

文章编号: 0258-7025(2009)09-2438-05

# 激光-电弧复合焊接临界速度规律研究

高明 熊征 曾晓雁 严军

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为了加深对激光-惰性气体熔化极电弧(MIG)复合焊接特性的认识程度, 采用厚 4 mm 的 Q235 低碳钢系统研究了激光功率、电弧电流和坡口间隙对复合焊接临界速度的影响规律。结果表明, 激光功率、电弧电流和复合焊接临界速度成正比关系。激光功率是决定上临界速度  $v_{\max}$  的主要因素, 电弧电流是决定下临界速度  $v_{\min}$  的主要因素。增加坡口间隙能同时提高  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$ , 但其对  $v_{\min}$  的影响更显著。在实验范围内, 坡口间隙对  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  的最大提高幅度分别可达 20% 和 35%。此外, 激光功率越大, 复合焊接可选速度范围  $\Delta v$  越大。在既定激光功率下, 增加电弧电流会减小  $\Delta v$ 。

**关键词** 激光技术; 复合焊接; 焊接速度; 激光功率; 电弧电流; 坡口间隙

中图分类号 TG456.9 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093609.2438

## Experimental Study on Critical Speed of Laser-Arc Hybrid Welding

Gao Ming Xiong Zheng Zeng Xiaoyan Yan Jun

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** For improving the understanding of laser-metal inert gas (MIG) hybrid welding, the effects of laser power, arc current and groove gap on critical speed of this process are studied on Q235 mild steel with thickness of 4 mm. The results show laser power and arc current are direct proportional to the critical speed of hybrid welding. The maximum and minimum critical speed,  $v_{\max}$  and  $v_{\min}$  are mainly determined by the laser power and arc current, respectively. Increasing groove gap can both increase  $v_{\max}$  and  $v_{\min}$  but the effect on  $v_{\min}$  is bigger. In the experiment, the effects of groove gap on  $v_{\max}$  and  $v_{\min}$  can reach 20% and 35% respectively. Moreover, the reliable welding speed range of hybrid welding,  $\Delta v$  is increased with laser power. For the constant laser power, increasing arc current will decrease  $\Delta v$ .

**Key words** laser technique; hybrid welding; welding speed; laser power; arc current; groove gap

## 1 引言

激光-惰性气体熔化极电弧(MIG)复合焊接具有熔深大、可填充材料、效率高、接头桥接能力强等优点, 是最受关注的激光-电弧复合焊接工艺<sup>[1~3]</sup>。近年来, 该工艺在改善材料可焊性和提高焊接效率上取得了显著进展, 并开始应用于工业领域<sup>[1, 4~8]</sup>。对焊接工艺来说, 焊接速度是决定焊缝成形、接头质量及焊接效率的关键参数。对应一定的热输入, 存在一个可靠的介于最快和最慢临界速度之间的焊接速度范围。确立该速度范围后, 制作单位根据实际要求只需进行少量调整即可确定关键工艺参数——热输入和最佳焊接速度, 从而大幅降低实验难度和调试时间。研究表明, 在复合焊接中, 激光和电弧这

两种性质截然不同的热源的能量配比对其焊接特性有决定性作用<sup>[9]</sup>。因为临界焊接速度和焊接特性密切相关, 激光和电弧参数的变化必将对复合焊接临界速度和可选速度范围产生显著影响。因此, 确定临界速度、可选速度范围及其规律能够提高复合焊接特性的认识程度并为其专家系统提供可靠的实验数据, 具有重要研究意义。

尽管在单独激光和单独电弧焊接中, 有关临界焊接速度研究相对成熟, 但迄今为止, 激光-电弧复合焊接临界速度只有少量零星的可参考信息<sup>[10]</sup>。对此, 本文采用 Q235 钢板研究了激光功率、电弧电流和坡口间隙对激光-MIG 复合焊接临界速度及可选范围的影响规律。

## 2 实验方法

### 2.1 实验设备及方法

实验采用 Rofin 5 kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器,其光束模式为连续 TEM<sub>01</sub> 模式。采用松下 YD-350 AG2 型 MIG 焊机,最大输出电流为 350 A,本实验采用其中的脉冲模式进行焊接。激光束采用反射聚焦,焦距为 286 mm,聚焦光斑直径为 0.6 mm。焊接材料为 4 mm 厚 Q235 低碳钢板,尺寸为 150 mm × 50 mm。焊丝为直径 1.0 mm 的神钢 MG51T(相当于国标 ER056)。实验采用对接平焊。

