

HRB400 钢筋电阻对焊接头焊接参数 对其性能的影响及优化

陈士忠¹, 苏伟¹, 刘子金^{1,2}, 侯爱山²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国建筑科学研究院有限公司
建筑机械化研究分院, 河北 廊坊 065000)

摘要 目的 探讨焊接工艺参数对焊接接头力学性能和金相组织的影响, 以优化 HRB400 钢筋电阻对焊的工艺参数。方法 对直径 10 mm 的钢筋开展不同焊接工艺参数下形成的电阻对焊接头性能试验分析, 并对各参数下焊接接头熔合区和过热区的金相组织进行对比分析。结果 优选出了最佳焊接参数: 焊接时间 0.8 ~ 0.9 s、焊接相对电流 65% ~ 68%、顶锻压力 0.2 ~ 0.3 MPa; 随着焊接相对电流的增加, 晶粒尺寸逐渐增大, 铁素体逐渐增多, 魏氏组织含量呈上升趋势; 顶锻压力的变化对焊接接头显微组织类别基本没有影响, 但熔合区内魏氏组织和铁素体含量有所减少, 组织逐渐细化, 过热区组织有细化的趋势; 随着焊接时间的增加, 晶粒尺寸增大且逐渐不均匀, 使得接头韧性下降。结论 综合考虑各焊接工艺参数对接头组织及性能的影响, 建议选用的焊接相对电流为 65% 和 66% 两种、顶锻压力为 0.3 MPa、焊接时间为 0.8 s。

关键词 封闭箍筋; 电阻对焊接头; 焊接参数; 性能试验; 金相组织

中图分类号 TU69; TG453⁺.9 文献标志码 A

Influence and Optimization of HRB400 Steel Upset Butt Welding Parameters on the Properties of Welded Joints

CHEN Shizhong¹, SU Wei¹, LIU Zijin^{1,2}, HOU Aishan²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Institute of Building Mechanization, China Academy of Building Research, Langfang, China, 065000)

Abstract: In order to optimize the process parameters of HRB400 steel upset butt welding, and discuss the influence of the welding process parameters on the mechanical properties and

收稿日期: 2019-06-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0704002)

作者简介: 陈士忠(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事质子交换膜燃料电池技术和建筑机械技术方面研究。

microstructure of welded joints. The performance test analysis of upset butt welding joints formed by different welding process parameters was carried out for steel bars with a diameter of 10mm, and the metallographic structure of the welding joint in the fusion zone and the superheated zone under various parameters was compared and analyzed. the optimal welding parameters were selected as 0.8 ~ 0.9 s welding time, 65% ~ 68% welding relative current, and 0.2 ~ 0.3 mpa forging pressure. With the increase of welding relative current, the grain size increases gradually, ferrite increases gradually, and the widmanstatten structure content increases. The change of the forging pressure has no effect on the microstructure of the welded joint, but the content of widmanstatten structure and ferrite in the fusion zone decreases, and the microstructure is gradually refined, and the microstructure in the superheated zone tended to be refined. With the increase of welding time, the grain size increases and becomes uneven, which leads to the decrease of joint toughness. Considering the influence of welding process parameters on the joint structure and performance, it is suggested that the welding relative current should be 65% or 66%, the forging pressure should be 0.3 MPa and the welding time should be 0.8 s.

Key words: closed stirrups; upset butt welding joint; welding parameter; properties tests; metallographic structure

“十三五”国家课题中明确提出“建筑工业化和绿色建筑的可持续发展”^[1], 封闭箍筋焊接成型系统是混凝土预制构件制造过程中的一个重要组成部分。相对于传统箍筋, 焊接封闭箍筋具有节约成本、安装方便、施工效率高和浇筑质量可靠等明显优势^[2-5]。在这一背景下, 中国建筑科学研究院建筑机械化研究分院和廊坊凯博建设机械科技有限公司共同研发了一种封闭箍筋自动焊接生产线, 集放线、矫直、切断、弯曲、定位加持、焊接为一体, 全部实现自动化^[6-10]。但是, 在封闭箍筋焊接过程中, 常常会因为焊接工艺参数设置的不合理而导致焊接接头出现未焊透、裂纹、脆性断裂等缺陷。因此, 分析研究封闭箍筋焊接接头焊接参数对其力学性能和金相组织的影响显得尤为重要。

