大角度激光填丝双面焊碳钢车体T形接头工艺及性能研究

郭丽娟[1] 田 慧[1] 李 洋[1] 邓江勇[2]
(1.中车唐山机车车辆有限公司,河北 唐山 063035; 2.广西防城港核电有限公司,广西 防城港 538000)

摘要 针对2.5 mm+3 mm的碳钢材料T形接头的激光填丝焊,采用ER50-G焊丝作为填充金属,对激光功率、光斑位置、离焦量、焊接速度和送丝速度等参数对焊缝成形的影响进行工艺试验,并对焊接接头的金相组织和硬度进行分析。结果表明:获得了优化的工艺参数,采用该参数焊接的接头成型良好,且硬化、软化倾向不明显;要保证该T形接头焊透,除需要保证一定熔深外,还需要有一定的熔宽;激光功率、光斑尺寸及光斑位置对焊缝质量影响较大。试验结果为激光填丝焊工艺的车体结构工程化应用提供技术支持。

关键词: 激光填丝焊 T形接头 大角度 碳钢
中图分类号: TG456.7

0 序 言

国内外高铁和动车组车体多采用铝合金型材制造,铝合金车体在轻量化方面优势最明显,但其生产成本远远高于碳钢车体,且不易维护,寿命周期、成本也比碳钢和不锈钢车体高很多[1]。目前,欧洲在设计时速较低的动车组拟采用碳钢材料生产制造,采用碳钢材料制造的车体较铝合金型材的可修复性好,可以节约成本,提高车辆的使用寿命。

焊接是轨道交通车体制造的关键工艺。对于车辆运行时高速、动载服役的特点,生产上往往要求焊接变形小、效率高和接头质量优良。与常规的熔焊方法相比,激光填丝焊具有热输入低、焊接变形小,接头质量优良、生产效率高、易于实现自动化焊接等优点[2-5],因此更加适合于长焊缝、要求变形小的车体结构的焊接生产。试验基于碳钢车体及轨道交通关键结构件的激光填丝焊工艺,针对厚度为2.5 mm和3 mm的碳钢材料的T形接头,开展大角度激光填丝焊接工艺及性能研究,为碳钢车体及相关结构件的激光焊接生产提供技术支撑。

1 试验材料及设备

1.1 母材及焊接材料检验

试验所用母材为2.5 mm厚的05CuPCrNi和3 mm厚的09CuPCrNi-A,焊材为ϕ1.0 mm的ER50-G。表1~2为母材和焊丝的化学成分及力学性能的试验结果。

表1 母材和焊丝的化学成分

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
标准	0.120	0.25~0.75	0.20~0.50	0.020 0	0.06~0.12	0.30~1.25	0.12~0.65	0.25~0.50
05CuPCrNi	0.061	0.45	0.47	0.004 0	0.068 0	0.40	0.12	0.26
标准	0.120	0.25~0.75	0.20~0.50	0.020 0	0.06~0.12	0.30~1.25	0.12~0.65	0.25~0.50
09CuPCrNi~A	0.080	0.45	0.40	0.006 6	0.068 0	0.47	0.12	0.26
标准	0.100	0.60	0.90~1.30	0.020 0	0.025 0	0.30~0.90	0.20~0.60	0.20~0.50
ER50~G	0.075	0.47	1.27	0.004 8	0.008 1	0.39	0.32	0.29

1.2 焊接设备

试验采用激光填丝焊,激光为6 kW光纤激光器,

收稿日期: 2017-10-17

光纤芯径为 0.6 mm，焦距 223 mm。送丝机为数字化 TIG 焊设备中的送丝机构。

表 2 母材性能

材料	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A(%)
05CuPCrNi	331	462	36
09CuPCrNi-A	387	551	33

1.3 焊接接头形式

工艺试验针对 3 mm 厚 09CuPCrNi-A 钢+2.5 mm 厚 05CuPCrNi 钢的 T 形接头，采用激光填丝双面两道焊接，要求焊透，而不能焊穿底板，并且控制变形。接头形式如图 1 所示。焊接时，焊丝在前，激光在后，激光、焊丝和焊接方向在一个面上，并与底板夹角为 35°，激光垂直于焊缝，焊丝与焊缝成 20°夹角。

