

不锈钢薄板大间隙接头激光-MIG电弧复合高速焊接工艺

张 洲¹, 单际国^{1,2}, 吴爱萍^{1,2}, 任家烈¹

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 采用填充 ER316 焊丝的光纤激光-MIG 电弧复合焊方法, 焊接间隙为 0.5 mm、厚度为 1 mm 的 SUS444 铁素体不锈钢薄板对接接头和搭接接头, 研究了获得成形良好的对接接头和搭接接头的工艺参数窗口和极限焊接速度, 并对焊缝进行了着色渗透检验和拉伸试验。结果表明, 合理匹配焊接速度和焊接电流, 是获得成形良好的大间隙接头的关键; 当焊接速度过小或焊接电流过大时, 较大的热输入导致焊缝过度熔透, 焊缝成形不良; 当焊接速度过大或焊接电流过小时, 较小的热输入导致焊缝未熔透。对接接头焊缝成形质量良好且熔透的极限焊接速度可达 12 m/min, 而搭接接头的极限焊接速度为 5 m/min。成形良好的焊缝均未发现表面裂纹。拉伸试验表明, 对接接头断裂在母材上; 搭接接头绝大部分断裂在熔合线附近, 极限焊接速度下获得的搭接接头的抗拉强度是母材的 84.2%。

关键词: 大间隙焊接; 高速焊接; 激光-MIG 电弧复合焊; 对接接头; 搭接接头

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)10-0109-04

0 序 言

激光焊接时的焊缝成形质量对焊接间隙的敏感性很高, 要求焊前有较高的装配精度^[1-3]。为了降低对焊前装配的要求, 激光填丝焊及激光-电弧复合焊得到重视^[4,5]。激光填丝焊时, 由于激光光斑直径较小, 焊接过程对送丝位置的要求极为严格, 控制难度很大^[4-6]。

激光-电弧复合焊对接头间隙的适应性较激光焊大大增强^[7]。Ishide 等人^[8]利用 2 kW 的 CO₂ 激光和 2.7 kW 的 MAG 电弧进行复合焊接, 实现了 1 mm 间隙的 2.5 mm 厚低碳钢的焊接, 而激光焊的最大间隙仅为板厚的 10%~15%^[1]。TWI 研究者^[5]开展了 8 mm 厚的 C-Mn 钢对接接头的焊接试验, 分别对比了激光焊、激光填丝焊以及激光-MIG 复合焊的搭桥能力, 发现在 4 kW 激光下, 激光-MIG 复合焊能够焊接的最大间隙可达 1.6 mm, 是激光焊和激光填丝焊的四倍之多。但是, 目前关于激光-电弧复合焊的允许间隙仍然偏小, 一般不超过板厚的 30%。另外, 焊接速度也是影响焊缝成形及焊接效率的重要因素。国内有研究者采用激光-电弧复合焊连接 0.4 mm 间隙和 4 mm 厚的 Q235 对接接头, 最大焊

接速度仅为 1.2 m/min^[9]。为提高焊接效率, 对大间隙接头的高速复合焊有必要作深入研究。

文中尝试采用光纤激光-MIG 电弧复合方法, 焊接间隙为板厚 50% 的大间隙对接接头和搭接接头, 在激光功率为 2 kW 的条件下, 考察焊接速度和焊接电流对焊缝成形质量的影响规律, 获得了焊缝成形良好的工艺参数窗口和焊接速度的极限值, 并测试了接头的拉伸断裂强度。研究结果对于大间隙激光-MIG 电弧复合高速焊接的工艺制定具有参考价值。

1 试验方法

母材为铁素体不锈钢 SUS444, 其化学成分如表 1 所示。填充材料为 ER316 焊丝, 直径为 1.0 mm, 化学成分如表 2 所示。

表 1 SU444 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of SUS444 stainless steel

| C | Mn | P | Si | Cr | Ni | Mo | Fe |
|-------|-----|------|-----|----|-----|-----|----|
| 0.025 | 1.0 | 0.04 | 1.0 | 18 | 1.0 | 1.8 | 余量 |

