

工艺参数对 304 不锈钢脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合焊焊缝成形的影响

张林杰¹, 张建勋¹, 曹伟杰¹, 柴国明², 巩水利²

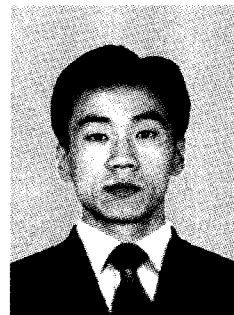
(1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049;

2. 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 研究了 304 不锈钢脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合热源焊接工艺参数对焊缝成形的影响。结果表明, 脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合焊焊缝横截面面积大于单一激光焊焊缝横截面面积与单一 TIG 焊焊缝横截面面积之和, 具有协同效应; 激光功率增大时, 复合焊焊缝熔深和熔宽均增大, 复合焊焊缝横截面面积增大, 复合热源热效率也增大; 离焦量从 -3 mm 增大到 5 mm 的过程中, 复合焊焊缝熔深、熔宽、焊缝横截面面积和复合热源热效率均先增大, 在离焦量为 -1 mm 时达到最大值, 然后随离焦量的进一步增大而减小; 焊接速度减小时, 复合焊焊缝熔深、熔宽和焊缝横截面面积均增大, 但复合热源热效率减小。

关键词: 激光/TIG 复合焊; 焊缝形貌; 工艺参数; 不锈钢

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2011)01-0033-04



张林杰

0 序 言

激光/TIG 复合焊接方法是同时采用激光束和 TIG 电弧两种热源, 激光束穿越 TIG 电弧照射到 TIG 电弧形成的熔池中, 从而使入射激光束的反射率显著降低、TIG 电弧更加稳定和集中, 并能够改进激光焊接间隙弥合能力差、TIG 焊接生产效率低的不足。

近年来激光/TIG 电弧复合焊接技术在国内外发展较快。文献[1]将激光/TIG 复合焊接应用于 800 MPa 级高强钢的快速焊接。文献[2]将激光/TIG 复合热源用于薄壁不锈钢管焊接, 焊接速度达到 15 m/min, 焊缝成形明显改善, 并且降低了对坡口加工精度的要求。文献[3]采用激光/TIG 复合热源焊接镀锌钢板搭接接头, 有效抑制了焊接过程中的飞溅和气孔缺陷。文献[4]采用高速摄影与 X 射线透射成像相结合的方法研究了激光/TIG 复合热源焊接过程中小孔和熔池的行为。文献[5]研究发现在激光/TIG 复合焊接过程中 TIG 电弧只存在于小孔孔口附近, 不会深入小孔内部。

文献[6]采用激光/TIG 复合焊接方法实现了超细晶粒钢的高速焊接。文献[7]研究了保护气流对两种热源耦合作用的影响。文献[8-11]将激光/TIG 复合热源焊接应用于钛合金、镁合金的焊接, 并在镁/铝、镁/钢等异种材料焊接方面取得了一系列研究成果。文献[12, 13]深入研究了电弧对激光的散焦作用和吸收作用, 并提出了脉冲激光/脉冲电弧复合焊接方法和同轴激光/TIG 复合焊接方法, 提高了激光/TIG 复合热源焊接的热效率。

激光/TIG 复合焊接不仅涉及两种焊接热源各自的工艺参数, 还涉及规定两个热源复合方式的参数, 工艺参数较多, 这些参数对成形过程的影响也比较复杂。文中针对 304 奥氏体不锈钢, 试验研究了脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合热源焊接过程中激光功率、激光束离焦量和焊接速度对焊缝成形的影响, 并根据这些工艺参数对焊缝横截面面积的影响分析了复合热源热效率的变化规律。

1 试验方法

焊接试板是 304 不锈钢, 厚度 3 mm, 试板尺寸 100 mm × 150 mm。打磨掉试板表面的氧化层, 清洗去除试板表面油污, 焊前再用丙酮将试板表面擦拭一遍。

收稿日期: 2009-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875200); 教育部博士点新教师基金资助项目(20090201120014); 西安交通大学校内科研基金资助项目

焊接设备采用 JHM—1GXY—400X 型脉冲 Nd:YAG 激光器和 TIG WP300 焊机。JHM—1GXY—400X 型激光器最大输出功率 500 W, 经焦距 70 mm 的透镜聚焦后可获得直径 0.2 mm 的焦斑。TIG WP300 焊机最大电流 300 A。如图 1 所示, 试验中采用旁轴复合的方式, 通过焊接夹具将激光头和 TIG 焊枪的相对位置固定起来。TIG 电弧在前并倾斜一定角度, 在工件表面形成熔池。激光束在后, 沿垂直于工件表面的方向入射到已经形成的熔池中。焊接过程中采用氩气对激光头、TIG 焊枪及工件高温区域进行保护。

