

文章编号: 0258-7025(2010)07-1908-06

Nd:YAG 激光 + P-GMA 复合热源焊接过程中激光对熔滴过渡频率和电流的影响

秦国梁¹ 林尚扬²

(¹山东大学现代焊接技术研究所, 山东 济南 250061; ²哈尔滨焊接研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 通过试验研究了在 Nd:YAG 激光+脉冲金属熔化极气体保护电弧(P-GMA)复合热源焊接过程中激光对熔滴脉冲过渡频率和脉冲电流的影响。研究表明,对于熔滴脉冲过渡,电流较小时,将激光能量加入到脉冲金属熔化极气体保护焊(P-GMAW)中,将会有助于提高熔滴过渡频率和焊接过程的稳定性;而在电流较大时,激光能量的加入将会不同程度地降低熔滴过渡频率;而激光能量的加入,对 P-GMAW 电流具有一定的减小作用,但其影响很弱。分析认为,激光通过材料蒸发反冲作用力和激光致等离子体与电弧等离子体的相互作用两种途径来影响熔滴过渡频率,而仅通过两种等离子体之间的相互作用来影响 P-GMAW 电流。

关键词 激光技术;复合热源焊接;熔滴过渡频率;焊接电流;电弧焊

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1908

Effect of Laser on Frequency of Metal Transfer and Welding Current in Nd:YAG Laser + P-GMA Hybrid Welding

Qin Guoliang¹ Lin Shangyang²

(¹Research Institute of Advanced Welding Technology, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)
(²Harbin Welding Institute, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract The effect of laser on the frequency of metal transfer and welding current in Nd:YAG laser + P-GMA (pulsed gas metal arc) hybrid welding was studied. The results show that the addition of laser energy into P-GMAW (pulsed gas metal arc welding) process can help to increase the frequency of metal transfer at the lower welding current and decrease its frequency at higher welding current. The addition of laser energy can reduce the welding current of P-GMAW, but its effect is very weak. The analyses indicate that the laser exerts the influence on metal transfer by the vaporization of material and the interaction between laser induced plasma and arc plasma, and its effects on welding current are exerted by the interaction between laser induced plasma and arc plasma.

Key words laser technique; hybrid welding; metal transfer frequency; welding current; gas metal arc welding

1 引言

激光+金属熔化极气体保护电弧(GMA)复合热源焊接是将激光焊接和金属熔化极气体保护焊(GMAW)结合起来实现优质高效焊接生产的一种新的焊接工艺,其既体现了激光焊接的高效性又体现了电弧焊接的高适应性,是目前焊接技术研究的热点之一^[1]。

在 GMAW 过程中,熔滴过渡频率在一定程度上

上表征了焊接过程的稳定性。而在激光+GMA 复合热源焊接过程中,激光的加入改变了电弧的形态及其一些内在特征,将对熔滴过渡产生一定的影响^[2, 3]。M. El. Rayes 等^[4]通过监测电弧电压和焊接电流波形研究了激光功率对激光+GMA 复合热源焊接过程的影响,实验表明,4 kW 激光功率下熔滴短路过渡频率比 9 kW 激光功率下熔滴短路过渡频率相对要高一些。M. Kutsuna 等^[5]则采用高速

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2010-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(50905099)资助课题。