表 2 ER316 焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of ER316 filler

| C | Cr | Fe | Mn | Mo | Ni | Si |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.08 | 22.11 | 64.21 | 1.254 | 0.203 | 11.62 | 0.564 |

采用的 YLS-2000 光纤激光器最大功率为 2 000 W, 波长为 1.07 μm , 聚焦光斑直径为 0.2 mm. MIG 电焊机型号为 NBC-350TSMI, 焊机采用“一元化”控制, 电弧电压和送丝速度根据设定的焊接电流来自动获得最优匹配, 且电焊机焊接模式为常规模式, 焊接过程中焊接电流、电弧电压保持恒定值. 工件的移动由四轴三联动数控机床控制.

焊接试验所用激光功率为 2 000 W, 激光 - MIG 焊采用激光引导电弧模式, 即激光位于电弧之前, 光丝间距设置为 0 mm, MIG 焊枪与试板上表面夹角为 60°.

焊接试样由两块 100 mm \times 100 mm \times 1 mm 的板材分别经对接和搭接而成, 焊接间隙均为 0.5 mm (板厚的 50%) (图 1). 使用着色渗透探伤剂对焊缝进行渗透检验, 以检测焊缝是否存在表面裂纹. 在 BX51M 光镜下观察焊缝横截面金相, 根据国家标准焊接接头拉伸试验方法 GB/T 2651—2008 制作接头的拉伸试样, 用 Z020 力学试验机进行拉伸试验.

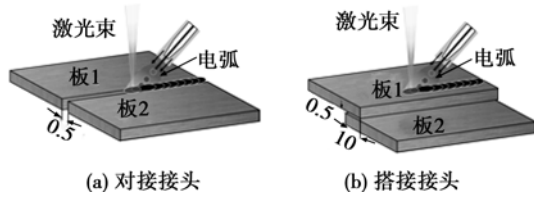


图 1 焊接方法 (mm)

Fig. 1 Schematic diagram of two welding methods

2 试验结果与分析

2.1 对接接头试验结果及分析




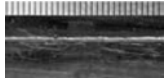


2.1.1 焊缝成形

焊缝的熔透状态对成形质量影响较大^[10]. 典型的熔透状态可分为三类: 未熔透、适度熔透和过熔透, 如表 3 所示. 可以看出, 过熔透的焊缝正面熔宽过大, 背面出现穿孔, 焊缝表面金属量分布不均, 成形较差; 未熔透的焊缝正面熔宽较小, 背面未熔化, 间隙没能被填充; 适度熔透的焊缝正面、背面金属分布均匀, 焊缝间隙形成了良好的桥接, 成形良好.

根据以上标准, 对在不同的焊接电流和焊接速度下所获得的焊缝进行分类, 获得图 2 所示的结果, 图 2 中阴影区域代表能够获得成形良好焊缝的 (即适度熔透焊缝) 的工艺参数窗口.

观察图 2 的阴影区可知, 当焊接速度为 12 m/min 时, 获得成形良好焊缝的电流选择范围很窄; 当焊接速度为 10 m/min 时, 获得成形良好焊缝的电流选择范围显著扩大. 而从阴影区以外区域可知,

表 3 对接接头焊缝成形质量评价标准
Table 3 Evaluation criterion for butt joints

| 熔透状态 | 位置 | |
|------|--|---|
| | 焊缝正面 | 焊缝背面 |
| 过熔透 |  |  |
| 适度熔透 |  |  |
| 未熔透 |  |  |

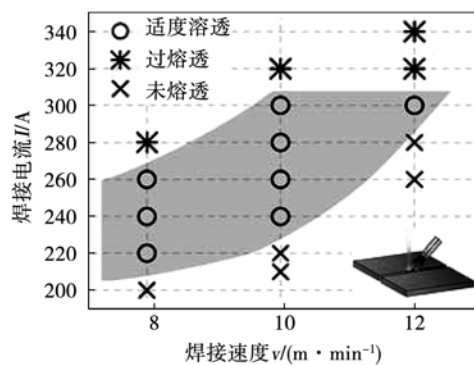


图 2 焊接电流和焊接速度对对接接头焊缝熔透状态的影响
Fig. 2 Penetration statuses of butt joints for different welding currents and welding speeds