采用如图 1 所示的热源位置参数和已经优化的实验装置<sup>[11,12]</sup>。复合方式为电弧引导焊,即电弧首先作用在未熔化母材上。焊丝尖端和激光束中心的距离定义为热源间距( $D_{LA}$ )。MIG 焊炬采用 He-Ar 混合气体抑制激光光致等离子体并维持电弧稳定燃烧。同轴喷嘴采用 7.5 L/min 的纯 Ar 气保护镜片。因为过低的焊接速度与复合焊接高效率的思想相违背,而且对激光聚焦镜片有一定损害,所以只在焊接速度较高的参数范围内进行讨论。工艺参数如表 1 所示。此外,使用的 IGBT 焊接电源的电弧特性及送丝速度通过电流调节来实现,因此以电弧电

流表征电弧特性,其对应的电压、功率和送丝速度如表 2 所示。

表 1 本实验焊接参数

Table 1 Welding parameters for experiment

Welding parameters	Range or value
Laser power $P$ /kW	2.5~4.5
Arc current $I$ /A	120~240
Shielding gas /(L/min)	25 (60%He-40% Ar)
Laser-arc distance $D_{LA}$ /mm	2
Wire stick-out /mm	12
Angle of welding torch /( $^{\circ}$ )	60
Laser defocused distance /mm	-1

表 2 电弧电流对应的电弧参数

Table 2 Other arc parameters corresponding to arc current

Current /A	Voltage /V	Wire speed /(m/min)	Power /kW
120	28	7.64	3.36
150	30	9.92	4.50
180	33	11.7	5.94
210	36	13.8	7.56
240	37	17.0	8.88

焊接完成后,焊接接头的质量依据焊缝表面和根部宏观形貌进行判断,将表面无成形缺陷,根部熔透良好且焊缝金属和母材金属过渡圆滑的接头判定为良好接头。良好接头对应的临界速度为有效数据,否则无效。金相试样采用体积分数为 4% 的硝酸乙醇溶液腐蚀和金相显微镜拍摄焊缝截面形貌。

### 2.2 相关定义

和其他焊接方法类似,激光-MIG 复合焊接在焊接速度过大时容易形成如图 2(a),(b)所示的未熔透和咬边缺陷,严重时甚至出现驼峰现象;焊接速度过低时会形成如图 2(c)所示的表面凹陷或熔透过度的缺陷,严重时出现烧穿缺陷。也就是说,只有在适当的焊接速度范围内,复合焊接才能够获得如图 2(d)所示的熔透良好,成形饱满、均匀的焊接接头。一般来说,可靠的焊接速度范围介于两种临界

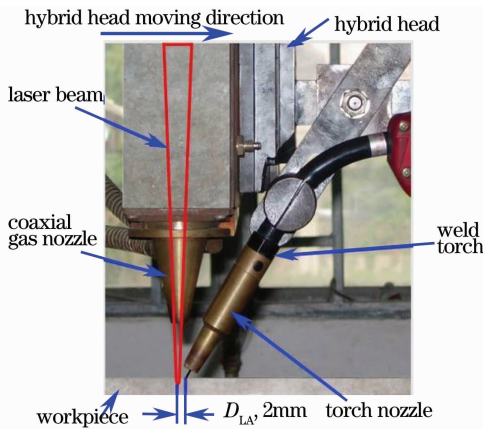


图 1 激光-MIG 复合焊接实验装置

Fig. 1 Set-up of CO<sub>2</sub> laser-MIG hybrid welding

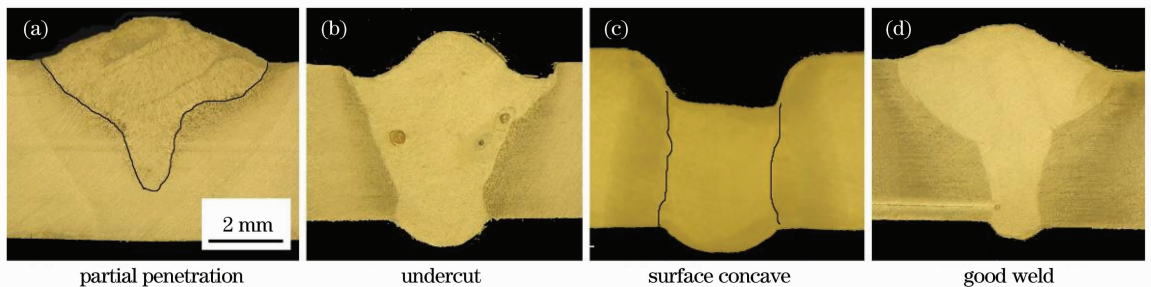


图 2 焊接速度不当时焊缝缺陷及良好焊缝的截面形貌

Fig. 2 Transverse morphologies of weld defect at inadequate welding speed and good weld

