

不同焊接参数对Q355B钢焊接接头力学性能的影响

赵小康¹, 张海燕¹, 李慧琼², 李世霞¹, 冶维财¹, 屈海东¹

1. 甘肃钢铁职业技术学院 甘肃嘉峪关 735100

2. 广西柳工机械股份有限公司 广西柳州 545001

摘要: 针对工程机械常用钢材Q355B, 通过弧焊机器人MAG焊, 焊接电流控制在280~400A, 进行不同焊接参数下的工艺试验研究。结果表明: 随着电流的增加其焊接接头性能并没有出现大幅的衰减, 焊接接头试样抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、弯曲性能、冲击性能及硬度均符合标准要求, 均可达到母材或高于母材水平, 当焊接电流控制在350A时, 焊接接头具有最优的性能。同时, 相比焊接电流较小时, 随着焊接电流增加到380A以上时, 效率提升20%左右, 可用于指导实际生产。

关键词: Q355B钢; MAG; 焊接电流; 接头性能; 效率

The influence of different welding parameters on the mechanical properties of Q355B steel welded joints

ZHAO Xiaokang¹, ZHANG Haiyan¹, LI Huiqiong², LI Shixia¹, YE Weicai¹, QU Haidong¹

1. Gansu Steel Vocational and Technical College, Jiayuguan 735100, Gansu, China

2. Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545001, Guangxi, China

Abstract: For the commonly used steel Q355B of construction machinery, through the arc welding robot MAG welding, the welding current is controlled at 280 to 400A, and process test research under different welding parameters is performed. The test results show that as the current increases its welding joint performance, there is no significant attenuation. The tensile strength, yield strength, elongation after fracture, bending performance, impact performance, and hardness performance of welded joint specimens all meet the standard requirements, and their performance can reach or exceed the level of the base metal. Welding joints have optimal performance when the current is controlled at 350A. At the same time, compared to when the welding current is small, as the welding increases to above 380A, the efficiency can be improved by about 20%, which is used to guide actual production needs.

Keywords: Q355B steel; MAG; welding current; performance of welding joints; efficiency

1 序言

Q355B是低合金高强度结构钢 ($w_c < 0.2\%$), 由于该钢合金元素含量较低, 因此碳当量不高, 焊接性良好, 因具备优良的综合力学性能而被广泛应用于低压容器、工程机械、建筑结构及机械零件等

场合^[1]。目前, 该钢的焊接广泛采用机器人MAG焊, 常用80%Ar + 20%CO₂的混合气体作为保护气体, 也称为富氩混合气体保护焊, 该焊接方法具有生产效率高、飞溅小、成本低、焊接变形小、能耗低及适用范围广等优点^[2]。本文对工程机械行业广

基金项目: 甘肃省创新基金项目 (2023B-488)。

泛采用的Q355B钢在不同焊接参数下的接头力学性能进行对比分析研究，探究其选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的ER50-6焊丝焊接时综合效能最优的参数范围，以此在保证焊接接头质量的前提下，提升焊接效率，为工程实际焊接工艺的优化提供参考及借鉴。

2 试验材料及方法

母材为热轧状态Q355B钢板，尺寸为 $550\text{mm} \times 160\text{mm} \times 14\text{mm}$ ，开V形坡口，焊接接头形式如图1所示。采用六轴钱江机器人QJRH4-1A，奥太MAG-500RPL逆变式MIG/MAG焊接电源进行不同焊接参数下的3层3道平对接（加垫板）工艺试验，焊接时保护气体为80%Ar+20%CO₂的混合气体，焊丝选用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的ER50-6实心焊丝。母材Q355B钢化学成分见表1，符合GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》要求，且碳当量为0.44%，因此焊接时无需预热。