当焊接电流超过 300 A 时, 母材被烧穿, 形成过熔透焊缝; 而当焊接电流低于 220 A 时, 焊缝未熔透. 实际上, 焊接过程中, 熔滴从焊丝过渡到熔池时, 会受到等离子流力的作用^[11]. 当焊接电流增大时, 等离子流力会增大, 熔滴对熔池的冲击力也越大, 焊缝熔深增加, 焊缝由“未熔透”转为“适度熔透”. 若焊接电流超过一定值时, 熔池受到熔滴的冲击力过大, 造成“过熔透”缺陷. 可见, 合理匹配焊接速度和焊接电流, 是获得成形良好的大间隙对接接头的关键.

复合焊的热量由激光和电弧共同提供, 由于激光功率保持 2 000 W 不变, 因而焊接热输入取决于电弧功率和焊接速度. 过大的焊接电流导致较大的热输入, 直接将母材烧穿, 对接接头难以形成桥接; 而过小的焊接电流导致未熔透, 而且焊接电流的减小也导致了送丝速率的降低, 过渡到熔池中的焊丝金属不足以填充间隙. 相应的, 当焊接速度过大时, 热输入会随之减小, 焊缝难以熔透, 且此时焊接过程不稳定, 这从不规整的焊缝表面可以看出; 而焊接速度较小时, 热输入过大同样会导致母材烧穿. 只有合理地匹配焊接速度和焊接电流, 才能获得成形良好的对接焊缝.

2.1.2 接头拉伸性能

对图 2 阴影区的 8 组成形良好(即适度熔透)的焊缝的表面进行着色探伤检验,图 3 列出典型探伤结果,可观察到所有焊缝表面均未探测出裂纹。

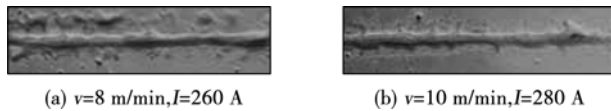


图 3 对接焊缝正面的着色探伤检验结果

Fig. 3 Results of the dye-penetrant experiment for front side of butt welds

此外,对 8 组接头进行拉伸试验,接头均断裂在母材上,可知成形良好的对接接头的断裂强度不低于母材。表 4 给出了接头的抗拉强度及断裂强度,显示出该 8 组对接接头的抗拉强度及断裂强度基本一致,断裂强度的平均值为 496 MPa(达到母材的断裂强度)。

表 4 对接接头及母材的断裂强度

Table 4 Tensile strength for butt joints and base metal

| 焊接参数 | | 断裂强度 | 断裂强度均值 |
|-----------------------------|----------|-----------|-----------------|
| 焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$ | 电流 I/A | R_d/MPa | \bar{R}_d/MPa |
| $v=8$ | $I=220$ | 497.4 | 496.0 |
| $v=8$ | $I=240$ | 496.6 | |
| $v=8$ | $I=260$ | 495.8 | |
| $v=10$ | $I=240$ | 496.7 | |
| $v=10$ | $I=260$ | 495.1 | |
| $v=10$ | $I=280$ | 497.0 | |
| $v=10$ | $I=300$ | 493.2 | |
| $v=12$ | $I=300$ | 496.2 | |

2.2 搭接接头试验结果及分析

2.2.1 焊缝成形

对于搭接接头,最重要的是要保证上、下板均能够熔透,否则两板之间的空隙难以形成良好的桥接,因此,焊缝的熔透状态对搭接接头的成形质量影响很大。

搭接接头典型的熔透状态也可分为三类:未熔透、适度熔透和过熔透,如表 5 所示。可以看出,过熔透的焊缝出现穿孔或者塌陷,焊缝成形较差;未熔透的焊缝下板未熔透,填充的金属在焊缝正面堆积,焊缝成形也较差;适度熔透的焊缝正面、背面金属分布均匀,焊接间隙形成了良好的桥接,成形良好。

