

文章编号: 1001-3806(2007)05-0465-04

## 激光-电弧复合焊接的热源相互作用

高 明<sup>1</sup>, 曾晓雁<sup>1\*</sup>, 严 军<sup>1</sup>, 胡乾午<sup>1</sup>, 王福德<sup>1</sup>, 邓业平<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074; 2. 安琪酵母股份有限公司, 宜昌 443003)

**摘要:** 为了研究激光-电弧复合焊接的热源相互作用, 提升对复合焊接复杂物理过程的认识程度, 进一步优化工艺参数, 采用 CO<sub>2</sub> 轴快流激光器和钨极氩弧焊机在 3mm 厚 316L 不锈钢板上进行了复合焊接试验研究。定义无量纲参数——复合焊接熔化效率增量  $\delta$  来表征热源相互作用的变化。结合焊缝成形、等离子体形貌, 通过  $\delta$  半定量分析了激光、电弧热源间距和能量对比对热源相互作用的影响。结果表明, 在优化的参数组合下,  $\delta$  高达 83.6%。其中, 电弧对工件的预热作用能够提高激光能量的利用率, 增强热源相互作用, 但是激光-电弧等离子体相互作用才是提高热源相互作用程度的关键机制。

**关键词:** 激光技术; 激光焊接; 复合焊接; 热源; 相互作用; 等离子体

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

### Heat sources interaction of laser-arc hybrid welding

GAO Ming<sup>1</sup>, ZENG Xiaoyan<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>1</sup>, HU Qianwu<sup>1</sup>, WANG Fude<sup>1</sup>, DENG Yeping<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Laser Processing Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Angel Yeast Co. Ltd., Yichang 443003, China)

**Abstract** The investigation on the interaction of laser induced plasma and arc plasma in the laser-arc hybrid welding process benefits the understanding of complicate physical phenomenon and the optimization of welding parameters. So far, the research materials about this are few. A detail experiment of laser-arc hybrid welding was carried out on 3mm thickness 316L stainless steel by a 5kW CO<sub>2</sub> laser together with a TIG (tungsten inert gas) welder. A dimensionless parameter, the increment of melting efficiency of hybrid welding  $\delta$ , is defined to indicate the heat sources interaction of laser and arc. With the bead shape, plasma shape and  $\delta$ , the effect of heat sources distance and energy ratio of laser and arc was semi-quantitative analyzed. The results show that with the optimized combination of welding parameters,  $\delta$  can reach 83.6%. Moreover, the preheating of arc on the work-piece can improve the efficiency of laser power and enhance the heat sources interaction, but the laser-arc interaction is the key mechanism to improve the heat sources interaction.

**Key words** laser technique; laser welding; hybrid welding; heat sources interaction; plasma

## 引 言

同传统单热源焊接工艺相比, 激光-电弧复合焊接具有焊接熔深大、速度快、变形小、熔池搭桥能力强、能够焊接高反射率材料等特点<sup>[1-5]</sup>。近年来, 激光-电弧复合焊接已经得到了发达国家焊接领域的广泛关注和积极研究。

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。因此, 深入研究两热源间的相互作用有助于提升对激光-电弧复合焊接复杂物理过程的认识程度, 有利于工艺参数的进一步优化。但

是目前, 激光-电弧复合焊接大多集中在提高材料可焊性的工艺研究上, 有关激光-电弧相互作用的系统研究非常有限。对此, 采用 5kW CO<sub>2</sub> 轴快流激光器和钨极惰性气体 (tungsten inert gas, TIG) 焊机在 3mm 厚 316L 不锈钢板上进行了 CO<sub>2</sub> 激光-TIG 电弧复合焊接试验研究, 通过复合焊接熔化效率增量 (相对于单独激光和电弧焊接的总熔化效率), 结合焊缝形貌和等离子体形貌探讨了不同热源间距和激光-电弧能量配比下的热源相互作用。

### 1 试验装置及方法

#### 1.1 试验装置

试验中采用 Rofin TR050 5kW 快轴流 CO<sub>2</sub> 激光器和 Miller 300A TIG 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 TEM<sub>01</sub>, 整个光路经 4 块平面反射镜后反射聚焦镜, 聚焦距离为 286.5mm,

作者简介: 高明 (1975-), 男, 博士研究生, 主要从事激光焊接及激光-电弧复合焊接技术的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: xyzen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-11-28 收到修改稿日期: 2007-01-08

