原因之一是理论计算聚焦光斑直径表明焦点表面附

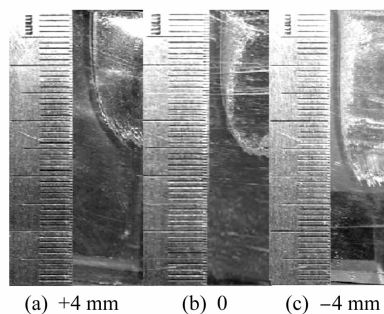


图 2 切割前沿几何形状随离焦量的变化

Fig. 2 Cutting front geometry with variation of focal distance

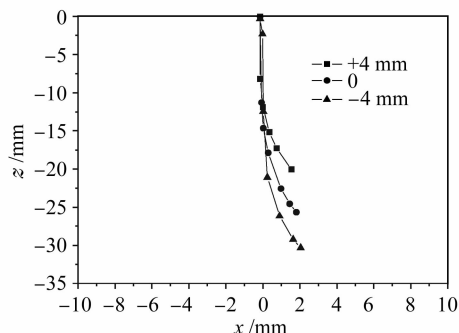


图 3 切割前沿弯曲和离焦量的关系

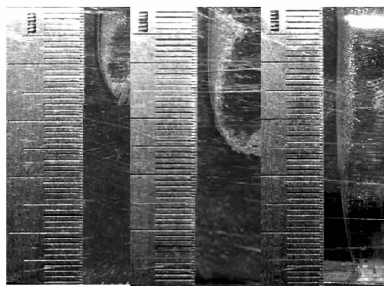
Fig. 3 Cutting front curvature versus focal distance

近的焦斑直径最小,且随着离焦量的增加而增加。光斑直径大小决定功率密度和焦深的大小。材料的去除和激光功率密度有关,也和焦深的范围有关。若为负离焦,有效焦深的范围增加,更有利于材料去除,所以切割前沿的深度增加。但是如果负离焦的离焦量过大,切割前沿的深度反而减小;相反,正离焦时,有效焦深范围减小,所以切割前沿深度要小些。

从图中还可以看出,正离焦时,切割前沿的弯曲程度最大,焦点位于焦点表面附近时,弯曲程度减小,负离焦时的弯曲程度最小。从弯曲程度可以判断切割前沿对激光存在反射,且前沿上部的入射角大于下部。焦点位置越靠下,前沿弯曲减小,存在多次反射。从而使得在同等参数下,焦点位置越靠下,由于多次反射的存在,使切割前沿的深度增加,这是影响切割深度增加的另一个原因。

### 3.2 切割速度对切割前沿的影响

切割前沿随着切割速度变化的几何形状如图 4 所示,图 5 是切割前沿弯曲和切割速度的关系曲线。实验条件为:焦点位于工件表面,激光功率 42 W。可以看出,随着切割速度的增加,切割前沿的深度减小。从图中还可以看出随着切割速度的增加,切割



(a)100 mm/min (b)54 mm/min (c)15 mm/min

图 4 切割前沿几何形状随切割速度的变化

Fig. 4 Cutting front geometry with variation of cutting speed

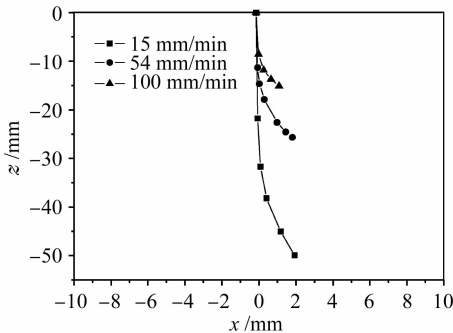


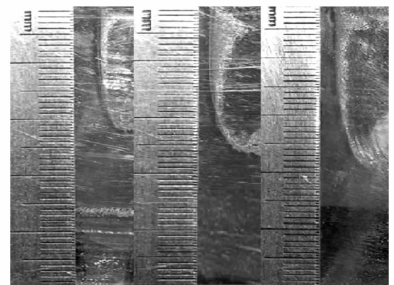
图 5 切割前沿弯曲程度和切割速度的关系

Fig. 5 Cutting front curvature versus cutting speed

前沿的弯曲程度显著增加,切割前沿变得较平,但前沿底部位置的入射角增加。从弯曲程度可以判断切割前沿对激光存在反射,且前沿上部的入射角大于下部。切割速度越低,前沿弯曲减小,存在多次反射。从而使得在同等参数下,由于多次反射的存在,切割前沿的深度增加。

