

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0310-04

激光切割过程火花簇射行为的研究

张永强^{1,2}, 陈武柱¹, 张旭东¹, 单际国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 建立了激光切割过程视觉检测系统,通过实验方法研究了火花簇射行为与最佳切割速度之间的关系。通过不同功率、不同板厚条件下的变速实验,发现在无缺陷切割区,最佳切割速度对应的火花簇射特征信号为:火花簇射角度垂直向下;出口处亮度最高;各亮度带像素数达到最大值。

关键词 激光技术;激光切割;切割质量;火花簇射;视觉传感

中图分类号 TG485 **文献标识码** A

Behavior of Sparks Jet for Laser Cutting

ZHANG Yong-qiang^{1,2}, CHEN Wu-zhu¹, ZHANG Xu-dong¹, SHAN Ji-guo¹

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

Abstract A vision sensing system for CO₂ laser cutting is designed. By detecting the images of the sparks jet, the relationship between sparks behavior and optimal cutting speed has been investigated. The characteristic signal under different laser power and slab thickness has been obtained. On the given condition, the optimal cutting speed corresponds to the vertical jet angle, the highest outlet brightness and the maximum pixels of different gray scales.

Key words laser technique; laser cutting; cutting quality; sparks jet; visual sensor

1 引言

激光切割是激光加工中最重要的一项应用技术,它占整个激光加工工业的 70% 以上^[1],已成为一种竞争力很强的高新技术。近年来,随着生产的发展和新工艺的应用,对切割工艺规范的选取提出了更高的要求。为达到生产要求的切缝质量,激光切割参数被限定在很窄的工艺区间,传统的人工选择、优化切割工艺的方法更为困难,该问题成为进一步发展和推广激光切割应用的主要障碍。因此,对切割质量进行在线检测和实时控制是保证激光切割质量的关键。

利用光信号作为被检测信号是研究激光切割质量实时监测的主要方向^[2~8],切割前沿和火花簇射是切割过程的两个主要辐射源。由于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,因此

对切割前沿的直接检测十分困难。而火花簇射是切割前沿的物理延伸,其行为蕴涵着丰富的质量信息。本文通过视觉检测方法,研究了火花簇射行为与切割面质量之间的关系。

2 系统组成和实验方法

切割过程中的高温辐射源包括切割前沿和火花簇射两部分。从研究火花簇射行为的目的出发,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。因此,独立研究火花簇射行为极其重要。

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 1 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

基金项目: 国家自然科学基金(50175061)和清华大学重点研究基金(012-101050)资助课题。

作者简介: 张永强(1978—),男,工学博士,主要从事激光加工及其过程检测与控制的研究。E-mail: zhyq01@gmail.com

导师简介: 陈武柱(1939—),男,广西人,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

射被切割面阻挡,而火花辐射通过滤波片到达 CCD,调节光圈和曝光时间使整个实验过程中 CCD 图像未达到饱和,并在改变工艺参数的实验中固定此光学参数。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。

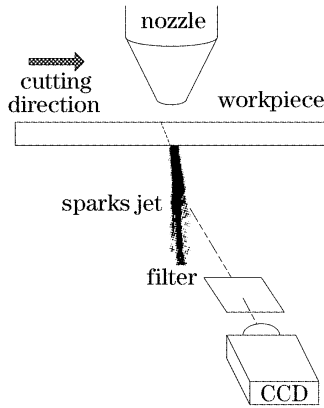


图 1 火花簇射行为的在线检测装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of visual monitoring system for laser cutting

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,切割过程采用氧气作为辅助气体,实验材料为 St12 钢板。

3 火花簇射行为的实验研究

图 2 是氧气压力 5×10^5 Pa,激光功率 800 W,材料为 2 mm 厚度 St12 钢板,切割速度由 10~65 mm/s 变化过程中,CCD 观测到的火花簇射行为特征。

从图像序列中可以看出,随着切割过程中速度的变化,火花簇射的形态有很大的差异,主要表现在:

