

激光-气体金属电弧复合焊接高强钢板的 焊缝形成和电信号分析

刘双宇¹ 张宏¹ 刘凤德¹ 石岩¹ 徐春鹰¹ 王宇琪²

(¹长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022
²内蒙古第一机械制造集团有限公司工艺研究所, 内蒙古 包头 014032)

摘要 以 7.0 mm 厚高强钢板为试验材料, 采用 CO₂ 激光-气体金属电弧(GMA)复合焊接方法, 研究了全熔透状态下光丝间距对复合焊接焊缝形成、熔滴过渡特征、电压和电流概率密度分布的影响。结果表明: 当光丝间距小于电弧弧柱半径时, 焊缝形貌为“鸡尾酒杯”形状; 当光丝间距接近或稍大于电弧弧柱半径时, 焊缝形貌为“圆锥”形状, 并且此时的有效连接面积最大。随着光丝间距的增加, 熔滴由颗粒过渡转变为射滴过渡, 使焊接过程更加稳定。汉诺威分析仪定量分析结果表明, 当光丝间距在 2~6 mm 范围内时, 焊接电压和电流概率密度分布曲线向中间收敛且大电流和大电压区概率较小, 此时有利于焊接过程的稳定。

关键词 激光技术; 复合焊接; 焊缝形貌; 信号处理

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101405

Analysis of Weld Formation and Electrical Signal in CO₂ Laser-Gas Metal Arc Hybrid Welding of High Strength Steel

Liu Shuangyu¹ Zhang Hong¹ Liu Fengde¹ Shi Yan¹ Xu Chunying¹ Wang Yuqi²

(¹ College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China
² Technology Research Institute, Inner Mongolia First Machinery Group Corporation,
Baotou, Neimeng 014032, China)

Abstract A CO₂ laser-gas metal arc (GMA) hybrid welding technology is used to weld the 7.0-mm-thick high strength steel. The effects of the distance between laser and arc on the weld shape, droplet transfer characteristics, probability density distribution of arc voltages and current are investigated. When the distance between the two heat sources is less than the arc plasma radius, the cross-sections are the "cocktail glass" figurate morphology. When the distance between the laser and arc is significantly greater than or approximately the same as the arc plasma radius, the cross-section of weld indicates the "cone-shaped" figurate morphology. When the laser passes through the edge of the arc plasma, the maximum effective joint area is achieved. When the distance of the two heat sources (D_{LA}) is 2~6 mm, probability density distribution of arc current converges toward center and the range of high current and voltage is smaller, which favors the stability of the droplet transfer and hybrid welding processes.

Key words laser technique; hybrid welding; weld shape; signal processing

OCIS codes 140.3390; 100.2960; 140.3470; 160.3900

1 引言

激光-电弧复合焊接技术具有高焊接速度, 高桥接性能, 大焊接熔深, 降低装配精度和成本等优势, 因此被广泛地研究和应用。近几年来, 研究人员更多地注意到采用激光-气体金属电弧(GMA)复合焊接方法^[1,2]来焊接中厚板。目前, 激光-GMA 复合焊接的研究主要集中在工艺参数对焊接稳定性、焊缝熔深和微观组

收稿日期: 2011-04-07; **收到修改稿日期**: 2011-05-04; **网络出版日期**: 2011-08-18

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(XSJ2008-1)和国家科技部基础研究(2009DFB70360)资助课题。

作者简介: 刘双宇(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光-电弧复合焊接、激光与材料相互作用、激光加工新工艺、新方法等方面的研究。E-mail: liushuangyu@cust.edu.cn