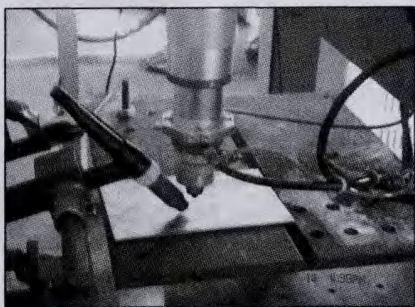


图 1 激光/TIG 复合焊接试验装置

Fig. 1 Experiment set-up for laser/TIG hybrid welding

焊接试验采用平板表面堆焊的方法, 通过改变激光/TIG 电弧的工艺参数, 得到一系列的焊接接头。经切割、镶样、预磨、抛光后, 用腐蚀剂进行腐蚀并在金相显微镜下观察、测量焊缝横截面形貌和尺寸。文中如没有特殊说明, 则所用的试验参数均为: TIG 电流 $I_T = 40$ A, TIG 电压 $U_T = 11 \sim 12$ V, 泵浦灯电流 $I_L = 190$ A, 激光束离焦量 $e = -1$ mm, 激光脉冲频率 $f = 15$ Hz, 脉宽 $b = 2.5$ ms, 热源间距 $d = 0.5$ mm, 焊接速度 $v = 25$ cm/min (此组参数下激光功率为 350 W)。

2 试验结果及讨论

2.1 三种焊接方法焊缝横截面形貌的比较

图 2 中对比了单一 TIG 焊、单一激光焊和激光/TIG 复合焊三种情况下得到的焊缝横截面形貌。单一 TIG 焊接得到典型热导焊焊缝, 焊缝深宽比很小。激光焊焊缝熔宽很小, 熔深很大, 深宽比约为 TIG 焊缝的 12 倍。复合焊焊缝宽度和焊缝熔深都明显增大, 形成了“钉头”形的焊缝横截面形貌。三者的焊缝横截面面积分别为 0.6, 1.1 和 2.4 mm², 复合焊焊缝的横截面面积比两种热源单一焊接得到的焊缝

横截面面积之和还要大 0.7 mm² 左右, 可见两种热源复合后产生了“1 + 1 > 2”的效应, 文献[14]将这种现象称为复合热源的协同效应。

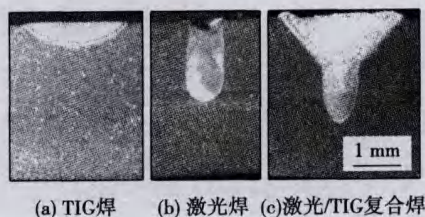


图 2 不同焊接热源得到的焊缝横截面形貌

Fig. 2 Cross sections of weld produced by different heat sources

2.2 激光功率对复合焊焊缝形貌的影响

为了研究激光功率变化对复合焊焊缝形貌的影响, 在其它工艺参数不变的条件下分别进行了激光功率 (P_L) 为 70, 210 和 350 W 的复合焊接试验。

图 3 比较了三种不同激光功率下得到的复合焊焊缝横截面形貌, 图 4 给出了激光功率对复合焊焊缝熔宽和熔深的影响。

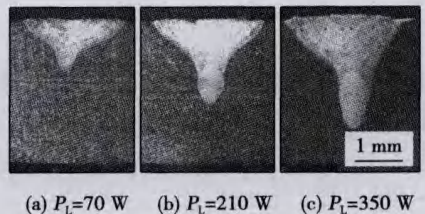


图 3 激光功率对复合焊焊缝横截面形貌的影响

Fig. 3 Effects of laser power on weld cross section shape

随着激光功率的增大, 复合热源总输出功率增大, 因此复合焊焊缝的熔宽和熔深均增大。从图 4 中可以看到, 当激光功率从 70 W 增大到 350 W 时, 熔深的变化很显著, 从约 0.9 mm 增大到约 2.0 mm, 增加了约 110%, 而熔宽的增幅相对较小, 只有约 20%。

图 3 中三种情况下焊缝的横截面面积依次为 1.07, 1.68 和 2.37 mm², 复合热源的功率分别为 520, 660 和 800 W。因此三种情况下单位热源功率形成的焊缝横截面面积依次为 2.06, 2.55 和 2.96 mm²/kW。可见随着激光功率的增大, 复合热源的热效率增大, 这是因为激光功率增大时小孔效应更加显著, 而且激光对 TIG 电弧的稳弧和压缩作用会增强, 从而使电弧能量密度增大^[13]。