基于此, 笔者利用封闭箍筋自动焊接生产线进行封闭箍筋的制作, 并对不同焊接参数条件下的焊接接头进行拉伸试验, 得到焊接参数的优化范围; 再对各参数下焊接接头的熔合区及过热区的金相组织进行对比分析, 得出焊接相对电流、顶锻压力和焊接时间对电阻对焊接头组织性能的影响, 并选出接头组织性能较好的焊接工艺参数, 为实际生

产过程提供参考与帮助。

1 焊接工艺参数的优化

1.1 试验材料及设备

试验采用国内某厂生产的直径 10mm 的 HRB400 钢筋, 采用封闭箍筋自动焊接生产线进行箍筋的焊接, 其采用的是电阻对焊方式, 焊接工艺参数主要包括焊接电流、焊接时间、顶锻压力等, 其中焊接电流是以额定电流百分比的形式呈现, 即焊接相对电流。箍筋焊接完成后截取焊接接头, 并在液压式万能试验机上对焊接接头进行拉伸试验。

1.2 试验内容

试验前期进行了大量的封闭箍筋焊接调试试验, 并且根据焊接经验对焊接接头的宏观形貌及焊接质量进行初步检查, 粗略得出直径 10 mm 的 HRB400 钢筋的焊接工艺参数范围: 焊接时间 $T = 0.8 \sim 0.9$ s, 顶锻压力 $P = 0.2 \sim 0.3$ MPa, 焊接相对电流 $I = 60\% \sim 74\%$ 。为了合理地制定封闭箍筋的焊接参数及实现数字化控制, 提高封闭箍筋焊接接头的质量, 需要对上述焊接参数范围进行优化。

(1) 固定顶锻压力 0.2 MPa 和焊接时间 0.8 s, 以试验前期粗略所得的焊接相对电流

有效范围的中值为基础,逐步调整焊接相对电流进行封闭箍筋焊接,每组焊接5件,箍筋尺寸为500 mm × 300 mm,成品箍筋如图1(a)所示,再按照图1(b)的形式截取400 mm的焊接接头,待焊点冷却后,按照《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T228.1—2010)对每组接头进行拉伸试验。记录好拉伸结果,并将断母材率达到100%且呈延性断裂的焊接接头判定为合格。焊接工艺参数匹配及拉伸试验结果如表1所示。当顶锻气压 $P=0.2$ MPa,焊接时间 $T=0.8$ s时,焊接相对电流 I 在66%~70%内的焊接接头都能实现断母材率100%,且呈延性断裂。

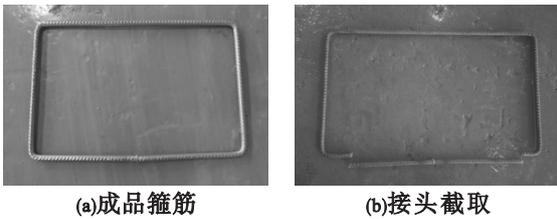


图1 成品箍筋及接头截取

Fig. 1 Closed stirrups and the joint cut

表1 $P=0.2$ MPa、0.8 s 条件下拉伸试验结果

Table 1 Tensile test results with $P=0.2$ MPa and $T=0.8$ s

顶锻压力 P/MPa	焊接时间 T/s	焊接相对 电流 $I/\%$	延性断母 材率/ $\%$
0.2	0.8	67	100
		65	80
		66	100
		69	100
		71	40
		70	100

(2)固定顶锻压力0.2 MPa和焊接时间0.9 s,对焊接相对电流 I 的有效范围进行优化。得到的焊接工艺参数匹配及拉伸试验结果如表2所示。当顶锻压力 $P=0.2$ MPa,焊接时间 $T=0.9$ s时,焊接相对电流 I 在65%~68%内的焊接接头都能实现断母材率