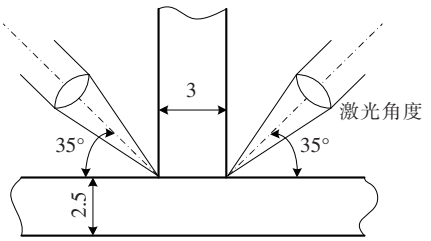


图 1 坡口形式

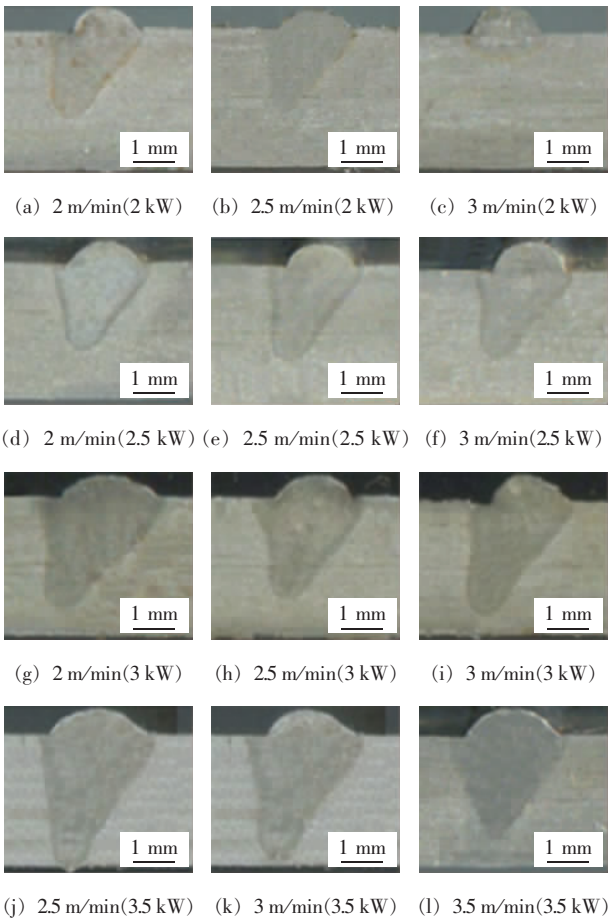
2 焊接工艺试验

2.1 表面堆焊试验

试验在横焊位置对 3 mm 厚的 09CuPCrNi-A 试板进行堆焊，考察不同工艺参数下获得的接头焊缝的熔深和熔宽。表 3 为试验参数。图 2 和图 3 为堆焊试验焊缝横截面照片。图 4 和图 5 为熔深、熔宽结果分析。从结果来看，一定焊接速度下，随着激光功率的增加，熔深、熔宽均呈上升的趋势。并且随着送丝速度增加，熔深呈下降趋势，而熔宽变化不明显。由于立板厚 3 mm，采用双面两道焊接工艺焊接，为保证焊透，每面焊道至少需要 1.5 mm 的熔深；由于激光与底板夹角为 30°，要保证在 T 形接头完全焊透，还需保证一定的熔宽，假设焊缝是等宽的，那么焊缝的熔宽不应低于 1.1 mm。要保证焊透，当焊接速度为 3.0 m/min，激光功率为 2.5~3.5 kW 之间；当焊接速度为 3.5 m/min，激光功率为 3.0~3.5 kW 之间；当焊接速度为 2.5 m/min，激光功率为 2.5~3.0 kW 之间。在一定速度下，激光功率太大，会导致焊接变形大，同时导致过多的激光能量将损耗在底板的熔化上，这些对该结构的焊接都是不利的；而激光功率小或焊接速度快，焊缝的熔宽过小，导致在立板上的有效熔深不够，容易形成未焊透缺陷。因此，焊接速度控制在 2.5~3.5 m/min 为宜，同时匹配激光功率 3.5~4.0 kW，送丝速度 2.5~3.5 m/min。

