

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0254-05

CO₂ 激光气化切割非金属材料机制分析

谢小柱¹, 李力钧²

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

摘要 研究了 CO₂ 激光气化切割高吸收率非金属材料机制。基于实验拍摄的前沿形状和切缝形状, 经过理论分析建立了激光气化切割非金属材料的三维能量耦合模型, 分析了实际弯曲切割前沿和两壁面对激光的反射和能量吸收过程。前沿和壁面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), 前沿本身的多次反射增强了前沿底部的功率密度, 而壁面的多次反射增强了前沿中下部位的功率密度。正是由于多次反射的存在, 使得整个前沿都有功率密度分布。两切口壁面对入射激光有波导作用, 入射激光在左右两壁面之间相互反射, 朝着切口深部传输, 即所谓的“壁面聚焦效应”(Wall focusing effect)。

关键词 光学设计与制造; 壁面聚焦效应; CO₂ 激光切割; 切割机制; 切割前沿; 非金属材料; 多次反射

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

Mechanism of CO₂ Laser Cutting Nonmetallic Materials

XIE Xiao-zhu¹, LI Li-jun²

(¹ Faculty of Electromechanical Engineering, Guangzhou Higher Education Mega Center Campus, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)
(² Laser Institute of Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract This paper systematically studies the mechanism of evaporation CO₂ laser cutting high absorptive nonmetallic material. Based on the cutting front and kerf shape photographed in the experiment, a three-dimensional energy coupling model for evaporative laser cutting nonmetallic material is established through theoretical analysis and the reflective transmission and energy absorption of laser against real bended cutting front and both two walls are analyzed. The front and wall's energy absorption is mainly determined by the first three incident beams, that is two reflections. The multiple reflections from the front will increase the power intensity of the bottom and the multiple reflections from the wall will increase the power intensity from the center to the bottom. Due to the multiple reflections, the power intensity distributes over the total front. Both two walls will have waveguide effects on the incident light which will mutual reflect against both walls and transmit toward the bottom of the cut, that is so-called "wall focusing effect".

Key words optical design and fabrication; wall focusing effects; CO₂ laser cutting; cutting mechanism; cutting front; nonmetallic materials; multiple reflections

1 引 言

目前关于激光切割^[1]的研究主要集中于激光熔化^[2]和反应熔化切割^[3], 表现为对熔化层、气-液分界面、热传导损失、等离子体、氧化层动力学、气体动力学等方面的研究。而对气化切割^[4]研究相对较少, 对中小功率 CO₂ 激光切割具有高吸收率的非金属材料厚板的机制和模型研究则鲜有报道。激光的吸收是激光切割中非常重要的因素, 它是有效进行

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。过去对具有高吸收率的非金属材料气化切割机制分析时通常假设为完全吸收, 材料瞬间气化, 切割前沿为一垂直直线或者倾斜一固定角度的直线^[5], 忽略前沿反射的影响, 这在薄板切割时是适用的, 但是对于厚

作者简介: 谢小柱(1975—), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: xiaozhuxie@yahoo.com.cn

导师简介: 李力钧(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工方面的研究。E-mail: lijunli@hotmail.com

板切割就不适用。这是因为,考虑切割速度的影响,气化切割前沿是弯曲的,此时入射激光的入射角会增大,一部分入射光吸收,另一部分反射后再次入射到前沿或者从切口处逃逸出去,直接在激光辐照下去除的深度是有限的。但是实际上切割深度要更大些,前沿的反射就不能忽略不计。为此,基于壁面聚焦效应理论,分析建立了激光气化切割非金属材料的三维能量耦合模型,分析了实际弯曲切割前沿和两壁面对激光的反射和能量吸收过程。

2 理论模型

图 1 所示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 1 所示建立空间三维坐标系,坐标原点在工件表面上,如图 1(b)所示。那么该曲面在 $X-Z$ 面的投影是前沿曲线,如图 1(c)所示。曲面在 $Y-Z$ 面的投影是切缝曲线,如图 1(a)所示。图 1(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。

