

能源节约型激光诱导电弧复合焊技术及应用

刘黎明, 王红阳, 宋 刚

(大连理工大学 辽宁省先进连接技术重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 围绕低能耗绿色焊接制造技术及理论开展研究, 阐述低功率激光与电弧之间的相互作用机理, 提出低功率脉冲激光诱导电弧复合高效焊的设计思想, 建立了能源节约型的复合焊制造技术体系。结果表明, 采用低功率脉冲激光对电弧进行诱导使电弧能量密度显著提高, 实现了激光与电弧两种热源之间的良好调控。采用低功率激光诱导电弧复合焊技术成功实现了镁合金、钛合金及钢铁等多种金属材料的优质高效焊接。该技术的发展为实现低能耗绿色焊接制造起到了积极的推动作用。

关键词: 激光-电弧复合焊; 诱导增强; 能源节约; 绿色焊接制造

中图分类号: TG 456 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)11-0009-04

0 序 言

随着以激光为代表的制造技术快速发展, 具有优质、高效特征的先进焊接制造技术也得到快速发展。20世纪70年代末, 英国 Steen 教授首次提出了激光-电弧复合焊技术的概念^[1,2]。激光-电弧的复合焊制造不仅在很大程度上消除了激光和电弧焊接自身存在的不足, 同时通过激光和电弧之间的相互作用形成了一种全新的焊接模式, 并逐渐成为国内外焊接制造领域研究的热点问题之一^[3-5]。

近年来, 随着大功率激光器制造技术的不断成熟, 5 kW 以上以至于 20 kW 的大功率激光器越来越多地应用于复合焊制造之中^[6,7]。大功率激光-电弧复合焊技术以大功率激光为主电弧为辅, 其焊接熔深与大功率激光相比虽然并未显著提高, 但是焊接接头的质量和焊接效率都与单独的大功率激光相比均有显著的提升。国际上奥地利福尼斯、美国 IPG 以及德国的激光制造企业已经开发出成套大功率激光-电弧复合焊装备, 并将其应用于实际的生产制造之中。国内哈尔滨工业大学、哈尔滨焊接研究所、华中科技大学、天津大学、北京工业大学及山东大学等单位均围绕着大功率激光-电弧复合焊开展了多角度的研究, 取得了系列的研究成果^[8-10]。

随着激光-电弧复合焊技术的发展, 在大功率激光-电弧复合焊技术快速发展的同时, 采用低功

率激光对电弧进行诱导增强, 以电弧为主的低功率激光诱导电弧焊制造技术也得到快速发展^[11-13]。这种方法在复合焊制造技术方面与大功率激光复合焊特点不同, 却获得了近似的焊接制造效果。文中主要针对低功率激光诱导电弧复合焊技术、装备及其应用进行详细介绍, 说明低功率激光诱导电弧复合焊技术的特点和优势, 推动低能耗激光诱导电弧复合焊技术及装备的快速发展。

1 能源节约型复合焊原理及技术

能源节约型激光诱导电弧复合焊技术是以电弧为主, 采用具有较低平均功率的脉冲激光对电弧进行诱导增强, 使电弧能量密度大幅度提高, 获得与大功率激光焊接相近的焊接效果。与传统的功率激光焊接相比, 低功率激光诱导电弧复合焊技术采用 1 kW 以下脉冲激光, 具有节约能源, 增强焊接适应性的优势, 其整体结构如图 1 所示。

图 2 是采用高速摄像机拍摄的低功率脉冲激光诱导钨极氩弧复合焊条件下 (laser induced TIG) 的等离子体状态。焊接工艺参数为激光平均功率 400 W, 焊接速度 1 000 mm/min, 焊接电流 100 A, 拍摄速度 1 000 帧/s。通过对焊接过程中保护气体氩原子的分布状态进行观察可以发现, 电弧在激光作用下显著收缩, 电弧能量密度显著提高, 焊接能力大幅度增强。通过对单独电弧焊、激光焊和激光诱导电弧复合焊接头熔深进行对比分析 (图 3), 发现通过低功率激光对电弧的诱导能力增强, 使得焊接熔深显著提升。

