

# A304 不锈钢 Nd:YAG 激光焊光致等离子体 电信号频谱分析

杨瑞霞<sup>1</sup> 杨立军<sup>1,2</sup> 刘 桐<sup>1</sup> 赵圣斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072

<sup>2</sup>天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072

**摘要** 利用无源电探针检测 A304 不锈钢在不同的 Nd:YAG 激光焊接条件下的光致等离子体电信号,研究了不同的激光焊接模式与激光等离子体电信号频谱分析结果之间的关系,分析了不同条件下的等离子体电信号波形图和频谱图,阐述了不同激光焊接模式下的焊缝横截面成形特征与等离子体电信号波形、频谱特征的关系。结果表明,在试验设定条件下,不同的激光焊接模式具有不同的等离子体电信号频谱特征。利用在 500~1000 Hz 范围内等离子体电信号频谱的谱强度  $E$  的大小可判别激光焊接过程是否为深熔焊,当  $E$  较大或超过一定值时,激光焊接模式为深熔焊。

**关键词** 激光技术;激光焊接;焊接模式;频谱强度;电信号;等离子体

**中图分类号** TG47 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0802008

## Spectral Analysis of Laser Induced Plasma Electrical Signals from Nd:YAG Laser Welding of A304 Stainless Steels

Yang Ruixia<sup>1</sup> Yang Lijun<sup>1,2</sup> Liu Tong<sup>1</sup> Zhao Shengbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** The electrical signals of laser induced plasma from Nd:YAG laser welding of A304 stainless steels are detected by a passive electrical probe. The relationship between different laser welding modes and the spectral analysis results of plasma electrical signals are investigated. The waveforms and spectra of plasma electrical signals are analyzed. The relationship between the formation characteristic of laser welds under different laser welding modes and the waveforms and spectra of the plasma electrical signals is illustrated. The results indicate that, under the specified conditions in the experiments, different laser welding modes correspond to different spectral characteristics of plasma electrical signals. Moreover, whether the welding mode is a deep penetration one or not can be identified by the spectral intensity  $E$  of plasma electrical signals within the scope of 500~1000 Hz. When  $E$  is large enough or exceeds a certain value, the laser welding mode is a deep penetration welding.

**Key words** laser technique; laser welding; welding mode; frequency spectrum intensity; electrical signal; plasma

**OCIS codes** 140.3460; 140.3390; 140.3380

## 1 引 言

激光焊接以其热输入小、焊缝深宽比大、焊接热影响区小、焊缝变形小等优点受到越来越广泛的关注。

**收稿日期:** 2016-02-26; **收到修改稿日期:** 2016-04-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(51175374)、先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWJ-Z15-03)

**作者简介:** 杨瑞霞(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光焊接等离子体电信号检测与分析方面的研究。

E-mail: 461434994@qq.com

**导师简介:** 杨立军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事焊接过程测控及等离子体物理方面的研究。

E-mail: yljabc@tju.edu.cn(通信联系人)

激光焊有深熔焊和热导焊两种模式,深熔焊是更能反映上述激光焊优点的焊接模式。

激光焊过程中产生的光致等离子体,又称激光等离子体。Szymanski 等<sup>[1-2]</sup>指出,等离子体在激光焊过程中以一定的频率周期性喷发,具有振荡特性,这种振荡特性在一定程度上反映了激光焊的特点。激光焊的不同焊接模式产生激光等离子体的方式不同:深熔焊过程中等离子体从小孔中喷出,热导焊过程中等离子体从被焊材料表面产生。激光等离子体的产生与激光焊过程密切相关,通过对激光等离子体的检测和分析可以研究激光焊的过程。

激光焊过程中等离子体的检测可以选择光、光谱、电及声等多种信号<sup>[3-5]</sup>,也可以采用多传感器系统<sup>[6]</sup>。其中,对声、光及光谱信号的研究较多,而对电信号的研究较少。前期的研究已利用无源电探针实时探测了激光焊接过程中的等离子体电信号,指出了其与等离子体温度及动态行为的关系<sup>[7]</sup>,并对激光等离子体的电信号进行了概率统计分析<sup>[8]</sup>。这种利用无源电探针实时探测的方法为研究激光等离子体的振荡特性提供了可能性,可以对等离子体电信号的频率特性进行检测与分析。本文利用无源电探针采集不同条件下激光焊接过程的等离子体电信号,分析研究激光等离子体电信号的频谱特征及其意义。

## 2 试验原理及方法

### 2.1 试验方法及设备

激光焊试验及信号采集系统如图 1 所示,其中电信号采集系统由无源电探针、调理电路、数据采集卡(DAQ)、计算机等构成。高速摄像用于采集激光焊接过程中的等离子体羽图像,其触发信号由计算机发出。试验中所用的 Nd:YAG 激光器(JK2003SM,GSI 公司,英国)的额定功率为 2 kW,激光波长为 1.06 μm,光斑直径为 0.6 mm。由于所采集的电信号幅值很小,研究过程中采用自主研发的调理放大电路对采集到的电信号进行滤波和放大,减小噪声信号的干扰。

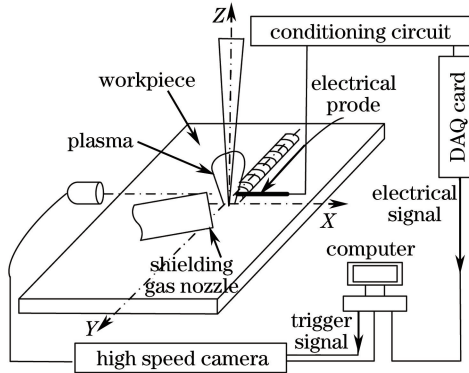


图 1 信号采集系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of signal acquisition system

试验材料为 3 mm 厚的 A304 奥氏体不锈钢板,保护气体为氩气。保护气喷嘴与焊接方向在同一平面,侧吹气流与工件表面角度为 45°。探针放置于工件上方,面对保护气吹送方向,探针尖端在图 1 所示的 YZ 平面内,距离激光作用点(即坐标原点)的距离为 2 mm,激光作用点和探针尖端的连线与 Y 轴的夹角为 45°。在激光焊接试验中,离焦量  $d$  为 -1 mm,通过调节激光功率、焊接速度、保护气流量等参数来获得不同的焊缝成形,同时采集电信号,进行焊缝成形特征和电信号波形图、频谱图的分析。

### 2.2 电信号检测原理

无源电探针检测电信号的理论基础是等离子体鞘层理论<sup>[9]</sup>。将一个温度较低的导体置于等离子体中,由于电子质量  $m_e$  远小于正离子质量  $m_i$ ,质量小的电子运动速度快,表面聚集负电荷最终形成了等离子体鞘层。根据研究<sup>[5]</sup>,导体表面的负电位  $U_w$  可由下式来表示

$$U_w = -(KT/4e)\ln(m_i/m_e), \quad (1)$$

式中  $U_w$  为鞘层电压, $K$  为 Boltzmann 常数, $T$  为电子温度, $e$  为电子电量。由电探针探测到鞘层电压,通过(1)式可求出探针所处位置的电子温度。

由(1)式可见,无源电探针所检测的电信号反映了等离子体电子温度的变化情况。根据等离子体动力学原理和广义欧姆定律,等离子体内部温度梯度和压力梯度变化会影响电子的运动,进而影响等离子体鞘层的状态变化。而激光等离子体的产生与喷发过程的剧烈程度会影响到等离子体内部温度与压力,这也意味着电信号的波动与等离子体内部的这种振荡特性密切相关。

### 2.3 电信号频谱分析原理

采集到的等离子体电信号具有振荡特性,因而可进行频谱分析。频谱分析的基础是傅里叶变换原理:任何一个函数都能够展开成三角函数的无穷级数,傅里叶变换可以将一个复杂的周期运动看作是许多不同频率的简谐振动的叠加。利用快速傅里叶变换(FFT)可以将离散时域信号变换到频域,获得信号的频域特征<sup>[10-11]</sup>。采样长度为  $N$  的信号可看作长度为  $N$ (采样数)的向量  $\mathbf{x}$ ,经傅里叶变换后是长度为  $N$  的向量  $\mathbf{X}$ ,向量  $\mathbf{X}$  的第  $k$  个元素可以表示为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times \exp(-2\pi jkn/N), \quad k \in [0, N-1], \quad (2)$$

式中  $X(k)$  一般为复数。这样就将信号由实数域转换到复数域,电信号进行 FFT 变换可借助 MATLAB 数学工具来实现。

对于采样长度为  $N$  的电信号,经过傅里叶变换可以得到  $N$  个复数点,第  $n$  个复数点处的频率为  $f_n = (n-1) \times F_s/N$ ,  $F_s$  为采样频率,该复数点的模值就是频率  $f_n$  处的幅度特性。以频率  $f_n$  为横坐标,任一频率  $f_n$  对应的复数点的模值除以  $N/2$  为纵坐标进行绘图,可得到电信号的幅频谱图。无特殊说明时,频谱图即为幅频谱图。

由于电信号频谱图在某一频率  $f_n$  处的幅值  $A$  为频率  $f_n$  对应的复数点的模值除以  $N/2$ ,可以用频率  $f_n$  处的频谱幅值来表征电信号在该频率处的强度。对某一频率范围内的频谱幅值进行叠加,得到电信号在该频率范围内的谱强度  $E$ :

$$E = \sum_{f=f_1}^{f_2} A_f, \quad (3)$$

式中  $A_f$  为频率  $f$  处的频谱幅值,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为所选谱段的起始频率和终止频率。

## 3 试验结果与分析

在激光焊接试验中,焊接参数变化范围如下:激光功率  $P$  为 1000~1350 W、焊接速度  $v$  为 6~18 mm/s、保护气流量  $q$  为 10~30 L/min,共进行了 12 组激光焊试验。通过对所采集电信号的频谱分析,发现电信号特定谱段的谱强度与激光焊模式有明显的对应关系。

### 3.1 典型电信号分析

#### 3.1.1 原始信号描述

三种典型的激光焊焊缝及其对应的电信号波形如图 2 所示,图 2(b1)所示电信号波形图与图 2(a1)、(c1)明显不同,图 2(b1)中的电信号波动范围较小,甚至出现 0 V 值,而图 2(a1)、(c1)中的电信号波动剧烈。

图 2(a1)、(a2)对应的是典型深熔焊焊接过程,深熔焊过程中的小孔持续存在,等离子体不断强烈喷发而产生较大波动,相应的电信号振荡强烈;图 2(b1)、(b2)对应典型热导焊焊接过程,热导焊过程没有小孔形成,等离子体的波动较弱,相应的电信号振荡较弱;图 2(c1)、(c2)对应的焊缝为钉形焊缝(因焊缝横截面呈钉子的形状,故称其为钉形焊缝),该焊接过程中的电信号与典型的深熔焊过程的电信号相似,也有较强的振荡。

综上所述,不同激光焊接模式的焊缝成形对应着不同的等离子体电信号波形特征,可以对电信号进行更深入的分析来理解二者之间的关系。

#### 3.1.2 FFT 频谱分析

图 3 所示是图 2 中电信号波形图通过 FFT 变换得到的频谱图,其中图 3(a)、(b)、(c)分别对应图 2(a1)、(b1)、(c1)。图 3(a)中典型的深熔焊电信号频谱与图 3(b)中典型的热导焊电信号频谱明显不同,后者等离子体电信号频率主要集中在 500 Hz 以下的低频谱段,前者等离子体电信号波动的频率范围较大,但二者均没有明显的特征频率;图 3(c)中钉形焊缝所对应的激光焊接过程中的电信号频谱与典型深熔焊模式下

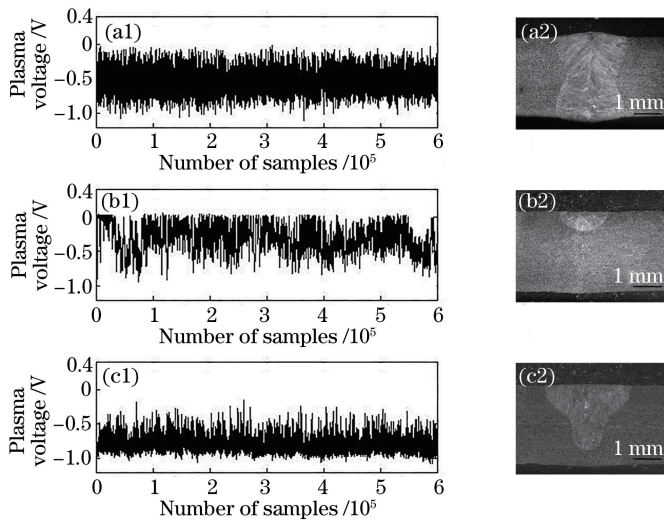


图 2 典型激光焊缝横截面及对应的电信号波形图。(a1)(a2)深熔焊缝;(b1)(b2)热导焊缝;(c1)(c2)钉形焊缝

Fig. 2 Cross sections of typical laser welds and their corresponding waveforms of electrical signals.

(a1)(a2) Deep penetration welds; (b1)(b2) thermal conduction welds; (c1)(c2) nail-shaped welds

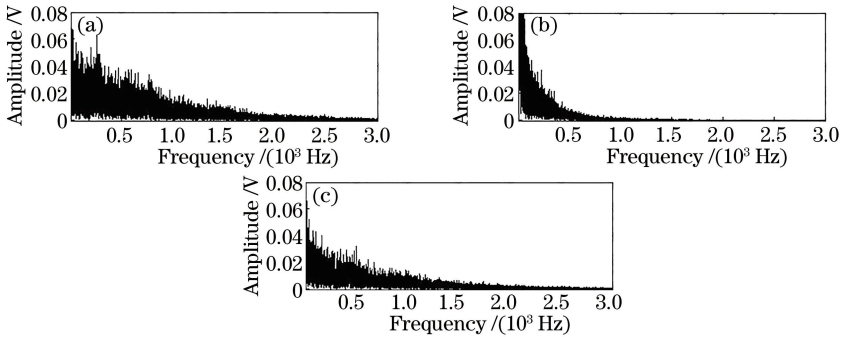


图 3 典型电信号频谱图。(a)深熔焊缝;(b)热导焊缝;(c)钉形焊缝

Fig. 3 Spectra of typical electrical signals. (a) Deep penetration welds; (b) thermal conduction welds;

(c) nail-shaped welds

的电信号频谱接近,其特征频率也不明显。

从上述分析可以看出,虽然深熔焊过程的小孔等离子体喷发具备周期性喷发的振荡特性,但是其电信号的频谱分布并未显示出固定的特征频率,而是在一定频率范围内相对于热导焊显示出振荡增强的特点,振荡增强的频谱在 300~3000 Hz 的较宽范围内。由此推测,小孔等离子体的喷发虽是周期性的,但该周期并非一个相对固定的值,而是在一定范围内变化。

对上述电信号在较大谱段内进行频谱分析,将 FFT 频谱按 500 Hz 为一个谱段进行分段的谱强度分析。通过对不同条件下的不同谱段的电信号频谱进行分析,发现三种电信号频谱强度在 500~1000 Hz 谱段差别最大。利用(4)式对上述三种电信号在 500~1000 Hz 谱段内的电信号频谱进行积分,得到的谱强度  $E$  分别为 22.41, 3.36, 13.34 V。可以看出,深熔焊焊缝对应的  $E$  值最大,另外两种情况对应的  $E$  值明显偏小。

### 3.2 试验电信号谱强度分析

上述分析是针对典型激光焊接过程,为获得一般性结论,按表 1 所示参数进行多组激光焊接试验,并进行电信号频谱强度分析和相应的焊缝形貌分析,相关分析结果见表 1,其中离焦距  $d$  为 -1 mm。表 1 中 12 组试验对应的电信号在 500~1000 Hz 谱段内的谱强度如图 4 所示,图 5 所示为各组试验所得焊缝横截面示意图。



表 1 激光焊接参数  
Table 1 Laser welding parameters

Group	Power $P$ /W	Welding speed $v$ /(mm/s)	Shielding gas flow $q$ /(L/min)	Deep penetration weld or not	$E$ /V
1	1000	6	20	No	12.31
2	1100	6	20	No	13.62
3	1250	6	20	Yes	23.61
4	1350	6	20	Yes	24.19
5	1250	6	30	Yes	22.41
6	1250	8	30	Yes	21.33
7	1250	10	30	Yes	22.27
8	1250	12	30	Yes	19.63
9	1250	16	30	No	10.90
10	1250	18	30	No	3.36
11	1250	6	15	No	13.34
12	1250	6	10	No	7.52

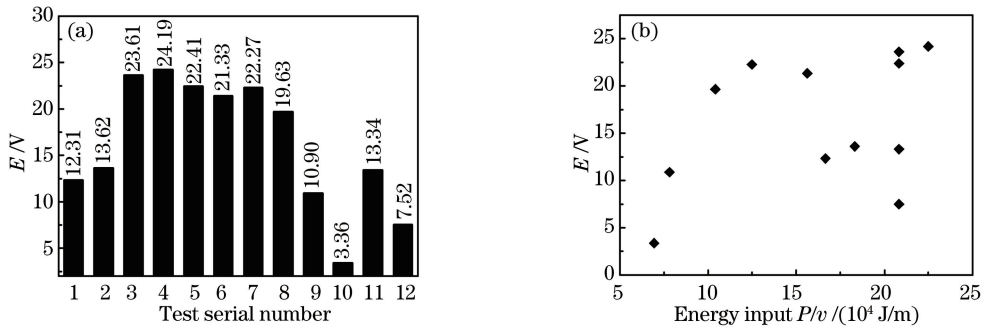


图 4 各组参数电信号谱强度  $E$ 。(a) 直方图;(b)  $E$  与能量输入( $P/v$ )的关系  
Fig. 4 Spectral intensity  $E$  of electrical signals for different groups of parameters.  
(a) Histogram; (b) relationship between  $E$  and energy input ( $P/v$ )

通过对比焊缝横截面成形情况与 500~1000 Hz 范围内的电信号谱强度  $E$  值,可以发现深熔焊对应的  $E$  值明显较大,都在 19 V 以上;相比之下,非深熔焊过程的  $E$  值明显偏低,不超过 14 V;从图 4(b)中可以看出  $E$  值与激光能量输入  $P/v$  无关,主要取决于焊接模式。这意味着可利用等离子体电信号在特定谱段内的谱强度大小来判别焊接模式,当  $E$  大于某个临界值或处于某个较高区间时,对应的焊接模式为深熔焊;当  $E$  小于这个值或处于较小区间时,就不是深熔焊。较大的  $E$  值表明等离子体电信号振荡强度较大,意味着对

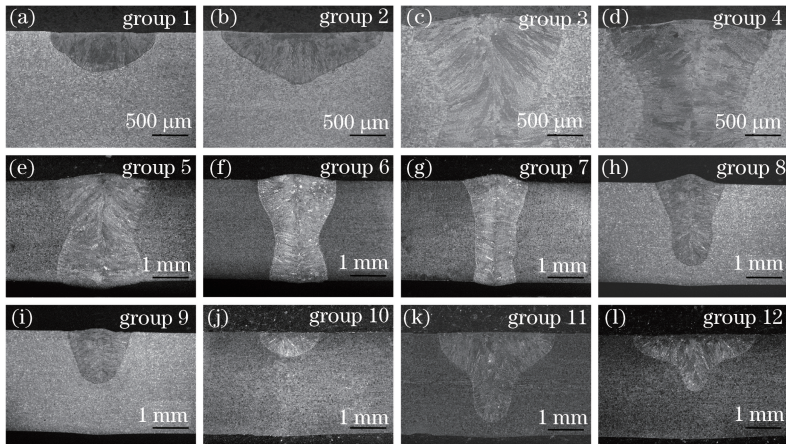


图 5 各组试验所得焊缝横截面形貌  
Fig. 5 Cross sections of welds for different groups of tests

应的激光焊接过程中等离子体的振荡较剧烈,这为激光焊接过程的监控提供了一种新的思路。

第 11、12 组试验与第 3、5 组试验能量输入条件相同,均为图 4(b)中最大能量输入,但焊缝不同,且与常见的深熔焊和热导焊焊缝也不同,这是因为在试验中保护气流量不足造成了等离子羽形态发生变化,如图 6 高速摄像所示。

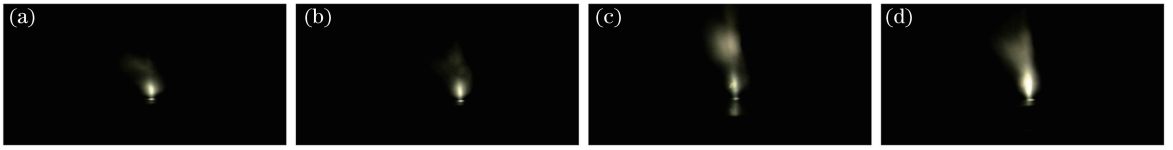


图 6 各组试验参数等离子羽高速摄像照片。(a) 第 5 组;(b) 第 3 组;(c) 第 11 组;(d) 第 12 组

Fig. 6 High-speed-camera pictures of plasma for different groups of test parameters. (a) Group 5; (b) group 3; (c) group 11; (d) group 12

较大保护气流量可有效抑制等离子羽体积的扩张,有利于激光能量到达工件,形成深熔焊焊缝。在深熔焊条件下小孔效应显著,等离子体剧烈喷发,引起孔外等离子体剧烈振荡,对应的等离子体电信号在特定频率范围内的谱强度较大。当保护气流量较小时,等离子羽明显分为上下两层,下层仍保持了与保护气流量较大时的类似形态,上层则扩张较大。对实际试验过程进行观察,可以推测上层由于卷入了空气而存在金属蒸气氧化现象,这会影 响激光的通过。有学者已指出等离子体形态变化对激光的折射、散射和吸收作用<sup>[12-13]</sup>,激光在通过非均质物质时折射作用会影响其焦点位置,例如使得激光束焦点上移而易于产生钉形焊缝。总的来说,保护气流量较小时,体积较大的等离子体会使得到达工件的激光能量较小,达不到深熔焊所需的条件,在这种情况下小孔效应减弱甚至消失,等离子体喷发的剧烈程度较低,孔外等离子体振荡较弱,对应的等离子体电信号在特定频率范围内的谱强度较小。因此,尽管钉形焊缝形成过程的等离子体电信号波形与深熔焊过程类似,然而对两者频谱特征进行分析仍可发现明显差异,说明深熔焊过程的电信号频谱特征有其特有的属性。

## 4 结 论

采用 A304 不锈钢材料和 Nd:YAG 激光器进行激光焊试验,采集激光等离子体电信号,通过频谱分析可知,等离子体电信号可以反映不同激光焊接模式的特征。利用等离子体电信号在特定谱段内的谱强度,分析和判别激光焊接模式,为激光焊接过程的监控提供了一种新的思路。对不同条件下激光焊接等离子体电信号频谱在 500~1000 Hz 范围内的谱强度  $E$  进行分析,发现深熔焊条件下  $E$  值较大,非深熔焊条件下  $E$  值相对较小,两者差异明显。

## 参 考 文 献

- 1 Szymanski Z, Hoffman J, Kurzyna J. Plasma plume oscillations during welding of thin metal sheets with a CW CO<sub>2</sub> laser [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(2): 189-199.
- 2 Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, *et al.* Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(8): 744-748.
- 3 Luo Hong, Hu Lunji, Huang Shuhuai, *et al.* Real time diagnosis and control of laser welding quality[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1997, 34(1): 1-6.  
骆 红, 胡伦骥, 黄树槐, 等. 激光焊接质量的实时诊断和控制[J]. 激光与光电子学进展, 1997, 34(1): 1-6.
- 4 Li Fei, Zou Jianglin, Kong Xiaofang, *et al.* Experimental research on high power fiber laser-TIG hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0503004.  
李 飞, 邹江林, 孔晓芳, 等. 高功率光纤激光-TIG 复合焊接实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0503004.
- 5 Zheng Shiqing, Wen Peng, Shan Jiguo. Research on wire transfer and its stability in laser hot wire welding process[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0403008.  
郑世卿, 温 鹏, 单际国. 激光热丝焊接过程焊丝过渡行为及其稳定性的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0403008.
- 6 You D Y, Gao X D, Katayama S. Multiple-optics sensing of high-brightness disk laser welding process [J]. NDT&E International, 2013, 60: 32-39.

- 7 Bi C, Yang L J, Xu W H, *et al.* An electrical detection of the fluctuating plasma of laser welding with a passive probe [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(38): 385202.
- 8 Jiao Jiao, Yang Lijun, Liu Tong, *et al.* Electrical detection of the plasma and analysis of welding modes in YAG laser welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0903005.  
焦 娇, 杨立军, 刘 桐, 等. YAG 激光焊接等离子体电信号检测与焊接模式分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0903005.
- 9 Cherrington B E. The use of electrostatic probes for plasma diagnostics—A review [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1982, 2(2): 113-140.
- 10 Liu Liqun, Zhao Zhennan. Spectrum analysis technique in ultrasonic test [J]. *CFHI Technology*, 2013(5): 57-61.  
刘立群, 赵振南. 频谱分析技术在超声检测中的应用[J]. *一重技术*, 2013(5): 57-61.
- 11 Liu Jinglei, Chen Yanbin, Xu Qinghong. Correlation of acoustic signals and weld depth in laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(1): 72-75.  
刘京雷, 陈彦宾, 徐庆鸿. 激光焊接声信号与熔深的相关性[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 72-75.
- 12 Xiao Rongshi, Chen Kai, Chen Jimin, *et al.* Experimental research of the plasma shielding mechanism in the process of CO<sub>2</sub> laser welding [J]. *Laser Technology*, 2001, 25(3): 238-241.  
肖荣诗, 陈 铠, 陈继民, 等. CO<sub>2</sub> 激光焊接光致等离子体屏蔽机制的实验研究[J]. *激光技术*, 2001, 25(3): 238-241.
- 13 Zou Jianglin, Li Fei, Niu Jianqiang, *et al.* Effect of laser-induced plume on welding process during high power fiber laser welding [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0603005.  
邹江林, 李 飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603005.