

文章编号: 0258-7025(2008)11-1680-06

激光-电弧复合焊接的研究进展

肖荣诗 吴世凯

(北京工业大学激光工程研究院, 北京, 100124)

摘要 激光-电弧复合焊技术是一种具有较好工业应用前景的新技术, 目前已经引起了国内外研究人员的重视。激光-电弧复合焊接将两种物理性质和能量传输机制截然不同的热源复合在一起, 实现优势互补, 提高焊接效率和质量。结合作者的研究工作, 概括了激光-电弧复合焊接中激光与电弧相互作用、熔滴过渡特性、小孔和熔池动态行为、复合焊接工艺技术及应用等方面的最新研究进展。

关键词 激光技术; 复合焊; 基础问题; 工业应用

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1680

Progress on Laser-Arc Hybrid Welding

Xiao Rongshi Wu Shikai

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract Laser-arc hybrid welding is a promising technology which can be widely used in industry and it attracts attention of the researchers worldwide. Combining two heat sources with different physical properties and energy transmission mechanisms together, laser-arc hybrid welding possesses the composite advantages of laser welding and arc welding. Some aspects on laser-arc hybrid welding such as the laser-arc interaction, droplet transfer characteristics, dynamic behaviors of the keyhole and the weld pool, hybrid welding processes and their applications are reviewed.

Key words laser technology; hybrid welding; foundational problems; industry applications

1 引 言

为解决激光焊接成本高、桥联性差等问题, 从而拓展激光焊接技术的应用范围, 20 世纪 80 年代初, 英国学者 W. M. Steen 首先提出了激光与电弧复合焊接的概念^[1], 从此引发了各国研究机构开展激光-电弧复合热源焊接技术的研究热潮^[2~8]。

激光电弧复合热源将物理性质、能量传输机制截然不同的两种热源复合在一起, 同时作用于同一加工位置, 通过两热源的相互作用及复合热源与工件作用, 完成焊接过程, 它既充分发挥了两种热源各自的优势, 又相互弥补了各自的不足, 从而形成一种全新的高效焊接热源。经过多年的研究, 已发展了多种复合焊接方法, 包括激光-氩弧焊(TIG), 激光-MIG/MAG, 激光-等离子体弧及激光-双电弧等。

本文结合国内外复合热源焊接的研究现状及作

者开展的研究工作, 概括了激光电弧复合焊接的几个关键问题, 并就最近发展的几种复合焊接工艺进行了阐述。

2 几个基础问题

2.1 激光-电弧相互作用

在激光-电弧复合焊接过程中, 激光和电弧之间存在强烈的相互作用, 这种相互作用对工艺稳定性和焊缝成形具有决定性的影响。激光与电弧等离子体的作用表现为激光对电弧形态的影响。O. Moriaki 等^[5,9]在研究 YAG 与电弧复合焊接时, 发现激光与电弧相互作用后, 电弧电压趋向稳定, 同时激光对电弧具有明显的吸引和压缩作用。Steen 等^[1]采用 1 kW CO₂ 激光与 100 A 的 TIG 电弧复合焊接时, 观察到了激光对电弧的吸引现象, 同时电

收稿日期: 2008-09-16; 收到修改稿日期: 2008-10-10

基金项目: 北京市教委科技发展计划重点项目(KZ200710005003)资助课题。

作者简介: 肖荣诗(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用、先进材料激光加工、激光加工新工艺、新方法及相关技术与系统等方面的研究。E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

弧电压降低。陈彦宾等^[10]对 CO₂ 激光与 TIG 电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特性进行研究时发现,在激光功率为 1000 W,电弧电流为 40 A 时,能看到激光对电弧有较强的压缩作用,随着电弧电流及激光功率的增加,等离子体开始膨胀长大,在电弧电流超过 200 A 时,出现等离子体的过度膨胀。