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11375038); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-13-0079); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助项目 (LJQ-2013007)

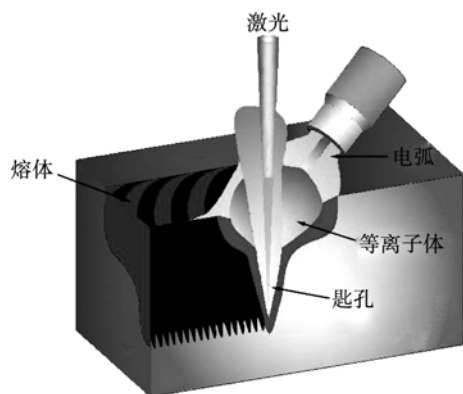


图 1 激光诱导电弧复合焊原理图

Fig. 1 Laser induced arc hybrid welding theory graph

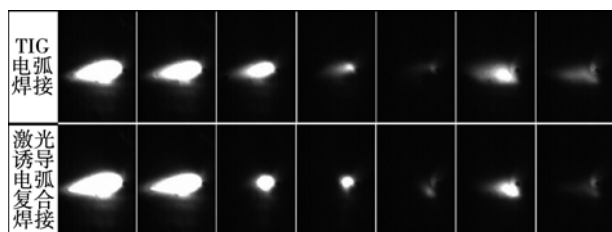
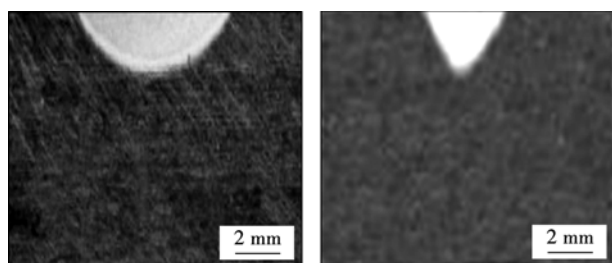


图 2 激光诱导电弧复合焊氩原子分布状态

Fig. 2 Distribution of Ar atoms in laser induced arc hybrid welding process



(a) 120 A 电弧焊熔深

(b) 400 W 激光焊熔深

(c) 激光诱导电弧复合焊熔深 (激光400 W+电弧 120 A)

图 3 电弧、激光及激光诱导电弧复合焊熔深对比

Fig. 3 Comparison of arc welding, laser welding and laser induced arc hybrid welding penetrations

为了对激光诱导增强电弧的作用效果进行深入的分析,对电弧焊和激光诱导电弧复合焊的等离子体状态进行研究. 测量了单独电弧焊和激光诱导电弧复合焊过程的特征谱线. 利用玻尔兹曼图线法,

对单独电弧焊(TIG)及激光诱导电弧复合焊过程等离子体的电子温度进行计算. 测量和计算的结果如图 4 所示.

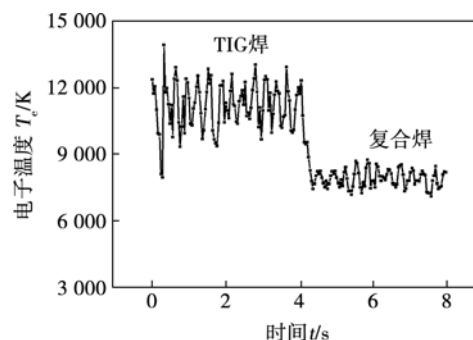


图 4 TIG 焊及激光诱导电弧复合焊等离子体电子温度对比

Fig. 4 Variations of plasma electron temperature in TIG welding and hybrid welding processes

从等离子体电子温度的变化也可以看出,TIG 焊过程中电弧等离子体不稳定,等离子体电子温度波动比较大,而复合焊过程中等离子体电子温度的波动明显减弱,这也证明了激光诱导电弧复合焊中电弧稳定性的提高. 通过对激光诱导电弧复合焊过程中不同区域等离子体的电子温度和电子密度进行计算发现,激光加入后电弧等离子体电子密度大幅提高,在激光作用点上方,电弧等离子体电子密度由 $9.5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 增大至 $1.22 \times 10^{17}/\text{cm}^3$.

