

文章编号: 0258-7025(2006)11-1580-05

激光切割质量的在线评价方法

张永强^{1,2}, 吴艳华¹, 陈武柱¹, 张旭东¹

(¹ 清华大学机械工程系, 北京 100084; ² 首钢技术研究院, 北京 100041)

摘要 在工艺实验的基础上,建立了切割面分层理论模型。实验研究和模型分析均表明:切割面近下缘处是切割质量的最薄弱环节,此处粗糙度最高,切割前沿在下缘处的温度是决定下缘质量的主要因素。提出以近下缘粗糙度作为切割质量评价和检测的主要指标,建立了火花簇射的视觉检测系统,从侧面研究了切割过程中的火花簇射行为,发现火花簇射视觉图像特征与切割速度以及切割面近下缘粗糙度之间具有良好的对应关系:随着切割速度的变化,最高的火花簇射出口温度(亮度)对应于最低的切割面近下缘粗糙度,此时的切割速度为该工艺条件下的最佳切割速度,从而实现了对切割面下缘质量的在线检测。

关键词 激光切割;质量评价;在线检测;火花簇射

中图分类号 TG 485;TG 487 **文献标识码** A

On-line Method for Evaluation of Laser Cutting Quality

ZHANG Yong-qiang^{1,2}, WU Yan-hua¹, CHEN Wu-zhu¹, ZHANG Xu-dong¹

(¹ *Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)
(² *Shougang Technical Research Institute, Beijing 100041, China*)

Abstract A laminated model of cutting face for evaluating cutting quality has been built up on the basis of cutting experiments. The experimental results and the theoretical analysis of the model show that, the lower part of the cutting face, adjacent to the bottom edge, has the worst cutting quality due to its worst roughness. The quality of the bottom face is mainly depended on the temperature of the lowest part of cutting front. Therefore, the method with this roughness as the main criterion for quality evaluation and detection is reasonable. The behavior of sparks has also been investigated by side imaging the sparks jet. It is found that the sparks behaviors are related to both the cutting speed and the roughness of the bottom face. The maximum temperature at the exit of sparks occurs at the status of the best roughness of the bottom face, which relates to the optimal cutting speed. Based on the method, on-line quality monitoring of lowest part of cutting front has been realized.

Key words laser cutting; quality evaluation; on-line monitoring; sparks jet

1 引言

激光切割是在极小区域发生的极其剧烈的物理和化学过程,输入的热量聚集在极小的区域使材料迅速升温,熔化的金属被吹除形成切缝。虽然切割质量的评价指标很多^[1~3],但优质激光切割的重要特征是具有光滑的切割表面(粗糙度低)。由于切割面粗糙度的分布并不均匀,因此其测量位置目前还

未有统一的标准。目前采用较多的是测量距离下表面1/3处的粗糙度,但该方法并不能代表切割面质量最差的部位。在切割过程中,影响切割质量的因素很多,仅仅通过固定的切割规范难以获得均匀稳定的切割质量,因此,对切割质量的在线检测与控制是保证切割质量的关键。目前已有的在线检测手段仅能实现切割缺陷的监测和切割面上部粗糙度的测

收稿日期:2006-04-29; **收到修改稿日期:**2006-05-31

基金项目:国家自然科学基金(50175061),清华大学重点研究基金(012-101050)和宝山钢铁股份有限公司资助项目。

作者简介:张永强(1978—),男,清华大学机械工程系博士研究生,主要从事数控系统、激光切割过程中激光与材料相互作用以及过程检测研究。E-mail:zhyq01@gmail.com

导师简介:陈武柱(1939—),男,广西人,清华大学机械工程系教授,博士生导师,主要从事激光加工及其过程检测与控制方面的研究。E-mail:cwz-dme@mail.tsinghua.edu.cn

量^[4~6],未能达到测量切割面最差部位的要求。

针对这一现状,建立了切割面质量分布的分层模型,提出基于切割面下缘粗糙度的切割质量评价方法,并通过在线检测的方法研究最低下缘粗糙度对应的特征信号。

2 切割面质量分布特征分析

2.1 切割面粗糙度的分布

图 1(a)为激光切割 3 mm 钢板的表面形貌照片,其中 A, B, C, D 四个位置的深度分别为 0.5 mm, 1.5 mm, 2.0 mm 和 3.0 mm (略小于 3.0 mm),图 1(b)表示不同位置处对应粗糙度的变化情况。从图中可以看出,随着深度的增加,表面粗糙度不断增加。靠近下缘的位置 D 是切割面粗糙度最高的位置,是切割面质量的薄弱环节。

