

文章编号: 0258-7025(2001)11-1041-04

## 管径和光斑影响激光切割开始瞬间 吸收率的分析\*

黄开金<sup>1</sup> 谢长生<sup>1</sup> 邵可然<sup>2</sup> 许德胜<sup>3</sup>

(华中科技大学<sup>1</sup> 国家模具技术重点实验室,<sup>2</sup> 电力工程系,<sup>3</sup> 激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

**摘要** 从理论上研究了曲率半径(管径)和激光光斑直径对304不锈钢管材和板材激光切割时开始瞬间吸收率的影响。结果表明,当激光光斑直径 $d$ 与物体外表面的管径(曲率半径) $D$ 之比大于0.866时,它们对激光切割开始瞬间吸收率的影响不能忽略,且随着管径(曲率半径)的减小或激光光斑直径的增大,激光切割开始瞬间吸收率增大。

**关键词** 激光切割, 吸收率, 曲率半径

**中图分类号** TN 249 **文献标识码** A

### Theoretical Analysis of the Effects of Pipe Diameter and Laser Beam Diameter on the Initial Instantaneous Absorptivity of Laser Cutting

HUANG Kai-jin<sup>1</sup> XIE Chang-sheng<sup>1</sup> SHAO Ke-ran<sup>2</sup> XU De-sheng<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>The State Key Laboratory of Plastic Forming Simulation and Mould Technology,

<sup>2</sup>Department of Electric Engineering, <sup>3</sup>The State Key Laboratory of Laser Technology,

Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan 430074)

**Abstract** The effects of curvature radius(pipe diameter) and laser beam diameter on the initial instantaneous absorptivity of laser cutting for 304 stainless steel pipe and plate were investigated theoretically. The theoretical analysis showed that the pipe diameter  $D$  and the laser beam diameter  $d$  had important effect on the initial instantaneous absorptivity of laser cutting as the ratio of  $d$  to  $D$  is bigger than 0.866, and the initial instantaneous absorptivity of laser cutting increases with the pipe diameter (curvature radius) decreases or the laser beam diameter increases.

**Key words** laser cutting, absorptivity, curvature radius

## 1 引言

材料表面的吸收率与入射激光波长、材料表面温度、材料表面几何形状、材料表面状态、激光束的偏振方向、材料表面上方是否存在等离子体等众多因素有关。而激光切割时,无论何种几何形状的物体,都包括激光开始辐照材料表面瞬间和材料表面熔化后被辅助气体吹除而形成有一定倾斜角度的切割前沿两个阶段。目前国内外学者只关注后面阶段的激光吸收率<sup>[1-9]</sup>,而极少关注开始阶段的激光吸

收率。一般认为金属材料在室温下对 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ 的 $\text{CO}_2$ 激光的吸收率非常低(小于0.05),只有温度接近材料的熔点时,吸收率才达到0.4~0.5<sup>[10]</sup>。只考虑第二阶段激光吸收率的处理方法对于小光斑条件下的板材和大管径管材的激光切割是正确的,而对于光斑大小与管径(曲率半径)相当的管材激光切割过程而言,则是不够的。因为在进行小管径管材的激光切割过程中,要获得与大管径的管材或板材相同切割质量的切缝是非常困难的,特别是当激光光斑直径和管材外径可比时(如广泛用于航空、机电、仪器、仪表元件的1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢冷拔(轧)小直径钢管<sup>[11]</sup>),这种情况特别突出。除了曲率半径效应和热积累效应外<sup>[12]</sup>,还与激光开始瞬间吸收率的增大有关。而激光开始瞬间吸收率的变

\* 国家自然科学基金(CN59635170)和华中科技大学激光技术国家重点实验室开放基金资助项目。

收稿日期:2000-08-02; 收到修改稿日期:2000-10-27

化,势必影响随后激光切割前沿的几何形状,进而影响管材激光的质量,因此有必要开展这方面的研究。

本文就曲率半径(管径)和激光光斑直径对304不锈钢管材和板材激光切割开始瞬间吸收率的影响进行理论分析。

## 2 理论分析

国内外的大量研究表明<sup>[4-9]</sup>,无论何种偏振特性的激光束,吸收率 $\alpha_i$ 和入射激光束光轴与材料表面法矢之间的夹角 $\beta_1$ 密切相关。

对于板材和管材激光直线切割方式而言,当激光束垂直入射时,由于板材和管材外表面几何形状的不同(板材的外表面为平面;管材的外表面为空间曲面),导致材料表面法矢与入射激光束光轴之间的夹角 $\beta_1$ 不同。其中管材的夹角 $\beta_1$ 在一定范围内变化( $[\beta_1 \in [0^\circ, \arcsin(d/D)]]$ ,其中 $d$ 为光斑直径, $D$ 为管材外直径),而板材的夹角 $\beta_1 = 0^\circ$ ,从而影响二者吸收的入射激光能量。

由于激光开始辐照板材和管材表面时的夹角 $\beta_{\text{max}}$ 不同,引起二者表面吸收率的不同<sup>[5]</sup>。这样一来,因吸收率不同而造成二者吸收的激光能量不同,进而使随后的切割前沿倾斜面几何形状不同。切割前沿倾斜面的几何形状不同,再次引发夹角 $\beta_{\text{max}}$ 的不同,吸收率的不同,吸收的激光能量不同,如此循环下去。

根据光的折射定律和非涅耳公式,可计算圆偏振激光(实际激光切割时多数采用圆偏振)在切割前沿倾斜面上的表面吸收率,具体过程如下:

在激光切割前沿倾斜面上任取一微元,该微元与原坐标系的关系见图1,其中微元与 $x$ 轴和 $y$ 轴的夹角分别为 $\varphi$ 和 $\phi$ ,且 $\varphi$ 和 $\phi$ 均为与时间、光斑大小和管径等参数有关的变量。假定切割前沿倾斜面上下两侧为气体及工件材料两种介质,其中气体的折射率 $n_1 = 1$ ,材料的复折射率 $\vec{n}_2 = n_2 - ik_2$ ;切割前沿倾斜面为光滑表面;激光透工件材料的透射率为零;不考虑切割前沿倾斜面上的等离子体吸收效应<sup>[6]</sup>。

由光的折射定律(Snell定律)可知

$$n_1 \sin \beta_1 = \vec{n}_2 \sin \beta_2 \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \cos \beta_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi + \tan^2 \phi}} \quad (2)$$

又由非涅耳公式<sup>[13]</sup>可求得界面处平行或垂直入射面的反射率分别为

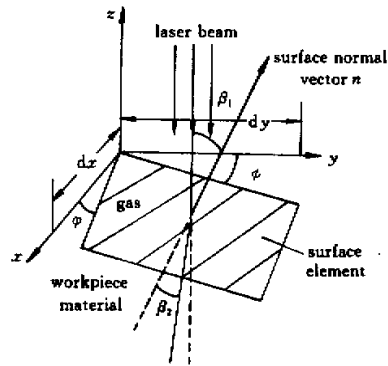


图1 在切割前沿倾斜面上的微元表面反射示意图

Fig.1 Schematic of surface reflection on the cutting front

$$R_p = \frac{|\vec{n}_2 \cos \beta_1 - n_1 \cos \beta_2|^2}{|\vec{n}_2 \cos \beta_1 + n_1 \cos \beta_2|^2} \quad (3)$$

$$R_s = \frac{|n_1 \cos \beta_1 - \vec{n}_2 \cos \beta_2|^2}{|n_1 \cos \beta_1 + \vec{n}_2 \cos \beta_2|^2} \quad (4)$$

对于圆偏振激光束而言,其界面反射率可用 $P$ 偏振面和 $S$ 偏振面之和的平均值代替,即切割前沿倾斜表面的吸收率为

$$\alpha_i = 1 - R_f = 1 - \frac{R_p + R_s}{2} \quad (5)$$

假定激光切割前沿倾斜面在整个切割深度方向保持光滑面不变,且与水平面的夹角为 $\gamma$ (图2)。考察几种极端情况:

①当 $\gamma = 0^\circ$ 时,激光切割前沿倾斜面为水平面,即激光切割开始垂直辐照表面瞬间的情况。

对于板材而言,由于在整个激光辐照区域内均为平面,故入射角 $\beta_1 = 0^\circ$ ,由式(1)和式(3)~(5)得

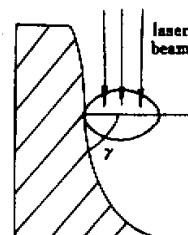


图2 激光切割前沿倾斜面与水平面夹角 $\gamma$ 的定义

Fig.2 Definition of the inclination angle  $\gamma$  of the cutting front in relation to the horizontal plane

$$\alpha_i = 1 - R_f = 1 - \frac{R_p + R_s}{2} = \frac{4n_2}{(n_2 + n_1)^2 + k_2^2} \quad (6)$$

式(6)就是一般参考书上经常给出的计算吸收率公式<sup>[10]</sup>,其适用条件就是激光垂直入射平板金属。

对于管材而言,由于在整个激光辐照区域内为一空间曲面,入射角  $\beta_1 \in [0^\circ, \arcsin(d/D)]$ ,由式(1)和式(3)~(5)可求出吸收率  $\alpha_i$  的变化范围,具体情况见计算实例部分(第3节)。

② 当  $\gamma = 90^\circ$  时,激光切割前沿倾斜面垂直于水平面,此时入射角  $\beta_1 = 90^\circ$ ,由式(1)和式(3)~(5)得  $\alpha_i = 0$ 。

③ 当  $\gamma \in (0^\circ, 90^\circ)$  时,激光切割前沿倾斜面为斜面(分斜平面和斜曲面两种情况)。

当激光切割前沿倾斜面为斜平面时,由于  $\phi$  和  $\varphi$  保持不变,因此  $\beta_1$  在整个切割深度范围内也保持不变(式(2)),这样一来,  $\beta_2$  在整个切割深度范围内保持不变(式(1)),从而有  $R_p$ ,  $R_s$  和  $\alpha_i$  在整个切割深度范围内保持不变(式(1)和式(3)~(5))。

当激光切割前沿倾斜面为曲面时,由于  $\phi$  和  $\varphi$  不断变化,因此  $\beta_1$  在整个切割深度范围内也不断变化(式(2)),这样一来,  $\beta_2$  在整个切割深度范围内不断变化(式(1)),从而有  $R_p$ ,  $R_s$  和  $\alpha_i$  在整个切割深度范围内不断变化(式(1)和式(3)~(5))。

其中②和③是当激光切割倾斜前沿形成之后的情况。由于受开始瞬间吸收率(情况①)的影响,因此对于板材和管材而言,它们分别对应的激光切割倾斜面是不同的。有关这方面的计算是十分复杂的。文献[5]对板材直线切割时切割前沿倾斜面的激光吸收率进行了初步计算。

总之,对于情况③而言,  $\alpha_i$  是一个变数,确定起来十分困难,一般只能根据实验结果估算。而这种情形正是二维板材和三维管材激光切割前沿常见的几何形状。

### 3 计算实例

文献[6]给出了304不锈钢的复折率,其中  $n_2 = 17.87$ ,  $k_2 = 28.5$ 。利用式(1)和式(3)~(5)便可计算出不同  $\beta_1$  条件下的表面激光吸收率。计算结果见图3所示(图中给出了圆偏振, P偏振和S偏振三种激光束的吸收率)。由图可知,圆偏振激光表面吸收率在  $\beta_1 = 88^\circ$  时达到最大值。

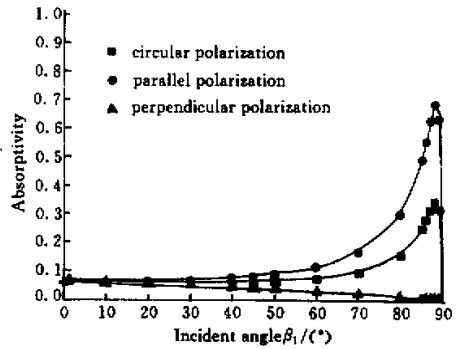


图3 激光入射角  $\beta_1$  与吸收率的关系

Fig.3 Surface absorptivity vs incident angle  $\beta_1$  for 304 stainless steel

对于板材而言,由于在整个激光辐照区域内均为平面,故入射角  $\beta_1 = 0^\circ$ 。由图3可知,其表面瞬间激光吸收率  $\alpha_i = 0.061$ 。

对于管材而言,由于在整个激光辐照区域内为一空间曲面,入射角  $\beta_1 \in [0^\circ, \arcsin(d/D)] = [0^\circ, 90^\circ]$ 。由图3可知,其表面瞬间吸收率  $\alpha_i$  则在  $[0, 0.346]$  范围内变化。事实上,当  $D \rightarrow \infty$  时,入射角  $\beta_1 = 0^\circ$ ,即回归到板材激光切割时的情况。

此外,当  $\beta_1 \in [0^\circ, 60^\circ]$  时,对应的表面激光吸收率  $\alpha_i \in [0.061, 0.075]$ ,此时对应的  $d/D = \sin 60^\circ = 0.866$ ;当  $\beta_1 \in [0^\circ, 88^\circ]$  时,对应的表面激光吸收率  $\alpha_i \in [0.061, 0.346]$ ,此时对应的  $d/D = \sin 88^\circ = 0.999$ ;当  $\beta_1 \in [0^\circ, 90^\circ]$  时,对应的表面激光吸收率  $\alpha_i \in [0, 0.346]$ ,此时对应的  $d/D = \sin 90^\circ = 1$ 。应该指出的是,由于吸收率  $\alpha_i$  与入射角  $\beta_1$  并非呈单调增加关系,而是在  $\beta_1 = 88^\circ$  时出现极大值( $\alpha_{i, \max} = 0.346$ ),因此当  $\beta_1 \in [0^\circ, 90^\circ]$  时,吸收率  $\alpha_i$  的上下限并非分别对应  $\beta_1 = 0^\circ$  和  $\beta_1 = 90^\circ$  时的  $\alpha_i$  值。

可见,对于304不锈钢而言,当  $d/D \geq 0.866$  时,曲率半径(管径)和激光光斑直径对激光切割开始瞬间吸收率的影响是非常大而不能忽略的。即当  $\gamma = 0^\circ$ ,激光光斑直径  $d$  不变,且  $d/D \geq 0.866$  时,随着曲率半径(管径  $D$ )的减小,激光切割开始瞬间的吸收率增大;或当  $\gamma = 0^\circ$ ,管径  $D$  不变,且  $d/D \geq 0.866$  时,随着激光光斑直径  $d$  的增大,激光切割开始瞬间的吸收率也增大。

应该指出的是,激光切割一般管材和板材时所采用的激光光斑直径  $d$  为  $0.2 \sim 0.5$  mm,因此,对于 304 不锈钢而言,要出现这种有明显影响的管材直径  $D$  应为  $0.23 \sim 0.58$  mm。而 GB3090-82 所给出的最小管径为  $0.32$  mm,因此进行这种研究还是有意义的。当然,一般管材的直径都超出有明显影响的管材直径  $D$  的范围,因此在通常情况下,可以不考虑这种影响。我们认为这就是人们极少考虑此种影响的原因,但对于小管径管材的激光切割而言,则应考虑材料开始瞬间吸收率的影响。

此外,不同材料的复折射率不同,因此所得的曲率半径(管径)和激光光斑直径对激光切割开始瞬间吸收率有影响的最小  $d/D$  比值也是不同的(式(1)和式(3)~(5))。