对激光诱导电弧复合焊过程中的“匙孔”特征进行分析,如图 5 所示. 这种焊接“匙孔”是通过激光对电弧的诱导增强作用形成的. 通过对激光诱导电弧复合焊过程的等离子体形态、电子温度、电子密度以及焊接“匙孔”的系统研究可以发现,低功率激光可以实现对焊接电弧的有效调控,从而使复合焊的能量密度及有效能量利用率提高,在较低能量消耗条件下获得具有高能量密度的复合焊热源.

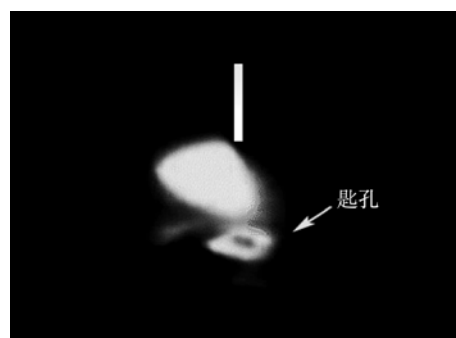


图 5 低功率激光诱导电弧复合焊匙孔形态

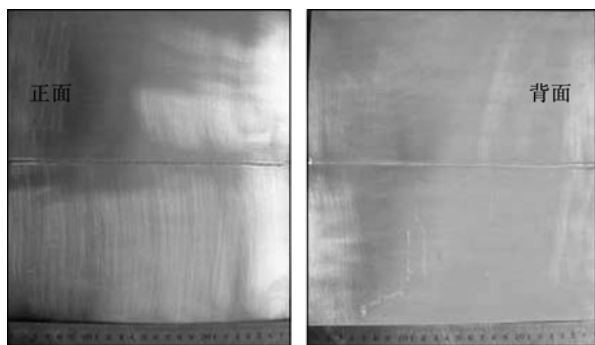
Fig. 5 Keyhole shape in low power laser induced arc hybrid welding process

2 能源节约型激光诱导电弧复合焊技术的应用

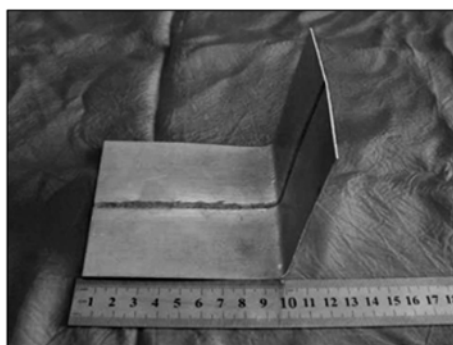
以上述低能耗激光诱导电弧复合焊技术为基础,开发出成套激光诱导电弧复合柔性焊接装备,采用该成套焊接装备围绕镁合金、钛合金等有色金属及钢铁材料开展了系列应用研究。

2.1 镁合金结构件的焊接

镁合金具有质量轻、抗震性能好等优势,被广泛应用于航空航天、汽车制造等领域,实现镁合金结构件的优质焊接对于轻质结构的应用具有重要的意义。采用激光诱导电弧复合焊技术成功实现镁合金薄板(0.5 mm)的优质高效焊接,焊接试件如图 6 所示。镁合金薄板焊缝正面光滑平整,成形良好,焊接接头性能达到母材的 90% 以上。同时对板材进行折弯试验,在焊缝的正面及背面均未发现弯曲裂纹。在此基础上进一步采用该技术进行了 2 mm 镁合金板材的高速焊接,焊接试件如图 7 所示,焊缝正面光滑平整,焊缝背面连续稳定,焊接接头性能达到了母材的 95%。通过上述试验可以充分说明低能耗激光诱导电弧复合焊在镁合金板材的焊接中具有显著的技术优势。