100%,且呈延性断裂。其中,当焊接相对电流 $I=69\%$ 时,焊接过程存在大量飞溅,焊接接头未焊透,所以无需进行拉伸试验。

表2 $P=0.2$ MPa、 $T=0.9$ s 条件下拉伸试验结果

Table 2 Tensile test results with $P=0.2$ MPa and $T=0.9$ s

P/MPa	T/s	$I/\%$	延性断母材率/ $\%$
0.2	0.9	67	100
		65	100
		63	60
		64	60
		69	未焊透
		68	100

(3)固定顶锻压力0.3 MPa和焊接时间0.8 s,对焊接相对电流 I 的有效范围进行优化。试验方法及过程均与上述内容相同,得到的焊接工艺参数匹配及拉伸试验结果如表3所示。当顶锻压力 $P=0.3$ MPa,焊接时间 $T=0.8$ s时,焊接相对电流 I 在65%~74%内的焊接接头都能实现断母材率100%,且呈延性断裂。其中,当焊接相对电流 $I=63\%$ 时,焊接接头未焊透,无需进行拉伸试验。

表3 $P=0.3$ MPa、 $T=0.8$ s 条件下拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results with $P=0.3$ MPa and $T=0.8$ s

P/MPa	T/s	$I/\%$	延性断母材率/ $\%$
0.3	0.8	67	100
		65	100
		63	未焊透
		64	60
		69	100
		71	100
		74	100

(4)固定顶锻压力0.3 MPa和焊接时间0.9 s,对焊接相对电流 I 的有效范围进行优化。得到的焊接工艺参数匹配及拉伸试验结果如表4所示。当顶锻压力 $P=0.3$ MPa,焊接时间 $T=0.9$ s时,焊接相对电流 I 在

63% ~ 70% 内的焊接接头都能实现断母材率 100%, 且呈延性断裂。

表 4 $P=0.3\text{ MPa}$ 、 $T=0.9\text{ s}$ 条件下拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results with $P=0.3\text{ MPa}$ and $T=0.9\text{ s}$

P/MPa	T/s	$I/\%$	延性断母材率/%
0.3	0.9	67	100
		65	100
		63	100
		69	100
		71	40
		70	100

1.3 试验验证及结果分析

综合上述 4 组试验结果可推断, 直径 10 mm 的 HRB400 钢筋进行封闭箍筋自动焊接时, 焊接工艺参数在顶锻压力 $P=0.2\sim 0.3\text{ MPa}$ 、焊接时间 $T=0.8\sim 0.9\text{ s}$ 、焊接相对电流 $I=65\%\sim 68\%$ 内任意匹配, 均能得到拉伸试验合格的焊接接头。

故选取 0.8 s、0.85 s 和 0.9 s 三种焊接时间, 0.2 MPa、0.25 MPa 和 0.3 MPa 三种顶锻压力, 65%、66%、67% 和 68% 四种焊接相对电流, 逐一匹配, 形成 36 组参数匹配方案, 每组焊接 5 件封闭箍筋并进行拉伸试验, 36 组验证试验的断母材率均为 100%, 且呈延性断裂, 故上述推断结论正确。

2 焊接参数对接头组织性能的影响

2.1 试验方法

根据上述试验所得的焊接工艺参数优化范围形成如表 5 所示的 10 组焊接工艺参数

匹配方案。

表 5 焊接工艺参数匹配方案

Table 5 Matching parameters scheme of welding process

序号	$I/\%$	P/MPa	T/s
1	65	0.3	0.9
2	66	0.3	0.9
3	67	0.3	0.9
4	68	0.3	0.9
5	66	0.2	0.9
6	66	0.25	0.9
7	66	0.3	0.9
8	66	0.3	0.8
9	66	0.3	0.85
10	66	0.3	0.9

