

镀锌钢激光添粉焊接的等离子体监测机理

张 屹¹ 段林勇¹ 周惦武¹ 李时春¹ 王存山²

(¹湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)
²大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 采用 CO₂ 激光器对 1.6 mm 厚的 B340/590DPD+Z 镀锌钢板间添加不同量铜粉进行了激光搭接焊。基于光谱仪采集的焊接等离子体光信号, 分析添加铜粉对焊接过程产生的等离子体光信号的影响, 以及焊接气孔与等离子体光信号的关系。焊后采用扫描电子显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 对焊缝截面扫描, 检测铜元素的平均含量及气孔内壁主要元素的分布变化。研究表明, 添加铜粉较未添加铜粉激光搭接焊时, 等离子体温度振荡显著降低, 平均温度下降约 5000 K; 气孔内壁存在着铜锌固溶体合金, 且焊缝中的气孔缺陷与 CuI324.8 nm 谱线强度存在着关联。此结果为镀锌钢添加粉末激光焊接监测提供了理论依据, 并为等离子体控制技术提供了一种新的方法。

关键词 激光技术; 激光搭接焊; 等离子体监测; 添粉; 镀锌钢; 气孔

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0503005

Monitoring Mechanism of Plasma Generated by Laser Welding Galvanized Steel with Powder Feeding

Zhang Yi¹ Duan Linyong¹ Zhou Dianwu¹ Li Shichun¹ Wang Cunshan²

¹The State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

²School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract Experiments of laser welding of 1.6 mm thick galvanized steel B340/590DPD+Z with different amounts of copper are performed by using a CO₂ laser. Based on the light emission from the plasma plume acquired by spectrometer in the welding process, the effects of adding copper powder on the plasma optical signal and the relationship between the pores and the plasma optical signal is analyzed. Then the average content of copper element and the distribution of the main elements around the pores are detected by using a scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that compared to laser welding without adding copper powder, the oscillation of plasma temperature is significantly reduced and the average temperature drops about 5000 K. In addition the solid solution alloy of copper and zinc distributes around the pore wall and the porosity has a correlation with the intensity of spectrum at CuI324.8 nm as well. The researches provide a theoretical basis for monitoring on laser welding galvanized steel with powder feeding and a new method for the plasma control technology.

Key words laser technique; laser lap welding; plasma monitoring; powder feeding; galvanized steel; pores

OCIS codes 140.3390; 140.3470; 160.3900; 350.5400

1 引 言

近年来, 为了提高汽车在恶劣环境下的抗腐蚀性能和使用寿命, 镀锌板被越来越多地用于制作汽

车车身覆盖件、底板等零部件^[1~3]。但是由于锌的低熔点(420 °C)和低沸点(906 °C), 激光焊接过程中镀锌钢表层镀锌层易迅速熔化和气化, 产生的锌

收稿日期: 2011-12-14; 收到修改稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(50805045, 51175162)和留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 张 屹(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光焊接、切割方面的科研和教学工作等方面的研究。

E-mail: zy2100_hn@yahoo.com.cn

蒸气在极大的熔池压力挤压下迅速爆破,从而产生飞溅、气孔、未熔合及裂纹等诸多焊接缺陷^[4]。而且镀锌层的大量挥发将使得母材的防腐蚀能力下降,焊接缺陷的产生导致焊缝的机械强度下降,从而限制了镀锌钢板在汽车车身制造领域中的应用。

激光焊接过程中会产生大量光致等离子体,研究发现光致等离子体与焊接过程的稳定性及焊接质量有很大关系^[5]。国内外众多学者利用激光深熔焊接产生的等离子体的声、光、电信号来监测激光焊接的熔透性及其他一些焊接缺陷^[6~8]。而锌行为则是镀锌钢激光焊接的另一困扰。锌行为主要指镀锌钢激光焊接过程中的锌蒸气和锌等离子体对激光束的阻隔、散射、吸收以及对焊接熔池的扰动。为抑制镀锌钢激光焊接过程中的锌行为和对接焊接质量进行有效监控,许多学者在这方面做了很多研究^[9~16]。北京工业大学的李明星^[9]提出通过在镀锌板焊接过程中添加与锌元素有较强亲和力的元素可以将锌固溶,抑制锌行为使焊接过程更加稳定。本文研究了添加铜粉对镀锌钢激光焊接过程中产生的等离子体光信号的影响,分析了添加铜粉对镀锌钢激光焊接时锌行为的抑制作用,建立了等离子体光信号与焊接缺陷(气孔)之间的关系,提供了镀锌钢添加粉末激光焊接监测的理论依据,为等离子体控制技术提供了一种新的方法。