根据上述评价标准,对不同工艺参数的搭接接头的熔透状态进行分析,得到图 4 所示的搭接接头

表 5 搭接接头焊缝成形质量评价标准

Table 5 Evaluation criterion for lap joints

| 熔透状态 | 位置 | |
|------|------|------|
| | 焊缝正面 | 焊缝背面 |
| 过熔透 | | |
| 适度熔透 | | |
| 未熔透 | | |

熔透状态图,图中阴影区域代表能够获得焊缝成形良好的(即适度熔透焊缝)的工艺参数窗口。

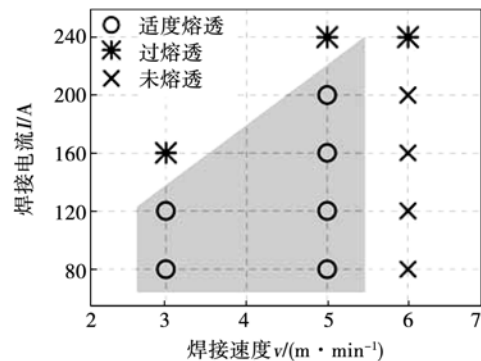


图 4 焊接电流和焊接速度对搭接接头焊缝熔透状态的影响

Fig. 4 Penetration statuses of lap joints for different welding currents and welding speeds

由图 4 的阴影区可知,获得成形良好的搭接接头的最大焊接速度为 5 m/min;焊接速度较低时,获得适度熔透焊缝的焊接电流的选择范围较窄。而从图 4 阴影区以外区域可知,在低焊接电流下难以获得成形良好的焊缝,这是由于热输入过小,搭接接头的下板材未熔透,填充的金属无法过渡到焊缝背面;而过大的焊接电流会导致焊缝烧穿或上板材严重塌陷,焊缝成形在这两种情况下均较差。当焊接电流一定时,焊接速度过小会导致烧穿,而焊接速度过大易产生未熔透,这都与热输入有关。因而,焊接电流和焊接速度的合理匹配也是获得成形良好的搭接接头的关键。

2.2.2 接头拉伸性能

对图 4 阴影区的 6 组成形良好(即适度熔透)焊缝的表面进行着色探伤检验,图 5 为典型的探伤检验结果。可观察到该 6 组焊缝表面均未探测出裂纹。

对上述 6 组搭接接头进行拉伸试验,6 组焊缝中仅一组(焊接速度 3 m/min,焊接电流 120 A)断裂

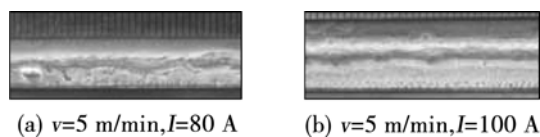


图 5 搭接焊缝正面的着色探伤检验结果

Fig. 5 Results of dye-penetrant experiment for front side of lap welds

在母材上,拉伸力可达 12.0 kN;其它参数下获得的接头均断裂于熔合线附近,表明熔合线附近是成形良好的搭接接头力学性能最为薄弱的部位。

搭接接头的拉伸断裂是剪应力和正应力共同作用的结果,因此用接头抗拉强度来表征其拉伸性能。各组焊缝成形良好的搭接接头抗拉强度如图 6 所示,可以发现,对同一焊接速度下,搭接焊缝的抗拉强度随焊接电流的增加而增加;当焊接电流相同时,焊接速度越低,接头的抗拉强度越大。对于极限焊接速度(5 m/min)获得的接头而言,搭接接头最大的抗拉强度可达 10.1 kN,是母材抗拉强度的 84.2%。