光斑直径为 0.6mm, TIG 焊机采用直流正接, 钨电极直径为 2.4mm, 试验材料为 316L 不锈钢板, 尺寸为 100mm × 50mm × 3mm, 保护气体采用直接从焊枪喷嘴流出, 流量为 20L/min 的 HeAr 混合气体, 并辅助以流量为 7.5L/min 的同轴 Ar 气。整体试验装置及相关位置参数如图 1 所示。其中, 激光离焦量为 0, 焊接速度为 1m/min, 焊接采用平板堆焊, 通过 CCD 摄像仪观测等离子形貌的变化。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, 用水腐蚀焊缝, 采用体式显微镜测量并拍摄焊缝形貌。

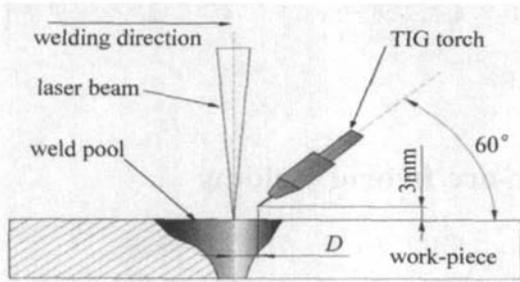


Fig 1 Schematic setup of CO<sub>2</sub> laser-TIG hybrid welding

### 1.2 热源相互作用的评定

从焊接特性来讲, 焊接的主要目的是通过热源加热来熔化金属来形成焊缝, 因此, 焊缝金属的熔化效率是表征热源能量利用率的直接参数。其中, 熔化效率可以表现为<sup>[6]</sup>:

$$\eta_m = vA\rho \left( \int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right) / Q_0 \quad (1)$$

式中,  $\eta_m$  为熔化效率,  $A$  为焊缝横截面积,  $v$  为焊接速度,  $vA$  为单位时间熔化的金属体积 (熔化量),  $\rho$  为密度,  $T$  为温度,  $T_m$  为熔点,  $T_0$  为环境温度,  $H$  为熔化潜热,  $c$  为比热容,  $Q_0$  为热源总输入能量。

同样的, 复合焊接热源相互作用的影响最终表现为焊接熔化效率的改变。在此, 将相同能量参数下的单独激光和单独电弧焊接的总熔化效率  $\eta_0$  作为评定基准来定量分析热源相互作用, 并用熔化效率增量  $\delta$  来表示热源相互作用的变化幅度, 表示为:

$$\delta = \frac{\eta_h - \eta_0}{\eta_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $\eta_0$ ,  $\eta_h$  分别为单独激光、单独电弧的总熔化效率与复合焊接熔化效率, 分别表示为:

$$\eta_h = vA_h \rho \left( \int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right) / Q_0 \quad (3)$$

$$\eta_0 = v(A_1 + A_a) \rho \left( \int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right) / Q_0 \quad (4)$$

式中,  $A_h$ ,  $A_1$  和  $A_a$  分别表示复合焊接、单独激光和单独电弧的焊缝横截面积。对于相同的焊接材料和参数,  $v\rho \left( \int_{T_0}^{T_m} c dT + H \right)$  和  $Q_0$  保持恒定。这样, 通过 (2) 式 ~

(4) 式,  $\delta$  可以表示为:

$$\delta = \frac{A_h - (A_1 + A_a)}{A_1 + A_a} \times 100\% \quad (5)$$

复合熔化效率增量  $\delta$  的绝对值越大, 表征复合焊接热源的相互作用越强烈。其中, 正值表明热源之间有效耦合, 有助于焊接熔化效率的提高, 负值则表明热源之间相互干扰, 降低了焊接熔化效率。

## 2 试验结果

### 2.1 热源相互作用的影响

图 2 为单独激光、电弧和复合焊接的焊缝形貌对

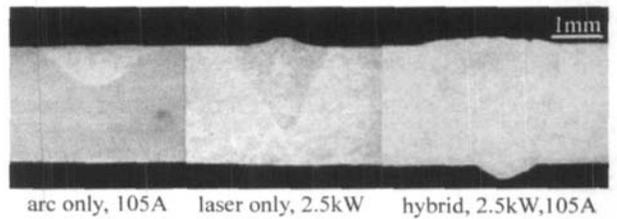


Fig 2 Weld shape of laser only, arc only and hybrid welding

比。复合焊接能够获得完全熔透的焊缝, 其熔深分别为单独激光和电弧熔深的 1.44 和 2.86 倍。由图 3 所示的单独电弧和复合焊接焊道表面形貌对比可以看到, 小电流电弧在高速焊接下弧根位置漂移, 导致电弧极不稳定并形成断续或波动的焊道 (见图 3a 和图 3c), 而激光的加入则有效改变了焊道的不连续性, 形成均匀一致的焊缝表面 (见图 3b 和图 3d)。由此可见, 激光和电弧之间存在强烈的相互作用, 这种相互作用有助于提高复合焊接熔深和焊接工艺稳定性。

