

文章编号: 1001-3806(2007)04-0397-03

激光切割光辐射与切割质量关系的研究

张永强, 吴艳华, 陈武柱*, 张旭东
(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要: 为了研究激光切割过程光信号与切割质量的关系, 搭建了以切割前沿光辐射作为检测参量的实时检测系统, 对切割前沿光辐射的时、频域信号进行了试验研究, 得到了不同参数下光信号的变化规律。时域分析表明, 无缺陷试样对应的标准方差较低; 与无缺陷切割相比, 过烧缺陷对应的光信号具有较低的强度和较高的标准方差; 挂渣缺陷具有较高的强度和标准方差。频域分析表明, 低速切割, 光信号主频与切缝表面波纹频率一致; 高速无缺陷切割无明显主频; 挂渣缺陷具有明显的低频波动。结果表明, 燃烧循环理论不仅是切割面波纹形成的主要因素, 也是光信号主频产生的主要原因。

关键词: 激光技术; 激光切割; 实时监测; 光信号; 切割质量

中图分类号: TG485 **文献标识码:** A

Study on relationship between radiation and quality for laser cutting

ZHANG Yong-qiang, WU Yan-hua, CHEN Wu-zhu, ZHANG Xu-dong
(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the relationship between optical signal and cutting quality, an on-line monitoring system with cut front radiation as the criterion for laser cutting was built up. The signal was studied in time-domain and frequency-domain. The analysis in time-domain shows that there is little fluctuation for free defect, while the reverse for the defects. The analysis in frequency-domain shows that when the cutting speed is slower than that of combustion reaction, the dominant frequency relates to the waviness frequency of cut front. The combustion cycle is the main reason of both cutting waviness and main frequency of optical signal.

Key words: laser technique; laser cutting; real-time monitoring; optical signal; cutting quality

引 言

激光切割是激光加工中最重要的一项应用技术, 它占整个激光加工业的 70% 以上, 已成为一种竞争力很强的高新技术。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将材料迅速升温, 熔化的金属被吹除形成切缝。由于在激光切割中影响切缝表面质量的因素很多, 如激光功率、切割速度、焦点位置、气体压力、表面状态等, 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, 对切割质量进行在线检测和实时控制是保证激光切割质量的关键^[1]。

激光切割过程中所产生的不同类型的光、声信号

可以直接或者间接地反映切割过程的稳定性以及切缝的质量, 实时采集这些信号并分析比较不同条件下的信号特征, 即可实现对激光切割质量的实时监测。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。近年来, 国内外学者的研究工作取得了初步进展^[2~8], 对于激光低速切割过程, 在时域和频域上建立了采样信号和切割质量之间的对应关系, 特别指出信号频谱的主频与切割面波纹频率有良好的对应关系, 为在线检测提供了实验依据。但对于汽车等行业常用的薄板切割过程, 优质切割区对应的切割速度较高, 对此领域信号与质量之间关系的研究目前还属空白。为了更深入地研究 CO₂ 激光切割前沿光辐射和切缝质量之间的关系, 客观评价这种方法的适用范围, 作者建立了一套 CO₂ 激光切割光辐射信号实时检测系统, 通过对不同参数条件下信号时域和频域的分析, 阐述了这种方法的检测机理和适用范围。

1 系统组成和实验方法

切割实验利用一台 PRC 公司的 3kW CO₂ 快轴流

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175061)

作者简介: 张永强 (1978-), 男, 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。

* 通讯联系人。E-mail: cwz-dme@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-05-08; 收到修改稿日期: 2006-06-27

激光器完成,其输出模式为 $TEM_{00} + TEM_{01}$,切割过程采用 O_2 气作为辅助气体。实验材料为低碳钢板,厚度 2mm,切缝长度 100mm。

实验系统的组成如图 1 所示(图 1a 为示意图,图 1b 为实物图), CO_2 激光经过焦距为 127mm 的 ZnSe 透镜聚焦在工件上表面。部分前沿光辐射经过滤光系统后,到达光电管表面。信号经过放大、500Hz 低通滤波、A/D 转换送入计算机。