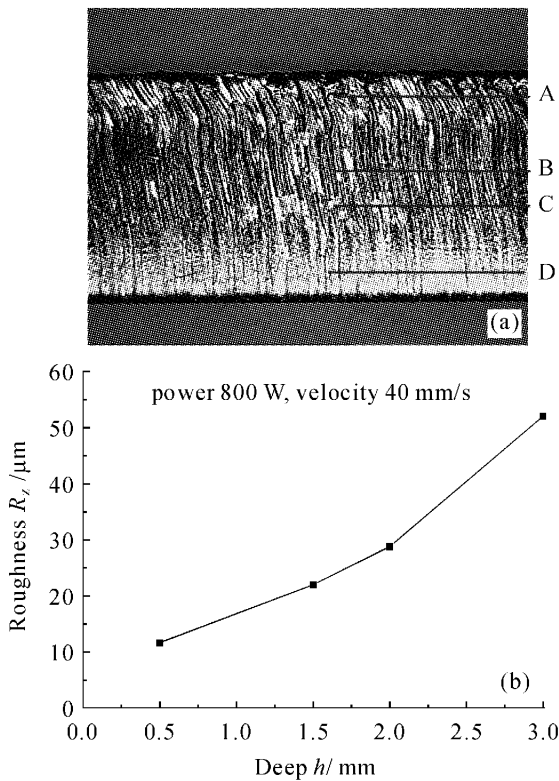


图 1 切割面粗糙度的分布

(a) 切割面照片;(b) 粗糙度随深度的变化

Fig. 1 Distribution of roughness on cut face

(a) photograph of cut face; (b) roughness varying with deep

2.2 切割面质量分布的分层模型

切割面表面形态随深度变化并不均匀,表明切割过程中前沿不同深度处经历了不同的物理和化学过程。为考虑深度上的变化,建立了分层模型如图 2 所示。将工件在厚度方向分为 n 层, t 时刻切割前沿的位置如图中 A, B_t 所示,黑色部分为前沿覆盖的

一层熔化金属及其氧化物,由于激光相对材料的运动速度为 $v, t + \Delta t$ 时刻前沿的位置变为 $A_{t+\Delta t} B_{t+\Delta t}$ 。虽然在实际切割过程中,切割前沿由于周期性的吹除具有一定的波动,但考虑平均的去除效果, $A_t B_t$ 与 $A_{t+\Delta t} B_{t+\Delta t}$ 具有相同的形状。

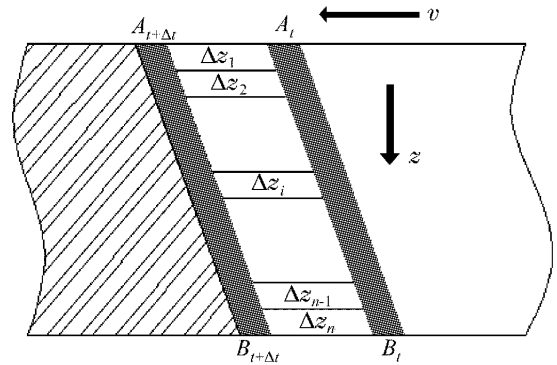


图 2 切割面的分层模型

Fig. 2 Laminated model of cutting face

考虑第 i 层 Δz_i ,在 Δt 时间内新产生的熔化金属的体积 $V_{\Delta z_i \Delta t}$ 可以表示为

$$V_{\Delta z_i \Delta t} = v \Delta t \cdot W \cdot \Delta z_i = v \Delta t \cdot W \cdot \frac{h}{n}, \quad (1)$$

