

Q355C 高强钢激光-MAG 复合焊接工艺参数对焊缝成型的影响

王志鹏¹, 尹燕^{1,3}, 南雪丽¹, 柴旭天¹, 董开基¹, 张瑞华^{2,3}

¹兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 甘肃兰州

²中国钢研科技集团有限公司 北京

³阳江市高功率激光应用实验室有限公司 广东阳江

【摘要】采用激光-MAG 复合焊接方法对 25mm 厚 Q355C 高强钢开展平板堆焊工艺试验, 研究各主要参数(光丝间距、送丝速度、离焦量、激光功率和焊接速度)对焊缝成型的影响规律。结果表明, 光丝间距为 3mm 时, 焊缝成型最好; 增加送丝速度使焊缝熔深熔宽都增加; 负离焦量的增大更有助于增加熔深; 激光功率对焊缝熔深起主导作用; 焊接速度的增大使焊缝熔深减小。万瓦级激光-MAG 复合焊接在特定的参数组合下, 激光和电弧两种热源之间具有良好的耦合效应, 可以获得较深熔深且无缺陷的焊缝, 实现高效焊接。

【关键词】激光-MAG 复合焊接; 工艺参数; 焊缝成型; 截面形貌

【基金项目】海上风电厚板高功率激光焊接技术开发及应用(SDZX2019038); 阳江市高功率激光应用实验室建设(2018057); 阳江市高功率激光应用实验室有限公司支持粤东西北新型研发机构建设(20180902); 广东省“扬帆计划”引进创新创业团队(2015YT02G090)

Effect of laser MAG hybrid welding parameters on weld formation of Q355C high strength steel

Zhipeng Wang¹, Yan Yin¹, Xueli Nan¹, Xutian Chai¹, Kaiji Dong¹, Ruihua Zhang^{2,3}

¹State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China

²China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing, China

³Yangjiang High Power Laser Application Laboratory Co., Ltd., Yangjiang, China

【Abstract】Laser MAG hybrid welding method was used to carry out plate surfacing process test on 25 mm thick Q355C high strength steel, and the influence of main parameters (wire spacing, wire feeding speed, defocusing amount, laser power and welding speed) on weld formation was studied. The results show that the weld formation is the best when the wire spacing is 3 mm; the weld penetration and width increase with the increase of wire feeding speed; the increase of negative defocus is more helpful to increase the weld penetration; the laser power plays a leading role in the weld penetration; the weld penetration decreases with the increase of welding speed. The results show that the coupling effect between laser and arc is good, and the weld with deep penetration and no defects can be obtained under the specific parameter combination of laser MAG hybrid welding.

【Keywords】Laser MAG hybrid welding; process parameters; weld formation; cross section morphology

20 世纪 70 年代末, 英国学者 W.M.Steen^[1]最先提出激光电弧复合焊接的概念, 激光-电弧复合焊接是将激光和电弧两种热源相互叠加, 充分发挥各自

的优势, 具有熔深大、高效率、接头桥接好等优点, 实现了“1+1>2”的效果^[2]。目前激光-电弧复合焊接方法已经广泛用于石油管道、航空航天、轨道交

通、海洋平台等领域^[3-6], 具有十分广阔的前景。

激光与电弧两种热源的耦合效果直接影响着焊缝成型, 当耦合不佳时, 会产生很多焊接缺陷, 所以激光-电弧复合焊接工艺参数的优化, 对焊缝成型的质量有着重要意义。罗子艺^[7]等人对 8mm 厚 304 不锈钢开展全熔透激光-电弧复合焊接工艺研究, 发现增大送丝速度能够减少咬边现象的产生。蒋宝^[8]等人采用 30kW 光纤激光器研究了工艺参数对万瓦级光纤激光-MAG 电弧复合焊接焊缝成型的影响, 研究发现激光在前的条件下, 增大焊接电流可以获得良好的焊缝表面成型。ZHANGfulong^[9]等人研究发现光丝间距为 3.5mm 时焊接稳定性最好。BakirN^[10]等人采用 16kW 激光器研究发现减小焊接速度能够减少激光-电弧复合焊接接头根部裂纹。

