

文章编号: 1001-3806(2003)03-0178-04

## 氧助散焦激光切割厚板的稳态工作条件

邓德圣 刘建华 胡席远 曹 阳

(华中科技大学材料科学与工程学院激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

**摘要:**介绍了散焦法的原理和特点,分析了形成稳态切割的条件,并用有限元方法对切割温度场进行了数值模拟,在此基础上得出散焦光斑直径、切割速度、激光功率等参数对切割质量的影响规律,预测了 20mm 板的切割速度范围。用散焦法进行了切割实验。结果表明,散焦法可以成功切割 12mm,20mm 厚钢板,同时也说明数值模拟预测结果与实验结果非常接近。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 激光切割;散焦法;温度场;数值模拟;厚板

**中图分类号:** TG485 **文献标识码:** A

## Steady-state conditions for oxygen assisted lasox laser cutting of thick plates

Deng Desheng, Liu Jianhua, Hu Xiyuan, Cao Yang

(National Laboratory of Laser Technology, School of Materials Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The principles and characteristics for lasox laser cutting of thick plates are presented in this paper. The steady-state conditions for the cutting were analyzed. The finite element method was used to simulate the surface temperature field along the centerline position in the cutting process. Based on this result, cutting quality was evaluated by the function of beam diameter, cutting speed and incident power. The range of cutting speed was also predicted for 20mm thick plates. A cutting experiment was made and the results shown that 12mm and 20mm thick plates could be cut successfully by the method, at the same time, a reasonable agreement between the numerical simulation and the experimental results was found.

**Key words:** CO<sub>2</sub> laser cutting; lasox; temperature field; numerical simulation; thick plate

### 引 言

30 余年来,激光切割技术获得了很大发展。对于切割 12mm 以下薄板,切割技术已经比较成熟。但如果要切割 12mm 以上厚板,则往往要使用 5000W 以上大激光器;或者使用 1000W 以上激光器而采用特殊工艺进行切割<sup>[1]</sup>。在钢结构、压力容器、船舶、桥梁等行业常常使用 12mm 以上钢板,而现役激光器功率大多在 2000W 以下。因而研究中小功率激光器切割厚板,很有实际意义。目前使用激光切割厚板方法有预热法<sup>[1]</sup>、激光锯切法<sup>[2]</sup>、双聚焦法、散焦法等。这些方法各有优缺点。其中散焦法<sup>[3,4]</sup>于 1998 年由英国 Liverpool 大学 Neill, Gabzdyl 和 Stracey 研究并报道。他们也是目前世界上唯一报道研究这一方法的学者。本文中介绍了这种方法的原理和特点,分析了形成稳态切割的条件,

并用有限元方法对切割温度场进行了数值模拟,在此基础上得出散焦光斑直径、切割速度、激光功率等参数对切割质量的影响规律,并预测了 20mm 板的切割速度范围。另外,用散焦法并利用超音速喷嘴进行了 12mm,20mm 钢板切割实验。

### 1 散焦法原理

在使用惰性气体作为辅助气体的激光切割过程中,激光是唯一的热量提供者。而在氧助激光切割过程中,燃烧反应提供了大量能量。对切割时喷出物的研究表明<sup>[5]</sup>,氧化产物的 97.6% 为 FeO,其余为 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,Fe 燃烧生成 FeO 的反应焓为 257.58kJ/mol,计算可知,每千克铁完全燃烧可以产生 4716kJ 的热量。由于切割时约有 50%Fe 完全燃烧,因而可以计算出不同板厚、切缝宽度及切割速度情况下,燃烧提供的能量。切割所需能量由加热工件的能量、使工件熔化的能量、热传导损失的能量和氧流带走的能量组成。用激光切割 20mm St52 钢板所需能量为 5152W,而燃烧放出热量为

作者简介:邓德圣,男,1964 年 5 月出生。工学硕士,高级工程师。现主要从事激光加工等方面研究工作。

收稿日期:2002-01-15;收到修改稿日期:2002-08-23

7536W<sup>[2]</sup>。即 68.4% 的燃烧能量就足以提供切割所需全部能量。因此,从理论上讲,只要氧气供应充足,可切割板厚不受限制。在实际切割过程中,能切割板厚是有限的。这与切割前沿铁不能稳定燃烧有关。燃烧过程要持续稳定进行,切割前沿顶部即氧流前沿温度必须达到氧气燃点。单靠燃烧反应放出的能量不足以维持燃烧过程稳定进行。原因有两个,一是切割前沿被氧流连续冷却降低了温度;其二是燃烧生成物氧化亚铁覆盖了工件表面,阻碍了氧的扩散。当氧浓度降低到一定程度时,燃烧过程会停止。使用传统会聚光束进行切割时,由于作用区域小,激光功率高,所以,不仅仅在激光照射的区域工件表面温度达到燃点温度;而且由于热传导,更宽的区域达到燃点温度。由于氧流直径大于激光直径,不仅在激光作用区域要发生氧化燃烧反应,而且在激光光斑外围也会发生燃烧。厚板切割时,切割速度较慢,工件燃烧速度比切割头前进速度快;这样