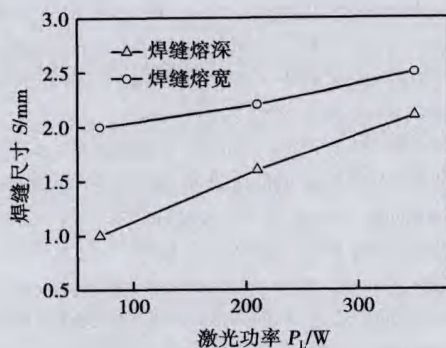


图4 激光功率对复合焊缝熔宽和熔深的影响

Fig. 4 Effects of laser power on width and depth of weld

2.3 激光束离焦量对复合焊缝形貌的影响

图5为在离焦量分别为5, 2, -1和-3 mm四种情况下进行焊接试验得到的焊缝横截面形貌。从图5中的结果可以看到,离焦量对焊缝横截面形貌有非常显著的影响,在离焦量 $e = 5$ mm时,由于工件表面激光光斑直径过大,能量密度较低不足以产生小孔效应,此时的焊接模式为热传导焊接;离焦量 $e = 2$ mm时,工件表面光斑直径减小,功率密度有所增大,因此形成了锥状的焊缝横截面形貌;离焦量 $e = -1$ mm时得到的熔深最大;离焦量 $e = -3$ mm时也形成了典型的钉头焊缝,但是焊缝熔深和 $e = -1$ mm时相比较有所减小。

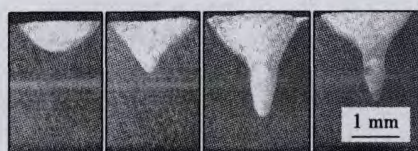
(a) $e=5$ mm (b) $e=2$ mm (c) $e=-1$ mm (d) $e=-3$ mm

图5 离焦量对复合焊缝横截面形貌的影响

Fig. 5 Effects of defocusing distance on weld cross section shape

激光离焦量对复合焊缝熔深和熔宽尺寸的影响见图6,离焦量从-3 mm增大到5 mm的过程中,焊缝熔深先增大,在离焦量为-1 mm时达到最大,然后随着离焦量的进一步增大焊缝熔深开始减小。焊缝熔宽随离焦量的变化趋势与熔深相同,随着离焦量从-3 mm增大到5 mm,焊缝熔宽也在离焦量为-1 mm时增加到最大,然后随着离焦量的进一步增大而减小。从图6中还可以看到,离焦量变化会导致复合焊缝熔深发生较大幅度变化,而焊缝熔宽的变化幅度则相对较小。

图5中四种情况下焊缝横截面面积测量结果依

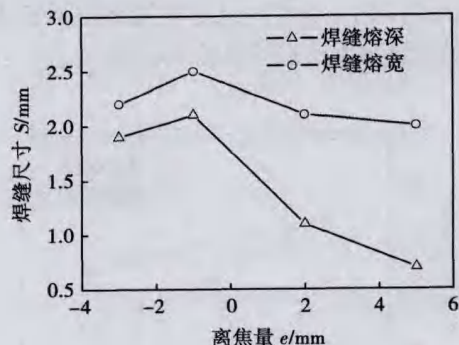


图6 离焦量对复合焊缝熔宽和熔深的影响

Fig. 6 Effects of defocusing distance on width and depth of weld

次为0.94, 1.29, 2.37和1.66 mm²。即随着离焦量从-3 mm增大到5 mm,复合热源热效率先增大,离焦量为-1 mm时达到最大,然后随离焦量的进一步增大而减小。

2.4 焊接速度对复合焊接焊缝形貌的影响

在其它工艺参数保持不变、焊接速度分别为35, 25和15 cm/min的条件下分别进行了焊接试验,以研究焊接速度变化对复合焊缝形貌的影响。

试验得到的不同焊接速度下复合焊缝的横截面形貌如图7所示。随着焊接速度的减小,焊缝熔深和熔宽都明显增大,当焊接速度为15 cm/min时,试板几乎熔穿。图8为焊接速度对复合焊缝熔深和熔宽的影响,可以看到当焊接速度从15 cm/min增大到35 cm/min时,复合焊接焊缝熔深变化较大,而焊缝熔宽的变化则相对较小。

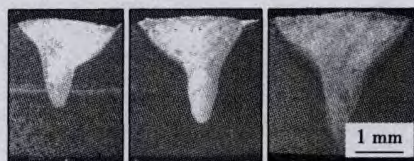
(a) $v=35$ cm/min (b) $v=25$ cm/min (c) $v=15$ cm/min

图7 焊接速度对复合焊缝横截面形貌的影响

Fig. 7 Effects of welding speed on weld cross section shape

图7中三种情况下焊缝横截面面积依次为1.88, 2.37和3.45 mm²。除了焊接速度外,三种情况下的其它工艺参数相同,为了消除热输入变化对焊缝横截面面积的影响,计算了三种情况下复合焊缝横截面面积与焊接速度的乘积,结果依次为658, 592.5和517.5 mm³/min,即截面面积与焊接速度的乘积随复合热源焊接速度的减小而减小,可见随着