作者简介: 秦国梁(1975—),男,博士,副教授,主要从事大功率激光焊接及激光+电弧复合热源焊接技术等方面的研究。

E-mail: glqin@sdu.edu.cn

摄像观测了不同熔滴过渡形式下复合热源焊接过程中激光对电弧等离子体和熔池稳定性的影响。

有研究发现,在激光金属熔化极惰性气体保护焊(MIG)电弧复合热源焊接铝合金的过程中,激光的引入改变了原有 MIG 焊接的熔滴稳定过渡区间范围,并且通过改变保护气体流量范围可以获得稳定的复合焊接状态;研究认为受激光等离子体和金属蒸气的影响,激光的引入产生了作用于熔滴的金属蒸气反作用力和复合电弧收缩力,从而降低了原有 MIG 焊接的熔滴过渡频率和过渡稳定性^[6,7]。但也有对 CO₂ 激光+MIG 复合焊接时的熔滴过渡行为的研究表明,与单 MIG 焊接的熔滴过渡相比,复合焊接过程中熔滴过渡频率加快,且过渡形式转变为稳定的射滴过渡^[8]。哈尔滨焊接研究所对 Nd:YAG 激光+金属活性气体(MAG)短路过渡电弧复合热源焊接进行了试验研究。研究发现,激光加入能够在一定的范围内提高短路过渡频率,改善焊缝成形。在小电流下,MAG 熔滴过渡频率为 15 Hz 左右,过程非常不稳定,也不能有效成形,同样的电弧参数与激光焊复合后,短路过渡频率提高到 45 Hz 左右,焊接过程稳定,焊缝成形美观^[9]。

目前,国内对激光+电弧复合热源焊接过程中激光对熔滴过渡影响的研究主要是基于短路过渡进行的。而随着数字化焊接电源的发展,脉冲金属熔化极气体保护焊(P-GMAW)以先进的波控技术实现了一个脉冲内过渡一个熔滴的稳定、低飞溅的焊接,该技术也得到了越来越多的应用。而激光+脉冲金属熔化极气体保护焊电弧(P-GMA)复合热源焊接技术克服了 P-GMAW 固有电弧焊的缺点,可以实现高速、高效、大熔深焊接。

本文通过试验研究了在 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中激光对脉冲熔滴过渡频率和脉冲电流的影响,并分析了其中的影响机制,为 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接工艺参数的选择提供了数据支持,并为后续有关 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接机理的研究提供了试验基础。

2 试验设备及方法

2.1 试验设备

试验用激光器是额定功率为 2 kW 的连续氙灯抽运 Nd:YAG 固体激光器,输出波长为 1.06 μm 的连续波激光,激光输出聚焦透镜焦距为 200 mm,激光束焦点直径为 0.6 mm。脉冲 GMAW 电源为数字化电源,对于一定材质和直径的焊丝,焊接电

流、电弧电压、送丝速度等焊接工艺参数实现协调控制一体化调节,通过调节送丝速度的方式来调节焊接电流,并在设定焊丝干伸长和弧压调节系数的条件下,焊接电源自动匹配电弧电压、电流和脉冲参数。焊丝干伸长 16 mm,弧压调整系数为 0;脉冲工作模式,每脉冲可过渡一个熔滴。

激光与 P-GMA 的复合方式为激光在前,激光垂直工件表面辐照在工件上,P-GMAW 焊枪以与激光束成 25.6° 夹角在激光束后面,激光在工件上表面的辐照点到焊丝与工件上表面交点的距离,即光丝间距为 1 mm。试验所用的复合热源焊枪如图 1 所示。试验材料为 10 mm 厚的普碳钢及直径为 1.2 mm 的碳钢气体保护焊焊丝,保护气体为 Ar 与体积分数为 18% 的 CO₂ 混合气体,从 P-GMAW 焊枪中喷出保护熔池。

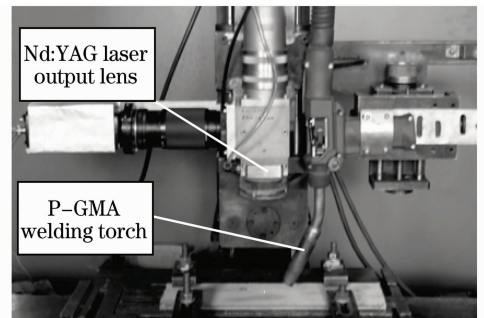


图 1 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接机头
Fig. 1 Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding head

2.2 试验方法

在焊接试验过程中利用焊接电弧分析仪分别采集相同电弧参数下 P-GMAW 和复合热源焊接过程中焊接电流的波形,从波形图中得出脉冲熔滴过渡参数,脉冲熔滴过渡参数为脉冲频率、峰值电流、基值电流和占空比,如图 2 所示。