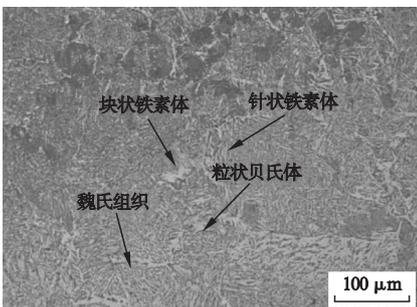
根据表 5 中焊接参数匹配方案, 利用封闭箍筋自动焊接生产线进行箍筋的焊接并按要求将接头制成金相试件, 使用 4% 的硝酸酒精溶液对试件进行腐蚀处理, 最后利用 OLYMPUS GX71 型倒置式金相显微镜分别对试件各区域的金相组织进行观察。

2.2 试验结果与分析

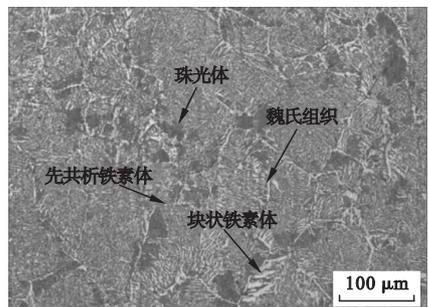
2.2.1 焊接相对电流的影响

图 2 为不同焊接相对电流条件下熔合区及过热区的显微组织。

随着焊接相对电流的增加, 晶粒尺寸逐渐增大, 魏氏组织逐渐增多, 铁素体逐渐增多, 基体珠光体逐渐减少。主要是因为电流越大, 热输入越大, 热循环温度越高, 结晶后奥氏体晶粒长大, 最终导致晶粒粗化^[11-16]。从显微组织特点角度分析可知, 出现魏氏组织越多的区域, 塑韧性就越低, 接头组织越脆, 越容易出现裂纹^[17-19]。所以, 在满足焊接接头力学性能的前提下, 推荐使用的焊接相对电流为 65% 和 66%。