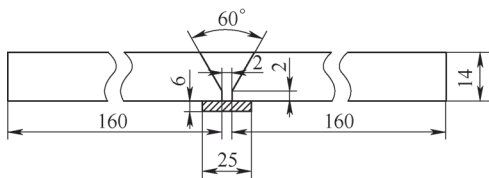


图1 焊接接头形式

表1 Q355B钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.194	0.238	1.280	0.0072	0.0055	0.124	0.016	0.035

注：CEV=0.44%。

3 焊接工艺试验及结果分析

（1）焊接参数 焊接电流控制在280~400A，保护气体流量为22L/min，焊丝干伸长控制在22mm，分3层3道完成不同焊接参数下的平对接V形坡口试板焊接，焊缝成形如图2所示。试验用焊接参数见表2。



图2 焊接试板焊缝成形

（2）母材力学性能 对母材Q355B钢的力学性能（拉伸、弯曲、冲击）进行检测，每种性能取3个试样进行评定，结果见表3。由表3可知，Q355B钢试样抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、冲击性能及弯曲性能均符合GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》要求，并且纵横两个方向的性能差异

表2 试验用焊接参数

参数	焊道/焊层	焊接电流/A		电弧电压/V		焊接速度/（mm/s）	焊接时间/s	摆幅/mm	摆动频率/Hz	道间焊丝偏移量/mm	焊接长度/mm
		编程	实际	编程（一元电压AVP）	实际	编程					
焊接电流控制在280A	1	250	248~252	1	23.6	6~5.8	131	1.2	2	0	540
	2	280	286~287	1	28	5~4.8	180	2.5	1.5	7	
	3	280	280~281	1	28	4.5~4.3	188	4.5	1.3	7	
焊接电流控制在320A	1	280	287~288	1	28.9	8~7.8	100	1.2	2	0	540
	2	320	330~332	1	31.4	6.5~6.3	139	2.5	1.5	7	
	3	320	336~340	1	31.4	6.5~6.3	130	4.5	1.3	7	
焊接电流控制在350A	1	320	326~330	1	31.5	8~7.8	98	1.2	2	0	540
	2	338	345~350	1	33.6	7.2~7	105	2.5	1.5	7	
	3	340	348~352	1	31.3	6.5~6.3	114	4.5	1.3	7	
焊接电流控制在380A	1	320	326~330	1	31.5	8~7.8	98	1.2	2	0	540
	2	365	374~378	1	34.6	7.5~7.3	96	2.5	1.5	7	
	3	365	378~382	1	35.6	6.8~6.6	105	4.5	1.3	7	
焊接电流控制在400A	1	320	326~330	1	31.4	8~7.8	98	1.2	2	0	540
	2	388	386~390	1	36.4	7.8~7.6	94	2.5	1.5	7	
	3	400	400~404	1	36.5	6.8~6.6	105	4.5	1.3	7	

不大。

表3 母材Q355B钢力学性能

平均抗拉强度 /MPa		平均屈服强度 /MPa		平均断后伸长率 (%)		冷弯 (纵向/横向, $\alpha=180^\circ$)	室温平均冲击吸收能量/J	
纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向		纵向	横向
523.3	524.3	396	395.3	31.8	31.3	完好	134.7	139.7

注：纵向指沿着板材轧制方向；横向指垂直于轧制方向。

(3) 焊缝成形及接头微观组织 通过超声波检测，不同焊接参数下得到的焊接试板均成形良好，无咬边、气孔、未熔合及裂纹等现象，如图3所示。通过光学显微镜观察不同焊接参数下焊接接头的微观组织（500×），第1道焊缝和热影响区组织主要以块状先共析铁素体，细小铁素体和少量珠光体、贝氏体为主，第2道和第3道焊缝组织除了块状先共析铁素体外，还有大量侧板条状铁素体生成，热影响区主要以细小的铁素体和少量珠光体、贝氏体为主，同时相比第3道焊缝各参数下第1道，第2道焊缝由于受到后一道焊缝的热处理作用，组织相对细小，并且随着焊接电流的增大，焊接热输入增大，焊接接头晶粒会变得较为粗大，尤其是热影响区的粗晶区。但是，在各焊接参数下，焊接接头均未生成淬硬的马氏体或魏氏体等严重影响接头性能的淬硬组织^[1, 2]。