### 3.3 激光功率对切割前沿的影响

切割前沿随着激光功率变化的几何形状如图 6 所示,图 7 是切割前沿弯曲和激光功率的关系曲线。实验条件为:焦点位于工件表面,切割速度 54 mm/min。可以看出,随着激光功率的增加,切割前沿的深度增加。还可以看出,随着激光功率的增加,切割前沿的弯曲程度减小,但 42 W 和 58 W 相互之间弯曲程度相差不大,相对切割速度对切割前沿弯曲程度的影响要小。从弯曲程度同样可以判断切割前沿对激光存在反射,且前沿上部的入射角大于下部。激光功率增加,前沿弯曲程度减小,存在多次反射。



(a) 28 W (b) 42 W (c) 58 W

图 6 切割前沿几何形状随激光功率的变化

Fig. 6 Cutting front geometry with variation of laser power

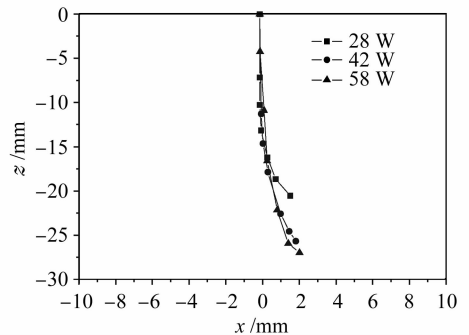


图 7 切割前沿弯曲程度和激光功率的关系

Fig. 7 Cutting front curvature versus laser power

## 4 理论分析

### 4.1 能量耦合模型

图 8 是气化正在发生的区域,也是激光-材料相

互作用的区域,按图所示建立空间三维坐标系,坐标原点在工件表面上,如图(a)所示。该曲面在  $x-z$  面的投影是前沿曲线,如图(b)所示。曲面在  $y-z$  面的投影是切缝曲线,如图(c)所示。图(d)是曲面在  $x-y$  面内的投影,上下曲线都是半圆弧。综合以上三个投影面的几何关系,假设该区域所在的曲面是由半圆弧曲线沿着前沿曲线的轨迹扫掠而成,且半圆弧的半径尺寸随着深度( $z$  方向)变化而变化,其相互关系满足切缝曲线变化的函数关系。

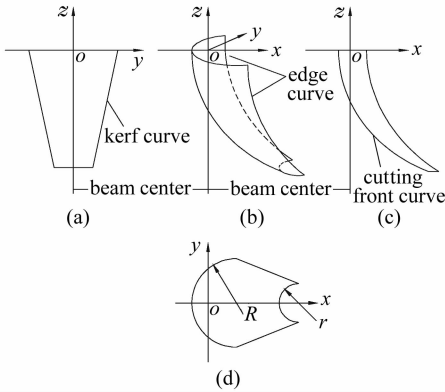


图8 气化切割区域示意图

Fig. 8 Sketch of evaporative cutting region

前沿曲线和切缝曲线可以通过实验的方法得到,激光入射到曲面(气化区域)上时,将在曲面发生多次反射,每次反射过程都有一部分能量被曲面吸收,曲面吸收的能量取决于哪几次反射,需要通过理论计算才能得出,为此针对曲面建立了相应的能量耦合模型,其基本假设如下:

1) 假设曲面表面光滑,对激光光束是镜面反射的,且遵循经典 Fresnel 反射公式,即入射角等于反射角。

2) 假设入射激光的功率密度为高斯分布,聚焦后入射到工件表面。由于激光波长相对于切缝尺寸小很多,按几何光学的传播规律处理。

3) 假设曲面任意一点吸收的激光能量是该点对直接入射反射吸收的能量和多次反射吸收能量之和。

4) 不产生等离子体。

按照射线跟踪法研究聚焦入射激光在切割前沿上的反射传输和能量吸收过程。以往认为光束在前沿的反射吸收只是在前沿曲线上进行,但是实际上由于前沿的弯曲,前沿上多次反射吸收的能量不仅仅是来自前沿曲线本身,而且还会由入射到两壁面的光束反射后再入射到前沿上,所以针对前沿多次反射的能量传输和反射过程将分成来自前沿本身和