表 3 焊接参数

激光功率 P/kW	离焦量 L/mm	焊接速度 v_1/(m·min^{-1})	送丝速度 v_2/(m·min^{-1})
3.5~4.0	+6	2.5~3.5	2.5~3.5

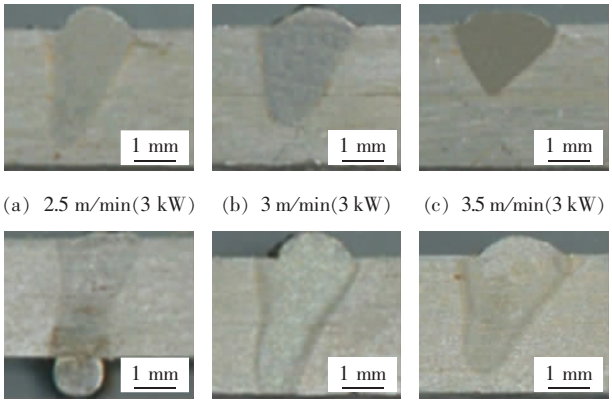


(a) 2 m/min(2 kW) (b) 2.5 m/min(2 kW) (c) 3 m/min(2 kW)
(d) 2 m/min(2.5 kW) (e) 2.5 m/min(2.5 kW) (f) 3 m/min(2.5 kW)
(g) 2 m/min(3 kW) (h) 2.5 m/min(3 kW) (i) 3 m/min(3 kW)
(j) 2.5 m/min(3.5 kW) (k) 3 m/min(3.5 kW) (l) 3.5 m/min(3.5 kW)

图 2 不同焊接速度下的焊缝成形

2.2 光斑位置试验

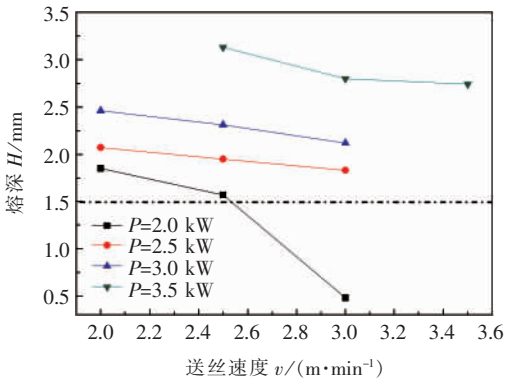
光斑在立板上的位置对焊缝表面成形有影响。试验对光斑全部位于立板、3/4 光斑位于立板和 1/2 光斑位于立板三个位置进行焊接试验，考察焊缝表面成形质量。图 6 为试验结果，从图中可以看出，当光斑全部位于立板时，焊缝下表面出现咬边和熔合不良等缺陷，在 3/4 光斑位于立板和 1/2 光斑位于立板之间，焊缝



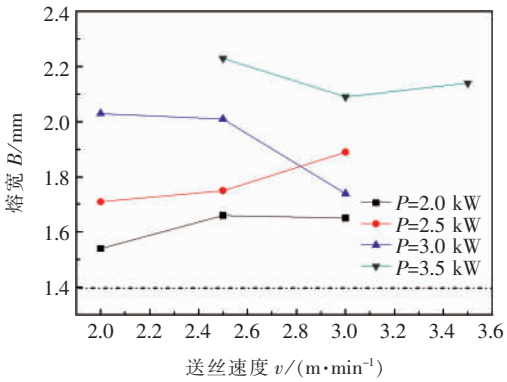
(a) 2.5 m/min(3 kW) (b) 3 m/min(3 kW) (c) 3.5 m/min(3 kW)

(d) 2.5 m/min(3.5 kW) (e) 3 m/min(3.5 kW) (f) 3.5 m/min(3.5 kW)