图3 焊接接头金相试样

(4) 焊接接头力学性能 参照GB/T 19869.1—2005《钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验》，对不同焊接参数下的焊接试件进行焊接接头力学性能（拉伸、弯曲、冲击、硬度）检测^[2, 3]。拉伸和冲击性能试验均取3个试样进行评定，弯曲性能正弯、背弯试验均取2个试样，硬度测量取1个试样进行评定。

不同参数下的拉伸试样如图4所示，拉伸试验结果如图5所示。由图5可知，不同焊接参数下焊接接头试样抗拉强度、屈服强度、断后伸长率均符合标准要求。焊接接头试样拉伸时均断裂在母材部位，其焊接接头断裂强度高于母材，但屈服强度、伸

长率低于试验选用的母材，抵抗塑性变形的能力降低，这主要与焊缝组织的不均性有关。通过对比分析，当焊接过程中电流控制在350A左右时，焊接接头具有最优的拉伸性能，其焊接接头的抗拉强度平均要高于其他焊接参数下12.4~20.7MPa，屈服强度和断后伸长率与其他参数情况下基本相当。

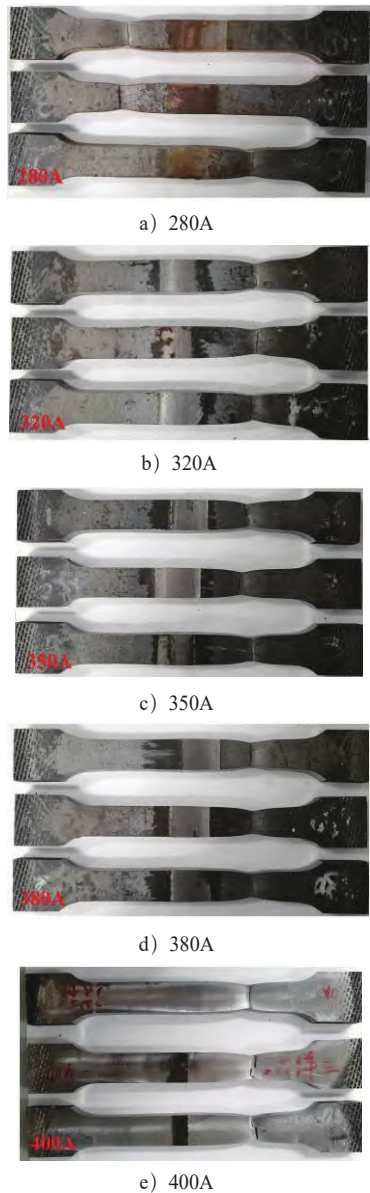


图4 焊接接头拉伸试样

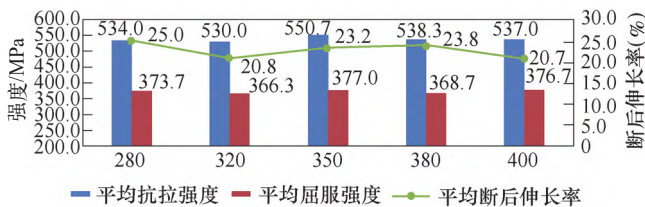


图5 焊接接头拉伸试验结果

不同参数下的冲击试样如图6所示，冲击试验结果如图7所示。由图7可知，不同焊接参数下焊接接头冲击性能均符合标准要求。通过对比分析，当焊接过程中电流控制在350A左右时，焊接接头具有最优的冲击性能，可达到与母材相当的水平，随着焊接电流的增加，接头的冲击性能略有降低。