织^[3~7]的影响以及熔滴和熔池金属的相互作用机制的计算机模拟^[8]等。高的桥接性能和穿透能力是焊接中厚板所关心的内容。很多研究人员采用激光引导的方式研究了复合热源焊接过程中焊接参数对焊缝熔深和熔宽的影响^[9~11]。结果表明,激光引导进行焊接时,激光入射到温度低的固态金属表面,由于温度较低的金
属表面对激光的吸收率很低,使部分激光能量损失掉了,而复合热源焊接时熔深主要取决于激光的能量,因此焊接熔深相对比较浅,并且当激光与电弧之间的距离为 4 mm 时,电弧与激光形成单一熔池。另外,随着电弧功率和激光功率的增加,复合热源焊缝熔深增加;随焊接速度的增大焊缝熔深减小。对于不同焊接电流,光丝间距在 0~3 mm 内复合热源焊缝取得最大熔深,取得最大熔深的光丝间距与焊接电流大小有关,且随着光丝间距的增加,焊缝熔深减小^[11]。以往人们采用激光引导的方式研究了不同参数对焊缝熔宽和熔深的影响规律。而对于电弧引导焊接时,复合焊接工艺参数对焊缝形成过程、焊缝有效连接面积和形状特征的研究较少。

在激光-GMA 复合焊接过程中,熔滴过渡模式在一定程度上表征了焊接过程的稳定性。研究者们一致认为射滴或是射流过渡有利于焊接过程的稳定和焊缝成形^[12,13]。然而,光丝间距对熔滴过渡模式的影响,以及采用汉诺威焊接质量分析仪来定量地分析焊接过程的电信号和优化焊接参数的相关文献却很少。

因此,本文以 7 mm 厚高强度钢板为试验材料,研究了 CO₂ 激光-GMA 复合焊接过程中,两热源间距对焊缝形成过程、熔滴过渡特性、有效连接面积以及电压和电流概率密度分布的影响规律,以深入了解 CO₂ 激光-GMA 复合焊接的高桥接性能和穿透性能,掌握焊缝成形和工艺稳定的规律,为其能更好地应用于实际生产奠定了基础。

2 试验方法

试验中采用 Rofin DC050 5 kW 板条 CO₂ 激光器和最大焊接电流为 350 A 的 Panasonic YD-350AG2HGE 型 MIG/MAG 焊机,通过自行研制的复合焊接装置进行旁轴复合,激光光束模式为 TEM₀₀,反射聚焦镜的焦距为 352 mm,光斑直径为 0.3 mm。采用德国汉诺威大学研制的弧焊质量分析仪获取焊接时随机变化的电弧电压、电流数据,并经过其内部的测试分析软件对这些瞬时值进行初次统计分析,精确地绘制出电弧电压和焊接电流的波形曲线,得到电弧电压、电流的概率密度分布图。采用 CMOS-CR5000×2 型高速相机观测并采集熔滴过渡模式和等离子体形态的变化,其采样频率为 5000 frame/s。为了清晰地观测熔滴过渡形态,采用波长为 532 nm 的激光二极管(LD)抽运激光作为背光光源。复合焊接过程的电信号和熔滴过渡的传感、可视化装备与同步数据采集系统如图 1 和 2 所示,沿焊接方向电弧在前,激光在后。

试验材料为高强度钢板,尺寸为 150 mm×30 mm×7 mm。采用牌号为 H09Cr21Ni9MnMo,直径为 1.2 mm 的不锈钢焊丝。MAG 焊枪保护气体直接从焊枪喷嘴流出,流量为 16 L/min 的混合气体(其中 CO₂ 和 Ar 气体的体积分数为 20%和 80%),激光同轴保护气体采用流量为 25 L/min 的混合气体(其中 He 和 Ar 气体的体积分数为 30%和 70%)。焊接采用平板堆焊。焊接完成后,将试样沿着横截面切开,采用标准金相试样制备工序制成试样,用王水(浓盐酸和浓硝酸组成的混合物)腐蚀