另一方面,电弧等离子体会吸收激光能量,造成激光能量的大幅衰减,同时电弧等离子体的“负透镜效应”使激光束产生散焦和偏折。由于等离子体对激光能量的吸收与激光束的波长成正比,CO₂ 激光穿过电弧后的能量损失要比 YAG 激光高得多^[11]。B. Hu 等^[9]使用功率计测量了 500 W Nd:YAG 激光垂直穿过 100 A 直流 TIG 电弧后的功率衰减。研究表明,YAG 激光穿过电弧空间的能量损耗非常低,可以忽略不计,同时电弧对激光的散射作用也不明显。Bibik 等^[12]使用 0.3~3 W 可调 CO₂ 激光垂直穿过 TIG 电弧时发现,随电弧电流的增大,激光的传输系数明显减小,当电弧电流大于 200 A 时,电弧对激光能量的吸收接近 30%^[12]。陈彦宾等^[13]采用激光烧蚀有机玻璃方法研究了电弧对脉冲 CO₂ 激光吸收及散焦情况,结果显示 TIG 电弧对 CO₂ 激光存在严重的吸收作用,电弧电流超过 150 A 时,1000 W 的激光穿过电弧后,其功率衰减可达 35%,另外激光穿过电弧时,电弧等离子体的负透镜效应导致电弧对光束有一定的散焦作用,从而降低了激光能量密度,其散焦作用随激光功率、电弧电流增大而增强。

本文作者所带领的课题组采用先进测试仪器,系统研究了复合焊接时激光-电弧相互作用后的激光特性及电弧特性。研究表明 CO₂ 激光垂直穿过 Ar 弧后,电弧吸收激光能量,激光功率衰减,中心功率密度下降,光束能量分布状态严重恶化。图 1(a)所示为激光束穿过 100 A 的 TIG 电弧轴向中心后,激光能量传输率 P/P_0 随功率的变化(P_0 为原始激光功率, P 为穿过电弧后的激光功率);图 1(b)为不同功率的激光束穿过 100 A 的 TIG 电弧后,中心功率密度随激光作用位置距阴极距离的变化曲线。从图中可以看出,在激光功率为 3500 W 时,激光穿过电弧后的能量损失高达 70%;在 1500 W 的激光束穿过电弧阳极附近区域时,光束中心功率密度降低接近 90%,电弧的散焦效应也是中心功率密度降低的原因之一。另一方面,电弧吸收激光能量后,引起电弧电压下降,电弧静特性曲线下移,同时电弧体积发生膨胀。图 2(a)为不同功率激光

束作用于 TIG 电弧轴向中心时,电弧静特性曲线下移;图 2(b)为激光穿过电弧轴向中心时,激光作用位置处的电弧直径随激光功率的变化曲线。同时实验中发现,电弧膨胀主要发生在激光作用位置处到阳极之间,当激光作用于阴极附近则引起整个电弧体积膨胀^[14,15]。同时研究结果表明,CO₂ 激光穿过 He 弧后,光束特性及电弧特性的变化很小^[16]。