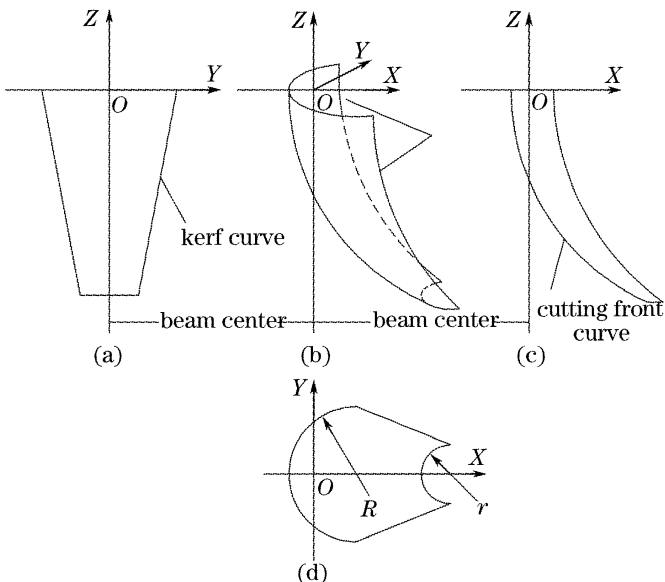


图 1 气化切割区域示意图

Fig. 1 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的能量被曲面吸收。究竟曲面吸收的能量取决于前几次反射,需要通过理论计算才能分析得出。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,且遵循经典菲涅耳(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) 不考虑等离子体对激光的反韧致辐射吸收。

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。以前许多学者认为光束在前沿的反射吸收只是在前沿曲线上进行的,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。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,然后再将这两部分的能量叠加在一起。

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^[6]

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

那么光线 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, ω 为聚焦透镜处光斑半径, θ_{of} 为光线 r 与光轴的夹角, r_f 为光线离透镜中心的距离, ϕ_{fj} 为光线 r 第 j 次的入射角, $R(\phi_{fi})$ 为线 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,其公式和前面是一样的,只是需要代入相应的数值即可。

3 结果及讨论

图 2 所示实验中,100 W 封离型 CO₂ 激光器,试件 PMMA(有机玻璃),激光功率 42 W,聚焦透镜处高斯光斑半径 5 mm,切割速度 54 mm/min,焦点位置在工件表面,聚焦透镜为 GaAs,焦距 150 mm,实际聚焦光斑直径 0.35 mm,前沿和切缝形状照片采用工具显微镜测量,再对数据进行多项式拟合。

图 3 为第一次入射(直接入射)到切割前沿的功

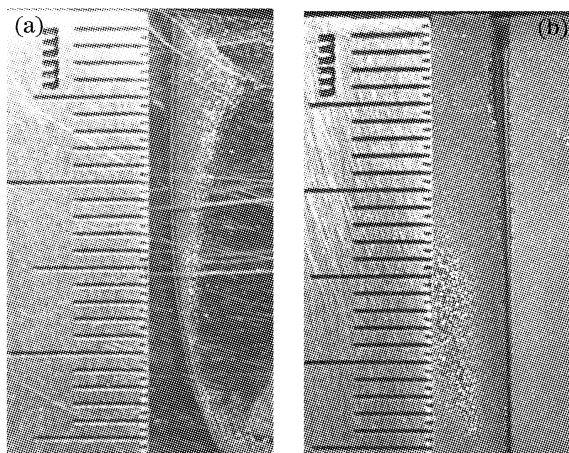


图 2 实验拍摄的切割前沿(a)和切缝照片(b)

Fig. 2 Photos of cutting front (a) and kerf (b)