目前国内对激光-MAG 复合焊接工艺探究大多只止步于万瓦级以内, 对万瓦级以上的鲜有研究。因此开展高功率万瓦级激光-MAG 复合焊接的工艺参数探究对获得高效率、高质量的焊接接头有着重要意义。

1 试验材料和方法

试验材料为 25mm 厚的 Q355C 高强钢, 尺寸为 200mm×140mm×25mm, 其供货状态为热轧。焊丝采用的是 THQ50-6 焊丝, 直径为 1.2mm。母材及焊丝的化学成分见表 1。本文碳当量算法采用美国焊接学会 (AWS) 标准, 标准适用于碳钢和低合金钢, 算法如式 1-1 所示。经计算, 母材的碳当量为 0.489%, 低于标准 0.52%, 说明 Q355C 高强钢的可焊性较好, 焊前不需要热处理。Q355C 高强钢的显微组织如图 1 所示。

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} \quad (1-1)$$

表 1 Q355 高强钢和 THQ50-6 焊丝的化学成分(质量分数, %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Fe
Q355C	0.176	0.33	1.42	0.019	0.004	0.10	0.31	余量
THQ50-6	0.08	0.40	1.39	0.014	0.013	0.11	0.15	余量

试验采用 Tru Disk 32001 型碟片式激光器, 其最大输出功率为 32 kW, 激光器的激光波长为 1030nm, 光纤最小直径为 200 μm, 功率稳定性 $\leq 1\%$。焊机电源采用福尼斯 TPS5000 型全数字化 MIG 焊机。

焊前使用砂轮机将试板表面打磨平整, 并用丙酮试剂擦去待焊表面的污渍, 试验采用 82%Ar 和 12%CO₂ 的混合气体作为保护气体, 气体流量为 18L·min⁻¹, 铜环中通入 99.99%的 Ar 保护熔池, 气体流量为 10 L·min⁻¹。激光束垂直作用在试板上, 焊枪与工件表面夹角为 60°, 采用激光在前, 电弧在后的旁轴复合方式, 焊接试验设备如图 1 所示。焊后使用线切割技术进行取样, 研磨、抛光后用 4% 的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀。

通过采用激光-MAG 复合焊接方法在 Q355C 高强钢上进行平板堆焊试验, 研究不同焊接工艺参数 (激光功率、焊接速度、送丝速度、光丝间距、离焦量、热源顺序) 对焊缝表面成型的影响规律, 并确定优化工艺, 得到大于 20mm 厚熔深且无缺陷的焊缝, 试验参数如表 2 所示。

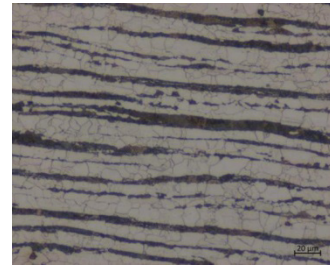


图 1 Q355C 高强钢的显微组织



图 2 焊接试验设备

2 试验结果和分析

2.1 光丝间距对焊缝成型的影响

在激光-MAG 复合焊接过程中, 焊丝顶端到激光光斑中心的距离称为光丝间距, 影响着激光与电弧两种热源的耦合程度, 决定着激光-MAG 复合焊接过程的稳定性。采用表 2 中 1-5 组参数进行试验, 研究不同光丝间距对激光-MAG 复合焊接焊缝熔深和熔宽的影响, 结果如图 3 所示。从 1-5 组的试验结果可以看出, 当光丝间距为 1mm 时, 焊缝的熔

深仅为 17.26mm, 在光丝间距为 3mm 时, 焊缝熔深达到最大值 19.28mm, 当光丝间距为 5mm 时, 焊缝熔深为 17.70mm; 试验过程中发现光丝间距大于 4mm 时, 激光与电弧两种热源相距太远, 焊接过程中飞溅较大, 焊缝表面成型效果变差, 当光丝间距为 1-3mm 时, 焊接过程稳定, 飞溅较小.分析