焊接速度:最快和最慢速度之间。根据激光-MIG复合焊接缺陷的特点,定义能够获得熔透良好且无咬边、驼峰缺陷复合焊缝的最快速度为上临界速度  $v_{\max}$ ;保证焊缝熔透良好且不出现表面凹陷、熔塌和根部烧穿缺陷的最慢速度为下临界速度  $v_{\min}$ 。对应既定热源参数  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  之间的范围即为获得良好复合焊接接头的可选速度范围  $\Delta v$ 。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 热源参数对 $v_{\max}$ 的影响

如图3所示,上临界速度  $v_{\max}$  和激光功率、电弧电流成正比关系。相比较而言,激光功率对  $v_{\max}$  的提升更有效。激光功率每增加 1 kW,  $v_{\max}$  增幅在 350~600 mm/min 之间。但是,电弧电流每提高

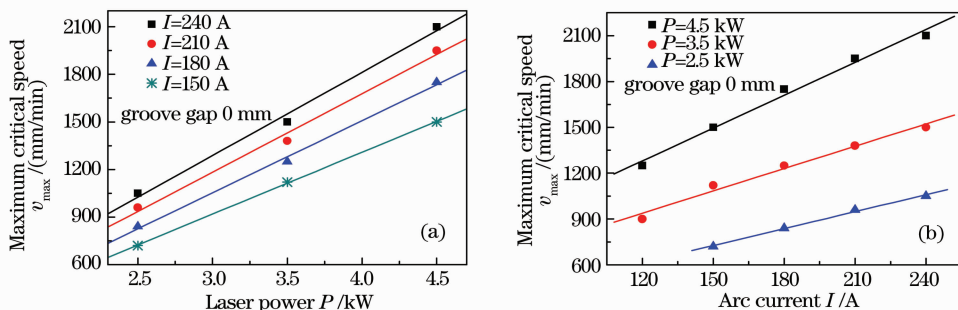


图3  $v_{\max}$  和激光功率(a)及电弧电流(b)的对应关系

Fig. 3  $v_{\max}$  as a function of laser power (a) and arc current (b)

另一方面,电弧对激光有一定的辅助作用<sup>[1~3]</sup>。首先,热输入随着电弧电流的增加而增加,这有利于  $v_{\max}$  的提高。其次,在电弧力和熔滴冲击力的作用下,电弧会形成一个表面低于工件表面的下凹熔池,如图4所示<sup>[14]</sup>。激光直接作用在该下凹熔池上,相当于减少了待焊材料的厚度,间接提高了激光小孔的穿透能力,有助于  $v_{\max}$  的提高。因为,电弧电流越大,电弧力越大,熔池下凹程度越大,且热输入越大,

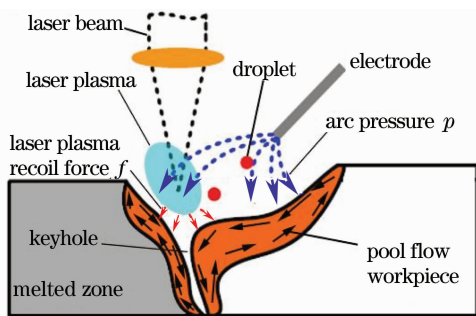


图4 复合焊接熔池形状及液态金属流动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of molten shape and metal flow in hybrid welding

30 A,其功率增加大于 1 kW(如表3所示),  $v_{\max}$  增幅一般情况下只略高于 100 mm/min,最高仅为 250 mm/min(激光功率为 4.5 kW 时)。

众所周知,激光是高能密度能量,在焊接过程中通过瞬间形成的“小孔”熔化周边金属,并通过其移动来形成细窄焊缝;电弧的能量密度相对较低,主要通过热传导熔化金属,通常热量仅仅作用于较浅的金属层并形成宽大焊缝。基于该原理,图2(a)、(d)中上半部分宽大、下半部分细窄的复合焊缝特征表明:通常,复合焊缝下半部分的熔透主要取决于激光能量;上半部分同时受到激光和电弧能量的作用,但电弧能量主要作用于该区域<sup>[13]</sup>。这说明,激光功率是熔透复合焊缝的主要热源,是决定  $v_{\max}$  的主要因素。从而,如图3(a)所示,随着激光功率的增加,  $v_{\max}$  逐步增加。