率密度分布和吸收的激光功率密度。由于前沿的弯曲,使得前沿并不能完全被激光直接照射到,只有深度小于 22.6 mm 的部位才能被照射到。

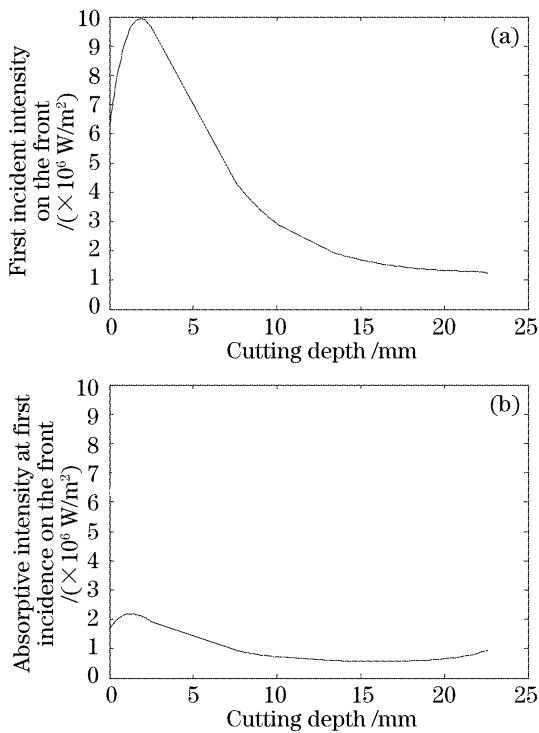


图 3 第一次入射到前沿的激光功率密度(a)和前沿吸收的激光功率密度(b)

Fig. 3 First incident intensity (a) and absorptive intensity at first incidence (b) on the front

图 4 为第二次入射(前沿一次反射)到切割前沿的功率密度分布和吸收的激光功率密度。由于反射的缘故,使得深度大于 22.6 mm 部位也能照射到激光功率密度,增强前沿底部功率密度。而第二次入射(壁面一次反射)到切割前沿的功率密度分布和吸收的激光功率密度,增强了深度介于 10.2~22.2 mm 部位的激光功率密度,如图 5 所示。

图 6 为第三次入射(前沿二次反射)到切割前沿

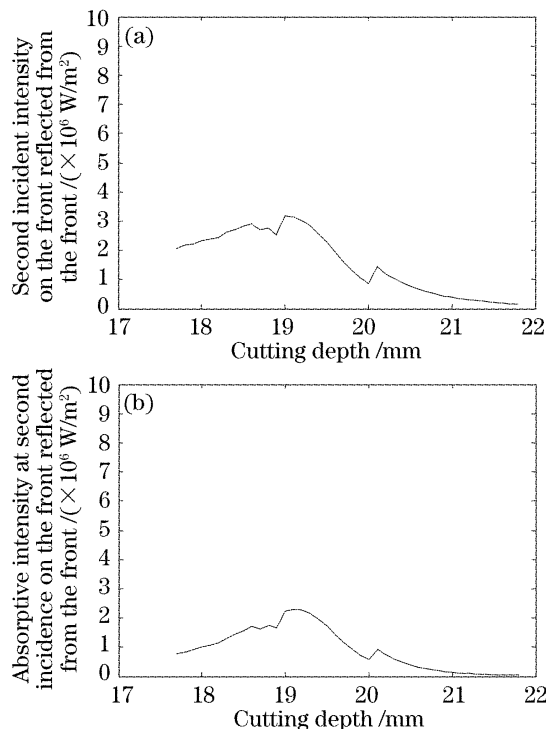


图 4 第二次入射(前沿一次反射)到前沿的激光功率密度(a)和前沿吸收的激光功率密度(b)

Fig. 4 Second incident intensity (a) and absorptive intensity at second incidence (b) on the front reflected from the front