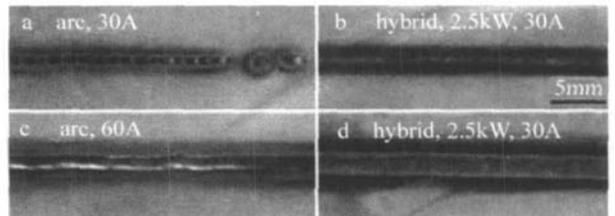


Fig 3 Weld surface shape of arc only and hybrid welding ( $D = 3\text{mm}$ )

通常认为, 激光-电弧复合焊接热源相互作用表现为两种机制: 预热机制和激光-电弧等离子体相互作用<sup>[7]</sup>。其中, 等离子体相互作用则来源于激光和电弧等离子体的特性差异: 因为激光光致等离子体在温度和带电粒子密度上远高于普通电弧等离子体, 两者在空间位置上相遇时会发生强烈的相互作用, 导致两者的等离子体强度、形貌发生改变, 强烈影响激光和电弧的焊接特性<sup>[8,9]</sup>。而预热机制主要表现为先行热源对工件预热来提高后行热源的利用率。

### 2.2 激光-电弧等离子体相互作用

图 4 为不同焊接参数下的复合焊接等离子体形貌。从中可以看出, 激光光致等离子体和电弧等离子

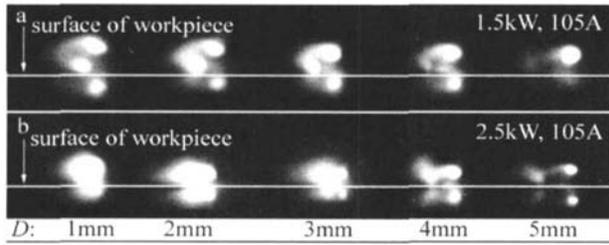


Fig 4 Effect of welding parameters on the plasma shape of hybrid welding  
体之间存在一个导电通道。通过此导电通道, 电弧被吸引至激光光致等离子体处。显然, 两等离子体通过此导电通道进行带电粒子的传输并发生相互作用。

对比图 4a 和图 4b 可以发现, 激光功率为 1.5kW 时, 无论热源间距  $D$  多大, 激光和电弧等离子体 (白色烁亮区) 始终表现为相互分离的两部分, 中间只是通过导电通道保持微弱的联系。而当激光功率为 2.5kW 时, 复合焊接等离子体随着  $D$  的增加, 逐步从一个整体分离为两部分: 当  $D \geq 4\text{mm}$  时, 等离子体 (白色烁亮区) 已经完全分离, 开始仅通过导电通道保持联系。这是因为激光功率在 2.5kW 时, 激光光致等离子体更强, 其作用范围增大, 这可以从图 4 中激光等离子体的亮度和大小得到证明。

### 2.3 电弧的预热效应

通过图 5 单独激光和复合焊接焊道表面形貌可以

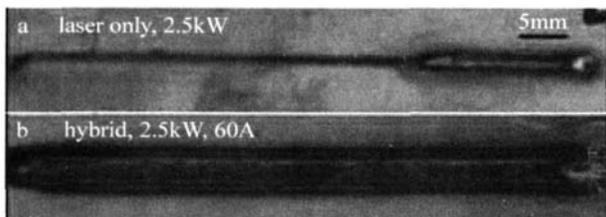


Fig 5 Weld surface shape of laser only and hybrid welding

看到: 本实验中, 单独激光焊接功率为 2.5kW 时, 单独激光焊接处于非稳状态<sup>[10]</sup>, 介于热传导焊和深熔焊之间, 任一工艺参数的波动都将导致激光焊接机制在热传导焊和深熔焊之间发生转变。但是如图 5b 中稳定的复合焊接焊道所示, 电弧的加入有效改变了这种不稳定状况, 因为电弧作用在工件前方, 预先对激光作用点前方的工件进行了加热, 一方面, 熔化的液态金属减少了工件对激光的反射率, 另一方面, 激光直接作用在高温金属上, 减少了融化金属所需的能量, 从而提高了激光在工件表面的能量密度, 并超过深熔焊的临界能量密度阈值, 形成稳定可靠的深熔焊过程。