燃烧持续一段时间后,由于氧浓度下降,燃烧熄灭。当切割头前进到该位置时,燃烧重新开始。这种燃烧过程的周期性变化导致切割前沿温度波动,切割质量下降。当采用散焦法进行切割时,焦点不是位于工件表面而是位于喷嘴内部,这样激光照射到工件上不是聚焦的而是发散的。光斑中小区温度下降,而光斑前沿温度上升。图 1 是散焦法实验示意图。

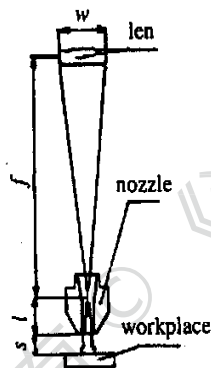


Fig. 1 Lasox cutting set up

照射到工件上的光斑直径可以由下式求出:

$$w_2 = w(l + s) / f \quad (1)$$

式中,  $w$  为镜片直径,  $f$  为镜片焦距,  $l$  为焦点到喷嘴端面距离,  $s$  为喷嘴端面到工件距离。合理调节焦点位置,保证作用在工件上的光斑直径大于氧流直径,即  $w_2 > w_1$ 。

Neill 等认为:激光作用区内温度可以达到燃点以上,这样可以确保氧流前沿温度在燃点以上,燃烧可稳定进行,切割质量高。事实上,光斑前沿温度不仅与光斑直径有关,而且与激光功率、切割速度、材料热物理性能等关系密切。因而,如果能用数值模拟方法预测温度场并确定稳态条件与相关参数的关系将很有实际意义。

## 2 切割温度场数值模拟

在散焦法切割过程中<sup>[3]</sup>,激光的主要作用不是在深度方向提供热量熔化金属,而是将被切割金属表面加热到燃点(约为 1000 )以上。在计算过程中只需考虑板材表面温度场而且只考虑激光的热作用。同时认为氧流直径与喷嘴出口直径相同。在实验及模拟过程中喷嘴出口直径为 2.3mm。

### 2.1 有限元方程

由于材料热物理性能随温度变化,因而采用非线性分析方法。有限元热平衡矩阵方程为:

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = [Q(T)] \quad (2)$$

式中,  $[C(T)]$  为比热容矩阵,  $\{\dot{T}\}$  为节点温度对时间导数向量,  $\{T\}$  为节点温度向量,  $[K(T)]$  为热传导矩阵,  $[Q(T)]$  为热流密度向量。

### 2.2 工艺参数

激光切割过程中,温度的高低、温度梯度的大小取决于板材的受热面积、板材吸收的热流密度和加热时间。激光热源的能量密度服从高斯分布,即

$$I = \frac{2AP}{r^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_b^2}\right)$$

。光束直径范围的平均热流密度为:

$$I_m = \frac{1}{r_b^2} \int_0^{r_b} I r dr = \frac{0.865AP}{r_b^2} \quad (3)$$

式中,  $A$  为板材对激光吸收率,取值为 0.3,  $P$  为激光功率,  $r_b$  为激光光斑半径,时间步长取值为  $t = r_b / 2v$ 。

### 2.3 钢板热物理性能

实验所用钢板为 20# 低碳钢板,其热物理性能如图 2 所示。

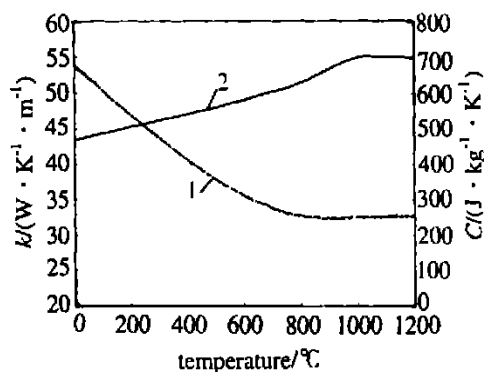


Fig. 2 Thermal data of 20# steel

1—thermal conductivity 2—specific heat

### 2.4 温度场数值模拟结果

2.4.1 激光光斑直径对温度场影响 图 3 表示光

斑直径与钢板表面温度的关系。图中横坐标表示沿移动中心线方向表面某点与光斑中心的距离,纵坐标表示该点表面温度。图中考虑了集中光斑, 2.5mm, 3mm 及 4mm 等 4 种光斑作用。其它参数为板厚 20mm、激光功率 1100W、切割速度 480mm/min。散焦光斑计算结果为有限元软件 ANSYS5.6 分析获得,而集中光斑结果则是根据 Rosenthal 公式