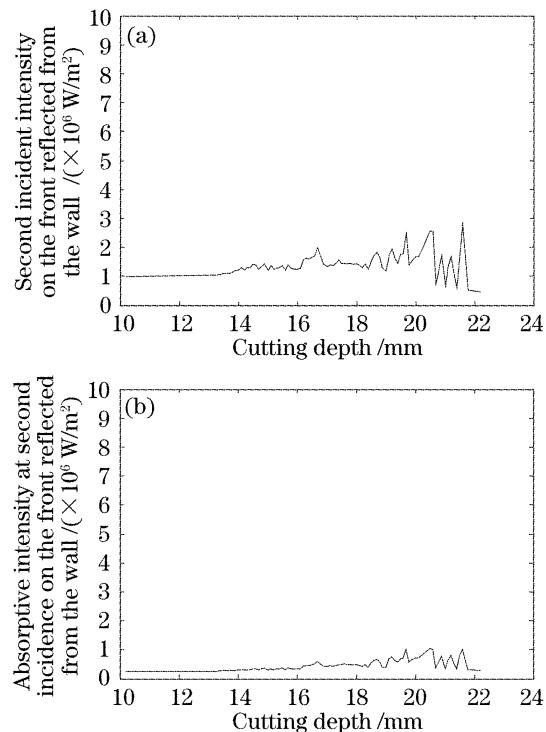


图 5 第二次入射(壁面一次反射)到前沿的激光功率密度(a)和前沿吸收的激光功率密度(b)

Fig. 5 Second incident intensity (a) and absorptive intensity at second incidence (b) on the front reflected from the wall
的功率密度分布和吸收的激光功率密度。由于二次反射的缘故,增强大于 23.2 mm 部位的功率密度,但是,相比前两次而言,此时入射和吸收的功率密度

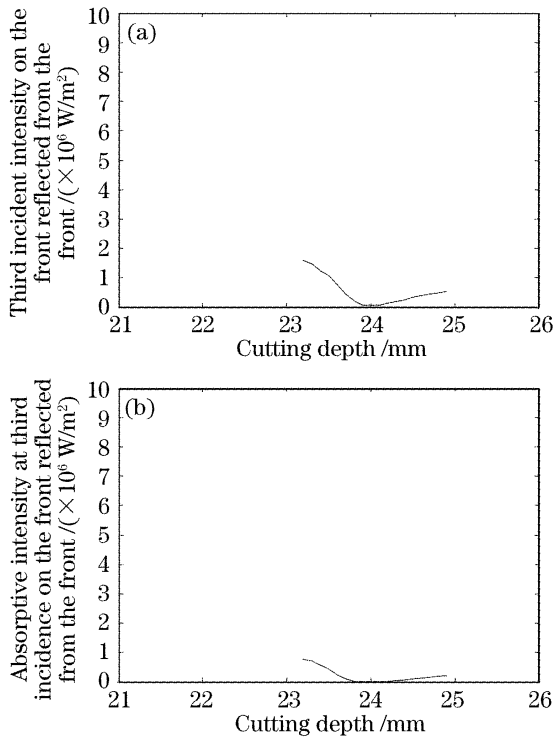


图6 第三次入射(前沿二次反射)到前沿的激光功率密度(a)和前沿时前沿吸收的激光功率密度(b)

Fig. 6 Third incident intensity (a) and absorptive intensity at third incidence (b) on the front reflected from the front

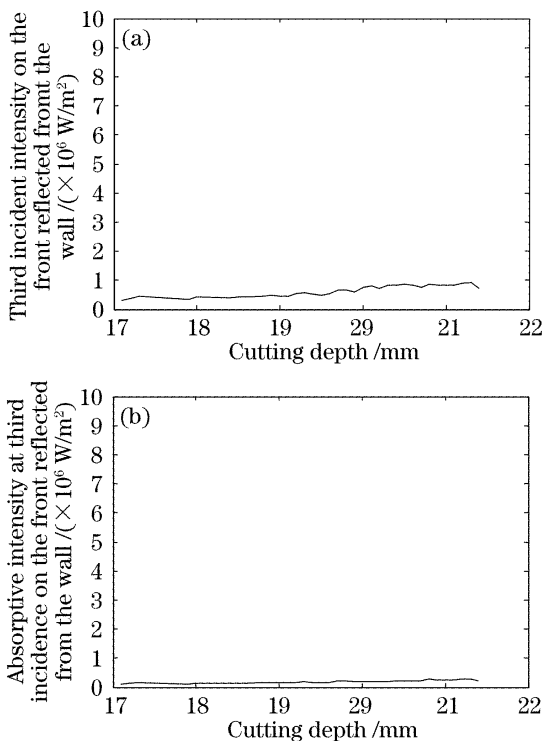


图7 第三次入射(壁面二次反射)到前沿的激光功率密度(a)和前沿吸收的激光功率密度

Fig. 7 Third incident intensity (a) and absorptive intensity at third incidence (b) on the front reflected from the wall
已经很小了。同理,第三次入射(壁面二次反射)到切割前沿的功率密度分布和吸收的激光功率密度也很小,如图7所示。