式中 h 为材料厚度, W 为切缝宽度。

在高压气流的作用下,熔化金属不能直接脱离切割前沿,而是沿着前沿向下运动,最终在下缘处排除。若熔化金属未出现滞留现象,在 Δt 时间内,流经第 i 层的熔化金属的体积可以表示为

$$V_{i, \Delta t} = v \Delta t \cdot W \cdot \frac{i-1}{n} h, \quad (2)$$

单位时间内流过第 i 层熔化金属的体积为

$$V_i = v \cdot W \cdot \frac{i-1}{n} h, \quad (3)$$

单位时间内流过第 i 层熔化金属的流速为

$$v_{\text{flow}, i} = v \cdot \frac{i-1}{n}, \quad (4)$$

从(4)式可见,如不发生滞留,则每层所必须达到的流速与该层的位置和切割速度有关:1) 越靠近切缝下表面熔化金属及其氧化物流过所需要达到的流速越大,在切缝的下缘处达到最大值;2) 切割速度越快,相同位置 z 上所需要达到的流速也越大。

黏度是物质的物理特性之一,液态物质流速增加将受到黏度特性的制约。物质的黏度并非恒定,它随温度的变化而改变。Fe 及其氧化物 FeO 的粘度均随温度的增加而降低,温度对于 FeO 的影响尤其明显。因此,温度的高低将影响其黏度的变化,直接影响局部流速能否达到要求。

在氧气辅助激光切割过程中,热源包括激光辐射和材料的化学反应两部分,下面分别阐述它们对切割面温度分布的影响。

从激光原理可知,一束沿 z 方向传播,功率为 P 的基模光束的光强可表示为

$$I(x, y, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(z)}\right], \quad (5)$$

经过透镜聚焦后,光腰处的半径 w_0 可以表示为

$$w_0 = \lambda f / (\pi R), \quad (6)$$

式中 λ 为光波波长, f 为透镜焦距, R 为入射光斑半径。

距离束腰位置 z 处的光斑半径 $w(z)$ 可以表达为

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2}. \quad (7)$$

实验中使用的 CO_2 激光器波长 $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, 聚焦透镜焦距 $f = 127 \text{ mm}$, 入射激光直径 $D = 17 \text{ mm}$ 。根据(7)式,采用 Matlab 软件计算的激光束腰附近等强线分布如图 3 所示。

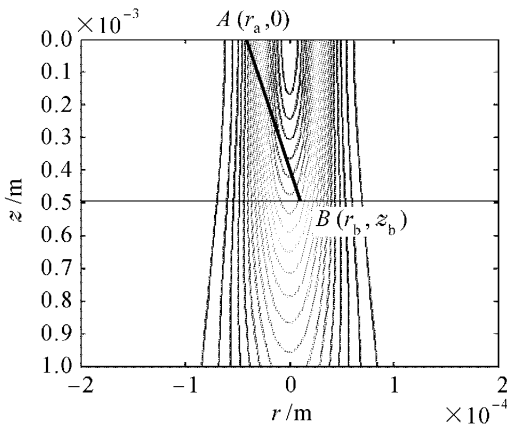


图 3 激光切割前沿激光辐照强度模型

Fig. 3 Model of laser radiation intensity on cut face

当切割参数发生改变时,切割前沿的倾斜角会发生一定变化:随着切割速度的增加,切割前沿与垂直方向的夹角随之增加。切割前沿倾斜角的变化,将改变前沿所受激光辐照强度的分布。为描述其变化规律,建立切割前沿激光辐照强度模型如图 3 所示。切割前沿与上表面交点 $A(r_a, 0)$, 与下表面交点 $B(r_b, z_b)$ 。为简化运算,模型做如下假设:1) 实际切割过程中,切割前沿几何形状较复杂,模型中仅以直线表示其倾斜状况;2) 实际切割过程中, A 点距离光束中心的距离 $|r_a|$ 随着速度的增加或功率的降低略有减小,模型中假设其恒定。

在此假设下,切割前沿的数学表达式为

$$r = \frac{r_b - r_a}{z_b} z + r_a. \quad (8)$$

算例如下:板厚 $h = 0.5 \text{ mm}$, A 点距离光束中心的距离 $|r_a| = 0.8 \cdot w_0$, 即 A 点坐标 $(0.8 \cdot w_0, 0)$, 在 B 点由 $(-0.4 \cdot w_0, h)$ 变化到 (w_0, h) 的过程中,切割前沿所受激光辐照强度的变化如图 4 所示,其中纵坐标表示与激光束腰中心处光强 I_0 的比值。从图中可以看出:1) 激光光束强度的空间分布和切割前沿几何形状的变化,决定激光辐射能量在切割前沿的分布情况;切割前沿所受辐照的分布随前沿倾斜角变化而改变:倾斜角较小时,切割前沿下部受辐照强度较高;2) 倾斜角较大时,切割前沿上部受到的辐射强度较高;3) 高的切割速度使前沿获得高辐照强度的同时,前沿下部受到的激光辐射强度下降。