认为, 随着光丝间距的增加, 焊缝熔深先增大后减小, 当光丝间距为 3mm 时, 为最佳匹配距离, 焊缝为标准的高脚杯形, 激光与电弧两种热源共同作用于同一个熔池中, 耦合效果最佳, 焊缝成型最稳定且获得最大熔深, 可以最大发挥激光与电弧两种热源的优点, 获得高质量的焊缝。

表 2 试验参数

编号	激光功率 P/kW	焊接速度 v/(m·min ⁻¹)	送丝速度 v _f /(m·min ⁻¹)	光丝间距 D _{LA} /mm	离焦量 f _d /mm
1	22	0.9	11.5	1	-5
2	22	0.9	11.5	2	-5
3	22	0.9	11.5	3	-5
4	22	0.9	11.5	4	-5
5	22	0.9	11.5	5	-5
6	22	0.9	10.0	3	-5
7	22	0.9	10.5	3	-5
8	22	0.9	11.0	3	-5
9	22	0.9	11.5	3	-5
10	22	0.9	12.0	3	-5
11	22	0.9	11.5	3	-20
12	22	0.9	11.5	3	-15
13	22	0.9	11.5	3	-10
14	22	0.9	11.5	3	-5
15	22	0.9	11.5	3	0
16	20	0.9	11.5	3	-10
17	21	0.9	11.5	3	-10
18	22	0.9	11.5	3	-10
19	23	0.9	11.5	3	-10
20	24	0.9	11.5	3	-10
21	23	0.8	11.5	3	-10
22	23	0.9	11.5	3	-10
23	23	1.0	11.5	3	-10
24	23	1.1	11.5	3	-10
25	23	1.2	11.5	3	-10

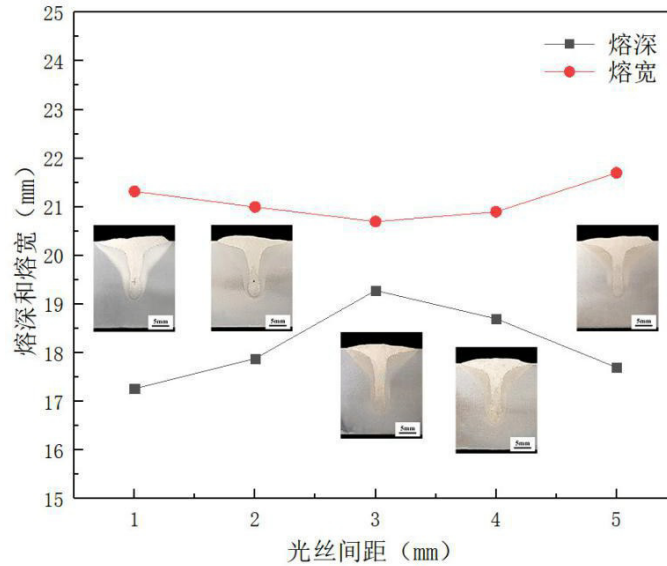


图3 光丝间距对焊缝熔深和熔宽的影响

2.2 送丝速度对焊缝成型的影响

试验的福尼斯 MAG 焊机为一元化调节模式, 焊接电流和焊接电压会随着送丝速度的增加呈线性增加, 因此送丝速度的大小决定着电弧功率。送丝速度的大小不仅对焊缝表面成型起着绝对性的作用, 而且在激光-MAG 复合焊接过程中对激光与电弧耦合作用有着很大的影响。采用表 2 中 6-10 组参数进行试验, 研究不同送丝速度对激光-MAG 复合焊接焊缝熔深和熔宽的影响, 结果如图 4 所示。当送丝速度为 10.0m/min 时, 熔深为 17.00mm, 由于送丝速度较低, 电弧能量较小, 激光与电弧两种热源耦合效果较差, 焊接过程中产生飞溅, 焊缝上表面出现气孔缺陷, 当送丝速度增加至 11.5m/min 时, 焊缝熔深为 19.28mm, 此时焊接过程稳定, 焊缝成型均匀; 当送丝速度为 12.0m/min 时, 焊接过程出现飞溅现象, 焊缝横截面出现气孔缺陷。可以看出, 增大送丝速度, 即增大了焊接电流和焊接电压, 故焊缝熔宽也会随之增大, 同时增大送丝速度能够增加电弧压力, 使熔池中液态金属更多的向下流动至焊缝底部, 焊缝熔深也随之增大。