壁面两部分,然后再将这两部分能量叠加在一起。

经过理论推导,得到光线  $r$  第  $j$  次入射到前沿时的实际激光功率密度为<sup>[13]</sup>

$$I_{fj} = \frac{2P_b F^2 \cos \phi_{fj}}{\pi \omega^2 L_{fj}^2 \cos^3 \theta_{of}} \exp\left(-\frac{2r_f^2}{\omega^2}\right) \prod_{i=1}^{j-1} R(\phi_{fi}), \quad (1)$$

光线  $r$  在第  $j$  次经由前沿本身反射过程中,前沿实际吸收的激光功率密度为

$$I_{fabj} = [1 - R(\phi_{fj})] \cdot I_{fj}, \quad (2)$$

式中  $P_b$  为激光功率,  $F$  为聚焦透镜焦距,  $\omega$  为聚焦透镜处光斑半径,  $\theta_{of}$  为光线  $r$  与光轴的夹角,  $r_f$  为光线离透镜中心的距离,  $\phi_{fj}$  为光线  $r$  第  $j$  次的入射角,  $R(\phi_{fi})$  为光线  $r$  第  $i$  次入射时的反射率,  $L_{fj}$  为光线  $r$  离开焦点到第  $j$  次入射到前沿时所走过的光程。

同理,可以得到光线  $r$  经由切口壁面反射后第  $j$  次入射到前沿曲线时的实际激光功率密度和光线  $r$  在经由切口壁面反射后第  $j$  次反射过程中,前沿曲线实际吸收的激光功率密度与(1),(2)式相同。

#### 4.2 反射次数的影响

图 9, 10 是前三次入射过程到前沿和前沿吸收的总激光功率密度分布。1, 2, 3 分别代表直接入射、前两次入射、前三次入射时总激光功率密度和吸收的总激光功率密度。可以看出,前沿的中上部主要取决于直接照射,而反射只对前沿的中下部位有

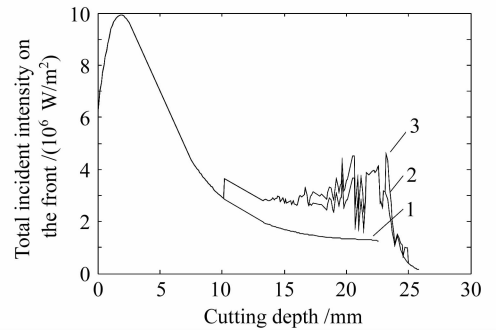


图9 入射到前沿时的总激光功率密度

Fig. 9 Total incident intensity on the front

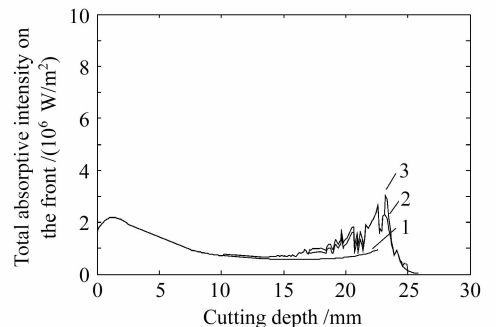


图10 前沿吸收的总激光功率密度

Fig. 10 Total absorptive intensity on the front

影响,增强了该部位的功率密度,正是由于反射的存在,才使得整个前沿都有激光功率分布,与激光总是朝着前沿底部传输的现象相符。从总的功率密度分布来看,前沿吸收的功率密度主要取决于前三次入射,即主要取决于两次反射。

### 4.3 焦点位置的影响

图 11,12 为前三次入射到前沿的总激光功率密度和吸收的总激光功率密度与焦点位置之间的关系。图中激光功率、切割速度相同,数字表示离焦量的大小,“+”代表正离焦,“-”代表负离焦。可以看出,离焦量的改变,影响了入射到工件表面的光斑半径大小和光束的入射方向。当焦点位于工件表面以上时,即正离焦时,入射到工件表面的总激光功率密度减小,相应吸收的总激光功率密度减小;当焦点位于工件表面以下时,即负离焦时,相应的最大激光功率密度值的位置下移,使得前沿功率密度分布朝着深部推进,所以负离焦有利于加工。但是负离焦量过大,随着表面光斑直径和光程的增加,更深位置的功率密度很快减小,反而不利于切割。