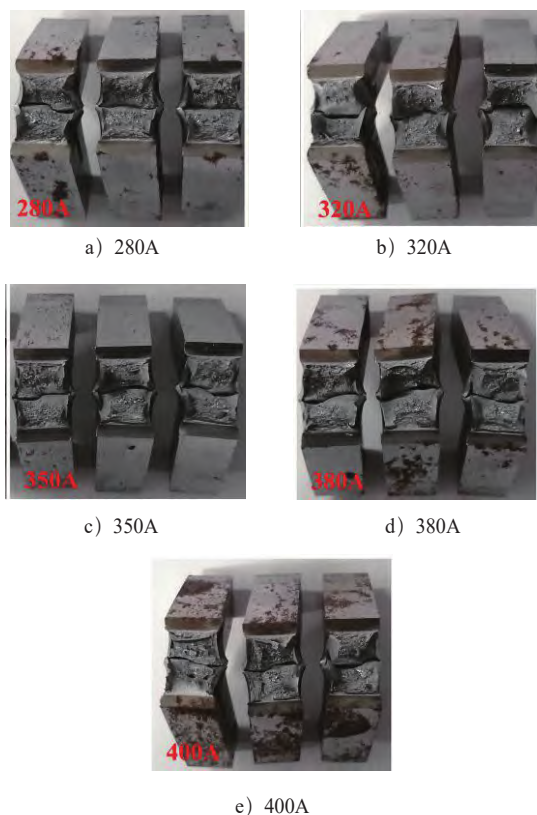


图6 焊接接头冲击试样

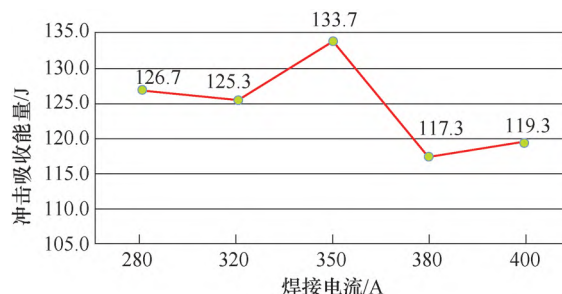


图7 焊接接头冲击试验结果

不同参数下的弯曲试样如图8所示。通过正弯、背弯试验后，无肉眼可见的裂纹，均符合标准要求，试验中未发现明显差别^[4]。

不同焊接参数下的焊接接头硬度测试如图9所示，分别对焊接接头表面及根部硬度进行检测，结果见表4。由表4可知，不同焊接参数下焊接接头硬度均符合标准要求，母材硬度在160HV左右，不同焊接参数下表面和根部焊缝区和热影响区硬度差别不大，除了400A时热影响区硬度在165HV左右，焊缝区硬度在180HV左右外，其他参数下其表面和根部焊缝区的硬度为188~210HV，热影响区的硬度在180~200HV内波动，并且各参数下焊缝区和近焊缝区附近具有较高的硬度。随着距焊缝距离变远，焊缝金属硬度逐渐降低，当焊接电流在350A时，硬度略高于其他参数下的硬度；当焊接电流在400A时，热影响区硬度偏低，主要是由于热输入太大，造成晶粒粗大，导致硬度降低。各参数下焊缝区的硬度要高于热影响区的硬度，也高于母材的硬度^[5]。