### 2.4 工艺参数对热源相互作用的影响

图 6 为复合焊接熔化效率增量  $\delta$  和热源间距、能量配比的关系图。可以看到, 当激光功率为 2.5kW 时,  $\delta$  随热源间距  $D$  剧烈变化 (图中虚线表示  $\delta = 0$ )。当激光功率为 1.5kW 时,  $\delta$  仅在 0 附近波动。此外, 在

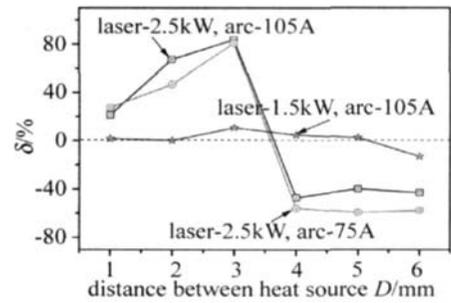


Fig 6 Relations between the heat sources distance and melting efficiency increment of hybrid welding  $\delta$

激光功率为 2.5kW 且  $D \leq 3\text{mm}$  时,  $\delta$  取正值, 热源相互作用有利于焊接效率的提升; 但  $D > 3\text{mm}$  后,  $\delta$  急剧下降且取负值。在图示曲线中,  $\delta$  在  $D = 3\text{mm}$  时取得最大值, 且在激光功率为 2.5kW、电弧电流为 105A 的能量参数下高达 83.6%。

如前所述, 热源间距  $D$  能够改变激光和电弧等离子体相互作用程度, 间距越小, 两者粒子传输距离越短, 作用越强烈。在  $D \leq 3\text{mm}$ , 电弧对工件的预热能够有效提高激光的能量密度, 形成更强烈的等离子体强度和更深的“小孔”, 熔深急剧增加, 如图 7a 和平图 7c

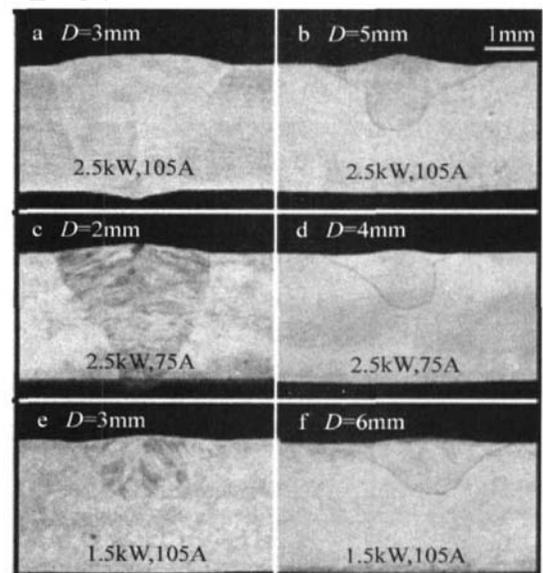


Fig 7 Cross-section weld shape of hybrid welding with different parameters

所示。反过来, 更强的等离子体相互作用能够更大程度地收缩电弧并集中电弧能量, 增强其对工件的预热作用。这种相互关联的相互作用提高了复合焊接熔化效率。在  $D \geq 4\text{mm}$  后, 两等离子体相互作用程度减弱, 之间开始出现明显的导电通道, 而且如图 4 所示, 此通道出现在激光等离子体上方和电弧上部, 并没有直接作用在工件上。这意味着大量的热源能量通过此通道消耗于环境空间, 而不是直接加热工件, 大幅度耗散了激光和电弧作用到工件上的有效能量。此外,  $D$  的增大也降低了预热效果, 减弱了激光的能量利用率。这

导致激光能量密度降低,小孔穿透能力下降,如图 7b和图 7d焊缝形貌所示:焊接熔深急剧降低,而焊接熔深直接决定于激光小孔的穿透深度。最终,当  $D \geq 4\text{mm}$  时,  $\delta$  迅速降低,甚至表现为负值,最低达  $-59.3\%$ 。

当激光功率为  $1.5\text{kW}$  时,激光能量密度较小,只能形成微弱的等离子,这导致激光-电弧等离子体相互作用非常微弱,如图 4a所示。激光表现为热传导焊模式,缺乏“小孔”效应。虽然存在电弧的预热效应,但不足以提高激光能量密度至深熔焊所需的能量密度阈值并形成强烈的等离子体相互作用。从而,两热源相互作用缺乏强烈的等离子体相互作用,主要表现为热量的简单叠加,造成  $\delta$  变化微弱。