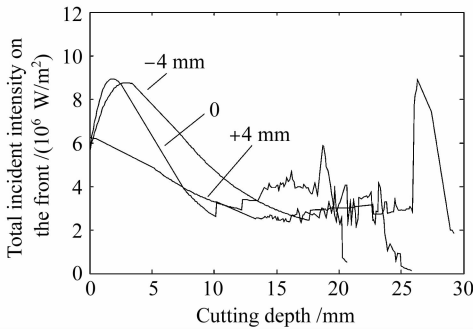


图 11 入射到前沿的总激光功率密度和焦点位置的关系

Fig. 11 Total incident intensity on the front versus focal distance

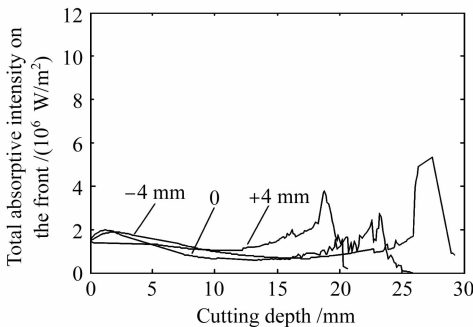


图 12 前沿吸收的总激光功率密度和焦点位置的关系

Fig. 12 Total absorptive intensity on the front versus focal distance

### 4.4 切割速度的影响

图 13,14 为前三次入射到前沿的总激光功率密

度和吸收的总激光功率密度与切割速度之间的关系,图中激光功率相同。可以看出,随着切割速度的增加,前沿弯曲程度增加,被激光直接照射的前沿部位缩短,所以在同样的激光功率下,切割的深度减小。从功率密度角度分析,虽然切割速度较大时,前沿上部照射的激光功率密度相对较大,但是由于弯曲程度增加,很大一部分反射激光从切缝中逃逸,单位时间内输入的能量减少,功率密度衰减得很快,所以能够实现的切割深度反而减小。相反,切割速度较低时,前沿弯曲程度减少,激光直接照射的前沿部位延长,吸收功率密度的前沿部位也会延长,单位时间内输入的能量增加,所以能够最终实现的切割深度反而大些。

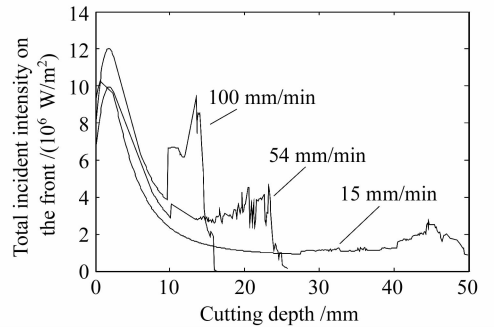


图 13 入射到前沿的总激光功率密度和切割速度的关系

Fig. 13 Total incident intensity on the front versus cutting speed

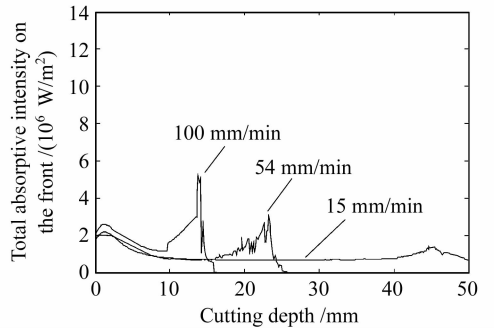


图 14 前沿吸收的总激光功率密度和切割速度的关系

Fig. 14 Total absorptive intensity on the front versus cutting speed

### 4.5 激光功率的影响

图 15,16 为前三次入射到前沿的总激光功率密度和吸收的总激光功率密度与激光功率之间的关系,图中切割速度相同。可以看出,随着激光功率的增加,前沿上照射的总激光功率密度和吸收的总激光功率密度也增加。激光功率越大,前沿弯曲程度减小,被激光直接照射的前沿部位增长,所以在同样的切割速度下,切割的深度增加,同样由于前沿存在