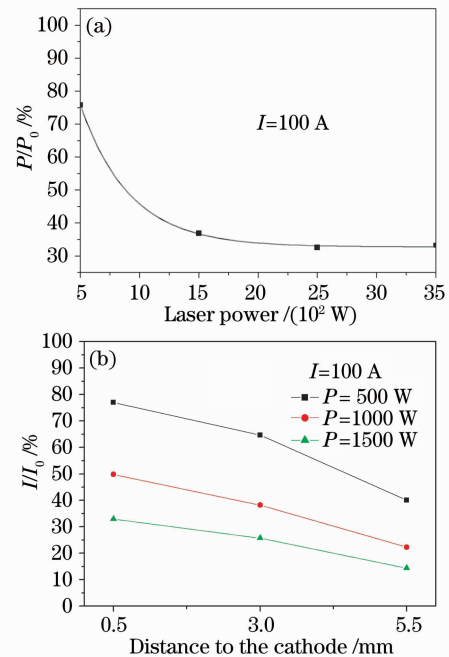


图 1 激光穿过电弧后的光束特性

Fig. 1 Beam characteristics with laser-arc interaction

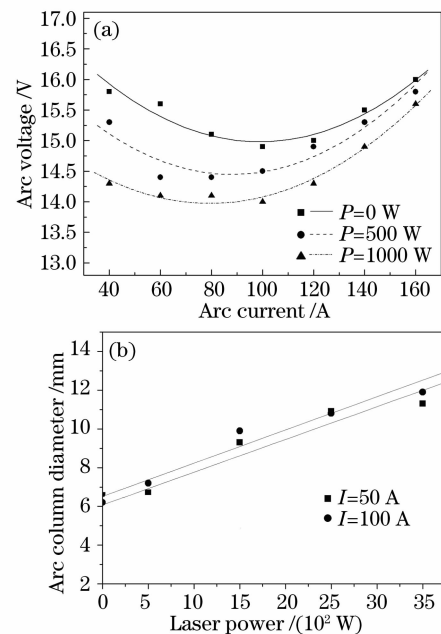


图 2 激光作用电弧时的电弧特性

Fig. 2 Arc characteristics with laser-arc interaction

综上所述,复合焊接时,电弧对 YAG 激光束的

影响较小,而电弧对 CO₂ 激光束将产生严重的负面影响,但是复合热源焊接仍然表现出较高的综合优势。因此深刻理解 CO₂ 激光与电弧的相互作用机制成为趋利避害,最大程度发挥复合焊接优势的关键。由于激光与电弧相互作用的复杂性,关于激光与电弧相互作用的机制研究还有很多工作需深入。

2.2 熔滴过渡特性

由于熔化极气体保护电弧焊(GMAW)焊接过程中加入激光后,将会引起电弧形态、熔池形状变化,从而引起电弧力、电磁场、熔池表面张力的变化,这些因素的变化将直接导致熔滴过渡特性发生变化。

日本学者 Kutsuna 等^[17]采用高速摄影观测了不同熔滴过渡形式下复合热源焊接过程中激光与电弧等离子体和熔池稳定性的影响。由于短路过渡电弧周期性的交替长大和熄灭会导致焊缝熔深的波动,因此,与短路过渡形式相比,喷射过渡形式更适合于激光与 MIG 电弧的复合热源焊接。

雷正龙等^[18]对 CO₂ 激光-MIG 复合焊接时的熔滴过渡行为进行了研究,结果表明,与单 MIG 焊接的熔滴过渡特性相比,复合焊接过程中一方面由于激光深熔时产生的金属等离子体对熔滴的热辐射作用,促进了熔滴过渡;另一方面由于激光等离子体对熔滴的吸引力和金属蒸气对熔滴的反冲力又阻碍了熔滴过渡,两者综合作用改变了熔滴过渡方式和过渡频率。当加入激光之后,不仅熔滴过渡频率加快了,而且熔滴过渡形式转变为稳定的射滴过渡,这样有利于提高焊缝熔深,稳定焊接电弧。因此,两者联合作用使其熔滴过渡形式由 MIG 焊接的短路过渡转变为射滴过渡,极大地提高了熔滴过渡的稳定性,减少了熔滴过渡周期,增加了熔滴过渡频率。在此基础上,进一步研究了激光功率、激光与电弧的作用位置以及激光束离焦量对复合焊接过程中熔滴过渡频率的影响规律。

由于复合焊接时的熔滴过渡涉及到小孔应力场、表面张力场及电磁场等复杂作用过程,这方面的研究仅局限于试验研究方面,缺乏深入的理论分析,深入揭示复合热源焊接过程中激光对熔滴过渡的影响机制是实现激光-GMAW 复合焊接过程控制,实现稳定无飞溅焊接的关键技术问题,也是目前复合热源焊接亟待解决的基础问题。

2.3 小孔与熔池动态行为

小孔的形成是激光深熔焊接的重要特征,其形成和维持是一个非常复杂的非线性过程,关于激光

焊接小孔的形成及动态特性的实验研究存在很大的困难。在激光-电弧复合热源焊接过程中,电弧的存在对小孔的动态平衡过程产生重要影响,同时小孔的形成更加剧了熔池行为的复杂性。由于焊接熔池的动态行为决定了焊缝成型的质量,而在目前的技术条件下,熔池流动行为难以直接观察和测量,数值模拟技术是目前的重要研究手段。