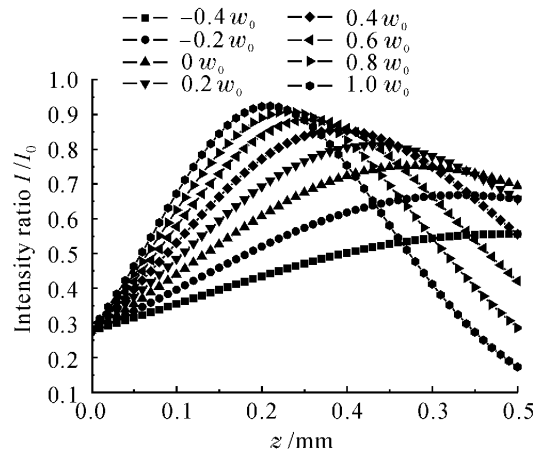


图 4 前沿激光辐照强度随 B 点位置的变化

Fig. 4 Variation of laser radiation intensity in different B position

在氧气辅助激光切割中,燃烧反应放出的热量是加工过程的另一重要能量来源。忽略金属中的合金成分和反应中产生的少量 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 , 由于燃烧反应的存在,切割前沿由外向里的主要物质依次为氧气、溶有氧气的液态氧化铁、铁和氧化铁的液态混合物、液态铁、固态铁。图 5(a)为切割前沿物质成分分布示意图,图中界面 1 为熔化前沿,3 为燃烧反应的前沿,穿过界面 3 的氧气将与 Fe 发生放热反应。

A. Ivarson 等^[1]从扩散理论出发,指出在界面 3 与界面 4 之间,氧气通过扩散作用穿透氧化层与 Fe 发生反应。从化学反应理论解释了“点燃-燃烧-熄灭-点燃”的燃烧循环过程中各个区域的变化规律:1) 氧气透过氧化层到达反应前沿 3,当 3 处氧气压力达到一定数值时与混合物中的 Fe 发生化学反

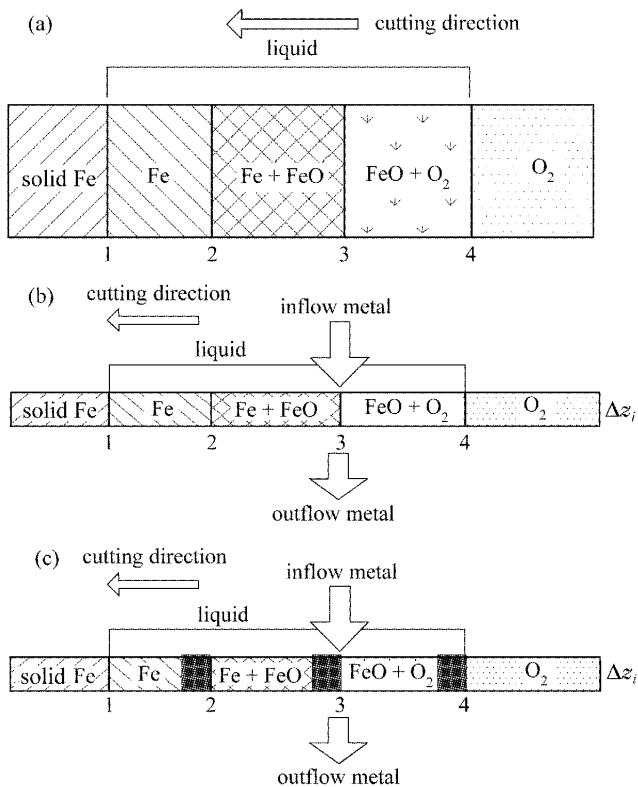


图5 金属及其氧化物流动对切割前沿成分的影响

(a) 厚度方向均匀的切割前沿成分分布; (b) 未出现滞留的第 i 层切割前沿成分分布; (c) 出现滞留的第 i 层切割前沿成分分布

Fig. 5 Effects on the components of cut front by the flow of metal and oxidate

(a) uniform constituent distribution of cut front in the direction of thickness; (b) constituent distribution of layer i without metal on oxidate retention; (c) constituent distribution of layer i with mass retention