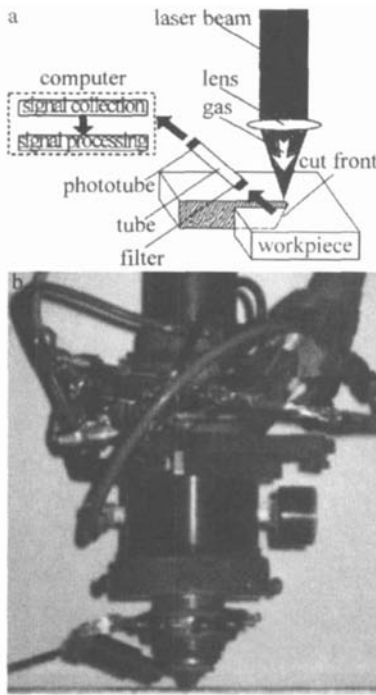


Fig 1 Schematic diagram of optical monitoring system for laser cutting
a—diagrammatic b—material object graph

2 实验结果和分析

在激光功率 600W、氧气压力 $5 \times 10^5 Pa$ 、切割速度在 $5mm/s \sim 70mm/s$ 情况下切割 2mm 厚低碳钢板。通

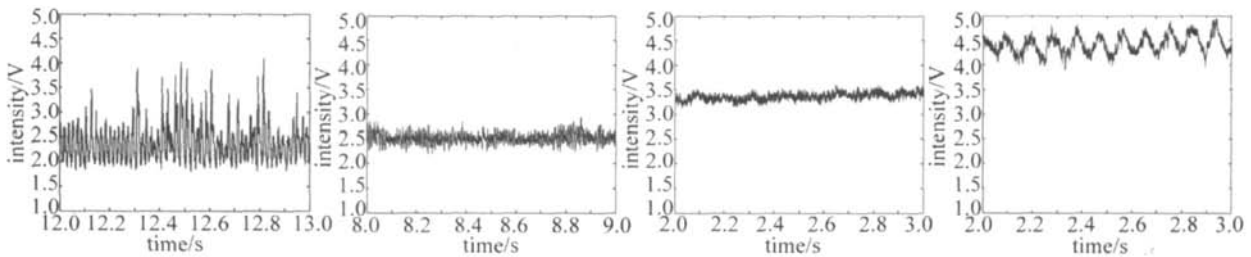


Fig 4 Time-domain analysis of typical signal

a—the signal of burning defect ($v=8mm/s$) b—the signal of free defect and low speed ($v=17mm/s$) c—the signal of free defect and high speed ($v=50mm/s$) d—the signal of dross defect ($v=65mm/s$)

陷对应的光信号具有较低的强度和较高的标准方差;挂渣缺陷具有较高的强度和标准方差;无缺陷式样对应的标准方差较低。

对光信号和试样的切割面进行频域分析,获得光辐射信号主频、切割面波纹频率随切割速度的变化规

律如图 6 所示。从图中可以看出,在切割速度从 $5mm/s$ 到 $60mm/s$ 的变化过程中,切割面波纹频率随着切割速度的增加而增大。实验发现,随着切割速度的增加,信号主频的强度逐渐减弱,实验条件下当切割速度大于 $17mm/s$ 信号主频淹没在频谱中。在切割速

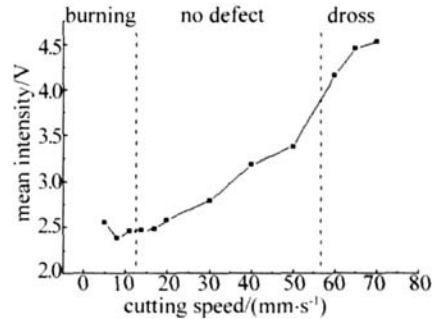


Fig 2 Relationship between signal intensity and cutting speed
变化规律。从图中可以看出,随着切割速度的增加光辐射强度随之增加。图 3 是在上述条件下得到的切割前沿光辐射信号标准方差随切割速度的变化规律。从