(a) 0.5 mm 镁合金板材焊接试件形貌
(激光能量 $P=150$ W,焊接速度 $v=4\ 000$ mm/min,焊接电流 $I=50$ A)



(b) 镁合金板材焊后弯曲试件

图 6 0.5 mm 镁合金薄板激光诱导 TIG 电弧焊试件
Fig. 6 Laser induced TIG hybrid welding magnesium alloy plate with 0.5 mm thickness

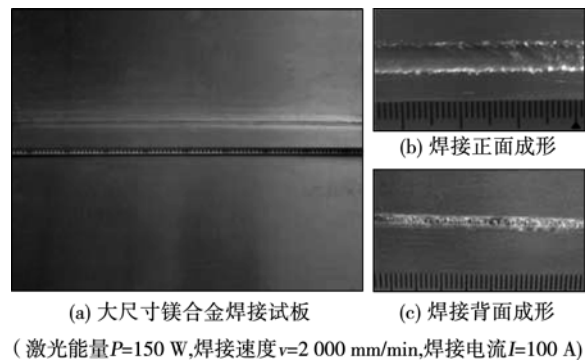
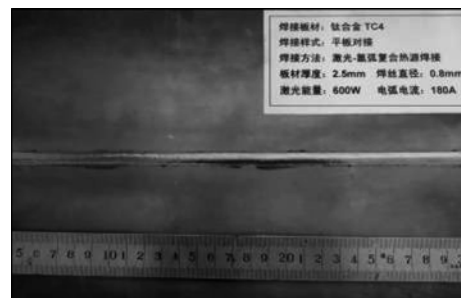


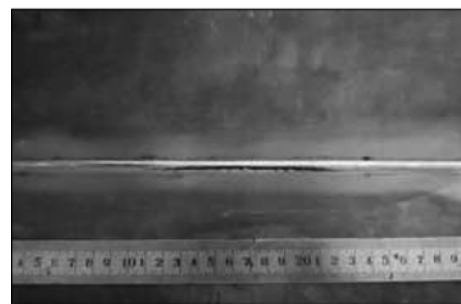
图 7 宽幅镁合金板材低功率激光诱导电弧对接焊试件
Fig. 7 Magnesium butt joint with large dimensions by low power laser induced TIG hybrid welding technology

2.2 钛合金板材的焊接

钛合金具有比强度大、比重量轻、耐高温、加工成形以及焊接性良好等优点,被广泛的应用于航天、航空等领域。钛合金的熔沸点高,焊接过程中需要的热输入较大,以 TC4(2.5 mm 板材)钛合金为研究对象,进行低功率激光诱导 TIG 复合焊试验,实现了 2.5 mm 钛合金板材的优质高效焊接,焊接试件如图 8 所示。通过调节激光诱导电弧复合焊的条件,实现了大气环境下局部保护的钛合金板材优质高效焊接,焊缝成形均匀美观,焊接接头性能均达到钛合金母材的 90% 以上。



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

(激光能量 $P=600$ W,焊接速度 $v=1\ 000$ mm/min,焊接电流 $I=180$ A)

图 8 TC4 钛合金板材低功率激光诱导电弧复合焊试件
Fig. 8 Low power laser induced TIG hybrid welding TC4 Ti alloy butt joint

2.3 钢铁材料的焊接

针对 Q235B 低碳钢展开低能耗激光诱导 MAG 电弧复合焊试验。低能耗激光诱导电弧复合焊正面无咬边缺陷,焊缝背面完全熔透且成形稳定。对 10 mm 厚 Q235B 低碳钢母材及焊接接头进行常温抗拉试验,拉伸后试样缩颈及断裂位置如图 9 所示。抗拉试验结果表明,母材试样于中部断裂,而焊接试样于母材处产生缩颈并断裂;焊接试样平均抗拉强度为 440 MPa 略高于母材的 430 MPa。