应, 燃烧反应被引燃; 2) 随着化学反应的进行, 导致了反应前沿 3 的向前推进, 氧化层厚度增加; 3) 伴随着氧化反应的进行和氧化层的增厚, 反应前沿氧气压力下降, 当氧气压力低于一定阈值时, 反应终止; 4) 在一定温度、气体流量条件下, 液态金属被吹除; 5) 重复 1), Fe 再度被点燃。

但是, A. Ivarson 等的上述模型未考虑切割前沿在厚度方向上的差别, 下面根据分层模型探讨一下厚度方向的影响规律。

考虑第 i 层 Δz_i 的情况, 如图 5(b) 所示, 除了氧气在横向的扩散作用, 又加入了液态金属及其氧化物在纵向的流动。金属的注入将对 Δz_i 中原有 $\text{FeO} + \text{O}_2$ (界面 3 与 4 之间) 层产生一定的影响。

当温度较高时, 液态金属流动性较好, 可满足不发生滞留的条件。此时, 不同深度处熔化层的厚度基本不变, Ivarson 模型转化为厚度方向均匀的模式。当温度较低时, 假设第 i 层温度开始下降, 由于

其黏度和表面张力增加, 无法满足液态金属高速流动的需求, 此时液态金属将在本层滞留 (如图 5(c) 所示, 深色阴影区表示滞留的金属), 导致氧化层 (界面 3 与 4 之间) 厚度增加, 氧气的扩散作用受阻, 氧化反应提供的热量减少。此时, 原来有规律性的切割条纹将出现一定的紊乱。

通过分析, 可以发现金属流动对化学反应具有重要的影响: 一旦液态金属受温度下降影响黏度增加, 将出现滞留现象, 增加的氧化层厚度将抑制化学反应放热, 导致温度条件继续恶化, 造成切割面质量迅速下降的恶性循环。切割面下缘处流经的体积最多, 因此所需达到的流速最高, 金属的流动也最易受到温度的影响导致化学反应受到抑制。

实验研究和理论分析均表明, 切割面下缘处流过的熔化金属及其氧化物体积最多, 所要求的流速最高, 也最易发生滞留造成质量的恶化。因此, 以下缘粗糙度作为切割面质量的评定指标更为合理。由于下缘处粗糙度难于测量, 实际操作中测量的是邻近下缘处的粗糙度, 文中称为近下缘粗糙度。

3 近下缘粗糙度的在线检测

3.1 实验装置和方法

熔化金属及其氧化物在切割面之间的部分被称为熔化层, 在切割面以下的部分被称为火花簇射, 切割面下缘是熔化层和火花簇射之间的物理分界线。熔化层在气流的作用下, 紧紧附着于切割前沿并向下游流动。流经切割面下缘后, 熔化层突然失去切割前沿的物理支撑, 在气流和重力作用下形成火花簇射。火花簇射始于切割前沿的下缘处, 与下缘具有相同的温度。因此, 火花簇射中蕴含着丰富的切割前沿下缘处的质量信息。

从研究火花簇射出口处热辐射的目的出发, 由于切割前沿具有很高的温度, 其热辐射是很重要的干扰因素。为避开切割前沿热辐射的干扰, 建立火花簇射的侧面检测系统如图 6 所示。CO₂ 激光经过焦距为 127 mm 的 ZnSe 透镜聚焦在工件上表面。CCD 置于试样的一侧, 镜头主轴与激光束和切割方向所确定的平面垂直且略低于切割面。此时, 切割前沿辐射被切割面阻挡, 而火花辐射通过滤光片到达 CCD。通过这种装置, 可以获得没有切割前沿干扰的火花辐射图像。