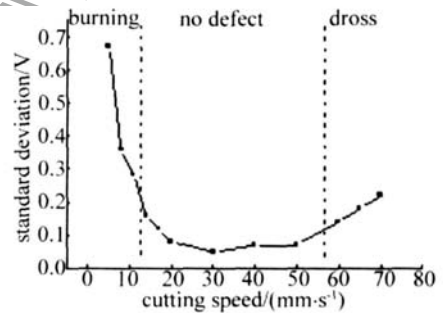


Fig 3 Relationship between signal standard deviation and cutting speed
图中可以看出,随着切割速度的增加;光辐射标准方差先减小后增大。图 4 是典型的过烧缺陷、低速无缺陷、高速无缺陷、挂渣缺陷所对应的时域信号,图 5 是与之对应的切割面形貌。从图中可以看出,切割前沿光辐射信号具有如下时域特征:与无缺陷切割相比,过烧缺

律如图 6 所示。从图中可以看出,在切割速度从 $5mm/s$ 到 $60mm/s$ 的变化过程中,切割面波纹频率随着切割速度的增加而增大。实验发现,随着切割速度的增加,信号主频的强度逐渐减弱,实验条件下当切割速度大于 $17mm/s$ 信号主频淹没在频谱中。在切割速

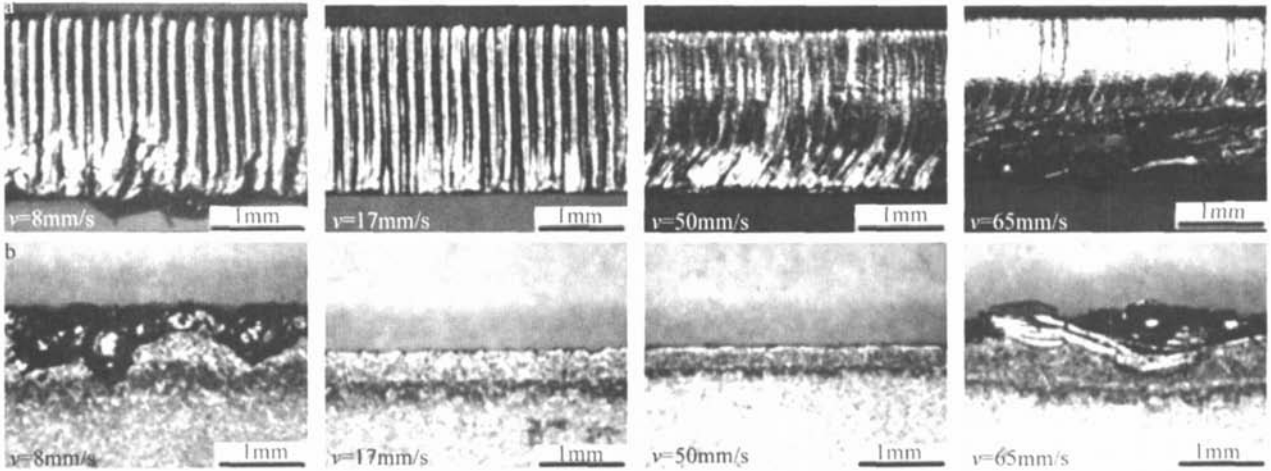


Fig 5 Typical cut face

a—photos of cut face b—photos of back side

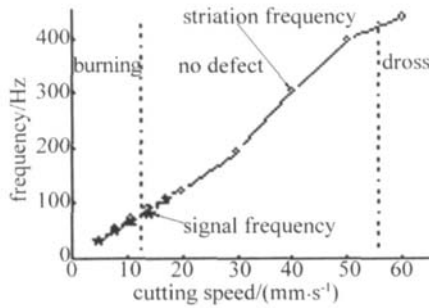


Fig 6 Frequency variation of optical signal and cut face waviness with cutting speed

度低于 17mm/s 情况下,光辐射信号主频域与表面波纹频率具有较好的对应关系。图 7 是典型的过烧缺陷、低速无缺陷、高速无缺陷、挂渣缺陷所对应的频域信号。从图中可以看出,切割前沿光辐射信号具有如下频域特征:低速切割过程中,光信号主频频率与切缝表面波纹频率相一致;高速无缺陷试样波动很小,且无明显主频;挂渣缺陷具有明显的低频波动。