日本学者 Naito 等^[19,20]采用 CCD 及 X 射线观察了 YAG 激光与 TIG 电弧复合热源焊接时的小孔及熔池的流动行为,结果表明,TIG 电弧的加入,小孔变长、变窄,稳定性明显改善,同时气孔减少,熔池中的熔融金属形成从小孔根部向熔池后沿的流动。分析认为电弧强化小孔内部蒸发抑制了保护气进入是气孔减少的关键因素,而熔池流动状态的变化则导致了焊缝成型的改善。

Zhou 等^[21]基于流体体积控制及连续方程建立了一个激光-MIG 复合热源模型,模型中假设小孔中的蒸气压力为常数,且近似为大气压力,同时忽略了小孔中的金属蒸气运动。通过控制方程的数值解模拟计算了填充金属和熔池的相互作用及相对应的温度场和速度场。计算结果表明,熔滴的加入改变了熔池的流动及温度分布,进而对熔滴在熔池中的扩散及熔池的形状、均匀性产生影响,同时复合焊接时,熔滴的加入可以抑制小孔塌陷形成的气孔。但是模型中没有考虑激光和电弧的相互作用、能量耦合以及复合热源焊接过程中小孔的动态特性,模型仅适用于小功率激光的情况。

清华大学的李志宁等^[22]建立了激光-等离子体电弧复合热源运动作用下的二维计算模型,模型中假设了激光束与等离子体子弧均为面热源,热流密度满足高斯分布,且激光束与等离子体弧存在能量耦合。在模型中同时考虑了表面张力、热浮力和电磁力的作用,通过数值计算得到了熔池的速度场和温度场。计算结果表明,复合焊接熔池中存在两个涡旋,且熔池上部的涡旋由表面张力梯度驱动的马兰戈尼(Marangoni)流产生,熔池下部的涡旋由电磁力驱动流强化的 Marangoni 流产生,电磁力驱动流是促使熔深增加的重要因素。但是该模型忽略了激光深熔焊中的小孔效应,具有很大的局限性。

不可否认,由于涉及的问题是一个复杂的局部流体力学问题,这些理论模型都是在简化假设条件下建立起来的,有很大的局限性。但是随着研究的深入,更接近真实焊接过程数学模型的建立,数值模拟技术在复合焊接机制研究方面将起到重要指导

作用。

3 焊接工艺及应用

目前激光-电弧复合焊技术在汽车、船舶制造业中获得了广泛的应用^[23],同时也为难焊材料^[24,25]、异种金属焊接^[26]提供了一种可能的解决方案。

例如,大众汽车公司已将复合焊接技术应用于高档新款车 Phaeton 的铝合金车门的焊接上,复合焊接焊缝总长 3570 mm,占焊缝总长度的 72%。奥迪 A8 铝合金轿车的侧顶梁也采用了激光复合焊工艺,焊缝长度共计 4.5 m。激光-电弧复合焊应用于造船工业的第一条生产线于 2002 年在德国 Meyer 造船厂实现,主要用于船体平板和加强筋的焊接^[27]。此外德国 Warnow Werft 船厂、丹麦 Odense 船厂也采用了激光电弧复合焊接技术。

近年来,作者带领的课题组在特殊结构的激光电弧复合焊接工艺方面开展了一些研究工作,介绍如下。

3.1 T 型接头激光-TIG 复合焊接

一般来讲,T 型接头为避免变形,需采用从筋板两侧焊接。发展从背板侧一次焊接成型的激光焊接技术,可以提高焊接效率,改善接头质量,具有重要的工程应用价值。采用 3500 W CO₂ 激光从背板侧焊接时,接头的筋板熔合不好,焊缝中的气孔很难克服,如图 3 所示。而采用 CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接时,焊缝成型明显改善,筋板和背板连接过渡均匀,同时基本避免了焊接气孔的形成,如图 4 所示。焊接时,激光功率为 2000 W,电弧电流为 120 A。