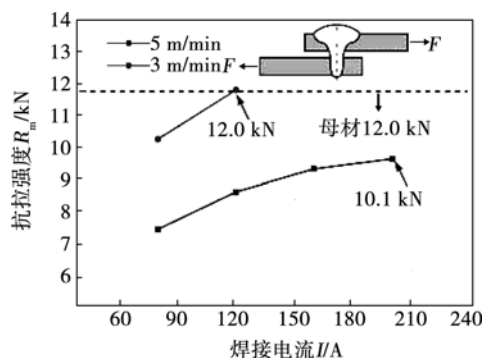


图 6 焊接速度和焊接电流对搭接接头抗拉强度的影响

Fig. 6 Influence of welding speed and current on tensile strength of lap joints

3 结 论

(1) 成功实现了间隙为厚度 50% 的大间隙搭接接头和对接接头的激光 - MIG 电弧高速焊接,获得了成形良好的对接焊缝和搭接焊缝的工艺参数窗口。

(2) 在 2 000 W 的激光功率下,光纤激光 - MIG 电弧复合焊接间隙 0.5 mm 及厚度 1 mm 的不锈钢对接接头的极限焊接速度为 12 m/min,搭接接头的极限焊接速度为 5 m/min。

(3) 成形良好的对接接头和搭接接头具有良好的拉伸性能。极限焊接速度下(12 m/min)获得的对接接头均断裂在母材上,极限焊接速度下(5 m/min)

获得的搭接接头绝大多数断裂在熔合线附近,最大抗拉强度是母材的 84.2%。

参考文献:

- [1] 高明. CO₂ 激光 - 电弧复合焊接工艺、机理及质量控制规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [2] Ono M, Shinbo Y, Yoshitake A, *et al.* Development of laser-arc hybrid welding[J]. NKK Technical Review, 2002(86): 8 - 12.
- [3] Emmelmann C, Kirchhoff M, Petri N. Development of plasma-laser-hybrid welding process[J]. Physics Procedia, 2011(12): 194 - 200.
- [4] 刘建华, 胡伦骥, 骆红, 等. 薄板激光填丝焊工艺研究[J]. 汽车技术, 1997(3): 42 - 46.
Liu Jianhua, Hu Lunji, Luo Hong, *et al.* Research of technology for laser welding metal sheet with wire filling[J]. Automobile Technology, 1997(3): 42 - 46.
- [5] Shi G, Hilton P. A comparison of the gap bridging capability of CO₂ laser and hybrid CO₂ laser MAG welding on 8mm thickness C-Mn Steel Plate[J]. Welding in the World, 2005, 49(7/8): 75 - 87.
- [6] 许飞. 铝合金激光填丝和电弧复合焊接技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [7] 杨璟, 李晓延, 巩水利, 等. 铝锂合金 YAG-MIG 复合焊缝成形特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 83 - 86.
Yang Jing, Li Xiaoyan, Gong Shuli, *et al.* Characteristics of aluminum-lithium alloy joint formed by YAG-MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 83 - 86.
- [8] Hayashi T, Katayama S, Abe N, *et al.* High-power CO₂ laser-MIG hybrid welding for increased gap tolerance. Hybrid weldability of thick steel plates with a square groove[J]. Welding International, 2004, 18(9): 692 - 701.
- [9] 高明, 熊征, 曾晓雁, 等. 激光 - 电弧复合焊接临界速度规律研究[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2438 - 2442.
Gao Ming, Xiong Zheng, Zeng Xiaoyan, *et al.* Experimental study on critical speed of laser-arc hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 36(9): 2438 - 2442.
- [10] 张永强, 陈武柱, 双元卿, 等. 激光 - MIG 复合焊接熔透状态评价方法[J]. 焊接学报, 2010, 31(8): 41 - 44.
Zhang Yongqiang, Chen Wuzhu, Shuang Yuanqing, *et al.* Evaluation method of penetration statuses in laser-MIG hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(8): 41 - 44.
- [11] 刘达樊. CO₂ 激光 - MIG 复合热源焊接熔滴过渡的行为分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

作者简介: 张洲,男,1989 年出生,博士研究生. 主要从事激光焊接方面的研究. 发表论文 1 篇. Email: zhou-zhang12@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 单际国,男,教授,博士研究生导师. Email: shanjg@tsinghua.edu.cn