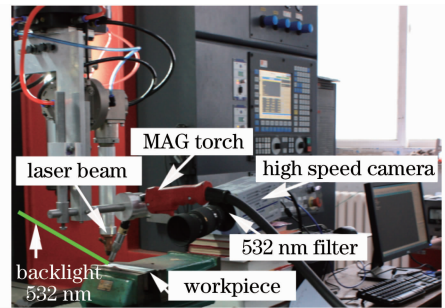


图 1 CO₂ 激光-电弧复合焊接试验装置

Fig. 1 Setup of CO₂ laser-MAG hybrid welding

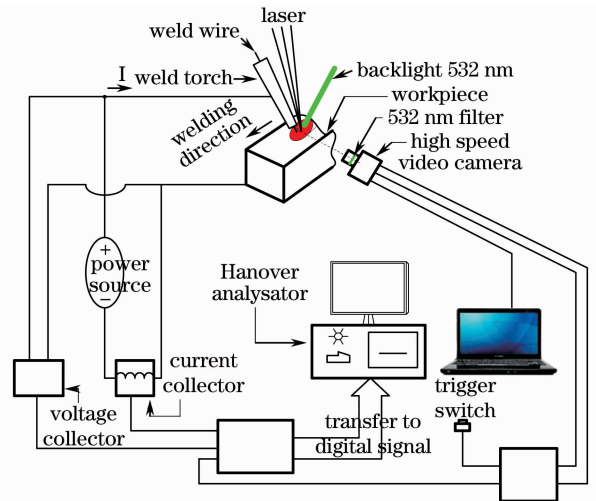


图 2 复合焊接过程的信号检测与可视化系统示意图

Fig. 2 Schematic drawing of droplet transfer sensing and visualizing system for hybrid welding

焊缝,采用 OLYMPUS OSL3000 型激光共焦显微镜拍摄焊缝形貌并测量相关的焊缝面积 S 。试验过程中采用的主要焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

Welding parameter	Value
Welding speed v / (m/min)	1.2
Angle of welding torch θ / ($^\circ$)	60
Defocusing amount Δf / mm	0
Extension length L / mm	12
Laser power P / kW	2.0
MAG current I / A	200
MAG voltage U / V	27
Distance between laser and arc D_{LA} / mm	0~6

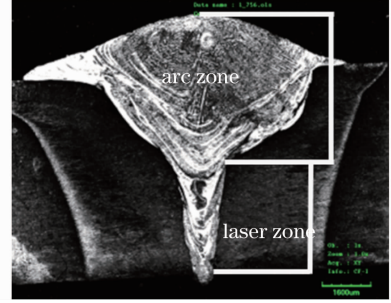


图 3 复合焊缝的截面形貌

Fig. 3 Typical cross-section morphology of hybrid weld bead

3 试验结果及分析

3.1 全熔透状态下光丝间距对焊缝截面形貌及焊缝形成的影响

根据激光-电弧复合焊缝的特征,将复合焊缝分为如图 3 所示的两个区域,即电弧区和激光区。图 4 给出了不同光丝间距 (D_{LA}) 的焊缝表面形貌、截面形貌以及复合等离子体的高速摄像静态照片,其他参数为固定值, $P=2.0$ kW, $v=1.0$ m/min, $I=200$ A, $U=27$ V。图 4 给出了光滑、均匀的焊缝表面形貌,并且表现出稳定焊接工艺。图 4(a)~(c)分别为光丝距离为 0, 1 和 2 mm 的焊缝截面形貌,其形貌为“鸡尾酒杯”形状,

Code	$P=2.0$ kW, $v=1.0$ m/min, $I=200$ A, $U=27$ V			
	D_{LA} / mm	picture	cross section	appearance
(a)	0			
(b)	1			
(c)	2			
(d)	3			
(e)	4			
(f)	5			
(g)	6			
(h)	GMAW			

图 4 焊缝的截面和表面照片以及高速摄像照片

Fig. 4 Pictures taken with high-speed camera, cross-sections and surface appearances of weld bead