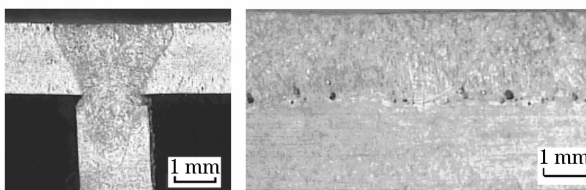


图 3 T 型接头激光焊接的焊缝横、纵截面
Fig. 3 T-joint cross-section of laser welding

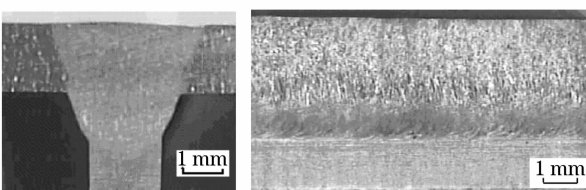


图 4 T 型接头复合焊接的焊缝横、纵截面
Fig. 4 T-joint cross-section of laser-TIG hybrid welding

3.2 薄钢板搭接接头激光-TIG 填丝复合焊接

目前汽车工业中大量使用的薄钢板的搭接接头广泛采用电阻点焊工艺,由于焊点不连续,焊接部件的整体性和安全性较差。激光焊接在薄板的搭接焊中具有明显的优势。但是由于激光焊接的间隙适应性差,当因装配误差以及板材本身的变形在上下板材间形成一定间隙时,即使通过添加填充材料,上部熔化的板材也不能与下部形成良好的结合,在上下板材中形成了两个独立的熔池,不能形成焊接接头。

采用激光-TIG 复合焊接工艺,由于复合热源作用面积大,熔池较大,熔池容易克服表面张力而向下塌陷,与下部板材结合形成焊缝,提高了对装配间隙的适应性。对 1.2 mm 厚的低碳钢板采用 CO₂ 激光-TIG 复合搭接焊,优化的焊接工艺参数为:激光功率 2500~3500 W,电弧电流 50~150 A。同时研究发现,焊接速度是影响复合焊接间隙适应性的主要工艺参数,图 5 所示为不同间隙条件下的最大焊接速度曲线及焊缝横截面图。从图中可以看出,在间隙较小时,复合焊接与激光焊接相当;当间隙为 0.5 mm 时,复合焊接时的速度可达激光焊的 3 倍;当间隙超过 0.5 mm 时,激光焊不能实现完整的焊接接头,而复合焊的最大允许间隙为 1.5 mm,其间隙适应性较激光焊提高了 300%。

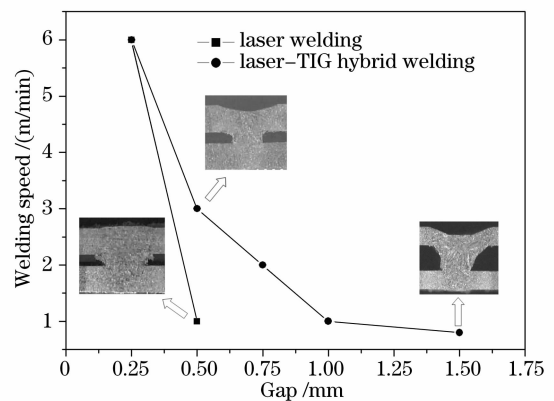


图 5 复合焊与激光焊的间隙适应性对比
Fig. 5 Comparison of gap tolerances between laser hybrid welding and laser welding

3.3 厚钢板窄间隙激光-TIG 填丝复合焊接

随着核电机组参数的提高,对不锈钢焊接结构的厚度、焊接变形、接头质量等提出了更高的要求。作为一种先进的高效焊接方法,激光焊接为此类结构的焊接提供了可行的解决办法。但受激光功率及光束质量的限制,一般激光焊接的深度有限,对于厚度超过 10 mm 的厚钢板需采用万瓦级的激光器^[28,29]。由于万瓦级激光器的光束质量较差,同时造价也比较昂贵,因此采用工业用千瓦级激光器实

现大厚度钢板的焊接具有重大的工程和经济意义。采用 3.5 kW CO₂ 激光-TIG 填丝复合焊接工艺实现了 10 mm 厚的 SUS304 不锈钢板的对接,焊接时,母材开 U 型坡口,单道焊接成型,激光功率为 3500 W,电弧电流为 200 A,焊接速度为 0.8 m/min。焊接接头的正反面成型良好,焊接接头的横截面如图 6 所示。解剖焊缝未见气孔、裂纹等缺陷。由于电弧的加入,增加了搭桥能力,减少了装配要求。同时采用填充焊丝的激光-TIG 复合焊接,焊接过程中不涉及熔滴过渡等复杂物理过程,电弧稳定性好,可以获得高质量的焊接接头。相比万瓦级激光焊接,也可节约焊接成本消耗。

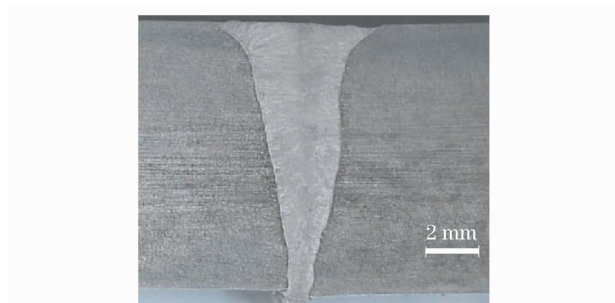


图 6 复合焊接焊缝横截面

Fig. 6 Cross-section of laser hybrid welding joint

4 结 论

激光-电弧复合焊接不仅综合了激光和电弧各自的优点,具有激光焊接的高速度及电弧焊接良好的桥联性和高的填充金属熔敷效率,而且由于激光与电弧的交互作用,产生了 1+1>2 的效果,焊接效率、焊接过程稳定性和可靠性、焊接质量等进一步提高。经过近 30 年的发展,对激光-电弧复合焊接的特点有了较深刻的认识,这种方法也已开始在工业中应用,但是在焊接机制、不同材料的中、厚板焊接工艺技术等方面还有许多问题需要深入研究。

参 考 文 献

- 1 W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- 2 B. Claus, O. O. Flemming. Review of laser hybrid welding[J]. *J. Laser Applications*, 2005, **17**(1): 2~14
- 3 A. Mahrie, E. Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications [J]. *J. Laser Applications*, 2006, **18**(3): 169~180
- 4 J. Tusek, M. Suban. Hybrid welding with arc and laser beam [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, **4**(5): 308~311
- 5 O. Moriaki, S. Yukio, Y. Akihida *et al.*. Development of laser-arc hybrid welding[J]. *NKK Technical Review*, 2002, (86): 8~12
- 6 C. J. Page, T. Devermann, J. Fiffin *et al.*. Plasma augmented laser welding and its applications[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2002, **7**(1): 1~10
- 7 B. Hu, G. D. Ouden. Synergetic effects of hybrid laser/arc welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(4): 427~431
- 8 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu *et al.*. Shielding gas method of CO₂ laser-TIG hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1422~1427
高明,曾晓雁,胡乾午等. CO₂ 激光-TIG 复合焊接气体的保护方式[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1422~1427
- 9 B. Hu, G. D. Ouden. Laser induced stabilization of the welding arc [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(1): 76~80
- 10 Chen Yanbin, Chen Jie, Li Liqun *et al.*. Properties of arc and weld in laser-TIG hybrid process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(1): 55~57
陈彦斌,陈杰,李俐群等. 激光与电弧相互作用时地电弧形态及焊缝特征[J]. *焊接学报*, 2003, **24**(1): 55~57
- 11 C. Tix, U. Gratzke, G. Simon. Absorption of the laser beam by the plasma in deep laser beam welding of metals[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(11): 6448~6453
- 12 O. B. Bibik, V. N. Brodyagin, Y. P. Rokladov. Special features of interaction of laser radiation with the electric welding arc in the combined laser-arc welding[J]. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1990, **24**(2): 176~178
- 13 Chen Yanbin, Li Liqun, Wu Lin. Quantitative measurement of absorption and defocusing of laser beam by electric arc [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(3): 56~58
陈彦斌,李俐群,吴林. 电弧对激光吸收与散焦的定量测量[J]. *焊接学报*, 2003, **24**(3): 56~58
- 14 Zhang Huanzhen, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Experimental study on characteristic of DC TIG arc with the action of a vertically incident CO₂ laser beam[J]. *Transactions of the China Welding Institution* (to be published)
张寰臻,吴世凯,肖荣诗. CO₂ 激光作用下直流 TIG 电弧特性的实验研究[J]. *焊接学报* (待发表)
- 15 Zhang Huanzhen, Wu Shikai, Xiao Rongshi. Influence of TIG arc on the characteristics of high power CO₂ laser beam [J]. *Transactions of the China Welding Institution* (to be published)
张寰臻,吴世凯,肖荣诗. TIG 电弧对高功率 CO₂ 激光光束特性影响的实验研究[J]. *焊接学报* (待发表)
- 16 Wu Shikai, Zhang Huanzhen, Xiao Rongshi. Effect of arc atmosphere on CO₂ laser beam and TIG arc interaction [J]. *Transactions of the China Welding Institution* (to be published)
吴世凯,张寰臻,肖荣诗. 电弧气氛对 CO₂ 激光与 TIG 电弧相互作用的影响[J]. *焊接学报* (待发表)
- 17 M. Kutsuna, L. Chen. Interaction of both plasmas in CO₂ laser-MAG hybrid welding of carbon steel[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 341~346
- 18 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Li Liqun *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,陈彦斌,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
- 19 Y. Natio, S. Katayama, A. Matsunawa. Keyhole behavior and liquid flow in molten pool during laser-arc hybrid welding[C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 357~362
- 20 Y. Naito, M. Mizutani, S. Katayama. Penetration characteristics in YAG laser and TIG arc hybrid welding, and arc and plasma/plume behavior during welding. Welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc (First Report) [J]. *Welding International*, 2006, **20**(10): 777~784
- 21 J. Zhou, H. L. Tsai. Modeling of transport phenomena in hybrid Laser-MIG keyhole welding [J]. *International J. Heat*

- and Mass Transfer*, 2008, **51**: 4353~4366
- 22 Li Zhining, Du Dong, Chang Baohua *et al.*. Numerical simulation on flow and heat transfer in weld pool of laser-plasma hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(7): 37~40
李志宁, 都东, 常保华等. 激光-等离子弧复合焊接熔池流动和传热的数值分析[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(7): 37~40
- 23 T. Ishide, S. Tsubota, M. Watanabe. Latest MIG, TIG arc-YAG laser hybrid welding systems for various welding products [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 347~352
- 24 B. Hu, I. M. Richardson. Hybrid laser/GMA welding aluminum alloy 7075[J]. *Welding in the World*, 2006, **50**(7~8): 51~57
- 25 Liu Liming, Wang Jifeng, Song Gang. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, **381**(1~2): 129~133
- 26 Lei Zhen, Yu Ning, You Aiqing. Fusion-brazing joining between 5A02 aluminum alloy and Q235 steel by Nd:YAG laser-pulsed MIG hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(6): 21~25
雷振, 于宁, 游爱清等. 5A02/Q235 钢 Nd:YAG 激光-脉冲 MIG 复合热源熔-钎连接[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(6): 21~25
- 27 R. Frank, R. Thomas, P. Guido. Laser welding in shipbuilding—an overview of the activities at meyer werft[J]. *Welding in the World*, 2002, **46**(9): 103~115
- 28 Zhang Song, Zhao Xudong, Wu Shikai *et al.*. 10 kW class CO₂ laser welding of thick stainless steel plates [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(suppl.): 169~172
张松, 赵旭东, 吴世凯等. 不锈钢厚板千瓦级 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2008, **35**(增刊): 169~172
- 29 Yang Xichen, Wang Yu, Ying Chaolong *et al.*. Microstructure and properties of high power laser welding of ship steel plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 866~870
杨洗陈, 王雨, 应朝龙等. 高功率激光焊接船板的组织性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 866~870