图 3 送丝速度对焊缝成形的影响



(a) 对熔深的影响



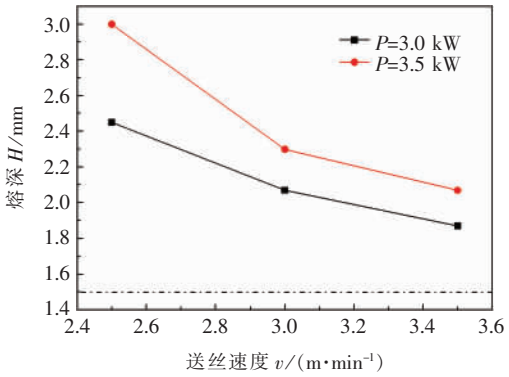
(b) 对熔宽的影响

图 4 激光功率、送丝速度对焊缝成形的影响(3.0 m/min)

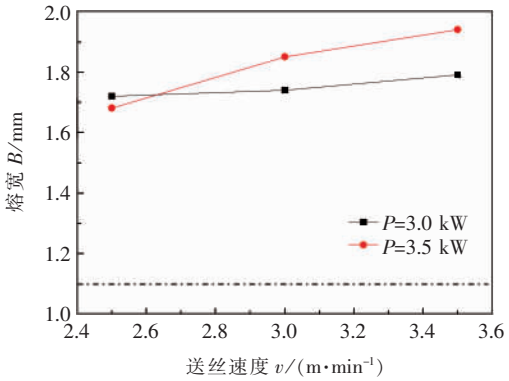
成形良好,试验光斑位置选在该范围内。可以看出光斑位置对焊缝表面成形,特别是焊缝两侧的熔合有很大的影响。

2.3 离焦量试验

激光焊接中,离焦量对焊接质量的影响很大,特别在激光填丝焊接中对焊缝成形影响较大。采用+2 mm,+4 mm 和+6 mm 三个离焦量进行工艺试验。图7为不同离焦量下焊缝横截面的照片,从照片来看,离

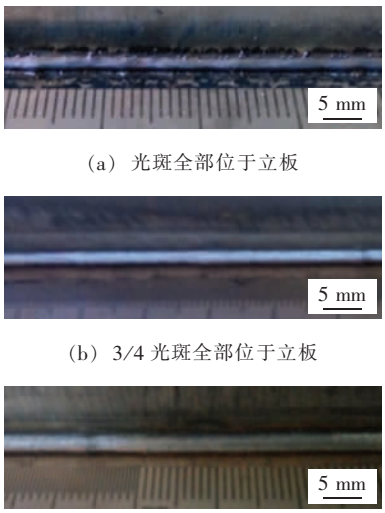


(a) 对熔深的影响



(b) 对熔宽的影响

图 5 激光功率、送丝速度对焊缝成形的影响(3.5 m/min)



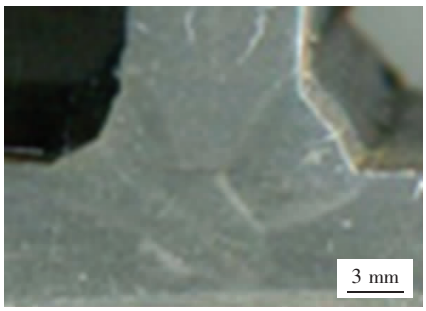
(a) 光斑全部位于立板

(b) 3/4 光斑全部位于立板

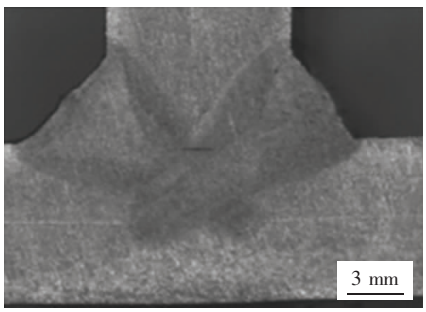
(c) 1/2 光斑全部位于立板

图 6 光斑位置对焊缝表面的影响

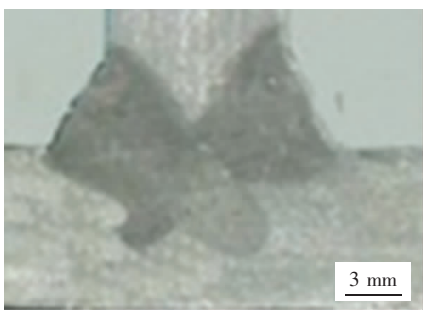
焦量为+2 mm 和+4 mm,由于离焦量较小,导致焊缝熔宽过小,因此在立板上的有效熔深不够,使得焊缝中心出现未熔合缺陷。离焦量越小,未熔合的区域越大。当离焦量达到+6 mm 时,两侧焊缝能实现良好的熔合。



(a) 离焦量:+2 mm



(b) 离焦量:+4 mm



(c) 离焦量:+6 mm

图 7 离焦量试验焊缝断面

2.4 优化工艺参数

通过工艺试验得到优化的工艺参数,见表 4。图 8 为优化的工艺焊接试板照片,可以看出,焊缝表面光滑、平直,成形美观。图 9 为 X 射线照片,照片没有气孔等缺陷,结果表明焊缝良好的成形质量和内部质量。

表 4 优化的焊接参数

激光功率 P/kW	焊接速度 v_1/(m·min^{-1})	送丝速度 v_2/(m·min^{-1})	离焦量 L/mm
3.5~4.0	3.0~3.5	4.5	+6

(a) 焊缝正面

(b) 焊缝背面

图 8 焊接试板照片

图 9 焊接试板 X 射线照片

3 焊接接头的组织及性能

3.1 金相试验结果

图 10 为焊接接头的宏观形貌。由图 10 可知,未发现裂纹、夹渣、气孔、未焊透、未熔合等焊接缺陷。接头各区金相组织如图11所示。焊缝区为贝氏体+马

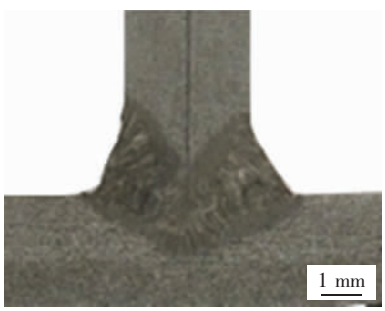
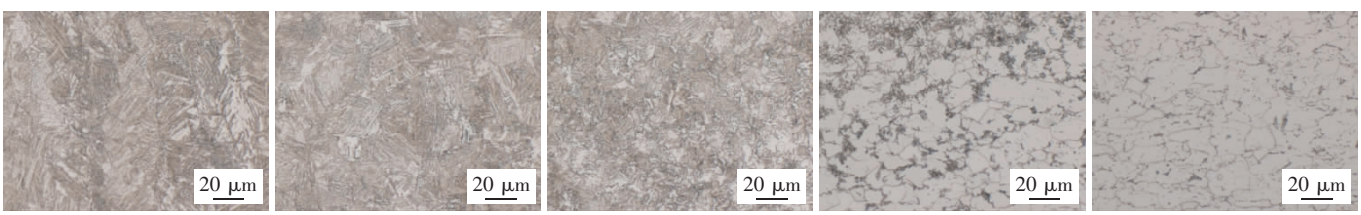


图 10 焊接接头宏观金相



(a) 焊缝区金相组织 (b) 过热区金相组织 (c) 正火区金相组织 (d) 不完全正火区金相组织 (e) 母材金相组织

图 11 接头各区域金相组织

氏体,呈典型的柱状晶特征。过热区为贝氏体,呈等轴晶;正火区为贝氏体+少量铁素体,呈细等轴晶;不完全正火区为铁素体和贝氏体,同时在晶间弥散分布有大量碳化物相。

3.2 硬度试验结果

硬度试验用于考核焊接接头的硬化、软化情况。试验采用维氏显微硬度试验进行测试,试验结果如图12所示。从图中可看出,焊缝、热影响区的硬度值均略高于母材的硬度值,这与所选择的焊丝强度较母材偏高有关;同时热影响区没有明显的硬化、软化倾向。

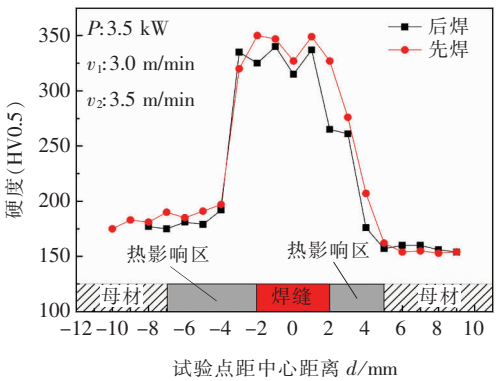


图12 硬度值曲线

4 结 论

(1) 获得了优化的工艺参数,采用该参数焊接的接头熔合良好,无气孔等缺陷。

(2) 若要保证该T形接头焊透,除了需要保证一定熔深外,还需要焊缝有一定的熔宽。

(3) 该T形接头工艺参数中,光斑在立板上的位置对焊缝表面成形有影响很大,激光功率和光斑大小对焊缝成形影响次之,焊接速度影响较小。

(4) 焊缝、热影响区的硬度值均略高于母材的硬度值,影响区硬化、软化倾向不明显,这与所选择的焊料有关,同时说明该工艺下接头质量优良。

参 考 文 献

[1] 杜彦品. 基于铁路客车碳钢车体的轻量化提升与应用[D]. 成都: 西南交通大学硕士学位论文, 2014.

[2] 王家淳. 5A06铝合金激光填丝焊工艺研究[J]. 焊接, 2008(8): 26-28.

[3] Huntington C A, Engar T W. Laser welding of aluminum and aluminum alloys [J]. Welding Journal, 1990, 80(4): 105-107.

[4] 王家淳. 激光焊接技术的发展与展望[J]. 激光技术, 2001, 25(1): 51-55.

[5] 左铁钏,肖荣诗,陈 铠, 等. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

作者简介: 郭丽娟,1982年出生,学士,高级工程师。主要从事轨道车体焊接工艺研究。

《CHINA WELDING》征稿启事

《CHINA WELDING(中国焊接)》(ISSN 1004-5341,CN23—1332/TG)1992年创刊,是由中国机械工业联合会主管,中国焊接协会、中国机械工程学会焊接分会、机械科学研究院哈尔滨焊接研究所主办的国内外公开发行的英文版学术期刊。作为中国焊接界唯一的英文版学术期刊,《CHINA WELDING(中国焊接)》已成为国际焊接界跟踪和了解中国焊接技术最新进步与发展的重要窗口,为宣传我国优秀的焊接技术成果,引进和吸收先进的国际焊接技术发挥着不可替代的作用。先后被国内外知名的检索机构包括CA,AJ,CSA,JST,Scopus收录。欢迎广大焊接及相关专业学者踊跃投稿。

《CHINA WELDING(中国焊接)》主要刊载焊接各专业学科领域及与焊接有密切关系领域最新理论研究和实际应用方面的高水平论文,涉及的内容包括:焊接基础理论、焊接材料、焊接工艺、焊接设备、检测及控制、切割与喷涂等焊接新理论、新技术、新方法方面具有一定学术价值和应用价值的科研成果。

投稿须知

1. 国内作者可通过网站 http://magazines.hwi.com.cn 投稿,首次投稿的作者需要注册之后登录投稿,根据相关提示进行操作,首次投稿时所填作者信息尽可能详细、准确。完成投稿获得稿件编号后,可实时在线跟踪查询稿件状态。
2. 国外作者可通过 E-mail: chinawelding2016@163.com 投稿。
3. 来稿是否刊登,经审查予以答复(2个月内)。未通过审查而不能刊登的稿件,作者可自行处理。
4. 论文发表周期(自收到稿件到见刊)不超过8个月。

网 址:http://magazines.hwi.com.cn 电 话:0451-84091132
传 真:0451-86325919 E-mail:chinawelding2016@163.com
通信地址:哈尔滨市松北区创新路2077号哈尔滨焊接研究所716室 中国焊接编辑部
邮 编:150028