由此可以认为,在激光-电弧复合焊接中,等离子体相互作用是提高热源相互作用程度的决定性作用机制,能更大程度的改变复合焊接热源相互作用。

### 3 结 论

(1)只有在优化的工艺参数组合下,激光和电弧的相互作用才有助于提高焊接熔深和工艺稳定性。  
(2)定义了无量纲参数——复合焊接熔化效率增量  $\delta$  来表征热源相互作用的变化。该参数能够对激光-电弧复合焊接的热源相互作用进行半定量分析。在本试验中,  $\delta$  最高可达  $83.6\%$ ,最低至  $-59.3\%$ 。(3)激光光致等离子体和电弧等离子体之间存在一个导电通道,两者通过此导电通道进行带电粒子的传输,发生相互

作用。(4)激光-电弧等离子体相互作用才是提高热源相互作用程度的关键机制;电弧通过对工件的预热作用能够提高激光能量的利用率,增强热源相互作用。

### 参 考 文 献

- (上接第 464 页)
- [ 1 ] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials [ J ]. J A P, 1980 51(11): 5636~ 5641
  - [ 2 ] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [ J ]. Journal of Laser Applications 2005, 1(17): 2~ 14
  - [ 3 ] TU SEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam [ J ]. Science and Technology of Welding and Joining 1999 4(5): 308~ 311.
  - [ 4 ] GAO M, ZENG X Y, YAN J. CO<sub>2</sub> laser-pulsed MAG hybrid welding of mild steel [ J ]. Laser Technology, 2006, 30(5): 498~ 500( in Chinese).
  - [ 5 ] FU JINAGA S, OHASHI R, KATAYAMA S. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system [ J ]. SPIE, 2002, 4831: 301~ 306
  - [ 6 ] READY J F. Industrial applications of lasers [ M ]. New York: Academic Press 1978. 380~ 382
  - [ 7 ] GAO M, ZENG X Y, YAN J. State and development of laser-arc hybrid welding technology [ J ]. China Welding Industry, 2005(2): 1~ 6 ( in Chinese).
  - [ 8 ] CHEN Y B, LEI Zh L, LIL Q. Study of welding characteristics in CO<sub>2</sub> laser-TIG hybrid welding process [ A ]. Proceedings of ICALEO 2003 [ C ]. Jacksonville, FL: LIA, 2003. 41~ 47
  - [ 9 ] GAO M, ZENG X Y, HU Q W. Effects of welding parameters on melting energy of CO<sub>2</sub> laser-GMA hybrid welding [ J ]. Science and Technology of Welding and Joining 2006 11(5): 517~ 522
  - [ 10 ] XIAO R Sh, CHEN JM, CHEN T *et al*. On the critical power density of CO<sub>2</sub> laser penetration welding [ J ]. Applied Laser 200 20(1): 1~ 3( in Chinese).
  - [ 2 ] TUSEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam [ J ]. Science and Technology of Welding and Joining, 1999 4(5): 308~ 311
  - [ 3 ] PAGE C J, DEVERMANN T, BIFFIN T *et al*. Plasma augmented laser welding and its applications [ J ]. Science and Technology of Welding and Joining 2002 7(1): 1~ 10.
  - [ 4 ] KHERSONSKY A, LEE H. Induction heating for efficient laser applications [ J ]. Advanced Materials and Processes 2000 157(4): 39~ 41
  - [ 5 ] LIX Sh, SHI Y Sh, HUANG Sh H. Model of scanning laser energy and its distribution in selective laser sintering [ J ]. Laser Technology 2003, 27(2): 143~ 144( in Chinese).
  - [ 6 ] LU X B, WANG H M. The influence of processing parameters on laser cladding composite coatings on TiAl intermetallic alloy [ J ]. Laser Technology 2006, 30(1): 67~ 69( in Chinese).
  - [ 7 ] ZHAO Y Zh, LIU J P, SHI Y W. Study on the property of laser remelting high carbon high alloy steel [ J ]. Laser Technology, 2003 27(6): 205~ 207( in Chinese).
  - [ 8 ] LUO G X, WU X L, CHEN G N. The effect of power intensity and pulse time on remelting characteristics in pulsed Nd:YAG laser spot processing [ J ]. Transactions of Metall Heat Treatment 1999, 20(1): 48~ 52( in Chinese).
  - [ 9 ] YE D L. A practical handbook of inorganic compounds thermodynamics data [ M ]. Beijing Metallurgical Industry Press 1982 56 74 321, 338, 512, 520( in Chinese).
  - [ 10 ] LI Sh HU Q W, ZENG X Y. Effect of laser mode on the quality of laser cladding layer [ J ]. Laser Technology, 2005, 29(6): 667~ 669 ( in Chinese).
  - [ 11 ] CHEN B L. Principle of welding metallurgy [ M ]. Beijing Tsinghua University Press 1991 488( in Chinese).