2 试验设备与方法

2.1 试验设备

试验采用德国 ROFIN 生产的 DC025 型板条式 CO₂ 激光器。最大输出功率为 2500 W,连续输出的激光模式为 TEM₀₀,输出能量近似高斯分布。光束发散半角 $\alpha < 0.15$ mrad,抛物反射镜聚焦,焦距 f 为 200 mm,焦斑直径 0.4 mm。等离子体光谱采集仪器为 SpectraPro-2356 型多通道光谱分析仪,配备 1340 pixel×400 pixel。

2.2 试验材料

试验材料为宝钢生产的高强度冷轧热镀锌双相钢板 B340/590DPD+Z,材料化学成分见表 1,其抗拉强度 $\sigma_b \geq 590$ MPa,屈服强度 $\sigma_s \geq 340$ MPa。试验

表 1 B340/590DPD+Z 的材料化学成分

Table 1 Chemical composition of B340/590DPD+Z

Chemical composition	C	Si	Mn	P	S
Mass fraction /%	0.18	0.8	2.2	0.035	0.030

Note: The zinc coating thickness is 200 g/m² (double), coating thickness is 20 μ m

试件尺寸为 90 mm×30 mm×1.6 mm 的平板件。为了尽可能减少油污对焊接质量的影响,焊前用丙酮清洗焊接部位,去除油污。

2.3 试验步骤

基于无添加铜粉的镀锌钢激光搭接焊试验获得的激光深熔穿透焊接工艺参数(如表 2 所示),进行了预置添加粉末镀锌钢激光搭接焊试验,试验过程采用氩气侧吹保护焊缝。试验原理如图 1 所示。焊接前,在两块镀锌钢板之间预置不同量的铜粉,激光束经反射和聚集后垂直照射到镀锌钢板表层,在高能量密度激光的作用下,试件材料被迅速熔化、气化、电离,继而产生光致等离子体。孔外等离子体光信号经成像透镜放大,沿高度方向多点光纤探点采集,多通道光纤传输至多通道光谱仪,并将光谱数据存储于计算机。为了分析添加铜粉对镀锌钢激光焊接的影响,计算了焊接过程中的等离子体温度及其变化。为了分析焊缝中的气孔缺陷与等离子体光信号的关系,焊后沿焊缝方向切割,且采用扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)检测了焊缝和气孔中主要元素的含量与分布变化。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

Group	Laser power / W	Welding speed / (mm/min)	Gas-flow rate / (L/min)	Defocusing distance / mm
1.6 mm+	2300	1000	15	0
1.6 mm				

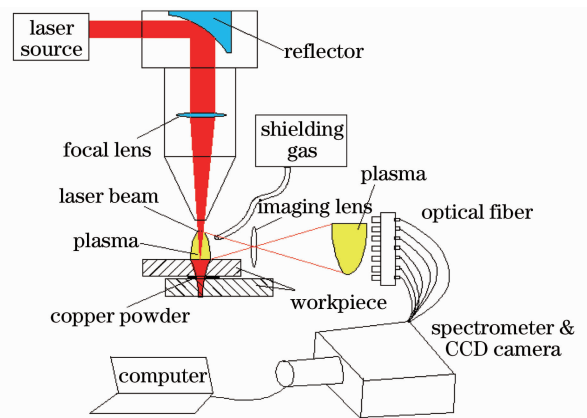


图 1 镀锌钢添粉激光焊接原理图

Fig. 1 Laser welding schematic of galvanized steel with copper powder

3 等离子体温度计算方法

多通道光谱分析仪测量的一帧谱线如图 2 所示。由 Boltzmann 分布定律^[17],当电子从能级 p 向

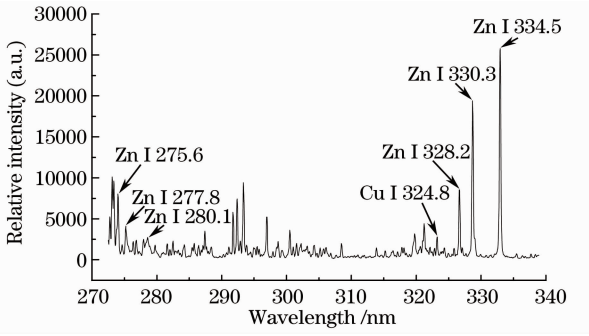


图 2 等离子体光谱图

Fig. 2 Spectra of plasma

能级 q 跃迁时,产生的辐射强度 I_{pq} 可表达为

$$I_{pq} = N_0 \frac{g_p}{g_0} \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right) A_{pq} h\nu_{pq}, \quad (1)$$

式中 N_0 为分析元素的总原子数; g_0 、 g_p 为基态和能级 p 的统计权重; E_p 为 p 能级的激发能; k 为 Boltzmann 常数; ν_{pq} 为电子从能级 p 向能级 q 跃迁时发射谱线的频率; h 为普朗克常数; A_{pq} 是 p 能级和 q

能级之间原子的跃迁几率; T 为等离子体温度。

将 $\nu_{pq} = c/\lambda$ (c 为光速, λ 为波长)代入(1)式,并取自然对数则得

$$\ln \frac{I_{pq}\lambda}{g_p A_{pq}} = -\frac{5040E_p}{T} + M, \quad (2)$$

式中 M 为常数。由(2)式可知, $\ln \frac{I_{pq}\lambda}{g_p A_{pq}}$ 和 E_p 成线性关系。基于多通道光谱分析仪测量的谱线强度,等离子体温度 T 可由斜率 $-\frac{5040E_p}{T}$ 计算而得。由(2)

式和锌离子能级跃迁图(图 3)可知,等离子体温度计算的谱线选择应遵循:1) 尽可能选择多条谱线以减少测量误差;2) 各谱线间上能级之差尽可能大以提高温度测量的精度。图 3 中,谱线 ZnI334.5 nm 的强度常超出测量范围,因此选择 ZnI275.6、277.8、280.1、328.2、330.3 nm 五条谱线用于计算等离子体温度。表 3 为用于计算等离子体温度的锌等离子体相关谱线的参数。

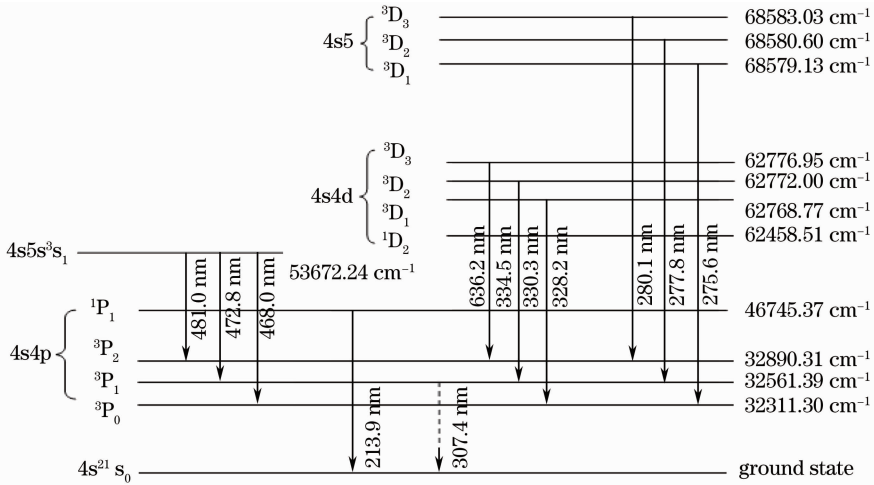


图 3 锌离子能级跃迁图

Fig. 3 Transition of Zinc ion

表 3 锌等离子体谱线的相关参数

Table 3 Spectroscopic parameters of zinc plasma

Wavelength λ /nm	Statistical weight g	Transition probability $A / (10^7 \text{ s}^{-1})$	Energy of the upper lever E_p / cm^{-1}
275.6	1	3.42	68579.13
277.8	3	4.60	68580.60
280.1	5	6.04	68583.03
328.2	1	8.66	62768.77
330.3	3	1.07	62772.00

4 试验结果及分析

4.1 添加铜粉对光致等离子体温度的影响

光致等离子体是激光深熔焊接过程中,在高能

量密度激光束作用下,伴随小孔同时存在的不可避免的重要物理现象。它对激光深熔焊过程中的小孔形成、能量及物质传递起到至关重要的作用。试验中,实际添加的铜粉量由焊后 EDS 测量焊缝截面铜元素的平均含量所得。图 4 为有无添加铜粉时焊接过程中等离子体的温度变化曲线。图 5 是添加不同铜粉量时焊接过程中等离子体平均温度曲线。由图 4、5 可知,无添加铜粉时,等离子体温度振荡大,最大振幅达到 14000 K;当焊缝中铜元素质量分数为 3.35% 时,等离子体温度振荡显著降低,最大振幅降为约 3000 K。无添加铜粉时等离子体平均温度约 10600 K;当焊缝中铜元素质量分数为 3.35%

时,平均温度迅速下降至约 5000 K。且随着添加铜粉量的增加,等离子体平均温度呈先大幅下降后基本保持不变。这是因为添加铜粉时,铜和锌固溶形成固溶体合金,铜锌固溶体合金的熔点和沸点均较锌的熔点和沸点要高,且随着铜锌合金中铜的含量增加,合金的熔点和沸点升高,因此添加铜粉较无铜粉激光焊接镀锌钢时,锌难于气化和电离。铜锌固溶体合金的形成在一定程度上减少了锌蒸气和锌等离子体的产生,等离子体温度及其振荡幅度也随之降低。

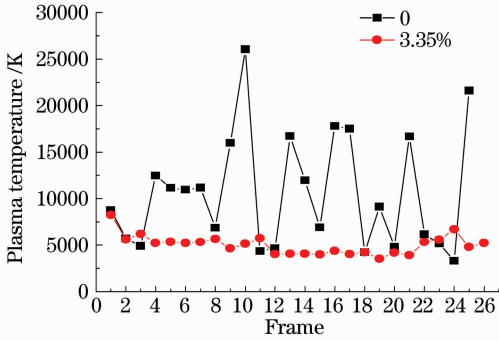


图 4 铜元素质量分数为 0 和 3.35% 时的等离子体温度曲线

Fig. 4 Plasma temperature curve of laser welding when the copper mass fractions are 0 and 3.35%, respectively

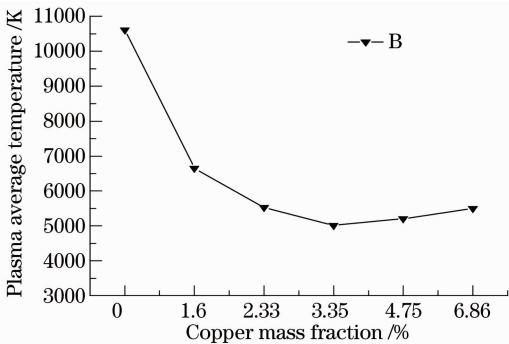


图 5 添加不同量铜粉时的等离子体平均温度曲线
Fig. 5 Plasma average temperature of laser welding with different amounts of copper

4.2 焊接气孔的元素分布

采用体视镜观测焊缝气孔,发现气孔四周含有大量的混合均匀的金黄色铜锌固溶体合金。采用 EDS 检测气孔内壁的主要元素及其变化趋势如图 6 所示。图 6(a)为扫描电子显微镜下拍摄的气孔照片及其线扫描位置,图 6(b)为线扫描位置的主要元素的分布变化。由图 6 可见焊缝区各主要元素分布均匀,而气孔内壁 Zn、Cu、C、O 元素含量较焊缝区显著增加且分布不均匀。其中 Cu 元素和 Zn 元素含量变化趋势完全一致。这是因为焊接过程中,铜

元素会向气孔处偏析积聚;铜粉在激光能量的作用下熔化,锌和铜的亲合力使得锌元素由低浓度处向高浓度处上扩散,生成了铜锌固溶体合金,使得孔壁处 Cu 元素和 Zn 元素含量同时大幅增加。气孔处 Cu 元素和 Zn 元素及其他元素含量在气孔底部表现为下降的原因是电子束无法探测到孔底部元素含量,各元素含量无法准确测量。

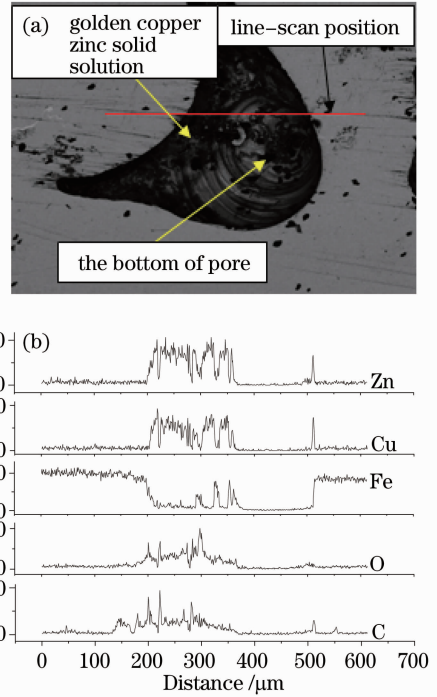


图 6 气孔周围主要元素的分布。(a) SEM 下拍摄的气孔及线扫描位置;(b)线扫描位置处主要元素的分布变化

Fig. 6 Main elements distribution around a pore. (a) Line-scan position and pore photograph shooten by SEM; (b) main elements distribution of the line-scan position

4.3 焊接气孔缺陷与 Cu 等离子体谱线的对应关系

通过分析镀锌钢激光焊接过程中 Cu、Zn、Fe 各谱线信息,发现谱线 CuI 324.8 nm(图 2)与焊接气孔缺陷密切相关。图 7 为铜元素质量分数为 2.33% 时,CuI 谱线强度曲线与焊缝气孔的对应关系。分析沿焊缝方向截面的有无气孔变化和 CuI 324.8 nm 谱线强度变化曲线,发现当谱线 CuI 324.8 nm 的强度出现某个峰值时,焊缝处对应出现了焊接气孔。这是因为气孔处铜元素含量增加(见图 6),激光能量在气孔处利用率增加,为气孔壁完全吸收,易于使铜元素熔化、气化。而由 Boltzmann 分布定律^[17]可知:电离原子数越多,谱线强度越高。因此激光焊接过程中产生的 CuI324.8 nm 等离子

体光信号可以用来有效监测镀锌钢添加铜粉焊接过程中气孔的产生。

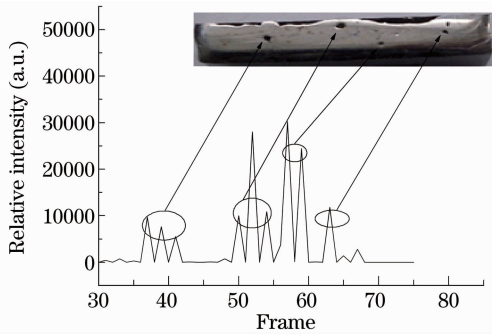


图7 铜元素质量分数为2.33%时焊接气孔与CuI 324.8 nm谱线强度的对应关系

Fig. 7 Correspondence between pores and the spectra relative intensity of CuI324.8 nm when the copper mass fraction is 2.33%

5 结 论

通过实验及结果分析,可以获得镀锌钢添加铜粉的激光焊接等离子体光信号监测的基本理论,得出以下结论:

1) 谱线 ZnI275.6、277.8、280.1、328.2、330.3 nm的光谱强度信息可用于计算等离子体温度,用于监测镀锌钢添加铜粉激光焊接过程的稳定性。

2) 添加铜粉降低了镀锌钢板激光焊接过程中孔外等离子体温度及其振荡幅度。无添加铜粉时,等离子体温度振荡幅度达到14000 K,平均温度约10605 K;当铜元素质量分数为3.35%时,等离子体温度最大振荡幅度约3000 K,等离子体平均温度下降至约5000 K,随着添加铜粉量的增加,等离子体平均温度呈先大幅下降后基本不变的趋势。

3) 添加铜粉镀锌钢激光焊接的气孔内壁形成了金黄色铜锌固溶体合金,且能谱监测结果显示焊缝区各元素均匀稳定,在气孔壁铜和锌元素含量较焊缝区显著增高,并且两元素含量变化趋势完全一致。

4) 通过分析镀锌钢激光焊接过程中Cu、Zn、Fe各谱线信息,当谱线CuI324.8 nm强度出现某个峰值时,则焊缝处对应出现了焊接气孔。CuI 324.8 nm等离子体光信号可以用来有效监测镀锌钢添加铜粉焊接过程中气孔的产生。