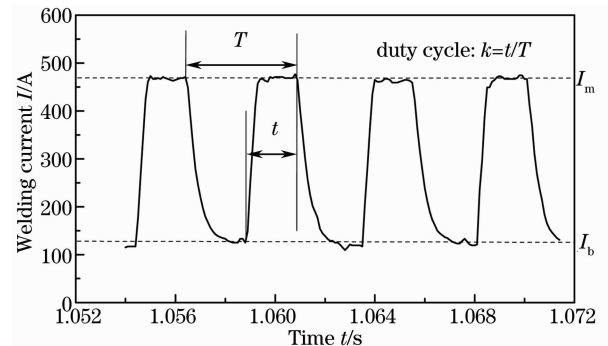


图 2 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中焊接电流的脉冲波形

Fig. 2 Waveform of welding current in Nd:YAG laser +P-GMA hybrid welding process

试验采用平均焊接电流(送丝速度)和激光功率分别离散变化,检测计算相同电弧参数下脉冲频率等参数并作两种焊接工艺之间的对比,以分析研究焊接工艺参数变化过程中激光对 P-GMAW 熔滴过渡的影响。

3 试验结果与讨论

3.1 焊接电流变化过程中激光对熔滴脉冲过渡的影响

图 3 分别为 2 kW Nd:YAG 激光对不同焊接电流下 P-GMAW 和复合热源焊接熔滴过渡频率和脉冲占空比的影响。从图中可以看出,当焊接电流小于 130 A 时,复合热源焊接脉冲熔滴过渡频率及脉冲

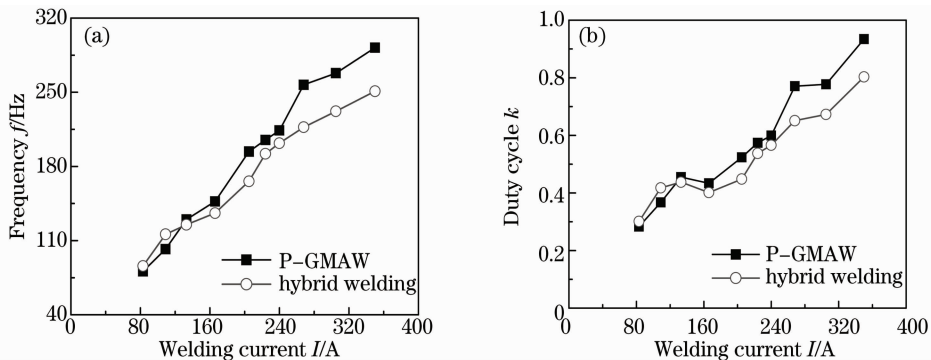


图 3 焊接电流变化过程中激光对 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接脉冲熔滴过渡频率(a)和占空比(b)的影响

Fig. 3 Effects of laser on (a) metal transfer pulse frequency and (b) duty cycle of Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding in variation of welding current

激光对脉冲熔滴过渡的影响主要是通过激光辐照下材料蒸发反冲作用力和激光致等离子体和电弧等离子体的相互作用两种途径实现的。

材料蒸发反冲作用力是向上的,有阻碍熔滴下落、降低熔滴过渡频率的作用,其作用只有在熔滴过渡区域处于激光形成的小孔上方时才最明显。当焊接电流较小时,焊接电弧铺展面积较小,熔滴过渡区域距离激光作用区域会相对变远,此时由激光形成的材料蒸发反冲作用力对熔滴过渡的影响将会很弱,对熔滴过渡的主要影响因素将是激光对电弧的吸引作用,如图 4 所示。

激光通过激光致等离子体和电弧等离子体的相互作用对电弧具有较强的吸引作用,改变了电弧的形态,从而对电弧对熔滴作用力的方向有一定影响。对于激光前置式的激光与电弧的复合,在激光形成的小孔区域及其上方,有高温的液态金属并聚集着金属蒸气和激光致等离子体,这个区域具有比固态金属低得多的电离能,为电弧提供了便捷的电子通道,形成了