综合以上三次入射情况,将各图中横坐标点(即相同前沿深度,亦即相同前沿位置)所对应的纵坐标值(即入射激光功率密度和吸收激光功率密度)叠加在一起,就可以得到前三次入射过程到前沿上各点的总激光功率密度分布,如图8所示。图(a),(b)中数字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。从图中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影响,增强了那些部位的功率密度,具体表现在前沿本身的多次反射增强了前沿底部的功率密度,而壁面的多次反射增强了中下部位的功率密度。正是由于反射的存在,才使得整个前沿都有激光功率分布,这也与激光总是朝着前沿底部传输的现象相符合。从总的功率密度分布来看,可认为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。

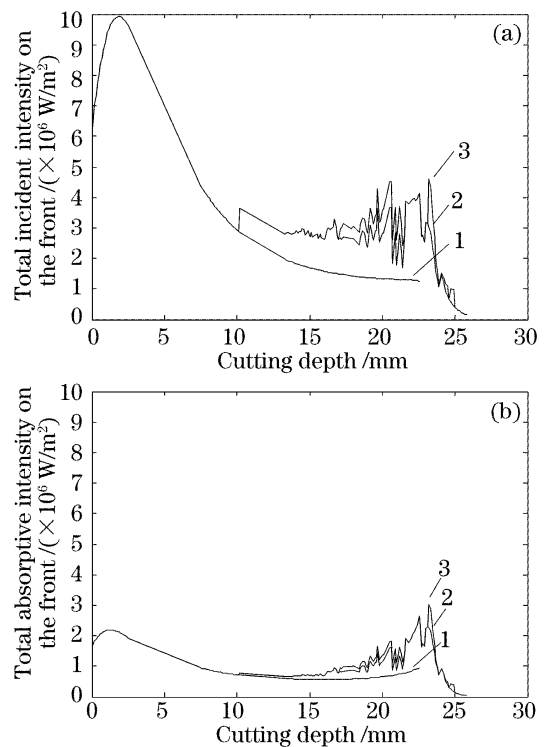


图8 入射到前沿时的总激光功率密度(a)和吸收的总激光功率密度(b)

Fig. 8 Total incident intensity (a) and total absorptive intensity (b) on the front

4 结 论

实验拍摄到前沿曲线和切缝曲线的照片,基于壁面聚焦效应理论,分析建立了激光气化切割高吸收率非金属材料的三维能量耦合模型,分析了实际弯曲切割前沿和两壁面对激光的反射和能量吸收过程。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),前沿本身的多次反射增强了前沿底部的功率密度,而壁面的多次反射增强了前沿中下部位的功率密度。正是由于多次反射的存在,使得整个前沿都有功率密度分布。多次反射的影响不能忽略不计。

参 考 文 献

- 1 Li Lijun. Modern Laser Processing and Equipment [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 161~162
李力钧. 现代激光加工及其装备 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 161~162
- 2 D. Schuocker. The Physical Mechanism and Theory of Laser Cutting [M]. In: Belforte, D. and Levitt, Eds. The Industrial Annual Handbook, New York: Pennwell Publishing Co., 1987. 65~79
- 3 V. P. Babenko, V. P. Tychinskii. Gas-jet laser cutting (review) [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1973, **2**(5): 399~410
- 4 M. F. Modest, H. Abakians. Evaporative cutting of a semi-infinite body with a moving CW laser [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1986, **108**: 602~607
- 5 M. Vicanek, G. Simon. Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, **20**: 1191~1196
- 6 Xie Xiaozhu. Study on the mechanism and key technique of CO₂ laser cutting nonmetallic materials based on wall focusing effects [D]. Changsha: Hunan University, 2006
谢小柱. 基于壁面聚焦效应的 CO₂ 激光切割非金属材料机理和关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006