反射,使得更深部位的前沿也有激光照射,从而深度增加。

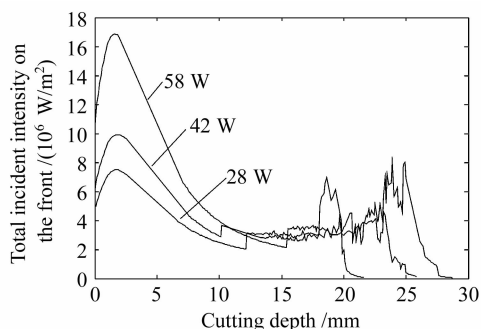


图 15 入射到前沿的总激光功率密度和激光功率的关系

Fig. 15 Total incident intensity on the front versus laser power

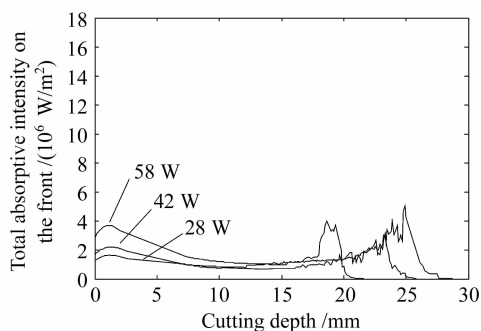


图 16 前沿吸收的总激光功率密度和激光功率的关系

Fig. 16 Total absorptive intensity on the front versus laser power

## 5 结 论

1) 实验清晰地观测到有机玻璃激光气化切割前沿的形状。随着焦点位置下移,切割前沿深度增加,弯曲程度减小;随着切割速度的增加,切割前沿深度减小,弯曲程度增加;随着激光功率增加,切割前沿深度增加,弯曲程度减小。

2) 建立激光材料作用的能量耦合模型,分析切割前沿激光功率密度的分布。实际弯曲切割前沿的能量吸收主要决定于入射光束的前三次入射(即两次反射)。正离焦切割时,入射到工件表面的总激光功率密度减小,相应吸收的总激光功率密度减小,切割深度减小;负离焦切割时,相应的最大激光功率密度值的位置下移,使得前沿功率密度分布朝着深部推进,所以有利于切割。但是负离焦量过大,随着表面光斑直径和光程的增加,更深位置的功率密度减

小得很快,反而不利于切割。随着激光功率的增加,切割速度的减小,前沿弯曲程度减小,被激光直接照射的前沿部位增长,前沿上照射的总激光功率密度和吸收的总激光功率密度也增加,切割深度增加。同样由于前沿存在反射,使更深部位的前沿也有激光照射,从而使切割深度增加。

## 参 考 文 献

- Huang Kaijin, Xie Changsheng, Shao Keran *et al.*. Theoretical analysis of the effects of pipe diameter and laser beam diameter on the initial instantaneous absorptivity of laser cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1041~1044  
黄开金,谢长生,邵可然等. 管径和光斑影响激光切割开始瞬间吸收率的分析[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1041~1044
- I. Black. A comparison of severance energies for reactive CO<sub>2</sub> laser cutting of mild steel [J]. *Intern. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1999, **15**(11):832~834
- Tong Kwok-On. Analytical model for laser fusion cutting of metals [J]. *Laser Institute of America*, 1997, **83**(2):E128~E137
- F. Quintero, F. Varas, J. Pou *et al.*. Theoretical analysis of material removal mechanisms in pulsed laser fusion cutting of ceramics [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(4):655~666
- Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. On-line method for evaluation of laser cutting quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1580~1584  
张永强,吴艳华,陈武柱等. 激光切割质量的在线评价方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1580~1584
- Takashi Fushimi, Hideyuki Horisawa, Shigeru Yamaguchi *et al.*. A fundamental study of laser cutting using a high speed photography [C]. *SPIE*, 2000, **3888**:90~95
- Takashi Fushimi, Hiromasa Nakajima, Hideyuki Horisawa *et al.*. A fundamental study about molten metal of laser cutting [C]. *SPIE*, 2000, **4088**:284~286
- O. B. Kovalev, A. M. Orishich, A. P. Petrov *et al.*. Modeling of the front of melting and destruction of a melt film during gas-laser cutting of metals [J]. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2004, **45**(1):133~141
- D. Petring, P. Abels, E. Beyer. The absorption distribution on idealized cutting front geometries and its significance for laser beam cutting [C]. *SPIE*, 1988, **1020**:123~131
- P. Sheng, L. Cai. Predictive process planning for laser cutting [J]. *J. Manufa. Sys.*, 1998, **17**(2):144~158
- J. Duan, H. C. Man, T. M. Yue. Modeling the laser fusion cutting process: I. Mathematical modeling of the cut kerf geometry for laser fusion cutting of thick metal [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**(14):2127~2134
- P. Di Pietro, Y. L. Yao. A numerical investigation into cutting front mobility in CO<sub>2</sub> laser cutting [J]. *Int. J. Mach. Tools & Manufact.*, 1995, **35**(5):673~688
- Xie Xiaozhu. Study on the mechanism and key technique of CO<sub>2</sub> laser cutting nonmetallic materials based on wall focusing effects [D]. Hunan University, 2006  
谢小柱. 基于壁面聚焦效应的 CO<sub>2</sub> 激光切割非金属材料机理和关键技术研究[D]. 湖南大学, 2006