切割实验利用一台 PRC 公司的 3 kW CO₂ 快轴流激光器完成, 其输出模式为 TEM₀₀ + TEM₀₁,

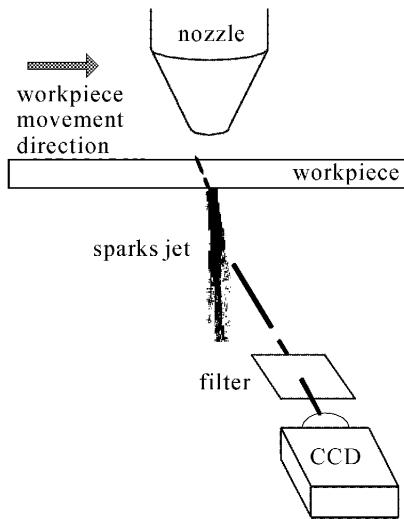


图 6 火花簇射的在线检测装置示意图

Fig. 6 On-line monitoring equipments for sparks jet

切割过程采用氧气作为辅助气体,实验材料为 St12 钢板。

3.2 实验结果及分析

在激光功率 800 W,氧气压力 500 kPa 条件下,切割 2 mm 厚钢板。随着切割速度变化,观察火花簇射行为的变化规律。试样在 15~55 mm/s 速度区间,未出现质量缺陷。

图 7 为出口处亮度 L_{max} 及近下缘粗糙度随着切割速度的变化规律。文中称近下缘粗糙度最低时对

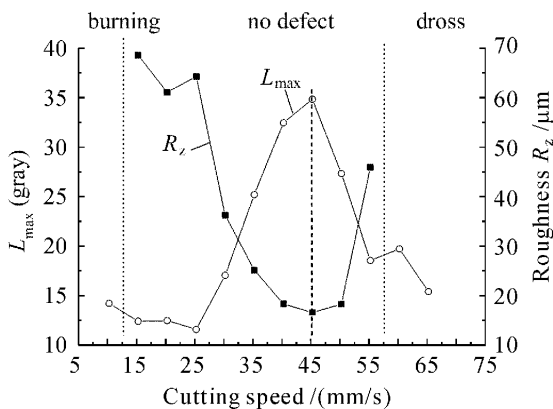


图 7 出口处亮度与最佳切割速度的关系

Fig. 7 Relationship between the brightness at the exit of sparks jet and optimal speed

应的切割速度为最佳切割速度,用 v_e 表示。通过对比两条曲线可以看出:火花簇射出口处亮度 L_{max} 先增加后减小,当 L_{max} 达到最大时,对应的切割面近下缘粗糙度最小。实验结果与分层模型提出的“温度是决定切割面下缘质量变化的核心因素:切割前沿下缘温度越高,切割面近下缘粗糙度越小,切割质量越好”理论相一致。

4 结 论

提出了切割面质量分布特征的分层模型,分析了激光辐射和反应放热对切割前沿温度分布的影响。实验研究和理论分析同时证明了切割面下缘是切割面质量的最薄弱环节,切割前沿在下缘处的温度是决定下缘质量的主要因素。在此基础上,指出应以切割面近下缘粗糙度作为切割面质量评价和检测的主要指标。最后,通过侧面视觉系统,实现了对火花簇射出口处亮度(温度)的在线检测,验证了模型的正确性。

参 考 文 献

- 1 A. Ivarson, J. Powell, J. Kamalu *et al.*. The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and the generation of striations on the cut edge [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, **40**(3-4):359~374
- 2 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Zhang Yongkang *et al.*. Comparison inspection and control methods of surface quality of laser cutting [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, **26**(11):25~27
花银群,陈瑞芳,张永康等. 激光切割表面质量比照判别与控制方法[J]. *金属热处理*, 2001, **26**(11):25~27
- 3 Zhang Yongqiang, Chen Wuzhu, Zhang Xudong *et al.*. Synthetic evaluation and neural network prediction of laser cutting quality [C]. *SPIE*, 2004, **5629**:237~246
- 4 H. Haferkamp, M. Goede, A. von Busse. Quality monitoring and assurance for laser beam cutting using a thermographic process control [C]. *SPIE*, 1999, **3824**:383~391
- 5 H. Jorgensen, F. O. Olsen. Process monitoring during CO₂ laser cutting [C]. *SPIE*, 1991, **1412**:198~208
- 6 Chen S.-L.. In-process monitoring of the cutting front of CO₂ laser cutting with off-axis optical fibre [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, **13**(10):685~691