2.3 离焦量对焊缝成型的影响

离焦量是指激光束焦点位置与焊接工件表面之间的相对位置, 改变离焦量的实质是改变激光辐照在工件表面的功率密度。激光束焦点位置在工件表面以上为正离焦, 在工件表面以下为负离焦。在中厚板的焊接中, 通常选择负离焦量, 因为激光束入

射到焊接工件内部的能量更集中, 以获得更大的熔深。采用表 2 中 11-15 组参数进行试验, 研究不同离焦量对激光-MAG 复合焊接焊缝熔深和熔宽的影响, 结果如图 5 所示。可以看出, 离焦量为 0mm 时, 焊缝熔深仅为 18.26mm, 当离焦量为 -10mm 时, 焊缝熔深为 19.58mm, 焊缝成型较好, 无缺陷产生, 当离焦量为 -15mm 和 -20mm 时, 虽然焊缝熔深达到 20.38 和 21.36mm, 但焊接过程有飞溅产生, 焊缝横截面出现气孔缺陷。分析认为, 离焦量主要对焊缝熔深起绝对性作用, 负离焦量的增大, 会使焊缝熔深增加, 对焊缝熔宽影响不大。

2.4 激光功率对焊缝成型的影响

在激光-MAG 复合焊接中, 激光功率的大小对焊缝熔深起着决定性的作用。采用表 2 中 16-20 组参数进行试验, 研究不同激光功率对激光-MAG 复合焊接焊缝熔深和熔宽的影响, 结果如图 6 所示。可以看出, 激光功率为 20kW 时, 焊缝熔深仅为 17.7mm, 随着激光功率的增加, 激光的功率密度也在增加, 金属蒸汽的反冲的压力也不断增大, 小孔效应越显著, 使得焊缝的熔深不断增加, 当激光功率为 23kW 时, 焊缝熔深达到 21.2mm, 此时激光与电弧两种热源能量匹配较好, 焊缝无气孔等缺陷; 当激光功率增大到 24kW 时, 焊缝熔深达到 22.14mm, 但焊缝出现气孔缺陷。激光功率决定焊缝的熔深, 激光功率越大, 焊缝熔深越大, 激光功率对焊缝的熔宽影响较小。