占空比都高于 P-GMAW;而焊接电流高于 130 A 时, P-GMAW 熔滴过渡频率和占空比都高于复合热源焊接。这说明 2 kW Nd:YAG 激光对不同电流下熔滴过渡的影响是不同的:电流较小时,将激光能量加入到 P-GMAW 中,将会有助于提高熔滴过渡频率,提高焊接过程稳定性;而在电流较大时,激光能量的加入将会不同程度地降低熔滴过渡频率。而在分别提高和降低熔滴过渡频率的同时分别增加和减少了脉冲占空比,亦即分别延长和缩短了脉冲峰值时间,即燃弧时间。在脉冲焊接过程中,燃弧过程是熔滴长大的过程,因此燃弧时间的延长和缩短均可分别加快和减缓熔滴的长大,从而提高和降低脉冲熔滴过渡频率。

对电弧较强的吸引作用。在其作用下,电弧底部发生前移,并形成对电弧上部的拉拽作用,改变了电弧力的方向,加速了熔滴脱离焊丝端部,使得熔滴过渡频率增加。图 5 中复合热源电弧形态和 P-GMA 形态的对比则可以清楚看出激光对 P-GMA 电弧吸引造成的对其拉拽作用,从而对电弧力的作用方向有一定的改变,有助于熔滴从焊丝端部的脱落。

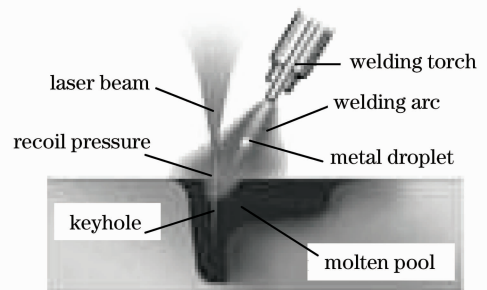


图 4 激光与电弧相互作用示意图

Fig. 4 Sketch of interaction between laser and welding arc

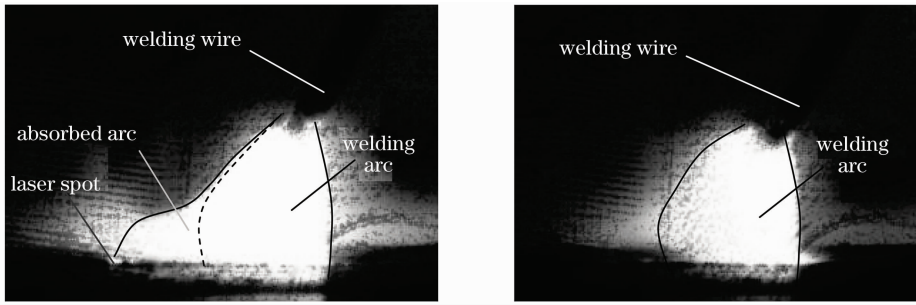


图 5 激光+P-GMA 复合热源电弧(a)与 P-GMA(b)形态的比较

Fig. 5 Comparison of shapes between laser+P-GMA hybrid welding arc(a) and P-GMA(b)

激光对脉冲占空比的影响与实验所用的弧焊电源有关:当外部因素导致焊接电流发生变化时,焊接电源中的传感检测单元将根据所检测到的电流变化自动调节脉冲频率及占空比等脉冲参数,从而实现一个脉冲一个熔滴的稳定过渡模式。在激光+P-GMA 复合热源焊接过程中,由于激光及激光致等离子体改变了电弧的电子密度和温度、形态以及电流大小等特征,从而使得数字化焊接电源传感检测单元做出了相应的响应,改变了脉冲占空比。当电流较小时,适当增加占空比,亦即增加燃弧时间以促进熔滴的长大,而电流较大时,则适当减小占空比,减小燃弧时间以避免熔滴过渡长大造成的熔滴过热和飞溅。

在 P-GMAW 过程加入 2 kW 的 Nd:YAG 激光将对焊接电流产生一定的影响,如图 6 所示。从图中可以看出,在 2 kW Nd:YAG 激光作用下,无论是基值电流还是峰值电流,Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接电流要稍微小于单独 P-GMAW 的焊接电流,峰值电流仅减小了 1%,而基值电流减小了仅 1.3%。由此可见,在 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中,