(a) $I=65\%$ 熔合区



(b) $I=65\%$ 过热区

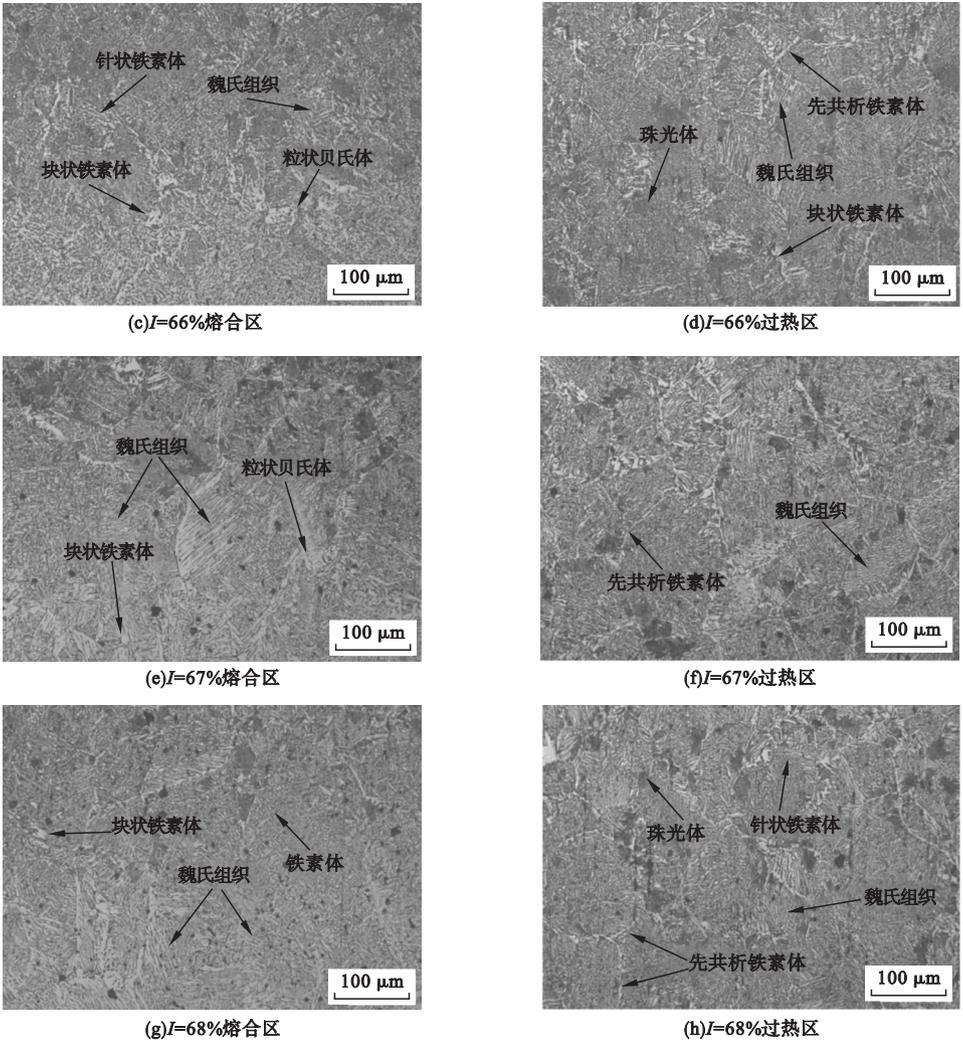


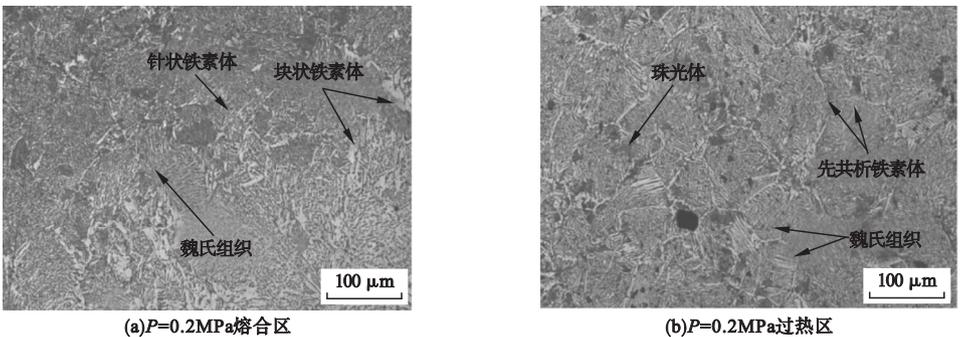
图2 不同焊接相对电流条件下焊接接头显微组织

Fig. 2 Microstructures of welded joints with different welding relative current conditions

2.2.2 顶锻压力的影响

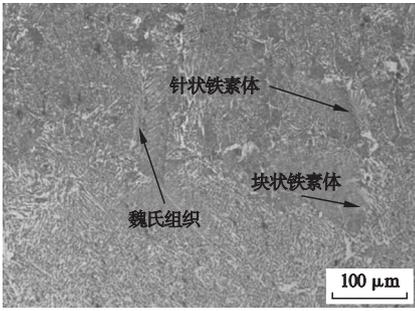
图3 为不同顶锻压力条件下焊接接头熔合区及过热区的显微组织。由图3可知,随着顶锻压力的增加,焊接接头显微组织类别

基本没有发生变化,熔合区为魏氏组织、块状铁素体和针状铁素体,其中魏氏组织和铁素体含量有所减少,组织逐渐细化;过热区晶界明显,先共析铁素体沿晶界析出,组织也稍有

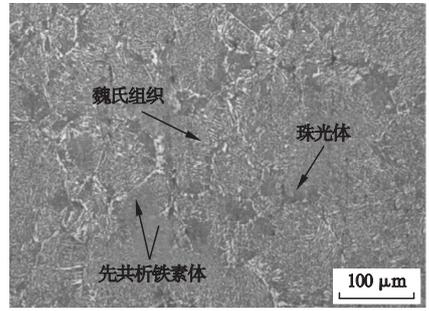


(a)P=0.2MPa熔合区

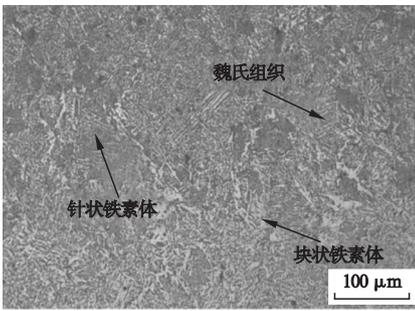
(b)P=0.2MPa过热区



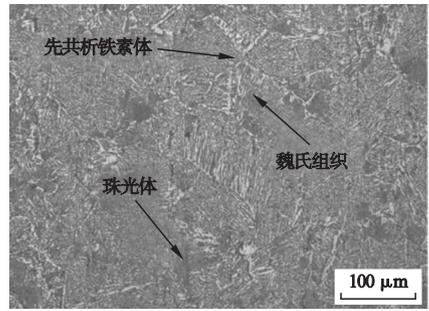
(c) $P=0.25\text{MPa}$ 熔合区



(d) $P=0.25\text{MPa}$ 过热区



(e) $P=0.3\text{MPa}$ 熔合区



(f) $P=0.3\text{MPa}$ 过热区

图3 不同顶锻压力条件下焊接接头显微组织

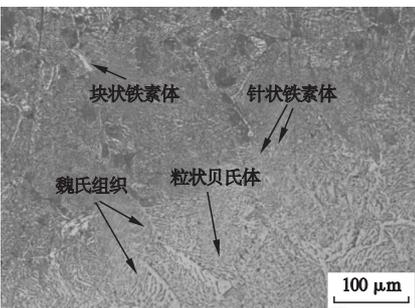
Fig. 3 Microstructures of welded joints with different top forging conditions

细化的趋势。通过上述分析可确定,实验中顶锻压力为 0.3 MPa 时的焊接接头性能优于 0.2 MPa 和 0.25 MPa 时的焊接接头性能。所以,在满足焊接接头力学性能的前提

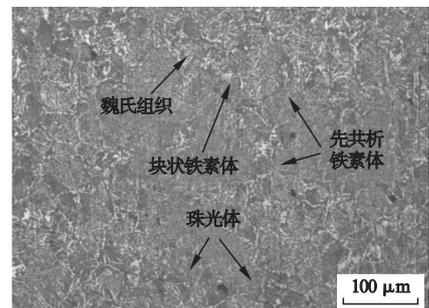
下,推荐使用的顶锻压力为 0.3 MPa。

2.2.3 焊接时间的影响

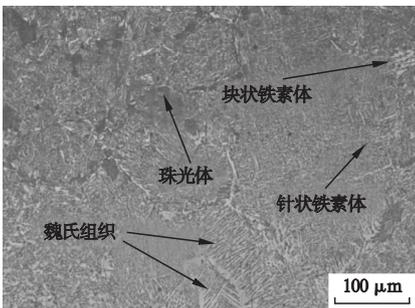
图4 为不同焊接时间条件下焊接接头熔合区及过热区的显微组织。



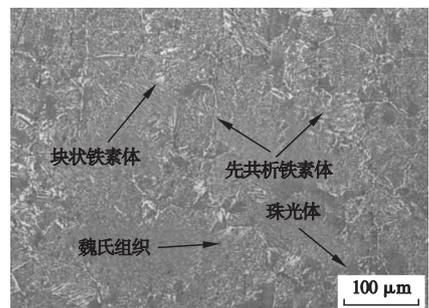
(a) $T=0.8\text{s}$ 熔合区



(b) $T=0.8\text{s}$ 过热区



(c) $T=0.85\text{s}$ 熔合区



(d) $T=0.85\text{s}$ 过热区

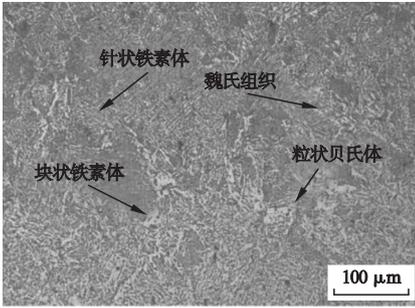
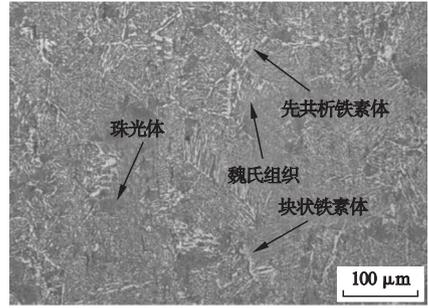
(e) $T=0.9\text{s}$ 熔合区(f) $T=0.9\text{s}$ 过热区

图4 不同焊接时间条件下焊接接头显微组织

Fig. 4 Microstructures of welded joints with different welding time

由图4可知,随着焊接时间的增大,晶粒尺寸有所增大,魏氏组织含量逐渐增多,块状铁素体与珠光体含量略有增加。随着焊接热循环峰值温度升高,且高温停留时间变长,促使铁素体析出,使得最后得到的铁素体含量有所增加。所以,在满足焊接接头力学性能的前提下,推荐使用的焊接时间为0.8s。

3 结论

(1)直径10 mm的HRB400钢筋进行封闭箍筋自动焊接,焊接工艺参数的优化范围:顶锻压力 $P=0.2\sim 0.3\text{ MPa}$,焊接时间 $T=0.8\text{ s}\sim 0.9\text{ s}$,焊接相对电流 $I=65\%\sim 68\%$ 。

(2)焊接相对电流对接头显微组织的影响较大,随着焊接相对电流的增加,晶粒尺寸逐渐增大,铁素体逐渐增多,魏氏组织含量呈上升趋势,基体珠光体逐渐减少。在满足焊接接头力学性能的前提下,焊接相对电流不宜过大,推荐使用的焊接相对电流为65%和66%。

(3)顶锻压力对接头显微组织的影响较小,顶锻压力的变化对焊接接头显微组织类别基本没有影响,但熔合区内魏氏组织和铁素体含量有所减少,组织逐渐细化,过热区组织也稍有细化的趋势。在满足焊接接头力学性能的前提下,顶锻压力不宜过小,封闭箍筋自动焊接生产线在实际生产过程中推荐使用的顶锻压力为0.3 MPa。

(4)焊接时间对接头显微组织的影响与

焊接相对电流类似。在满足焊接接头力学性能的前提下,焊接时间不宜过长,封闭箍筋自动焊接生产线在实际生产过程中推荐使用的焊接时间为0.8 s。

(5)研究结果为封闭箍筋自动焊接工艺参数的选取提供了理论基础,不仅节约成本而且提高了生产效率和质量;同时为进一步提高焊接接头组织性能及机械性能稳定性提供了参考与帮助。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工规范:GB5066—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for construction of concrete structures:GB5066—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.)
- [2] WANG Y Q, ZONG L, ZHU R X, et al. Behavior of I-section steel beam welding reinforced while under load[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 106: 278—288.
- [3] 赵红学,侯爱山,纪恩龙. 焊接封闭箍筋自动焊接技术的研究[J]. 建筑机械化,2015,36(6):51—52.
(ZHAO Hongxue, HOU Aishan, JI Enlong. Study on the automatic welding technology of weld closed steel[J]. Construction mechanization,2015,36(6):51—52.)
- [4] BRODKA J, BRONIEWICZ M. Design of hollow section overlap joints with the reinforcing rib plate welded connection resistance[J]. Archives of civil engineering, 2015,61(1):17—44.
- [5] 刘永军,王烁勋,谷凡,等. 灌浆套筒连接钢筋高温后抗拉性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(5):796—802.
(LIU Yongjun, WANG Shuoxun, GU Fan, et al.

- Test of tensile resistance after high temperature connecting steel bar with grouting sleeve [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(5): 796 - 802.)
- [6] 许科华, 朱飞. 焊接热输入对焊接接头金相组织的影响 [J]. 现代冶金, 2015, 43 (5): 10 - 15.
(XU Kehua, ZHU Fei. Effect of welding heat input on metallographic structure of welded joints [J]. Modern metallurgy, 2015, 43 (5): 10 - 15.)
- [7] 李亚江. 焊接组织性能与质量控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
(LI Yajiang. Welding tissue performance and quality control [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.)
- [8] GONG Y H, GONG M Y, SUN D Q. Study on microstructures and properties of preheated flash butt welded SW400 steel joints [J]. China welding, 2018, 27(3): 42 - 52.
- [9] 崔冰, 彭云, 彭梦都, 等. 热循环对 Q890 钢焊接热影响不同区域组织及性能的影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 35 - 39.
(CUI Bing, PENG Yun, PENG Mengdu, et al. Effect of heat cycle on different regional structure and properties of Q890 steel welding heat [J]. Transactions of the China welding institution, 2017, 38(7): 35 - 39.)
- [10] WANG Y R, YU Y, TENG W H. Effect of welding parameters on Al/Ti joint property in electron beam welding-brazing [J]. China welding, 2016, 25(4): 27 - 33.
- [11] 李兵, 孟爽, 杨永生. 不同参数变化对方钢管再生混凝土柱抗震性能的影响 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2015, 31 (6): 1066 - 1074.
(LI Bing, MENG Shuang, YANG Yongsheng. Effect of different parameters on seismic properties of regenerated steel tube concrete columns [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31 (6): 1066 - 1074.)
- [12] 贺地求, 孙友庆, 马力, 等. CuNiCrSi 铜合金搅拌摩擦焊工艺参数与组织性能分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 83 - 88.
(HE Diqiu, SUN Youqing, MA Li, et al. Analysis of parameters and microstructure of friction stir welding process for CuNiCrSi copper alloy [J]. Transactions of the China welding institution, 2018, 39(11): 83 - 88.)
- [13] ZHANG H, MIN W, XIAO Z, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 2A14T6 aluminum alloy [J]. Materials & design, 2015, 65: 559 - 566.
- [14] 施刚, 刘钊, 张勇, 等. 高强度钢材轴心受压构件局部稳定的有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2010, 26 (6): 1046 - 1051.
(SHI Gang, LIU Zhao, ZHANG Yong, et al. Finite element analysis of local stability of high strength steel axial compression members [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(6): 1046 - 1051.)
- [15] 王振强, 李智能, 魏奇科, 等. 钢管混凝土中约束箍筋电阻压接焊焊接工艺及接头试验 [J]. 钢结构, 2016, 31(9): 80 - 84.
(WANG Zhenqiang, LI Zhineng, WEI Qike, et al. Steel beam resistance pressure welding process and joint test in steel bone concrete [J]. Steel construction, 2016, 31 (9): 80 - 84.)
- [16] 王元清, 林云, 石永久. 高强度钢 Q460C 对接焊缝低温冲击韧性试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2015, 31(6): 971 - 980.
(WANG Yuanqing, LIN Yun, SHI Yongjiu. High strength steel Q460C butt weld low temperature impact toughness test [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(6): 971 - 980.)
- [17] 张秀荷. 不同热处理温度对 D36 钢焊接接头力学性能和金相组织的影响 [J]. 焊管, 2016, 39(1): 17 - 20.
(ZHANG Xiuhe. Effects of different heat treatment temperatures on mechanical properties and metallographic structure of welded joints of D36 steel [J]. Welded pipe and tube, 2016, 39(1): 17 - 20.)
- [18] 赵波, 王振强, 李智能, 等. 钢筋电阻压接焊焊接接头试验研究 [J]. 黑龙江科技信息, 2016 (2): 83 - 84.
(ZHAO Bo, WANG Zhenqiang, LI Zhineng, et al. Experimental study on welding joints with reinforced resistance pressure welding [J]. Heilongjiang science and technology information, 2016(2): 83 - 84.)
- [19] 邓磊, 尹孝辉, 袁中涛, 等. 焊接热输入对 800MPa 级低合金高强度钢焊接接头组织性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (1): 36 - 38.
(DENG Lei, YIN Xiaohui, YUAN Zhongtao, et al. Effect of welding heat input on the microstructure of 800 MPa low alloy high strength steel welded joint [J]. Hot working technology, 2015, 44(1): 36 - 38.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)