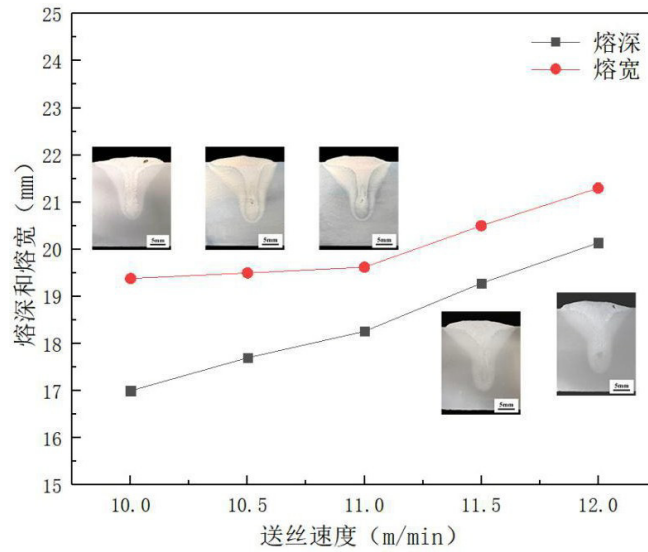


图 4 送丝速度对焊缝熔深和熔宽的影响

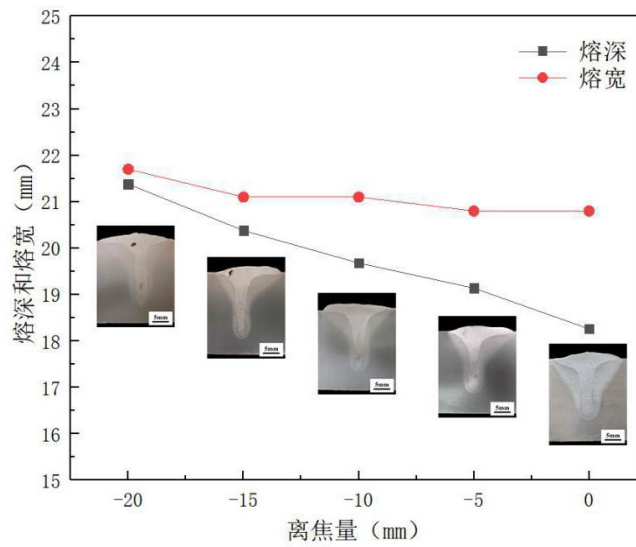


图 5 离焦量对焊缝熔深和熔宽的影响

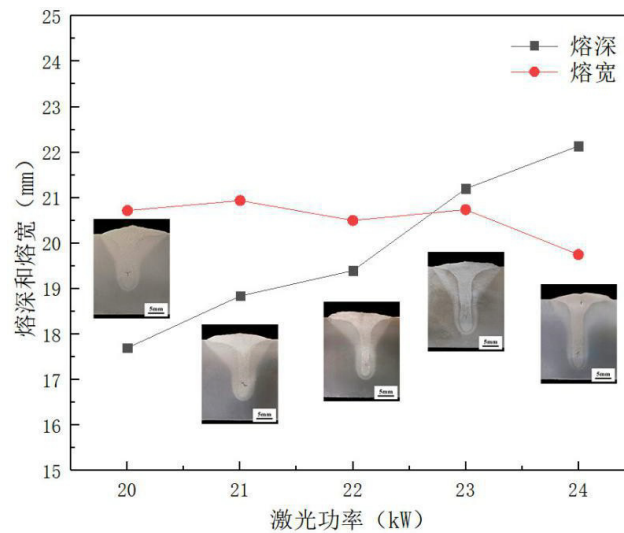


图 6 激光功率对焊缝熔深和熔宽的影响

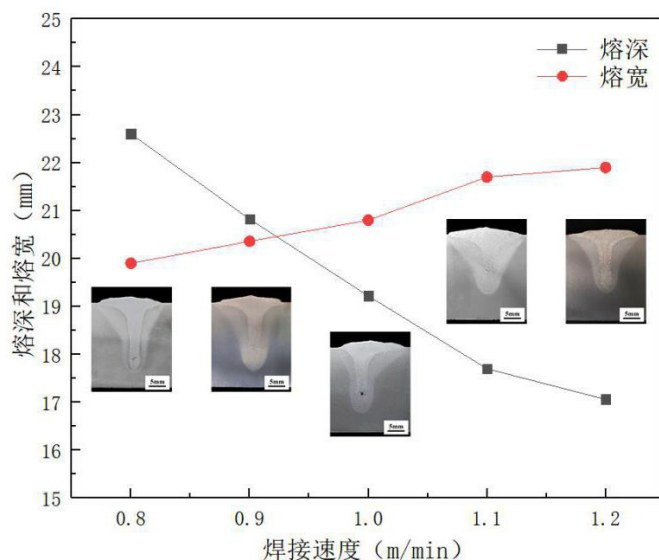


图7 焊接速度对焊缝熔深和熔宽的影响

2.5 焊接速度对焊缝成型的影响

焊接速度的快慢不仅影响着焊接效率,也决定着焊缝成型的质量.采用表2中21-25组参数进行试验,研究不同焊接速度对激光-MAG复合焊接焊缝熔深和熔宽的影响,结果如图7所示.当焊接速度为0.8m/min时,焊接线能量较大,激光和电弧两种热源对一定长度的焊缝熔池作用时间长,熔深达到22.6mm,但焊接过程中有飞溅产生,焊缝底部有裂纹产生;当焊接速度为0.9m/min时,焊接过程较稳定,焊缝成型无缺陷,熔深达到20.82mm;当焊接速度为1.2m/min时,焊接速度过快,此时单位时间内对单位长度焊缝的热输入过低,焊缝的熔深仅为17.06mm.可以看出,焊接速度的增加会导致单位时间内激光和电弧两种热源的热输入量的降低,焊缝熔深也随之减小,焊缝熔宽随之增大。

3 结论

(1)万瓦级激光-MAG复合焊接对工艺参数的变化极其敏感,激光与电弧两种热源能量匹配良好时,即在优化的工艺参数下,焊缝可获得较深的熔深且无缺陷。

(2)光丝间距在3mm时,激光与电弧两种热源耦合效果较好,焊接过程稳定,焊缝成型较好。

(3)送丝速度的增大会使焊缝熔深和熔宽都增加;负离焦量的增大有利于提高焊缝的熔深能力;随着激光功率的增大,焊缝熔深也增大;焊接速度的增加会使焊缝熔深减小,焊缝熔宽增加。

24.5mm厚Q355C高强钢激光-MAG复合焊接优化的工艺参数如下:光丝间距3mm,送丝速度11.5m/min,离焦量-10mm,激光功率23kW,焊接速度0.9m/min,此时,焊缝成型良好,焊缝的熔深可达到20.82mm。

参考文献

- [1] Steen W M, Eboo M. ARCAUGMENTEDLASER WELDING [J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-333, 335.
- [2] 肖荣诗,吴世凯.激光-电弧复合焊接的研究进展[J].中国激光,2008(11):1680-1685.
- [3] AJZ, BTTZ, CHLT, et al. Hybrid Laser-arc welding in aerospace engineering[J]. Welding and Joining of Aerospace Materials (Second Edition), 2021: 123-156.