参 考 文 献

1 Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side

- laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1375~1379
- 卢兵兵, 白车身车顶侧围激光焊接工艺参数分析与优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1375~1379
- 2 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603013
- 陈根余, 陈飞, 张屹等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603013
- 3 Zhang Jian, Yang Rui. Prediction on light intensity distribution of laser melt pool base on radial basis function neural network [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1856~1860
- 张健, 杨锐. 基于径向基函数神经网络的激光焊接熔池强度分布预测[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1856~1860
- 4 Zhang Yi, Li Shichun, Jin Xiangzhong *et al.*. Research on the key technology of laser welding of galvanized steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **46**(7): 071401
- 张屹, 李时春, 金湘中等. 镀锌钢板激光焊接关键技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **46**(7): 071401
- 5 Gao Shiyi, Wu Ruimin, Chen Weidong *et al.*. Development status of laser welding process monitor and seam quality detection [J]. *World Iron & Steel*, 2010, **10**(3): 51~54
- 高世一, 吴瑞珉, 陈卫东等. 激光焊接过程监测及焊缝质量检测技术研究现状[J]. *世界钢铁*, 2010, **10**(3): 51~54
- 6 Duan Aiqin, Hu Lunji, Wang Yajun. Research on weld penetration monitoring by laser plasma optical signal in laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 131~134
- 段爱琴, 胡伦骥, 王亚军. 激光深熔焊焊缝的熔透性监测研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 131~134
- 7 Zeng Hao, Zhou Zude, Chen Youping *et al.*. Real-time in-process monitoring of laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(3): 284~288
- 曾浩, 周祖德, 陈幼平等. 激光焊接过程实时监测[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(3): 284~288
- 8 Wang Chunming, Yu Fulin, Duan Aiqin. The relationship between penetration and plasma optical signal of deep non-penetrating laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, **23**(5): 45~49
- 王春明, 余福林, 段爱琴. 非穿透激光深熔焊熔透与等离子体光信号的关系[J]. *焊接学报*, 2002, **23**(5): 45~49
- 9 Li Mingxing. Laser Welding of Zinc-Coated Steels with Filler Powder[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. 6~9
- 李明星. 镀锌板的激光填充粉末焊接[D]. 北京: 北京工业大学, 2006. 6~9
- 10 Xiong Jiangang, Hu Lunji, Liu Jianhua *et al.*. Study on laser welding of zinc coated steel and the effects of zinc vaporization [J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(1): 26~28
- 熊建钢, 胡伦骥, 刘建华等. 镀锌板激光焊接工艺及锌行为研究[J]. *激光技术*, 1998, **22**(1): 26~28
- 11 Cui Huaiyang, Chen Kai, Zuo Tiechuan. CO₂ laser welding of galvanized steel welding[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2004, **25**(4): 115~118
- 崔怀洋, 陈铠, 左铁钊. 镀锌钢板的CO₂激光焊接性[J]. *焊接学报*, 2004, **25**(4): 115~118
- 12 A. Loredo, B. Martin, H. Andrzejewski *et al.*. Numerical support for laser welding of zinc-coated sheets process development[J]. *Applied Surface Science*, 2002, **195**: 297~303
- 13 Weichiat Chen, Paul Ackerson, Pal Molian. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**: 245~251
- 14 Tang Xiahui, Zhou Yi, Li Shimin *et al.*. Study of laser-induced plasma behavior and control during laser deep penetration welding of powder materials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 237~240
- 唐霞辉, 周毅, 李适民等. 粉末冶金材料激光深熔焊接光致等

- 离子体行为及控制[J]. 中国激光, 2004, **31**(2): 237~240
- 15 Zhang Shenghai, Chen Kai, Xiao Rongshi *et al.*. Influence of metal powder on high power CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 860~863
- 张盛海, 陈 铠, 肖荣诗等. 填充粉末对铝合金高功率 CO₂ 激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 860~863
- 16 Guohua Li, Yan Cai, Yixiong Wu. Stability information in plasma image of high-power CO₂ laser welding [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2009, **47**: 990~994
- 17 Xin Renxuan. Spectrum Analysis of Plasma Emission [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 19~21
- 辛仁轩. 等离子体发射光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 19~21

栏目编辑: 宋梅梅