所以如图3(b)所示,激光功率一定时,电弧电流越大,  $v_{\max}$  越大。

#### 3.2 热源参数对 $v_{\min}$ 的影响

如图5所示,下临界速度  $v_{\min}$  随激光功率和电弧电流的增加而增加。在既定电弧电流下,激光功率对  $v_{\min}$  只有微弱影响:激光功率每增加 1 kW,  $v_{\min}$  提高幅度约为 60 mm/min,最高仅为 100 mm/min。但是,电弧电流对  $v_{\min}$  有显著影响:电弧电流每增加 30 A(电弧功率约增加 1.5 kW),  $v_{\min}$  提高幅度约为 180 mm/min,最高可达 240 mm/min。这说明电弧电流是决定  $v_{\min}$  的关键因素。

虽然在复合焊接通常采用的高焊接速度下,激光功率是熔透复合焊缝的主要热源,但是焊接速度较低时,电弧热量热传导范围(包括深度和宽度)增加,即电弧能量能够更多地进入复合焊缝下部,开始成为熔透焊缝的重要热源。此时典型的复合焊缝形貌消失,焊缝上半部分和下半部分尺寸上的差距缩小,如图2(b)和(c)所示。复合焊接特性开始接近电弧焊接,当焊接速度小于  $v_{\min}$  时,焊缝容易出现根

部烧穿及表面熔塌缺陷,导致焊接失败。也就是说,  $v_{\min}$  和根部烧穿和表面熔塌缺陷密切相关。该缺陷主要决定于熔池在焊接过程中的受力状况。从静力学的角度考虑,复合焊接熔池主要受到向下的电弧压力  $p$  (包含熔滴冲击力、电磁力、等离子体流力、斑点压力等),重力  $G$ ,连续激光作用时产生等离子体反冲反作用力  $f$  (如图 4 所示) 以及向上的熔化金属与熔池壁之间的表面张力  $F_{\sigma}$  的作用<sup>[12]</sup>。在本实验焊缝背面处于自由状态且全部熔透的情况下,假定

表面张力系数  $\sigma$  不随温度变化而变化。熔池受力的平衡条件为

$$F_{\sigma} = \sigma \cdot L \cdot \sin \alpha = G + p + f, \quad (1)$$

其中,  $L$  为焊接时焊缝截面上的熔池-母材界面长度,  $\alpha$  为熔池-母材界面和工件表面的夹角。在本实验中,材料一定,  $\sigma$  为定量。公式(1)表明,增加  $G$ ,  $p$  和  $f$  或者降低  $L$  会增加形成焊缝熔塌或烧穿缺陷的倾向并提高  $v_{\min}$ 。

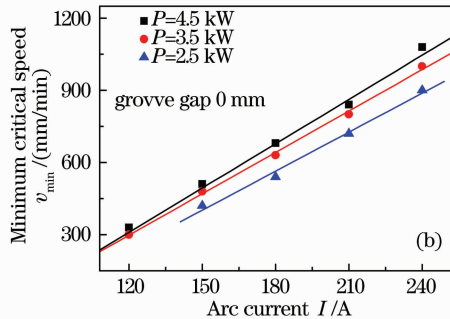
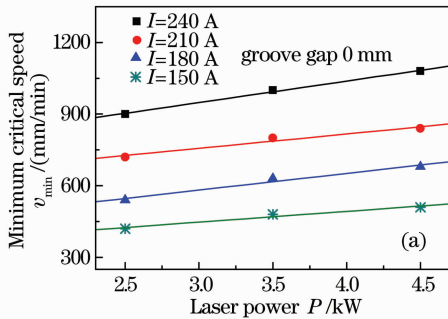


图 5  $v_{\min}$  和激光功率(a)及电弧电流(b)的对应关系

Fig. 5  $v_{\min}$  as a function of laser power (a) and arc current (b)