并且焊缝上部电弧区宽度随着 D_{LA} 的增加而减少。图 4(d)~(g)分别为光丝距离为 3,4,5 和 6 mm 的焊缝截面形貌,其形貌为“锥形”形状,且激光区的深度随着 D_{LA} 的增加而增加。从图 4 中的复合等离子体形貌可以看出,当 $D_{LA}=0$ 时,激光作用在焊丝端部,电弧被强烈地压缩至激光入射点处。随着 D_{LA} 的增加电弧与激光等离子体之间的导电通道更加明显,电弧体积逐渐增加。当 $D_{LA}>5$ mm 时两种等离子体分离。

图 5 给出了不同 D_{LA} 条件下焊缝的有效连接面积,这种有效连接面积是通过图 5 中的白色虚线定义的。从图中可以看出当 $0 \leq D_{LA} \leq 5$ mm 时,有效连接面积逐渐增加,当 $D_{LA}>5$ mm 时,有效连接面积减少。有效连接面积的这种变化规律与光丝距离有着密切的关系。图 6 为复合焊接过程中熔池形貌的高速摄像照片。从图中可以清晰地看出,当光丝距离小于电弧弧柱半径时(即 $0 \leq D_{LA} < 2$ mm),在电弧推力和熔滴冲击力的共同作用下熔池液态金属产生下凹,并且熔池前沿液态金属沿着固-液界面流向熔池根部,由此导致此区域(区域 2)的液态金属很少。此时,激光和电弧的能量直接作用在熔池的上部,更多的热量集中在这个区域,导致电弧区宽度增加。当激光束正好作用在液态金属很少的区域 2 时,熔池金属的流动特征以激光深熔焊产生的液体流动为主,主要是沿着激光匙孔壁向下流动,形成明显的激光区。图 4

(a)~(c)给出了光丝距离小于电弧弧柱半径时的焊缝截面照片,从图中可以明显地看出焊缝电弧区和激光区之间没有明显的过渡区。当 $2 \text{ mm} \leq D_{LA} \leq 5$ mm 时,激光束恰好作用在电弧推力和熔滴冲击力共同作用产生的熔池斜面区域 3 处,在电弧中心线附近,电磁力、熔滴冲击力的作用方向向下,推动着高温的液态金属流向熔池底部^[14],此时激光匙孔周围的金属流向^[15]和熔池斜面区域的熔池金属流向相同,两者的复合加强了作用于熔池表面的电弧热以及熔滴热焓向熔池根部的流动,从而有利于增加熔深,并且形成锥形焊缝。图 4(d)~(f)给出了 $2 \text{ mm} \leq D_{LA} \leq 5$ mm 复合焊缝的截面照片,从图中可以看出电弧区与激光区有着明显的过渡。当 $D_{LA}>5$ mm 时,激光作用于熔池表面隆起的部位(区域 4),此时以激光匙孔焊为主,焊缝锥体面积减小,如图 4(g)所示。然而在熔池的宽度方向,越靠近熔池中心线的区域液体金属温度越高,表面张力越低;而在熔池的边界附近,熔池液态金属的温度较低,表面张力较高,因此在熔池表面张力梯度的驱动下,熔池表面的液态金属就由靠熔池中心线的区域向熔池边界流动,因此复合焊接熔宽增加。

3.2 不同光丝间距的熔滴过渡模式与电信号特征

图 7 给出了不同 D_{LA} 下的一系列高速照片,从图中可以看出,随着光丝间距的增加,复合焊接熔滴过渡模式从颗粒过渡转变为射滴或是射流过渡。在 $0 \leq D_{LA} < 2$ mm 时,即激光束入射在电弧后排熔池金属的下凹处时,熔滴过渡模式为颗粒过渡,熔滴过渡频率最低。这主要是因为当激光束入射在熔池下凹处时,激光匙孔产生的金属蒸气的反冲力阻碍熔滴的过渡。当 $2 \text{ mm} \leq D_{LA} \leq 5$ mm 时,熔滴过渡模式为射流或是射滴过渡,这是因为金属蒸气对熔滴的阻力减小,使得熔滴的过渡频率增加。当 $D_{LA}>5$ mm 时,激光与电弧分离,激光失去对电弧的引导和压缩作用,此时熔滴的过渡模式与单独 GMA 相同,为射滴过渡。图 8 为对应的电流和电压波形,在光丝距离为 0 时,电流和电压的波形都波动得比较剧烈,这是因为激光光致等离子体强烈地压缩电弧,并且使熔滴直接作用于激光匙孔处,熔滴强烈干扰激光匙孔的稳定,激光匙孔的稳定直接影响作用于熔滴的金属蒸气的反冲力,而引起熔滴过渡不稳定,因此电弧电流和电压波动较大,如图 8(a)所示。随着光丝距离的增加,电流和电压的波形的波动程度逐渐减弱,这是由于激光对电弧的压缩作用以及金

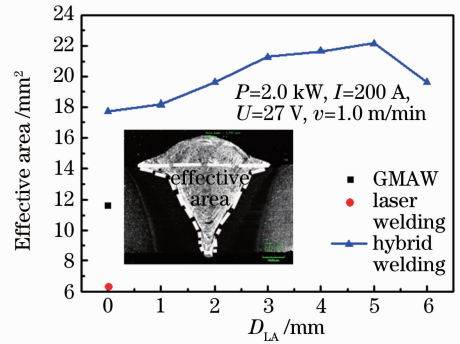


图 5 D_{LA} 对焊缝有效连接面积的影响
Fig. 5 Effects of distance between laser and arc on effective joint area

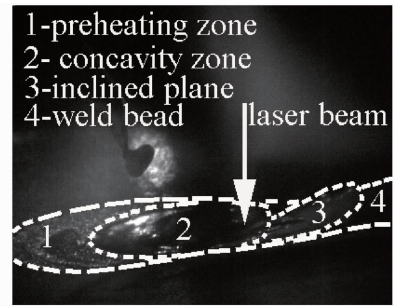


图 6 熔池流动特征和复合焊缝的形成过程
Fig. 6 Fluid flow of metal pool and process of weld formation

属蒸气对熔滴的作用力减弱,熔滴过渡模式逐渐变得稳定,如图 8(b)所示。当光丝距离大于 5 mm 时,电流和电压的信号非常稳定,此时熔滴的过渡模式与单独 GMA 焊接相同,为射流过渡,如图 8(c)和(d)所示。

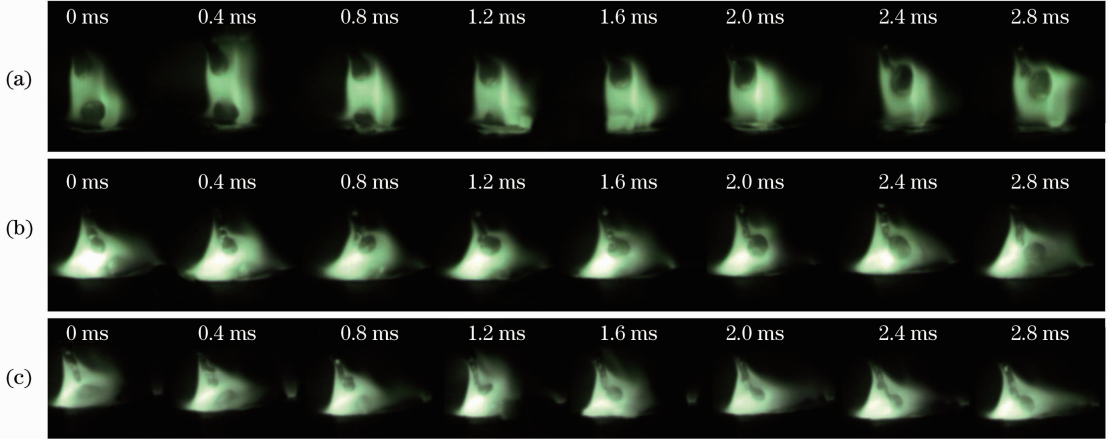


图 7 不同光丝间距的熔滴过渡高速摄像照片, $P=2.0\text{ kW}$, $I=200\text{ A}$, $U=27\text{ V}$ 。(a) $D_{LA}=0$;

(b) $D_{LA}=3\text{ mm}$ 和(c) $D_{LA}=5\text{ mm}$

Fig. 7 High-speed-photographs showing typical tapering of droplet transfer at (a) $D_{LA}=0$; (b) $D_{LA}=3$ and (c) $D_{LA}=5\text{ mm}$ for $P=2.0\text{ kW}$, $I=200\text{ A}$, $U=27\text{ V}$

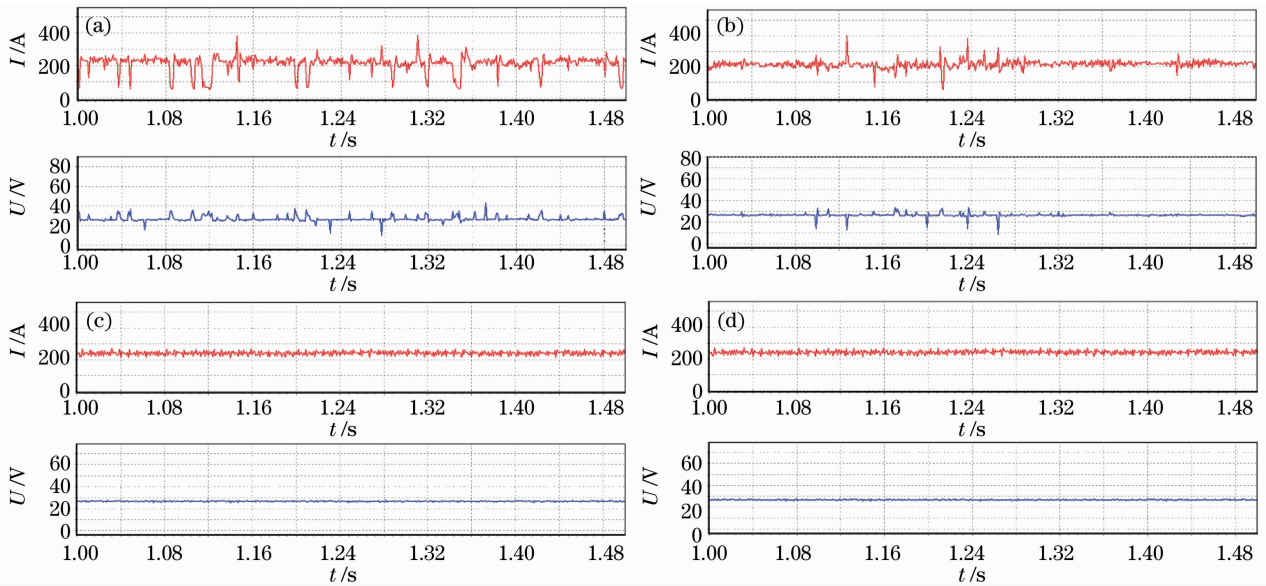


图 8 不同光丝距离下的复合焊接电流和电压波形图。(a) $D_{LA}=0$; (b) $D_{LA}=3\text{ mm}$; (c) $D_{LA}=5\text{ mm}$ 和(d) GMA

Fig. 8 Arc voltage and welding current oscillograms of different D_{LA} . (a) $D_{LA}=0$; (b) $D_{LA}=3\text{ mm}$;

(c) $D_{LA}=5\text{ mm}$ and (d) GMA

图 9 为采用汉诺威分析仪测试的不同 D_{LA} 下的电弧电流和电压概率密度分布曲线, y 轴为某一电压或是电流值的采样点数占总采样点数的百分率。图 9(a)是复合焊接时电流概率密度分布曲线,曲线左侧概率较高的峰值(区域 I)表示短路结束时的电流概率密度分布;曲线的左边概率最高的峰值(区域 II)表示电弧正常燃烧时焊接电流的概率密度;曲线中部较平缓的曲线部分(区域 III)表示熔滴短路产生的大电流的概率密度分布。焊接过程熔滴短路越少,这部分的曲线越低。如果焊接过程没有短路发生,则曲线向中间收敛。从图中可以看出当 $D_{LA}=0$ 时,区域 II 的分布范围较宽,说明该条件下焊接电流波动范围较大,焊接过程不稳定。图 9(b)是电压概率密度分布曲线,中间最高峰表示的是电弧正常燃烧时电弧电压的概率密度分布,因为电弧燃烧时间占焊接过程的比例较大,所以最高峰曲线覆盖的电压范围最大。大驼峰左侧有一个低谷,反映的是熔滴开始短路的电压。在本试验中焊接电流和电压分别为 200 A 和 27 V ,熔滴过渡模式为射滴过

渡,当 $D_{LA}=0$ 时,激光对电流和电压的影响最大,由于电弧距离激光热作用点最近,此时激光产生的带电粒子对电弧的引燃最有利,导致焊接电流较低,同时由于熔滴过渡模式为颗粒过渡,因此焊接电压较高,如图 9(a)和(b)中的曲线 0 所示。

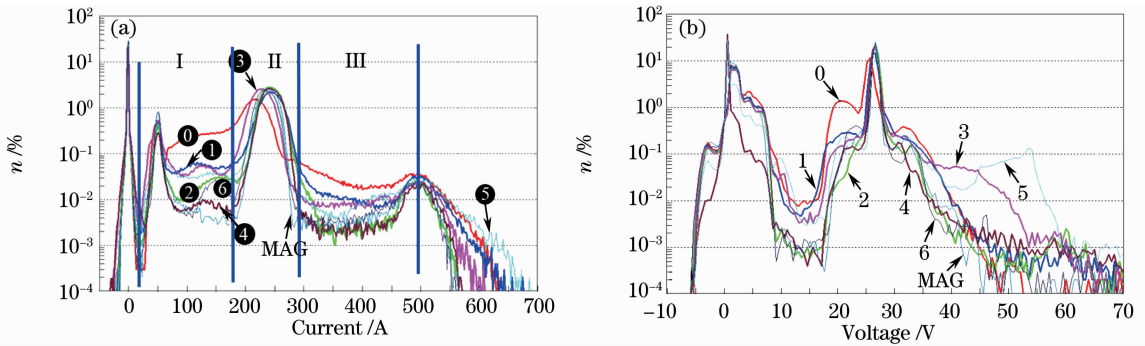


图 9 不同光丝间距下电弧电流(a)和电弧电压(b)概率密度分布

Fig. 9 Probability density distributions of (a) currents and (b) voltages for different D_{LA}

4 结 论

1) 在 CO_2 激光-GMA 复合焊接过程中,当光丝间距小于电弧等离子体半径时,激光作用在电弧后排金属的下凹处,此处金属熔体很少,并且熔池根部熔体金属流向与激光匙孔内金属流向相同,因此形成激光区特别明显的“鸡尾酒杯”形状的焊缝;当光丝间距等于或稍大于电弧等离子体半径时,激光作用在电弧后排金属的斜面上,此处金属熔体的流向与激光匙孔内金属流向相同,因此形成非常明显的“圆锥形”形状的焊缝。当激光作用在焊缝隆起表面时,熔池尾部金属流动对激光匙孔内金属流动的影响较小,焊缝形貌以激光深熔焊特征为主。

2) 当光丝距离等于或是稍大于电弧弧柱半径时,焊缝的有效连接面积最佳。

3) 与单独射流过渡的 GMA 焊接相比,复合焊接过程中,当 $0 \leq D_{LA} < 2$ mm 时,激光匙孔产生的金属蒸气的反冲力阻碍熔滴的过渡,此时熔滴的过渡模式为颗粒过渡,电流和电压波形波动较大;当 2 mm $\leq D_{LA} \leq 6$ mm 时,金属蒸气对熔滴的阻力减小,此时熔滴过渡模式由射滴过渡转变为射流过渡,电流和电压波形非常稳定。

4) 汉诺威焊接质量分析仪能定量地分析焊接过程中电流、电压概率密度分布,为优化复合焊接工艺参数提供有效手段。焊接电流和电压概率密度分布曲线向中间收敛且高电流和高电压区概率较小,此时有利于焊接过程的稳定。

参 考 文 献

- 1 G. Campana, A. Ascari, A. Fortunato *et al.*. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: the influence of shielding gases[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(10): 5588~5590
- 2 Giovanni Tani, Giampaolo Campana, Alessandro Fortunato *et al.*. The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8050~8053
- 3 Daquan Zhang, Jin Li, Hyung Goun Joo *et al.*. Corrosion properties of Nd:YAG laser-GMA hybrid welded AA6061 Al alloy and its microstructure[J]. *Corrosion Science*, 2009, **51**(6): 1399~1404
- 4 Yanbin Chen, Zhenglong Lei, Liqun Li *et al.*. Influence of shielding gas pressure on welding characteristics in CO_2 laser-MIG hybrid welding process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 33~35
- 5 Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Jun Yan *et al.*. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**(18): 5715~5721
- 6 B. Hu, I. M. Richardson. Microstructure and mechanical properties of AA7075(T6) hybrid laser/GMA welds[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2007, **459**(1-2): 94~100
- 7 Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser-MAG hybrid welding process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 47~50

- 8 J. Zhou, H. L. Tsai. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(17-18): 4353~4366
- 9 Qin Guoliang, Lei Zhen, Wang Xuyou *et al.*. Influences of Nd:YAG laser+pulsed MAG arc hybrid welding parameters on weld penetration[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(1): 225~228
秦国梁, 雷 振, 王旭友 等. Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 电弧复合热源焊接参数对焊缝熔深的影响[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(1): 225~228
- 10 Wang Xuyou, Wang Wei, Lin Shangyang. Effect of welding parameter on weld penetration in laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(6): 13~16
王旭友, 王 威, 林尚扬. 焊接参数对铝合金激光-MIG 电弧复合焊缝熔深的影响[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(6): 13~16
- 11 Wang Wei, Wang Xuyou, Zhao Ziliang *et al.*. Influential factors in laser-MAG hybrid welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(2): 6~10
王 威, 王旭友, 赵子良 等. 激光-MAG 电弧复合热源焊接过程的影响因素[J]. *焊接学报*, 2006, **27**(2): 6~10
- 12 Liu Shuangyu, Zhang Hong, Shi Yan *et al.*. Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO₂-MAG hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3172~3179
刘双宇, 张 宏, 石 岩 等. CO₂ 激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3172~3179
- 13 Qin Guoliang, Lin Shangyang. Effect of laser on frequency of metal transfer and welding current in Nd:YAG laser+P-GMA hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1908~1913
秦国梁, 林尚扬. 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[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1908~1913
- 14 Sun Junsheng, Wu Chuansong. The electromagnetic force and its influence on the weld pool fluid flow in MIG welding[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(2): 209~216
孙俊生, 武传松. 电磁力及其对 MIG 焊接熔池流场的影响[J]. *物理学报*, 2001, **50**(2): 209~216
- 15 Du Hanbin, Hu Lunji, Wang Dongchuan *et al.*. Simulation of the temperature field and flow field in full penetration laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(12): 65~68
杜汉斌, 胡伦骥, 王东川 等. 激光穿透焊温度场及流动场的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, **26**(12): 65~68