$$T = \frac{Q}{2 \cdot kR} \exp\left(-\frac{vx}{a}\right)$$

经解析计算获得。可以看出,光斑直径越小,高温区越集中于中心区。光斑直径越大,温度沿距离方向下降越平缓。根据经验,切割 20mm 以上厚板一般使用 2mm 以上出口直径喷嘴,切缝宽度在 2mm 以上。而集中光斑热源在前沿 1mm 处温度小于 600,远远小于氧气燃点温度 1000,不能形成稳态燃烧。因此,中小功率集中激光热源不适合切割厚板。当散焦光斑直径过大时,例如 4mm 以上时,由于板材表面光斑作用区内整体温度较低,也不适合切割厚板。而 2.5mm 光斑在 1.25mm 范围内能达到燃点,3mm 光斑在 1.5mm 范围内能达到燃点。因而这两种直径光斑适合切割厚板。而且,比较而言,3mm 光斑更适合切割厚板。

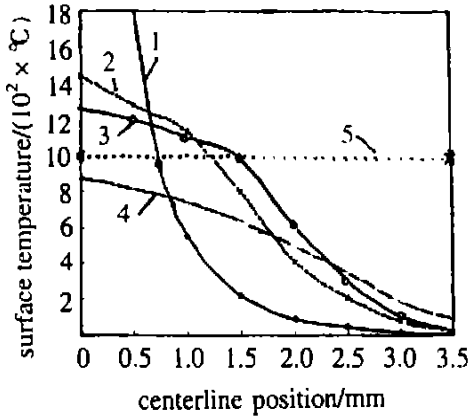


Fig.3 Centerline surface temperature as a function of beam diameter for 20mm thick steel at an incident power of 1100W & cutting speed of 480mm/min  
 1—analytical values for centralized beam 2—beam diameter 2.5mm 3—beam diameter 3mm 4—beam diameter 4mm 5—ignition temperature

2.4.2 激光头运动速度对表面温度场的影响 图 4 与图 5 分别表示在 1400W, 2.5mm 光斑及 1000W, 2.5mm 光斑作用下表面温度与切割速度的关系。可以看出,当激光功率为 1400W、切割速度为 150mm/min ~ 480mm/min 时,氧流前沿 1.15mm 处温度都处在 1000 以上,切割过程能形成稳态切割。而当功率为 1000W、只有当速度小于 320mm/min 时,前沿温度位于燃点以上,形成稳态切割。

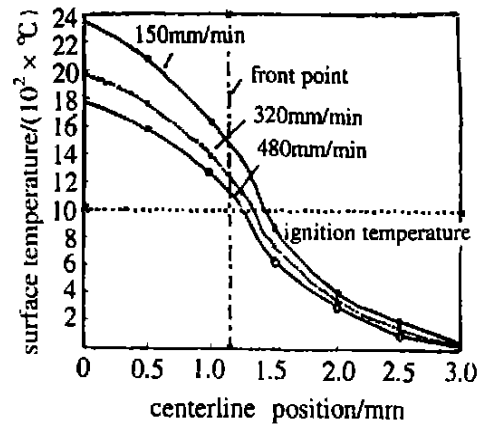


Fig.4 Centerline surface temperature as a function of velocity for 20mm thick steel at an incident power of 1400W & beam diameter of 2.5mm

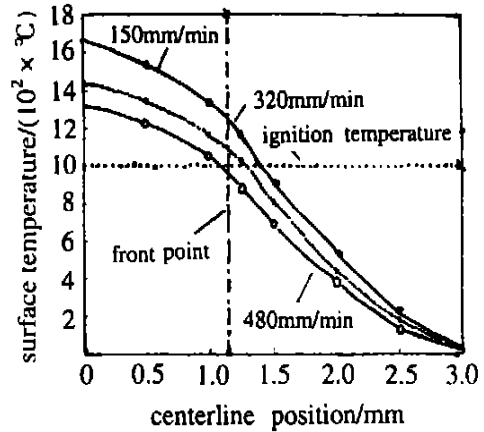


Fig.5 Centerline surface temperature as a function of velocity for 20mm thick steel at an incident power of 1000W & beam diameter of 2.5mm

2.4.3 激光功率对表面温度场影响 图 6 表示表面温度场与激光功率的关系。其它参数为:切割速度 480mm/min、散焦光斑直径 4mm、板厚 20mm。

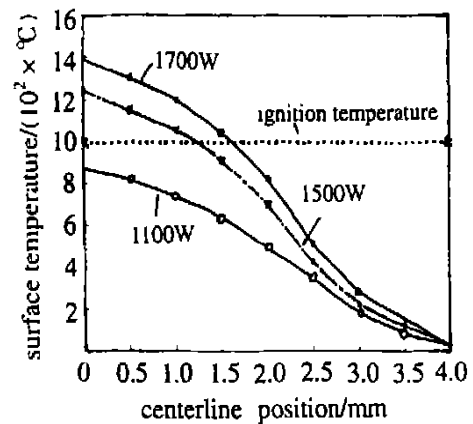


Fig.6 Centerline surface temperature as a function of incident power for 20mm steel at a cutting speed of 480mm/min & beam diameter of 4mm