在激光-电弧复合焊接中,增加电弧电流能够在通过热输入增加提高熔池重力的同时提高电弧压力。通常,焊接熔池内存在主要由表面张力和电弧力共同驱动的熔池涡流,如图 4 所示<sup>[15]</sup>。该涡流有利于焊接热输入向焊缝下半部分的传导。当电弧电流增加时,增加的电弧压力将加速该涡流流动,并将更多电弧热量带入复合焊缝下半部分,使复合焊缝表面宽度减小,根部宽度增加,即焊缝上下部分的过渡更为圆滑。对比图 2(b)和(d)可以发现这实际上降低了  $L$ 。综上所述,增加电弧电流能够同时增加  $G$ ,  $p$  并降低  $L$ 。因此电弧电流对  $v_{\min}$  有显著影响。增加激光功率能够通过提高热输入和等离子体强度,即增加  $G$  和  $f$ 。但是,  $f$  远小于电弧压力,其变化对熔池受力平衡的影响较小。因为,激光焊接时,在

工件表面形成深度很浅的熔池凹陷,其深度远低于电弧,尤其是喷射过渡电弧所形成的熔池凹陷。这样,激光功率主要通过影响复合焊接熔池重力来影响  $v_{\min}$ ,因此其对  $v_{\min}$  的贡献有限。

### 3.3 坡口间隙对临界速度的影响

实验采用可实现稳定连接的坡口间隙范围<sup>[12]</sup>,如图 6 所示。坡口间隙对  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  都有提高。坡口间隙越大,临界速度增幅越大。而且,电弧电流越大,坡口间隙对临界速度的影响越显著。以 0.8 mm 间隙为例,在电弧电流为 120 A 时,  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$  的增加幅度分别为 10% 和 16.7%;在电弧电流为 240 A 时,两者的增加幅度分别为 20% 和 35%。从数据对比上看,坡口间隙对  $v_{\min}$  的影响大于  $v_{\max}$ 。

当存在坡口间隙时,熔池在电弧力和重力作用

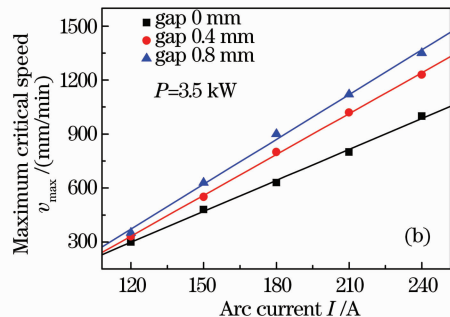
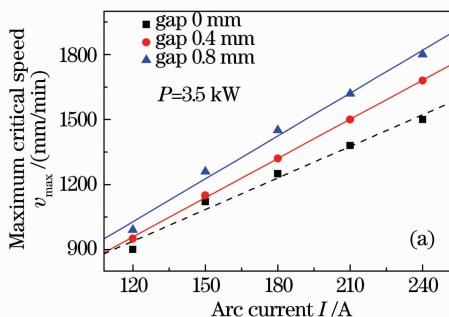


图 6 坡口间隙对  $v_{\max}$  (a) 和  $v_{\min}$  (b) 的影响

Fig. 6 Effects of groove gap on  $v_{\max}$  (a) and  $v_{\min}$  (b)



下向下流淌的阻力减小,焊接热量能更有效地传向焊缝根部。这有助于焊缝的熔透并提高  $v_{\max}$ 。与此同时,该热量传输将使复合焊缝上下部分过渡更为圆滑,即减小  $L$ 。根据(1)式,这增加了形成焊缝烧穿缺陷的倾向,有助于  $v_{\min}$  的提高。坡口间隙越大,熔池向下流淌的倾向越大,因此临界速度的增加幅度越大。此外,电弧电流越大,电弧力越大,熔池向下流淌的速度越快。因此,电流越大,坡口间隙对临界速度的影响越显著。

### 3.4 可选焊接速度范围

对复合焊接来说,可选速度范围,  $\Delta v$  越大,参数选择余地越大;反之,可选参数越窄,热源功率和外界环境的任何波动都可能形成焊缝缺陷,影响焊接工艺稳定性。因此,掌握  $\Delta v$  影响规律对复合焊接有一定指导意义。图7为根据图3和图5绘制的  $\Delta v$  变化图。由图可知,激光功率越大,  $\Delta v$  越大。因为随着激光功率的增加,复合焊接在特性上更接近单独激光焊接,从而具备较宽的可选工艺规范;反之,其特性更接近电弧焊接,可选工艺规范变窄<sup>[9,10]</sup>。此外,在既定激光功率下,因为电弧电流对  $v_{\min}$  的影响大于  $v_{\max}$ ,增加电弧电流会减小  $\Delta v$ 。