焊接速度的减小,虽然复合焊焊缝横截面积不断增大,但是复合热源的热效率是不断减小的。

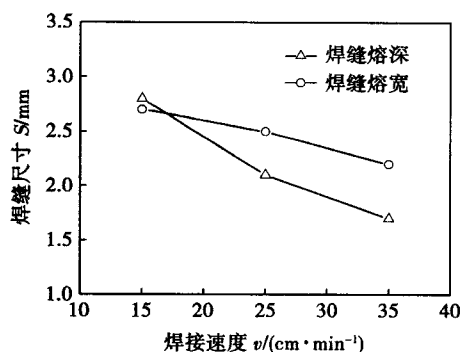


图 8 焊接速度对复合焊焊缝熔宽和熔深的影响

Fig. 8 Effects of welding speed on width and depth of weld

3 结 论

(1) 激光/TIG 电弧复合焊焊缝横截面面积大于单一激光焊焊缝横截面面积与单一 TIG 焊焊缝横截面面积之和,具有“1 + 1 > 2”的协同效应。

(2) 激光功率增大时,复合焊焊缝熔深和熔宽均增大,复合焊焊缝横截面面积增大,复合热源热效率也增大。

(3) 离焦量从 -3 mm 增大到 5 mm 的过程中,复合焊焊缝熔深、熔宽、焊缝横截面面积和复合热源热效率均先增大,在离焦量为 -1 mm 时达到最大值,然后随着离焦量的进一步增大而减小。

(4) 焊接速度减小时,复合焊焊缝熔深、熔宽和焊缝横截面面积都增大,但复合热源热效率降低。

参考文献:

- [1] Murakami Koji, Mitooka Yutaka, Hino Makoto, *et al.* YAG laser-TIG hybrid welding of 800 MPa-class high tensile strength steel[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2006, 70(2): 134 - 137.
- [2] Arias Jorge L, Romero Pablo, Vandewynck, *et al.* Laser-TIG hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheets[C] // ICALOE 2005 Proceedings, Miami, FL, USA, 2005, 104 - 107.

- [3] Cheolhee Kim, Woongyong Choi, Jeonghan Kim, *et al.* Relationship between the weldability and the process parameters for laser-TIG hybrid welding of galvanized steel sheets[J]. Materials Transactions, 2008, 49(1): 179 - 186.
- [4] Katayama Seiji, Naito Yasuaki, Mizutani Masami, YAG laser and TIG Arc hybrid welding phenomena[C] // ASM Conference Proceedings: Joining of Advanced and Specialty Materials, Columbus, OH, USA, 2005, 183 - 188.
- [5] Naito Yasuaki, Mizutani Masami, Katayama Seiji. Electrical measurement of arc during hybrid welding-welding phenomena in hybrid welding using YAG laser and TIG arc[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2006, 24(1): 45 - 51.
- [6] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W, *et al.* Laser-TIG hybrid welding of ultra-fine grained steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(2): 785 - 791.
- [7] Gao M, Zeng X Y, Hu Q W. Effects of gas shielding parameters on weld penetration of CO₂ laser-TIG hybrid welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1 - 3): 177 - 183.
- [8] Liu L M, Hao X F, Du X. Microstructure characteristics and mechanical properties of laser-TIG hybrid welding joint of TA15 titanium alloy[J]. Materials Research Innovations, 2008, 12(3): 114 - 118.
- [9] Liu L M, Liu X J, Liu S H. Microstructure of laser-TIG hybrid welds of dissimilar Mg alloy and Al alloy with Ce as interlayer[J]. Scripta Materialia, 2006, 12(3): 383 - 386.
- [10] Liu L M, Wang J F, Song G. Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 381: 129 - 133.
- [11] Song G, Liu L M, Chi M S, *et al.* Investigations on laser-TIG hybrid welding of magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2005, 488 - 489: 371 - 376.
- [12] Chen Y B, Lei Z L, Li L Q, *et al.* Novel hybrid method: pulse CO₂ laser-TIG hybrid welding by coordinated control[J]. China Welding, 2006, 15(1): 20 - 25.
- [13] Chen Y B, Lei Z L, Li L Q, *et al.* Experimental study on welding characteristics of CO₂ laser TIG hybrid welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(4): 403 - 411.
- [14] Hu B, Ouden den G. Synergetic effects of hybrid laser/arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2005, 10(4): 427 - 431.

作者简介: 张林杰,男,1973 年出生,博士,讲师。主要从事大型工程结构焊接应力变形,高效计算激光焊和激光电弧复合焊接机理方面的研究。发表论文 20 余篇。Email: zhanglinjie@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者: 巩水利,教授。Email: Shuilingong@yahoo.com