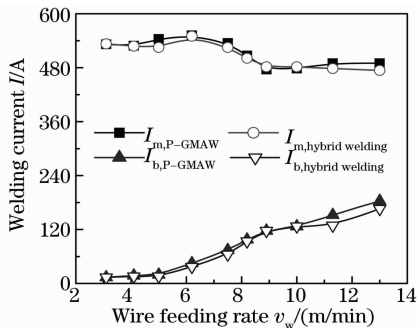


图 6 P-GMAW 和 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接脉冲电流和基值电流随送丝速度的变化

Fig. 6 Variations of pulse current and background current of P-GMAW and hybrid welding with wire feeding rate

2 kW Nd:YAG 激光对 P-GMA 焊接电流幅值的影响很小,这种影响是可以忽略不计的。

激光对脉冲电流的影响较弱是由提供焊接电流的焊接电源决定的,其影响仅仅是通过激光及其等离子体与电弧等离子体的相互作用,改变电弧的状态而实现的。在电弧电压基本保持稳定的条件下,激光及激光致等离子体为焊接电弧提供了一个低电离能的电子通道,能够在一定程度上减小焊接电流,这是一方面的原因。另一方面原因是受数字化焊接电源的限制,对于一定送丝速度,输出的焊接电流受数据库控制单元限制,也不可能有较大的变化。

3.2 激光功率变化过程中激光对脉冲熔滴过渡的影响

图 7 为在 6 m/min 送丝速度条件下激光功率的变化对 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中脉冲熔滴过渡频率的影响。从图中可以看出,无论是脉冲频率还是占空比都是随着激光功率的增大而降低,但与单独的 P-GMAW 相比(激光功率 $P_1=0$)其减小的幅度相对较小,分别只有 3%和 5%。这说明,对于 P-GMAW,激光能量的加入对其脉冲熔滴过渡频率和占空比是有影响的,但其影响力度较弱。

在激光功率变化过程中,材料蒸发反冲作用力将随着激光功率的增大而增大。在 6 m/min 的送丝速度下,随着激光功率的增加脉冲频率呈减小的趋势,说明在对较大电流条件下高能密度激光束辐照形成的材料蒸发反冲力对脉冲熔滴过渡具有重要影响。

图 8 说明了在送丝速度 6 m/min 的条件下,激光功率的变化对 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中焊接电流的影响。从图中可以看出,在激光功率变化过程中,无论是脉冲峰值电流还是基值电流仅存在微小的波动。这也说明在激光+电弧复合热源焊接过程中激光对焊接电流存在一定的影响,但很弱。

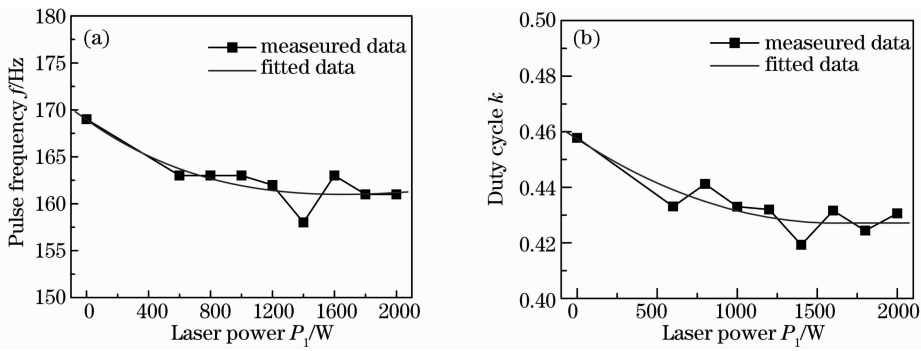


图 7 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中脉冲熔滴过渡频率(a) 和占空比(b) 随激光功率的变化

Fig. 7 Variations of pulse frequency (a) and duty cycle (b) of welding current with laser power in Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding process

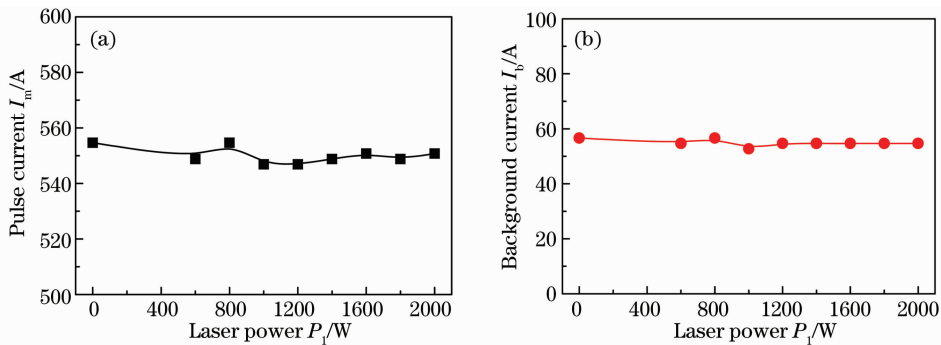


图 8 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中脉冲焊接电流幅值(a)和基值电流(b)随激光功率的变化

Fig. 8 Variations of pulse current(a) and background current(b) of Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding with laser power

在试验中使用的数字化焊接电源采用的是协调控制策略,对于给定材质、直径的焊丝,在设定送丝速度后,焊接将自动匹配脉冲电流的具体参数,实现一个脉冲一个熔滴的过渡模式,具有强制性。高能密度激光束辐照造成局部的高温区及形成的等离子体为电弧形成了低电离能的电子通道,而这个电子通道随激光功率的变化很小,因此依赖于等离子体电子温度及密度的焊接电流变化也就不会大。从这个角度来讲,激光+电弧复合热源焊接过程中,激光与电弧等离子体的相互作用是焊接电流的主要影响因素。

4 结 论

通过 2 kW 连续波 Nd:YAG 激光和 P-GMAW 复合,试验研究了在 Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接过程中激光对脉冲熔滴过渡频率和焊接电流的影响,得出以下结论:

1) 电流较小时,将激光能量加入到 P-GMAW 中,将会有助于提高熔滴过渡频率,提高焊接过程稳定性;而在电流较大时,激光能量的加入将会不同程度地降低熔滴过渡频率。

2) 在激光功率变化过程中,Nd:YAG 激光+P-GMA 复合热源焊接电流的脉冲频率和占空比相对单独 P-GMAW 电流来说降低的幅度较小,说明对于 P-GMAW,激光能量的加入对其脉冲电流幅值的影响力度相对较弱。

3) 通过对试验过程的分析认为,激光对脉冲熔滴过渡的影响主要通过激光辐照下材料蒸发反冲作用力和激光致等离子体与电弧等离子体的相互作用两种途径实现。电流较小时,激光、激光致等离子体与电弧等离子体的相互作用对熔滴过渡的影响占主导地位;电流较大时,材料蒸发反冲作用力对熔滴过渡起主要影响作用。

参 考 文 献

- 1 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1653~1659
钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主导领域与热点 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1653~1659
- 2 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
- 3 B. Claus, O. O. Flemming. Review of laser hybrid welding [J]. *J. Laser Appl.*, 2005, **17**(1): 2~14

- 4 M. El. Rayes, C. Walz, G. Sepold. The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry [J]. *Welding J.*, 2004, **83**(5): 147~153-S
- 5 M. Kutsuna, L. Chen. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 341~346
- 6 K. D. Lee, K. Y. Park. A study on the process robustness of Nd:YAG laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy 6016-T6 [C]. *ICALEO*, 2003, Section A: 48~55
- 7 B. Hu, I. M. Richardson. Hybrid laser/GMA welding aluminum alloy 7075 [J]. *Welding in the World*, 2006, **50**(7-8): 51~57
- 8 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liquan *et al.*. Characteristics of droplet transfer in CO₂ laser-MIG hybrid welding with projected mode [J]. *Applied. Laser*, 2004, **24**(6): 361~364
雷正龙, 陈彦宾, 李俐群等. CO₂ 激光-MIG 复合焊接射滴过渡的熔滴特性 [J]. *应用激光*, 2004, **24**(6): 361~364
- 9 Lin Shangyang. New technology of laser-Arc hybrid welding and its application [C]. *Academicians Forum on "the 21st Century Welding Technology Prospects"*, Harbin, 2006
林尚扬. 激光-电弧复合热源焊接新技术及其应用 [C]. "21 世纪焊接技术展望" 院士论坛, 哈尔滨, 2006