- [4] Kristiansen M, Farrokhi F, Kristiansen E, et al. Application of Hybrid Laserarc Welding for the Joining of Large Offshore Steel Foundations[J]. Physics Procedia, 2017, 89:197-204.
- [5] 宋新华,金湘中,陈胜迁,袁江,张明军.激光-电弧复合焊接及应用于车身制造的进展[J].激光技术, 2015, 39(02): 259-265.
- [6] 鲍亮亮,王勇,韩涛,等.海洋平台焊接技术及发展趋势[J].焊接, 2019, 000(001):21-30,后插2.

- [7] 罗子艺, 韩善果, 陈永城, 等. 工艺参数对激光-电弧复合焊缝成形及拉伸性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2146-2150.
- [8] 蒋宝, 雷振, 黄瑞生, 等. 万瓦级光纤激光-MAG 复合焊接焊缝成形[J]. 焊接, 2020(06):5-11+32+61.
- [9] Fulong Z, Hong Z, Fengde L, et al. Effect of Laser-arc Hybrid Welding Energy Parameterson Welding Stability[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 175.
- [10] Bakir N , Ömer Üstündag, Gumenyuk A, et al. Experimental and numerical study on the influence of the laser hybrid parameters in partial penetration welding on the solidification cracking in the weld root[J]. Welding in the World (2020)64:501-51

收稿日期: 2021 年 9 月 19 日

出刊日期: 2021 年 12 月 31 日

引用本文: 王志鹏, 尹燕, 南雪丽, 柴旭天, 董开基, 张瑞华, Q355C 高强钢激光-MAG 复合焊接工艺参数对焊缝成型的影响[J]. 物理科学与技术研究, 2021, 1(1): 23-29.

DOI: 10.12208/j.pstr.20210007

检索信息: RCCSE 权威核心学术期刊数据库、中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

版权声明: ©2021 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS