

# CO<sub>2</sub> 激光焊接的同轴检测与熔透控制

## (II) 熔透状态同轴光信号的频域分析

张旭东，陈武柱，刘春，国静

(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

**摘要:** 利用 CO<sub>2</sub> 激光深熔焊等离子体光信号的同轴检测系统, 提出了频谱重心的概念并以此来分析等离子体光信号的频谱特性。研究了平板焊接时对应适度熔透状态时同轴光信号的频域特征。结果表明, 随激光功率增加或焊接速度减小, 当焊接熔透状态从“适度熔透(小孔透)”变化到“仅熔池透”时对应 2~6 kHz 段频谱重心位置向上(高频)跳变。

**关键词:** 激光焊接; 熔透; 同轴检测; 频谱重心

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2004)05-25-05



张旭东

## 0 序 言

在激光焊接中, 焊缝的熔透状态是衡量焊接成形质量最重要和最根本的指标之一, 特别是对绝大多数的接头形式来说, 获得均匀适度熔透是保证焊接质量的前提。作为以小孔效应为基本特征的激光深熔焊方法, 根据小孔及熔池穿透工件程度的不同可以将激光焊的熔透状态分为未熔透(Partial penetration)、仅熔池透(Weld pool penetration)、适度熔透(Moderate full penetration)和过熔透(Excessive full penetration)四种熔透状态。图 1、2 所示为四种熔透状态小孔和熔池形状以及焊缝成形的示意图和典型的焊缝照片。其中适度熔透是最为理想的熔透状态。

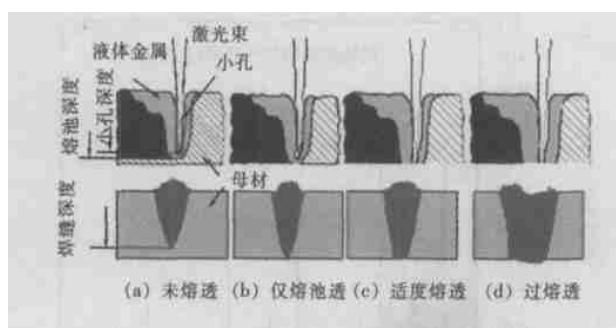


图 1 激光焊缝四种熔透状态示意图

Fig. 1 Four types of penetration statuses for laser welding

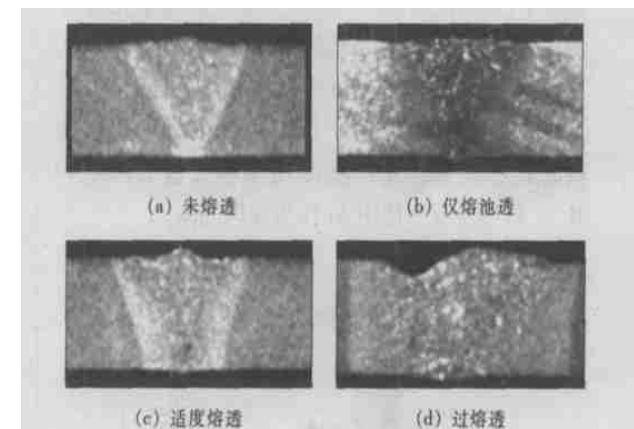


图 2 激光焊缝四种熔透状态的焊缝横断面照片

Fig. 2 Photos of weld beads with different penetration statuses

利用光电或视觉传感器从小孔正上方检测(即同轴检测)激光焊接过程中小孔、等离子体或熔池等产生的光辐射是激光焊接过程检测的重要方法之一, 也是目前国内外学者致力研究的重点。这是由于小孔内部等离子体的光辐射包含了比小孔上方等离子体更多的与熔透状态有关的信息, 因此, 从焊缝正面特别是从小孔的正上方对小孔内部进行检测, 提取反映适度完全熔透的特征信号, 将是熔透自动控制的重要前提。近年来国外一些学者在 Nd:YAG 激光焊接中, 利用同轴检测装置检测熔池和等离子体红外辐射光信号进行熔透检测与控制<sup>[1~3]</sup>。其他学者在 CO<sub>2</sub> 激光焊的熔透检测与控制方面也进行了多许研究工作, 但还未取得令人信服的反映适度完全熔透状态的特征信息<sup>[4~5]</sup>, 特别是对信号的频域特性研究得较少。

作者利用研制的 CO<sub>2</sub> 激光焊的同轴光学检测系统<sup>[6, 7]</sup>进行了平板激光焊接试验, 着重研究了不同熔透状态下同轴光辐射信号的频域特征。

## 1 试验方法

图 3 是 CO<sub>2</sub> 激光焊接同轴检测系统组成示意图。系统的核心是一个可以允许 10.6 μm 波长的 CO<sub>2</sub> 激光透过, 对由焊接区域产生的光辐射(主要是焊接等离子体, 也包括熔池)则几乎全部反射的分光镜。CO<sub>2</sub> 激光经平面反射镜入射到分光镜上, 经分光镜后再经一个焦距为 127 mm 直径为 40 mm 的 ZnSe 透镜聚焦后作用在工件表面。焊接过程中由等离子体或熔池发出的光辐射经透镜后再照射到分光镜上, 由于分光镜只允许远红外波段光通过, 这部分由焊接区域产生的光辐射被分光镜反射到光电传感器中, 光电传感器产生的信号通过处理单元输入到计算机进行处理。系统的采样频率为 50 kHz。

激光焊接使用 2.6 mm 厚低碳钢板进行, 工件尺寸为 250 mm × 50 mm。激光器使用 3 kW CO<sub>2</sub> 快轴流激光器, 连续工作模式, 光束模式为 TEM<sub>00</sub> + 01<sup>\*</sup>。焊接过程中使用 Ar 作为保护气体。

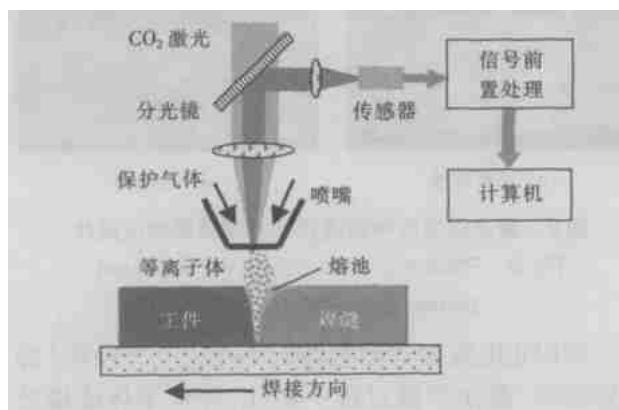


图 3 CO<sub>2</sub> 激光焊接同轴光检测装置示意图

Fig. 3 Experimental setup of coaxial monitoring system for CO<sub>2</sub> laser welding

## 2 试验结果和分析

### 2.1 等离子体信号的单段频谱分析

固定激光功率为 1 300 W, 焊接速度分别为 0.6 m/min、0.8 m/min、1.0 m/min 和 1.2 m/min 分四段进行平板焊接, 焊接过程中检测到的等离子体同轴光检测信号变化曲线如图 4 所示。图中同时给出了对应每段焊速下的焊缝背面成形。由图 4 可见, 焊接速度分别为 0.6 m/min、0.8 m/min、1.0 m/min

和 1.2 m/min 时对应的焊缝状态分别为过熔透、适度熔透(小孔透)、仅熔池透(小孔不透)和未熔透。分别对此四段的等离子体光信号进行单段 8 192 点快速傅立叶变化(FFT), 分别得到如图 5~图 8 的频谱曲线。比较这四种熔透状态的对应频谱图中可以看出, 采用不同规范进行激光焊接, 其等离子体同轴光检测信号的频谱都主要集中在 10 kHz 以下。从频谱图形看, 过熔透状态下 2.0~5 kHz 的频谱强度最高(图 5), 在小孔透(适度熔透)时, 2.0~5 kHz 频谱也有较大强度(图 6), 而在小孔未透时(包括图 7 所示的仅熔池透和图 8 所示的未熔透), 2.0~5.0 kHz 频谱强度有所下降。对比图 7 和图 8 可以发现, 图 8 中 2.0~5.0 kHz 频谱强度略高, 但在小于 2.0 kHz 的频谱范围内, 图 8 所示未熔透状态

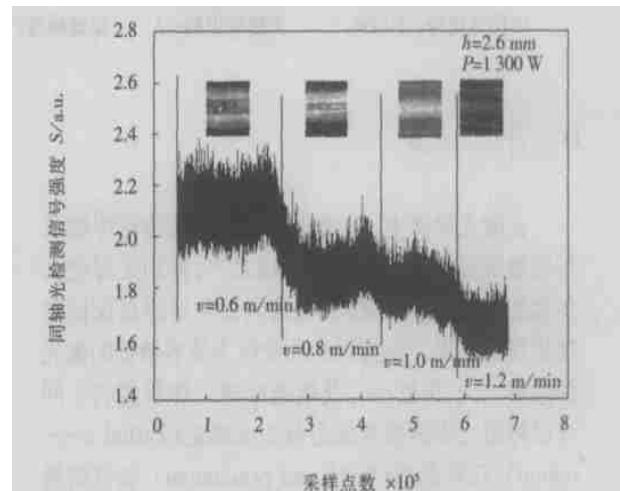


图 4 不同焊接速度下等离子体光信号

Fig. 4 Time-field plasma signal under various welding speed

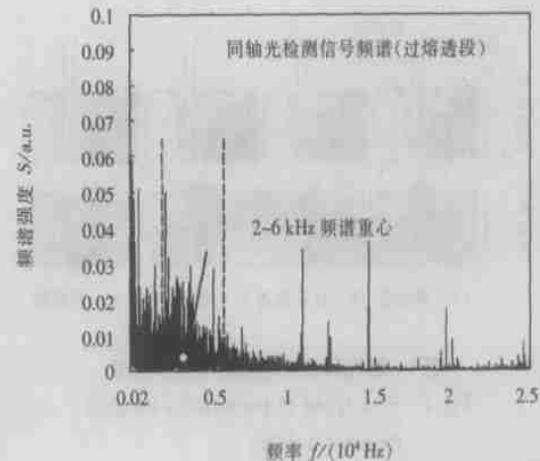


图 5 过熔透段同轴光检测信号的频谱

Fig. 5 Frequency-field plasma signal under excessive penetration

的频谱强度小于图7所示仅熔池状态下的频谱强度。

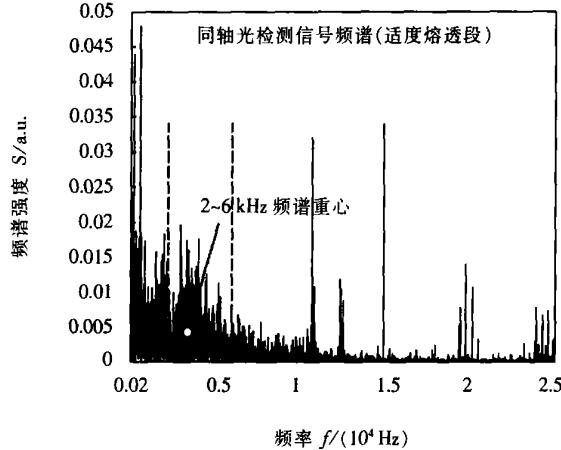


图6 适度熔透段同轴光检测信号的频谱  
Fig. 6 Frequency-field plasma signal under moderate full penetration

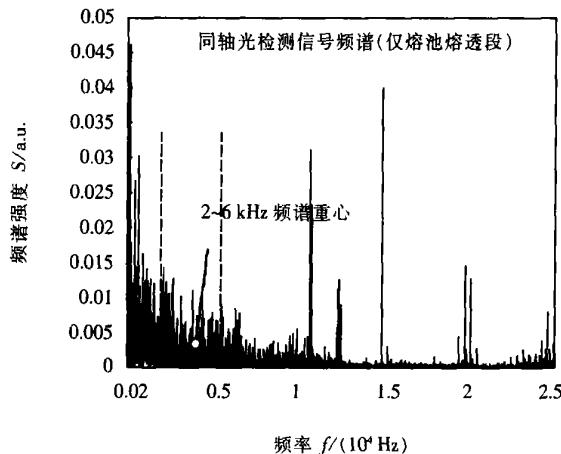


图7 仅熔池透段同轴光检测信号的频谱  
Fig. 7 Frequency-field plasma signal under weld pool penetration

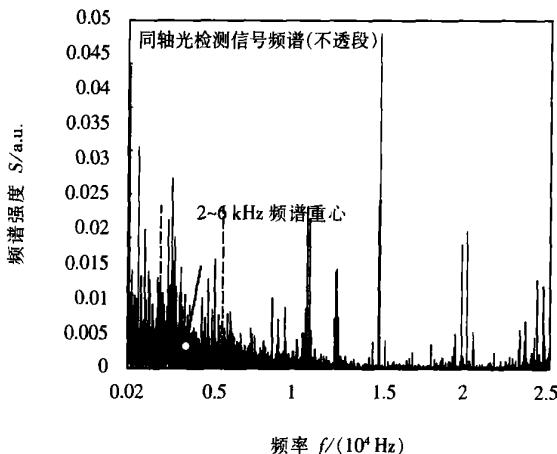


图8 不透段同轴光检测信号的频谱  
Fig. 8 Frequency-field plasma signal under partial penetration

以上的规律在其它焊接条件下也可以发现,但是小孔透和仅熔池透两种熔透状态所对应的频谱差别并不很明显,无法定量分析。为了准确寻找可能作为识别熔透的准确判据和控制信号,在对大量的各种熔透状态下频谱强度的分布进行研究后,提出了频谱重心的概念并以此来反映指定频谱段的频谱强度的性质。

## 2.2 频谱重心的计算方法

为了定量表征信号频谱特征,以某一频段频谱图形的重心所对应的频率坐标作为衡量频谱的定量指标,作者称之为频谱重心。图5~图8中示意出了2.0~6.0 kHz频段频谱重心的大致位置。频谱重心的数学表达式为

$$FreqG(i) = \frac{\sum_{f=f_{low}}^{f_{up}} f \times Power(i, f)}{\sum_{f=f_{low}}^{f_{up}} Power(i, f)}, \quad (1)$$

式中: $FreqG(i)$ 为频谱重心;  $f$ 为频率;  $i$ 为分段编号; $f_{low}$ 为统计频谱段的下限频率; $f_{up}$ 为统计频谱段的上限频率; $Power(i, f)$ 为第  $i$  分段功率谱中频率  $f$  所对应的功率谱强度。

为了反映频谱重心随时间的变化,现对等离子体同轴光检测信号做带重叠的短时傅立叶分析,使用经典功率谱估计直接法(周期图法)进行功率谱估计,计算每段的频谱重心,然后绘制频谱重心随时间变化的曲线。信号处理流程如图9所示。

(1)在信号初始化阶段,首先采用三点平均对数据进行平滑处理,给定采样频率  $f$ ,快速FFT变化点数  $N$ (取8 192),重叠点数  $Noverlap$ (取4 096),确定正常焊接段对应的数据起点  $xbegin$  和终点  $xend$ ;

(2)分段数 计算如式(2)

$$imax = floor(\frac{xend - xbegin + 1 - N + Noverlap}{Noverlap}), \quad (2)$$

式中:函数  $floor(x)$  代表取  $x$  的整数部分。

(3)使用周期图法估计第  $i$  段的功率谱之后,按照式(3)计算第  $i$  段的2~6 kHz段的频谱重心为

$$G(i) = \frac{\sum_{f=2000}^{6000} f \times P(i, f)}{\sum_{f=2000}^{6000} P(i, f)}, \quad (3)$$

式中: $G(i)$ 为第  $i$  段的频谱重心; $P(i, f)$ 为第  $i$  分段的频率  $f$  处的功率谱密度。

图10给出了使用周期图法估计功率谱密度进行短时傅立叶分析后计算得到的频谱重心随时间的变化。其中细实线为计算得到的实际曲线,粗实线

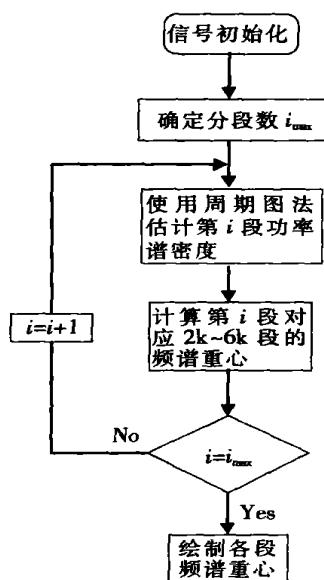


图 9 周期图法短时傅立叶分析频谱重心计算流程

Fig. 9 Flow chart of FBS calculation using periodogram short-time FFT

表征了频谱重心的变化趋势。由图可见,当熔透状态从过熔透变化到适度熔透时,频谱重心分布基本不变;熔透状态从适度熔透变化到仅熔池透时,频谱重心的分布有所上移;熔透状态从仅熔池透变化到不透时,频谱重心又有所下降。从图中还可以发现,使用直接法进行功率谱估计,频谱重心的波动较大。

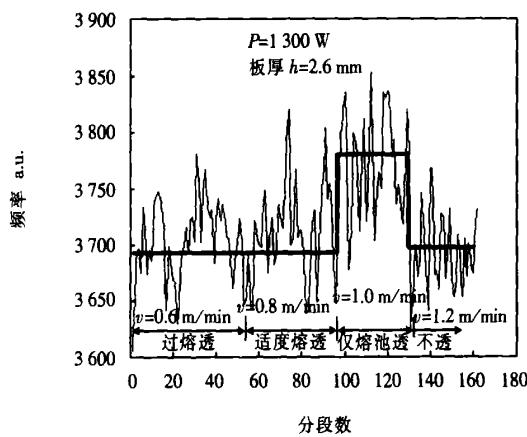


图 10 短时傅立叶分析中使用周期图法估计功率谱计算得到的频谱重心变化

Fig. 10 FBC of plasma signal obtained by using periodogram algorithm

下面在短时傅立叶分析中, 使用 AR 模型进行功率谱估计, 并使用 Burg 算法计算模型参数, 然后再计算各分段的频谱重心。图 11 所示为使用参数功率谱估计方法进行短时傅立叶分析计算得到的

2~6 kHz 段频谱重心随着时间变化的曲线。由图可见, 在从适度熔透变化到仅熔池透的时候, 2~6 kHz 频谱重心明显向上跳变, 当进入不透状态时, 频谱重心又有所下降。

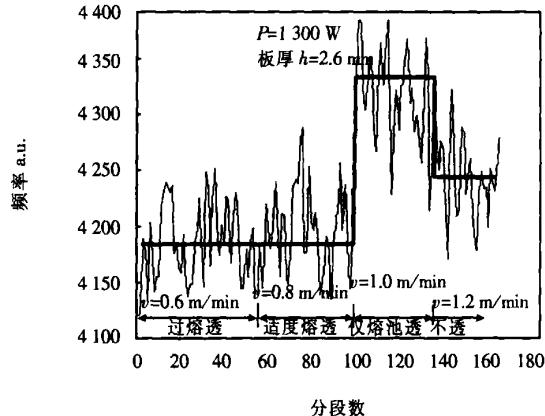


图 11 短时傅立叶分析中使用 AR 模型估计功率谱并计算得到的频谱重心

Fig. 11 FBC (barycenter of frequency spectrum) of plasma signal obtained by using AR model

比较图 10、11 可以看出, 在进行功率谱估计的时候, 使用经典功率谱估计的方法和使用现代参数模型功率谱估计方法效果有所不同, 使用 AR 模型估计功率谱然后计算频谱重心分布的方法优于使用经典周期图法估计功率谱再计算频谱重心的方法。

### 3 结 论

(1) 通过对不同熔透状态下的单段频谱分析, 发现了在小孔透与小孔不透成形状态下, 2~5 kHz 频谱段的强度分布有所变化。

(2) 采用频谱重心可以定量表征不同熔透状态下的频谱特征。对于平板焊接, 虽然等离子体同轴光检测信号在过熔透段信号大于小孔适度熔透段信号, 但是在频域上, 它们在 2~6 kHz 段的频谱重心分布基本一致; 当焊接状态从“适度熔透(小孔穿透)”变化到“仅熔池透”状态时, 2~6 kHz 段的频谱重心向上跳变; 当焊接状态从“仅熔池透”变化到不透时, 2~6 kHz 段的频谱重心有所下降。

(3) 在进行功率谱估计的时候, 使用经典功率谱估计的方法和使用现代参数模型功率谱估计方法效果有所不同, 使用 AR 模型估计功率谱然后计算频谱重心分布的方法优于使用经典周期图法估计功率谱再计算频谱重心的方法。

[下转第 32 页]

形貌照片及元素线扫描, 可以看出界面结合完好, 无缺陷。钎料与钢基体之间存在明显的相互扩散现象, 两者形成了化学冶金结合。从图中可以看到, 在界面处 Cu、Ti 有富集, 这主要是因为 Fe、Cu、Ti 原子的半径分别为 0.127、0.128、0.147 nm, 可见它们的原子半径、晶格常数等比较接近, Cu 与 Fe 在高温有限互溶, 并且不形成脆性化合物, Ti 在界面上可能形成了部分化合物。在 Ag-Cu-Ti 钎料中形成了 Ag-Cu 共晶组织上分布一些棒状 Ti、Cu 的化合物。

### 3 钎焊与电镀 CBN 砂轮磨削对比试验

通过 Ag-Cu-Ti 钎料与 CBN 的化学反应, 实现了 CBN 与砂轮基体的牢固连接, 不过只有在实际的磨削过程中才可知道钎焊效果。为检验按以上工艺高温钎焊 CBN 砂轮的磨削性能, 将单层钎焊 CBN 砂轮与电镀 CBN 砂轮进行重负荷磨削对比试验。

结果表明, 在磨削过程中, 钎焊砂轮磨削力较小, 表面几乎没有 CBN 的脱落, 磨粒均为正常磨损; 而电镀砂轮磨削力较大, 在磨深 0.06 mm 时磨粒大量脱落。这主要是因为钎焊 CBN 砂轮比电镀砂轮的磨粒结合强度高, 容屑空间大, 同时也充分说明钎焊 CBN 砂轮比电镀 CBN 砂轮有明显的优势, 适合于重负荷磨削加工。

### 4 结 论

(1) 使用 Ag-Cu-Ti 钎料连接 CBN, 在合适的钎焊条件下可以获得致密的 CBN/45 钢接头, 钎焊界面由 CBN-TiN-TiB<sub>2</sub>-(Ag-Cu 共晶组织) 分布少量 Ti

的金属间化合物)-钢基体组成。

(2) CBN 在钎焊过程中, 在其表面生成大约 1 μm 直径的针状化合物(TiB<sub>2</sub>+TiN), 形成了类似纤维增强复合材料的结构, 这种结构既没有连续的脆性化合物, 又提高了连接强度。

(3) 重负荷磨削试验表明, 钎焊 CBN 砂轮为正常磨损, 没有 CBN 磨粒脱落, 适合于高效重负荷磨削加工。

### 参考文献:

- [1] Frederick Mason. High efficiency deep grinding (HEDG)[J]. American Machining, 1993, 38(5): 317—319.
- [2] Inasaki I, Howes T D. Abrasive machining in the future[J]. Annals of the CIRP, 1993, 42(2): 723—731.
- [3] 肖冰, 武志斌, 徐鸿钧. 银基钎料钎焊单层金刚石砂轮的试验[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2001, 12(1): 4~7.
- [4] Xiao Bing, Xu Hongjun, Wu Zhibin, et al. Furnace brazing of diamond grinding wheel with Ni-Cr alloy under vacuum atmosphere[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(2): 23—27.
- [5] 肖冰, 徐鸿钧, 武志斌, 等. Ni-Cr 合金真空单层钎焊金刚石砂轮[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 23—27.
- [6] 王明智, 臧建兵, 王艳辉. 立方氮化硼表面镀 Ti 及其与金属粘结剂的作用[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 104—107.
- [7] 李戈扬, 王公辉, 吴亮, 等. 双靶反应溅射 Ti-B-N 复合膜的研制[J]. 上海交通大学学报, 1997, 37(4): 108—113.

**作者简介:** 丁文锋, 男, 1978 年 2 月出生, 博士研究生。主要从事高温钎焊立方氮化硼砂轮研究, 承担 1 项国家自然科学基金课题, 发表论文 2 篇。

Email: dingwenfeng2002@163.com

[上接第 28 页]

### 参考文献:

- [1] Sjoerd Postma, Ronald G K M Aarts, Johan Meijer, et al. Penetration control in laser welding of sheet metal using optical sensors[A]. In: Proc. Of ICALEO' 2001 [C]. LIA, USA, 2001.
- [2] Sjoerd Postma, Ronald G K M Aarts, Johan Meijer, et al. Feedback control for optimal production speed in laser beam welding of mild steel [A]. In: Proc. Of ICALEO' 2002 [C]. LIA, USA, 2002.
- [3] Peteriet J, Abels P, Kaierle S, et al. Failure recognition and online process control in laser beam welding[A]. In: Proc. Of ICALEO' 2002 [C]. LIA, USA, 2002.
- [4] Isamu Miyamoto, Kiyokazu Mori. Development of in-process monitoring system for laser welding[A]. In: Proc. ICALEO' 95, LIA Inst[ C]. LIA, USA, 1996.
- [5] Hongping Gu, Duley W W. Discrete signal components in optical emission during keyhole welding[A]. In: Section C-ICALEO' 97 [C]. LIA, USA, 1998.
- [6] 国静, 刘春, 杨文广, 等. 激光焊接熔透控制过程同轴光信号检测[J]. 激光杂志, 2003, 24(1): 51—53.
- [7] 刘春. CO<sub>2</sub> 激光深熔焊熔透同轴检测与控制的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.

**作者简介:** 张旭东, 男, 1969 年 9 月出生, 博士, 副教授。主要研究方向为激光加工过程监测与控制、激光焊接技术等。参加并完成多项国家科研项目, 发表论文 50 余篇。

Email: xdzhang@tsinghua.edu.cn