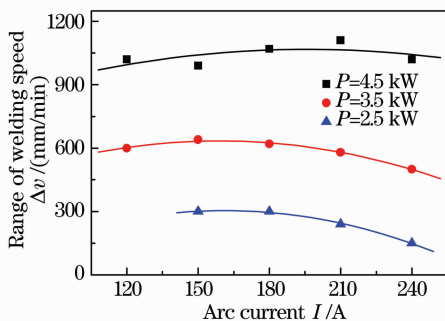


图7 工艺参数对焊接速度范围  $\Delta v$  的影响

Fig. 7 Effects of welding parameters on  $\Delta v$

## 4 结 论

1) 增加激光功率和电弧电流都能同时提高激光-电弧复合焊接上临界速度  $v_{\max}$  和下临界速度  $v_{\min}$ 。因为在高焊接速度下,复合焊缝下半部分的熔透依赖于激光小孔的移动,因此  $v_{\max}$  主要决定于激光功率。电弧电流能够同时改变熔池重力、电弧压力和熔池-母材的界面长度来影响  $v_{\min}$ ,是决定  $v_{\min}$  的主要因素。

2) 在既定热源参数下,因为坡口间隙能减小熔池向下流淌的阻力,因此增加坡口间隙能同时提高  $v_{\max}$  和  $v_{\min}$ ,但其对  $v_{\min}$  的影响大于  $v_{\max}$ 。

3) 激光功率越大,复合焊接特性越接近激光焊接,其可选速度范围  $\Delta v$  越大。在既定激光功率下,电弧电流对增加电弧电流会减小  $\Delta v$ 。

## 参 考 文 献

- 1 C. Bagger, F. O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Applications*, 2005, **17**: 2~14
- 2 A. Mahrle, E. Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics and applications [J]. *J. Laser Applications*, 2006, **18**: 169~180
- 3 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685  
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1680~1685
- 4 Liu Liming, Wang Jifeng, Song Gang. Hybrid laser-arc welding of AZ31B Mg alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 1523~1526  
刘黎明, 王继锋, 宋 刚. 激光电弧复合焊接 AZ31B 镁合金[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 1523~1526
- 5 B. Hu, I. M Richardson. Hybrid laser/GMA welding aluminum alloy 7075 [J]. *Welding in the World*, 2006, **50**(7/8): 51~57
- 6 T. P. Diebold, C. E. Albright. Laser-GTA welding of aluminum alloy 5052 [J]. *Welding Journal*, 1984, **63**(6): 18~24
- 7 T. Jokinen, V. Kujanpaa. High power Nd:YAG laser welding in manufacturing of vacuum vessel of fusion reactor [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, **69**(1-4): 349~353
- 8 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Comparison of MIG welding and laser-MIG welding of high strength aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(2): 38~42  
许良红, 田志凌, 彭 云等. 高强铝合金的 MIG 以及激光-MIG 焊接工艺对比[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(2): 38~42
- 9 M. Gao, X. Y. Zeng, Q. W. Hu *et al.*. Weld shape and microstructure of laser-arc hybrid welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, **13**(2): 106~113
- 10 S. G. Shi, P. Hilton, S. Mulligan *et al.*. Hybrid Nd:YAG laser-MAG welding of thick section steel with adaptive control [C]. *Proceedings of ICALOE 2004, Hybrid Laser Welding of LMPC*. San Francisco: LIA, 2004. 25~32
- 11 Gao Ming, Zeng Xiaoyan. Effects of heat sources arrangement on weld shape of laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(s1): 279~283  
高 明, 曾晓雁. 热源空间位置对激光-电弧复合焊接焊缝形成的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(s1): 279~283
- 12 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Yan Jun *et al.*. Groove gap bridging ability of laser-arc hybrid welding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, **19**(20): 2496~2500  
高 明, 曾晓雁, 严 军等. 激光-电弧复合焊接的坡口间隙桥接能力[J]. *中国机械工程*, 2008, **19**(20): 2496~2500
- 13 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Yan Jun *et al.*. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel [J]. *Applied Surface Science*, 2008, **254**: 5715~5721
- 14 S. Uchiumi, J. B. Wang, S. Katayama *et al.*. Penetration and welding phenomena in YAG laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy [C]. *Proceedings of ICALOE 2004, Hybrid Laser Welding of LMPC*, San Francisco: LIA, 2004. 76~85
- 15 J. Zhou, W. H. Zhang, H. L. Tsai. Modeling the transport phenomena during hybrid laser-MIG welding process [C]. *Proceedings of IMECE'03*. Washington, D. C.: ASME (2003) paper IMECE 2003~41703.