1) 火花簇射方式的变化:在很低速度的情况下,如图 2(a),喷射出的火花呈现较大的滴状,称之为滴状火花簇射(Globular Sparks);在高速切割情况下,如图 2(h),喷射出的火花呈现连续的喷射状,称之为喷射状火花簇射(Spray Sparks)。随着切割速度的增加,火花喷射形态由滴状向喷射状过渡。

2) 当火花簇射呈喷射状时,出口处亮度最高,随喷射距离的增加,亮度逐渐减小。当切割速度发生变化时,出口处代表的最高亮度是不断变化的。

3) 随着切割速度的变化,火花簇射的亮度分布不断变化。

4) 随着切割速度的变化,火花簇射的方向不断变化。

切割实验表明,优质切割质量位于喷射状火花簇射区域。

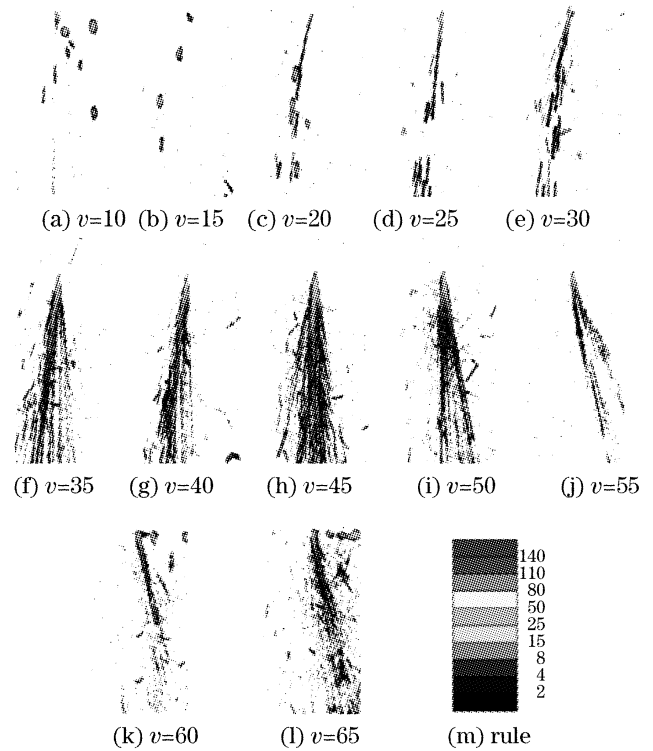


图 2 火花簇射行为随速度的变化

Fig. 2 Sparks jet behavior under different cutting speed

3.1 火花簇射角度的变化

为定量测量,定义火花簇射中心线与垂直方向的夹角为 α (如图 3 所示),方向前倾角为正(即指向工件未切部分),后倾角为负。

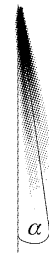


图 3 火花簇射角度 α 的定义

Fig. 3 Definition of sparks jet angle

在激光功率 800 W,氧气压力 5×10^5 Pa 条件下,切割 2 mm 厚钢板。随着切割速度变化,观察火花簇射角度的变化规律。试样在 15~55 mm/s 速度区间,未出现质量缺陷。在无缺陷喷射状簇射区间,火花簇射倾角与切割速度的关系,如图 4 所示。随着切割速度的增加,夹角 α 由正到负单调变化。图 4 中还一并列出了切割面粗糙度(测量位置为靠近切割面下缘处,称为近下缘粗糙度)与切割速度的关系曲线,粗糙度的变化规律是先减小后增加。通过对比两条曲线,可以发现:火花簇射角度 α 接近 0° 时,切割面粗糙度最小,称最小粗糙度对应的切割速度为最佳切割速度,用 V_0 表示,此时对应的最佳切割速度 V_0 为 45 mm/s。