#### 4 讨论

从理论上讲,当用激光作为热源切割材料时,无论所切割对象的几何形状如何,其表面开始瞬间吸收率  $\alpha_s$ , 应该是激光光斑范围内各个微元吸收率之和的平均值。理所当然包括激光光斑的中央部分和边缘部分。在其他参数相同的情况下,材料表面开始瞬间吸收率  $\alpha_s$  与激光入射角  $\beta_1$  密切相关(图 3)。

对于 304 不锈钢板材的激光切割,在激光光斑范围内,由于从中央部分到边缘部分均有  $\beta_1 = 0^\circ$ , 因此板材表面的开始瞬间吸收率  $\alpha_s = 0.061$ (图 3)。

对于 304 不锈钢管材的激光切割,在激光光斑范围内,由于从中央部分到边缘部分的入射角  $\beta_1$  由  $0^\circ$  逐步变化到  $\arcsin(d/D)$ , 因此管材表面各个微元的开始瞬间吸收率  $\alpha_s$  从  $0.061$  变化到  $0.346$ , 最后变化到  $0$ , 故管材表面的开始瞬间吸收率为(根据图 3 中计算出的  $\beta_1$  和  $\alpha_s$  值计算):

$$\alpha_s \approx (0.06118 + 0.06118 + 0.06119 + 0.06129 + 0.06176 + 0.06331 + 0.06453 + 0.06675 + 0.07479 + 0.09469 + 0.15572 + 0.24795 + 0.27938 + 0.31523 + 0.34563 + 0.31755 + 0)/17 = 0.13718.$$

可见,它约为板材表面开始瞬间吸收率  $\alpha_s$  的 2 倍。

应该指出的是,至于激光光斑中央处和边缘处被辐照材料最终所吸收的激光能量大小,不仅与其所在处的吸收率  $\alpha_s$  大小有关,而且还与激光光斑的能量分布曲线有关。

#### 参 考 文 献

- 1 P. Di Pietro, Y. L. Yao. A numerical investigation into cutting front mobility in CO<sub>2</sub> laser cutting. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1995, 35(5):673~688
- 2 S.-L. Chen. Thermal modelling of cutting front edge dynamic behaviour in high-power reactive CO<sub>2</sub> laser cutting. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1998, 212(B7):555~570
- 3 M. J. Hsu, P. A. Molian. Thermochemical modelling in CO<sub>2</sub> laser cutting of carbon steel. *J. Mater. Sci.*, 1994, 29(21):5607~5611
- 4 S.-L. Chen. Analysis and modelling of reactive three-dimensional high-power CO<sub>2</sub> laser cutting. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 1998, 212(B2):113~128
- 5 D. Petring, P. Abels, E. Beyer. The absorption distribution as a variable property during laser beam cutting. *ICALEO'88*, 1988. 293~302
- 6 L. Cai, P. Sheng. Analysis of laser evaporative and fusion cutting. *J. Manuf. Science Eng.*, Transactions of the ASME, 1996, 118(2):225~234
- 7 IIW. The laser cutting process. *Weld World*, 1987, 25(5/6):78~89
- 8 F. O. Olsen. Investigation in optimising the laser cutting process, *Lasers in Materials Processing*, Edited by E. A. Metzbowner, Conference Proceedings, ASM, 1983. 64~80
- 9 W. Schulz, G. Simon, H. M. Urbassek *et al.*. On laser fusion cutting of metals. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1987, 20(4):481~488
- 10 Wang Jiajin (chief-editor). *Laser Processing Technology*. Beijing: China Measurement Press, 1992. 111~113 (in Chinese)
- 11 Stainless steel small diameter steel tubes, GB3090-82 (in Chinese)
- 12 Huang Kaijin, Zeng Dawen, Xie Changsheng. The effects of curvature radius and cutting speed on the top kerf width of laser cutting of thin pipe with a small diameter. *Laser Technology (激光技术)*, 2000, 24(1):51~54 (in Chinese)
- 13 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics (Volume One)*. Beijing: Science Press, 1978. 61~64 (in Chinese)