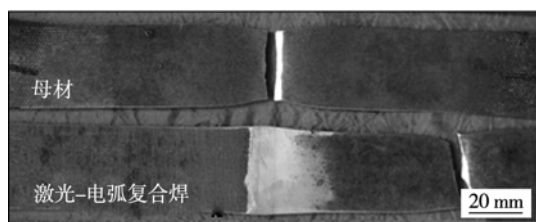


图 9 Q235 钢母材及激光诱导电弧复合焊试件断裂位置
Fig. 9 Fractures of Q235 steel base metal and laser induced arc hybrid welding joint

低碳钢的低功率激光诱导 MAG 电弧复合焊接接头成形及性能研究结果表明,与低碳钢大功率激光 - MAG 电弧复合焊类似,低功率激光诱导 MAG 电弧复合焊同样能有效抑制焊缝表面咬边缺陷的形成,提高焊接速度,降低焊接热输入,提高坡口间隙桥接能力。

3 结 论

(1) 能源节约型激光诱导电弧复合焊技术是一种新型的复合焊接技术,通过低功率激光对电弧的诱导,使电弧的能量密度大幅度增强,在低能量的脉冲激光作用下形成了大功率激光焊接时才能形成的焊接匙孔,从理论上为激光诱导电弧复合焊在较低能量消耗条件下获得高能量密度热源奠定了基础。

(2) 开发出低能耗激光诱导电弧复合柔性焊接技术及成套装备,采用该成套装备实现了镁合金、铝合金、钛合金及黑色金属的优质高效焊接,大幅度提高了焊接制造效率,降低了焊接制造能耗。与大功率激光焊接相比,低能耗激光诱导电弧复合焊具有一定的制造优势,在飞机、船舶及汽车制造领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Steen W M. Arc augmented laser processing of materials[J].

Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5636 - 5641.

- [2] Steen W M, Eboo M. Arc augmented laser welding[J]. Metal Construction, 1979, 7: 332 - 335.
- [3] Kelly S M, Brown S W, Tressler J F. Using hybrid laser-arc welding to reduce distortion in ship panels[J]. Welding Journal, 2009, 88(3): 32 - 36.
- [4] Hu B, den Ouden G. Synergetic effects of hybrid laser/arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 427 - 431.
- [5] BY Roepke C, Liu S, Kelly S, *et al.* Martukanitz, hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel[J]. Welding Journal, 2010, 89(7): 140 - 150.
- [6] Ian D Harris, Mark I. Norfolk, hybrid laser/gas metal arc welding of high strength steel gas transmission pipelines[C]// Calgary, Alberta, Canada, 7th International Pipeline Conference, 2008: 61 - 66.
- [7] 胥国祥, 武传松, 秦国梁, 等. 激光 - GMAW 复合热源焊缝成形的数值模拟; III 电弧脉冲作用的处理与热源模型的改进[J]. 金属学报, 2009, 45(1): 107 - 112.
Xu Guoxiang, Wu Chuansong, Qin Guoliang, *et al.* Numerical simulation of welding formation in laser + GMAW hybrid welding III treatment of pulsed arc action and improvement of heat source modes[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(1): 107 - 112.
- [8] 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.
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.
- [9] 陈彦宾, 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.
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.
- [10] Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu, *et al.* Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 785 - 791.
- [11] 樊 丁, 中田一博, 牛尾诚夫. YAG 激光与脉冲 MIG 复合焊接[J]. 焊接学报, 2002, 23(5): 81 - 83.
Fan Ding, Nakata K, Ushio M. Study of YAG laser-pulsed MIG hybrid welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(5): 81 - 83.
- [12] Huang Ruisheng, Liu Liming. Infrared temperature measurement and interference analysis of magnesium alloys in hybrid laser-TIG welding process[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 447(1/2): 239 - 243.
- [13] Liu Liming, Hao Xinfeng. Study of the effect of low-power pulse laser on arc plasma and magnesium alloy target in hybrid welding by spectral diagnose technique[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008(41): 205202 - 1 - 10.

作者简介: 刘黎明,男,1967 年出生,博士,教授。主要研究方向为绿色焊接制造技术与装备。发表论文 100 余篇。Email: liulm@dlut.edu.cn