可以看出,当功率提高时,各点温度相应提高。当激

光功率达到 1500W 时,前沿 1.5mm 处温度仍然在 1000 燃点以下。而当激光功率提高到 1700W 时,前沿 1.5mm 温度在 1000 以上。因此,4mm 光斑不适合中小功率激光切割厚板。而如果能够使用较大功率(例如 1700W)或者使用较小速度(小于 480mm/min),则 4mm 散焦光斑仍然可以切割厚板。具体参数可以用本文中提到的方法算出。

### 3 切割实验

为了验证散焦法切割厚板的可能性,同时为了验证数值模拟结果的正确性,笔者进行了 12mm 及 20mm 钢板切割实验。

#### 3.1 实验条件

使用 PRC2000 轴快流 CO<sub>2</sub> 激光器,在华中科大自制的专用切割机床上进行切割。镜片为 ZnSe 聚焦透镜,焦距为 127mm。喷嘴为超音速喷嘴,喉部直径 2.1mm,设计压力 0.8MPa。切割用氧气纯度为 99.99%。实验材料为 20# 钢板,尺寸分别为 12mm × 180mm × 300mm 及 20mm × 100mm × 200mm。

#### 3.2 实验结果与讨论

图 7 和图 8 为 20mm 和 12mm 板切割表面和切缝图片。可以看出,切缝平直,切割条纹细且均匀。



Fig. 7 Cutting surface and kerf of a 20mm thick plate, incident power 1kW, cutting speed 320mm/min, gas pressure 0.7MPa, stand-off 3.3mm, beam diameter 2.5mm, average surface roughness Ra = 24μm, kerf width 2.4mm



Fig. 8 Cutting surface and kerf of a 12mm thick plate, incident power 1kW, cutting speed 720mm/min, gas pressure 0.7MPa, stand-off 3.3mm, beam diameter 2.5mm, average surface roughness Ra = 40μm, kerf width 2.4mm

20mm 板切割实验表明,当激光功率 1000W、光斑直径 2.5mm、切割速度为 150mm/min ~ 320mm/min

时,切割过程稳定、切缝质量高。当切割速度提高到 400mm/min 时,质量明显下降。而当速度提高到 480mm/min 时,板材不能切透。由图 5 可以看出:当切割速度位于 150mm/min ~ 320mm/min 之间时,氧流前沿温度可以达到燃点以上,能够形成稳态燃烧,切割过程稳定;而当速度达到 480mm/min 时,前沿温度明显低于燃点,燃烧会形成周期性变化甚至熄灭,因而很难切透。当激光功率提高到 1400W 以上(例如 1500W 时)切割速度可以达到 480mm/min,这与图 4 结果是一致的。因此可以看出,实验结果与数值模拟分析结果非常吻合。

### 4 结论

(1) 厚板切割的稳态工作条件是散焦光斑直径大于氧流直径同时钢板氧流区域前沿温度达到燃点 1000 以上。

(2) 用有限元软件对切割表面温度场进行了数值模拟。结果表明:散焦光斑直径、切割速度、激光功率对前沿温度有很大影响。当用 1400W, 2.5mm 激光, 1100W, 3mm 激光切割 20mm 厚板时,切割速度范围都为 150mm/min ~ 480mm/min。通过对 2.5mm, 3mm, 4mm 3 种光斑切割温度场分析表明, 2.5mm, 3mm 两种光斑可以切割厚板, 3mm 光斑最合适。而 4mm 光斑则因要求较大功率不适合中小功率激光切割厚板。

(3) 用散焦法结合超音速喷嘴可以成功切割 12mm, 20mm 厚板。

(4) 数值模拟预测结果与实验结果非常吻合。

#### 参 考 文 献

- [1] Frank D J, Schulz D W. Welding Research Abroad, 1995, 41: 34 ~ 37.
- [2] Geiger M, Schuberth S, Hufless J. Welding in the World, 1996, 37 (1): 5 ~ 11.
- [3] Neill W O, Gabzdyl J T, Stracey R. Section B- ICAL EO, 1998: 88 ~ 96.
- [4] Neill W O, Gabzdyl J T. Opt & Lasers in Engng, 2000, 34: 355 ~ 367.
- [5] Ivarson A, Powell J, Magnusson C. Welding in the World, 1992, 30(5/6): 116 ~ 125.