当切割速度小于材料燃烧反应速度时,根据 ARATA 提出的燃烧循环理论,“引燃 燃烧 熄灭 引燃”的循环过程形成切割面波纹,因此可以通过光辐

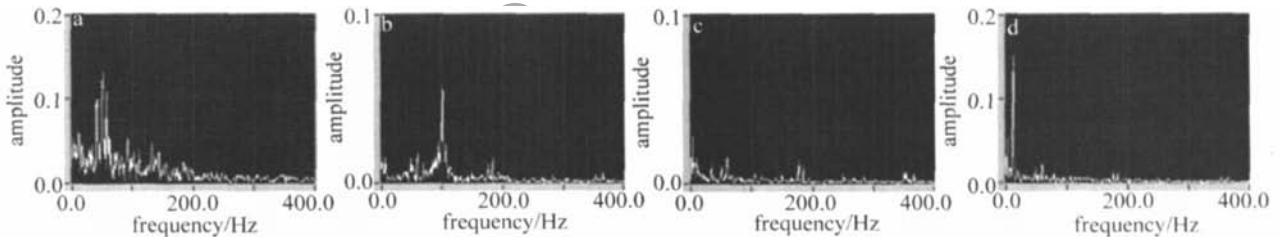


Fig 7 Frequency-domain analysis of typical signal

a—the signal of burning defect ($v=8\text{mm/s}$) b—the signal of free defect and low speed ($v=17\text{mm/s}$) c—the signal of free defect and high speed ($v=50\text{mm/s}$) d—the signal of dross defect ($v=65\text{mm/s}$)

射信号的主频获取切割面波纹的信息。燃烧循环理论示意图如图 8 所示^[9]: (1)激光移动到钢板表面,在激

(见图 8e)。当切割速度高于材料燃烧反应速度时,信号主频消失,此时切割过程较平稳,熔化的高温金属连续平稳的被氧气流排出切割前沿。但当切割速度过高形成挂渣时,熔化金属是间断性的排出切割前沿的,因此造成光辐射信号波动,但这一波动频率一般很低。

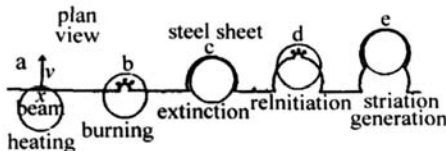


Fig 8 Schematic diagram of combustion cycle in CW laser cutting^[9]

光的作用下温度迅速升高 (见图 8a); (2)当温度达到燃点时,燃烧反应开始,燃烧前沿移动速度高于激光束移动速度 (见图 8b); (3)燃烧前沿离开激光辐照区域,燃烧反应熄灭 (见图 8c); (4)随着激光束的移动,重复步骤 (1)进入循环 (见图 8d),形成切割面条纹

3 结 论

(1)搭建了基于切割前沿光辐射的检测系统,对于较大速度范围内切割试验的光信号进行了检测和分析。

(2)时域分析表明:无缺陷试样对应的标准方差较低;与无缺陷切割相比,过烧缺陷对应的光信号具有较低的强度和较高的标准方差;挂渣缺陷具有较高的 (下转第 444 页)

$(g+e+e_1)/a$ 及 f/b 随着脊槽宽度 g/a 从0.1变化至0.8,主模归一化截止波长 λ_c/a 先逐渐增大随后又逐渐减小;当槽和脊的宽度一定时,脊的高度越高,主模归一化截止波长 λ_c/a 越大,即脊槽间距越小,主模归一化截止波长 λ_c/a 越大,当脊深入槽中时, λ_c/a 取到最大值;(2)当脊槽波导的脊的高度和宽度不变时,随着槽宽度增加,主模归一化截止波长 λ_c/a 逐渐变小,即在此情况下,槽越窄, λ_c/a 越大;(3)当槽波导的槽宽度一定时,随着槽高度的增加,主模归一化截止波长 λ_c/a 逐渐减小;当槽的高度不变时,随着槽宽度增加,主模归一化截止波长 λ_c/a 先减小后增大;而单脊波导的特性为^[4]:当脊的宽度不变时,随着脊高度增加,主模归一化截止波长 λ_c/a 逐渐增大;而当脊的高度不变时,随着脊宽度增加, λ_c/a 逐渐减小;(4)脊槽波导截止特性较单脊波导和单槽波导的更加良好。