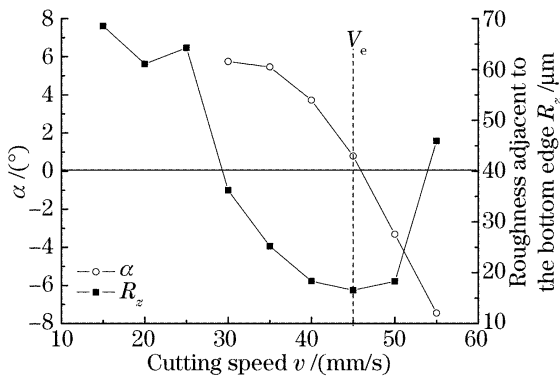


图4 火花簇射角度与最佳切割速度 V_e 的关系
Fig. 4 Relationship between α and V_e

3.2 火花簇射出口处亮度的变化

图5为出口处亮度 L_{max} (为减小误差, L_{max} 为视觉图像空域和时域滤波后的结果) 随着切割速度的变化规律, 图中给出了切割速度为 30 mm/s, 45 mm/s, 55 mm/s 和 65 mm/s 的火花簇射经过时域叠加平均后的图像, 为方便观察, 此四幅图像进行了灰度值的等比例放大且做了反色处理。从图中曲线可以看出: 在切割速度较低(15~25 mm/s)时, 火花簇射出口处亮度 L_{max} 很低, 且受切割速度变化的影响较小; 随着切割速度不断增加, L_{max} 迅速增加; 在切割速度达到 45 mm/s 时, L_{max} 取得最大值; 然后, 随着速度的增加, L_{max} 迅速下降。由于切割前沿在下缘处与火花簇射出口具有相同的温度, 上述实验结果预示着: 在切割速度很低时, 下缘温度变化不大; 随着切割速度的增加, 下缘温度迅速增加, 然后开始下降。图5中还绘出了此条件下, 切割面粗糙

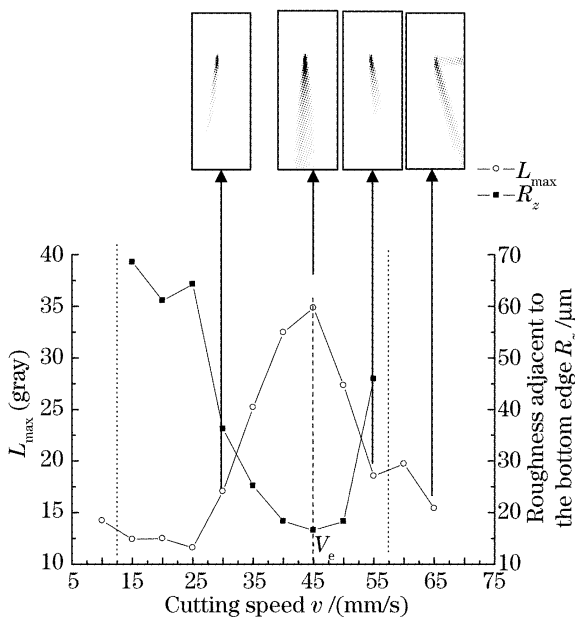


图5 L_{max} 与 V_e 的关系
Fig. 5 Relationship between L_{max} and V_e

度与切割速度之间的关系曲线, 通过对比可以看出: 火花簇射出口处亮度 L_{max} 达到最大时, 对应的切割面粗糙度最小。

3.3 火花簇射亮度分布的变化

$f(x, y)$ 表示拍摄窗口中某像素点 (x, y) 的灰度值, $P(f_i, f_j)$ 表示窗口中灰度值处于 f_i 和 f_j 之间的像素点的子集, 即

$$P(f_i, f_j) = \{(x, y) \mid f_i \leq f(x, y) < f_j\},$$

$N_{P(f_i, f_j)}$ 表示满足上述要求的集合 $P(f_i, f_j)$ 中元素的数目。

在激光功率 800 W, 氧气压力 5×10^5 Pa, 板厚 2 mm 情况下, 图6为随着切割速度的变化, 火花簇射所包含的不同亮度带集合 $P(f_i, f_j)$ 中像素数 $N_{P(f_i, f_j)}$ 的变化规律。其中, 亮度带 $f_i \sim f_j$ 的取值分别为 2~4, 4~6, 6~8, 8~10, 10~20, 20~30 和 30~255。考察无缺陷切割区域(切割速度 15~55 mm/s), 从图中可以看出:

- 1) 各参数下均存在的亮度带, 在参数变化过程中各亮度带的像素数 $N_{P(f_i, f_j)}$ 具有相近的变化趋势;
- 2) 不同亮度带的像素数 $N_{P(f_i, f_j)}$ 随着速度的增加, 先增大后减小, 速度 45 mm/s 时达到最大值。
- 3) 对比粗糙度与切割速度的关系曲线, 在无缺陷区间各亮度带 $N_{P(f_i, f_j)}$ 到达峰值时, 对应的切割面粗糙度最小。

为验证上述实验结果, 在不同功率、不同板厚条件下进行变速实验, 火花簇射角度、出口处亮度以及其亮度分布行为与最佳切割速度的对应关系均成立。

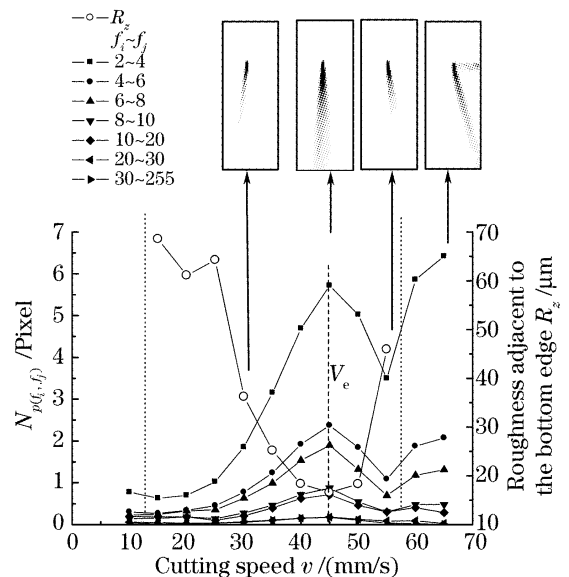


图6 $N_{P(f_i, f_j)}$ 与 V_e 的关系
Fig. 6 Relationship between $N_{P(f_i, f_j)}$ and V_e

4 结 论

通过实验的方法研究了火花簇射行为与最佳切割速度之间的关系。通过不同功率、不同板厚条件下的变速实验,发现在无缺陷切割区,最佳切割速度 V_c 对应的火花簇射特征信号为:火花簇射角度垂直向下;出口处亮度最高;各亮度带像素数达到最大值。

参 考 文 献

- 1 Chen Shuming. Status & development of laser cutting technique [J]. *Metal forming Machinery*, 2002, (2): 3~5
陈树明. 激光切割技术现状与发展 [J]. 锻压机械, 2002, (2): 3~5
- 2 Zhang Yongqiang, Wu Yanhua, Chen Wuzhu *et al.*. Study on online quality assessment in laser cutting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1580~1584
张永强, 吴艳华, 陈武柱 等. 激光切割质量在线评价方法的研究 [J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1580~1584
- 3 Wang Chunming, Hu Lunji, Hu Xiyuan. The latest overseas development of real time monitoring technology for laser cutting [J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 412~417
王春明, 胡伦骥, 胡席远. 国外激光切割实时检测技术的最新进展 [J]. 激光技术, 2001, **25**(6): 412~417
- 4 C. H. Tsai, C. S. Liou. Applying an on-line crack detection technique for laser cutting by controlled fracture [J]. *International J. Advanced Manufacturing Technology*, 2001, **18**(10): 724~730
- 5 Fushimi Takashi, Hideyuki Horisawa, Shigeru Yamaguchi *et al.*. Fundamental study of laser cutting using a high speed photography [C]. *SPIE*, 2000, **3888**: 90~95
- 6 Fushimi Takashi, Hiromasa Nakajima, Hideyuki Horisawa *et al.*. Fundamental study about molten metal of laser cutting [C]. *SPIE*, 2000, **4088**: 284~286
- 7 Porawe R. Modeling. Monitoring and control in high quality laser cutting [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, **50**(1): 137~140
- 8 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