3 结束语

使用有限差分法计算了脊槽波导中主模归一化截止波长 λ_c/a 随脊槽宽度及高度变化的数值,分析了脊槽尺寸对脊槽波导归一化截止波长的影响。在边值问题的数值方法中,有限差分法是相当简便的。在计算机存储容量允许的情况下,有可能采用较精细的网格,使离散化模型能较精确地逼近真实问题,获得具有足够精度的数值解^[11]。即当网格的划分导致的计算结果偏差可忽略不计时,说明计算结果收敛,也就达到了要求的精度。计算结果表明:使用有限差分法计算脊槽矩形波导主模归一化截止波长具有较高的计算精度,用有限差分法计算脊槽矩形波导主模归一化截止波长问题,编

程简单,计算量小,一般微机就能解决实际工程问题。

参 考 文 献

- [1] SAAD A M K, MILLER J D, MITHA A *et al* Analysis of antipodal ridge waveguide structure and application on extremely wide stopband lowpass filter [A]. IEEE Microwave Symposium Digest, MTT-S International [C]. Mississauga, Ontario, Canada: MA Electronics Canada, A Division of M/A-COM Inc., 1986. 361~363.
- [2] LU M, LEONARD P J. Design of trapezoidal-ridge waveguide by finite-element method [J]. IEEE Microwaves Antennas and Propagation Proceedings, 2004, 151 (3): 205~211.
- [3] RONG Y, ZAKI K A. Characteristics of generalized rectangular and circular ridge waveguides [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48 (2): 258~265.
- [4] LU M, LEONARD P J. Dependence of ridge position on the cutoff wavelength of the dominant mode in single ridge waveguides [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2002, 34 (5): 374~377.
- [5] GUHA D, SAHA P K. Some characteristics of ridge-trough waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45 (3): 449~453.
- [6] GODSHALK E M. A V-band wafer probe using ridge-trough waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39 (12): 2218~2228.
- [7] GODSHALK E M. A W-band wafer probe [A]. IEEE Microwave Symposium Digest, MTT-S International [C]. Beaverton, Oregon: Cascade Microtech Inc., 1993. 171~174.
- [8] SU J M, DA I J Zh, YANG Y P. Review of the new development of optical waveguide amplifier [J]. Laser Technology, 2004, 28 (6): 604~608 (in Chinese).
- [9] LI F Q. Numerical calculation of electromagnetic fields and design of electromagnets [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 81~87 (in Chinese).
- [10] SHENG X Q. The nub of electromagnetic computation [M]. Beijing: Science Press, 2004. 133~134 (in Chinese).
- [11] WANG B Zh. Electromagnetic computation [M]. Beijing: Science Press, 2002. 20~21 (in Chinese).

(上接第 399页)

强度和标准方差。

(3)频域分析表明:低速切割,光信号主频与切缝表面波纹频率一致;高速无缺陷切割无明显主频;挂渣缺陷具有明显的低频波动。

(4)燃烧循环理论不仅是切割面波纹形成的主要因素,也是光信号主频产生的主要原因;切割前沿光信号频谱分析的方法,仅适用于低速切割过程;高速切割时,只能采用时域分析的方法。

参 考 文 献

- [1] WANG Ch M, HU L J, HU X Y. The latest overseas development of real time monitoring technology for laser cutting [J]. Laser Technology, 2001, 25 (6): 412~416 (in Chinese).
- [2] JORGENSEN H, OISEN F O. Process monitoring during CO₂ laser cutting [J]. Proc SPIE, 1991, 1412: 198~208.
- [3] NGO D, HOLGER H, DIRK M. Process monitoring in laser beam cutting on its way to industrial application [J]. SPIE, 1997, 3097: 29~

37.

- [4] 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.
- [5] KAEBENCK H, JEROM N A, MATHEW P. Adaptive control for laser cutting using striation frequency analysis [J]. CRP Annals Manufacturing Technology, 1998, 47 (1): 137~140.
- [6] WANG Ch M, HU L J, HU X Y *et al*. Pilot study on relation between cutting quality and radiation from cutting front in laser cutting [J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12 (7): 821~814 (in Chinese).
- [7] MAHLEN F D T, PAUL F, CHRIS P *et al*. Applications of optical sensing for laser cutting and drilling [J]. Appl Opt, 2002, 41 (24): 4988~4995.
- [8] WANG Ch M. Fundamental research on real-time monitoring technique for laser cutting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1999. 1~63 (in Chinese).
- [9] di PIETRO P, YAO Y L. Investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality—a review [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1994, 34 (2): 225~243.