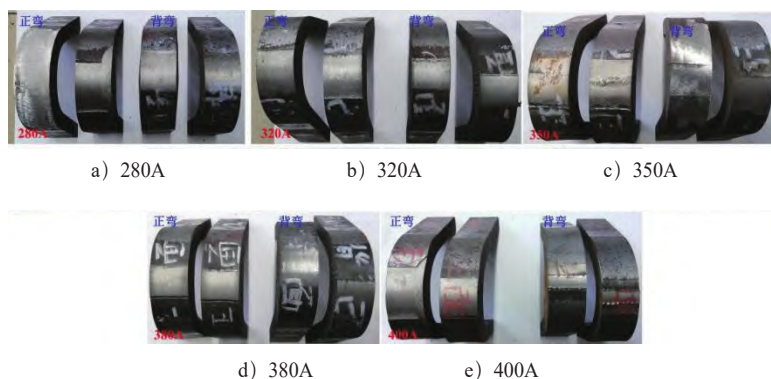


图8 焊接接头弯曲试样



图9 焊接接头硬度测试

(5) 不同焊接参数下对接接头焊接效率的比较 以1m长焊缝计算，不同焊接参数下焊接效率对比如图10所示。从图10可看出，随着焊接电流的增加（电弧电压、焊接速度也相应调整），其焊

表4 焊接接头硬度试验结果

焊接 电流 /A	焊缝根部硬度HV															焊缝表面硬度HV														
	母材			热影响区			焊缝			热影响区			母材			母材			热影响区			焊缝			热影响区			母材		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
280	162	158	166	173	185	191	191	197	192	186	172	167	159	159	155	172	163	166	173	173	196	186	192	189	197	161	166	152	148	153
320	171	163	167	173	178	181	187	189	197	190	172	173	161	171	166	150	157	159	171	175	179	192	206	190	219	182	174	170	170	165
350	175	176	180	192	201	205	211	214	219	218	202	194	188	188	180	169	167	165	180	181	211	196	205	207	242	199	194	180	176	178
380	165	169	170	183	185	190	199	202	203	203	193	180	166	157	160	161	161	160	169	166	199	181	191	193	237	180	176	163	162	163
400	146	147	148	156	158	158	169	173	181	168	165	164	153	155	156	165	164	156	171	171	177	198	182	176	169	164	161	151	153	153

接时间缩短，焊接效率得到提升。相比焊接电流为320A，随着焊接电流增加到380A以上时，效率可提升20%左右。

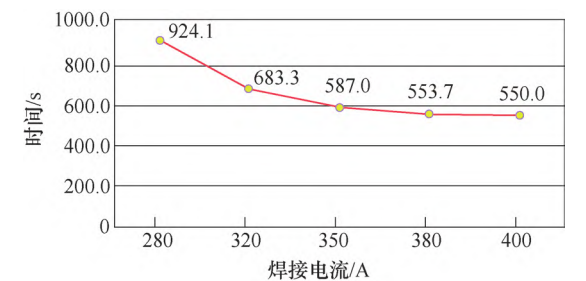


图10 长1m焊缝在不同焊接参数下焊接效率对比

4 实际应用

目前，上述工艺已应用于某工程机械行业装载机产品的焊接过程中（见图11），用于指导机器人焊接时不同焊接部位焊接参数的选取，同时通过适当增加焊接电流，可提升焊接效率13%以上。



图11 工程机械产品结构件现场焊接

5 结束语

- 1) 采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的ER50-6焊丝、焊接电流为280~400A，对Q355B钢的对接试板焊接时，焊接接头微观组织主要以铁素体为主和少量珠光体。
- 2) 采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 的ER50-6焊丝、焊接电流为280~400A，对Q355B钢的对接试板焊接时，其焊接接头试样抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、弯

曲性能、冲击性能及硬度均符合标准要求，接头强度要高于母材，并且所有焊接参数下的接头冲击性能均优于母材的冲击性能。

3) 不同焊接参数下，对接接头的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、弯曲性能、冲击性能及硬度相差不大，当焊接电流控制在350A时，其接头具有最优的性能，但随着焊接电流的增加，其接头性能并没有出现大幅衰减，其性能可达到母材或高于母材水平。因此，对于 $\phi 1.2\text{mm}$ 的焊丝，焊接电流可提升至380~400A进行焊接。

4) 随着焊接电流的增加（电弧电压、焊接速度也相应调整），其焊接时间缩短，焊接效率得到提升，相比焊接电流在320A时，随着焊接电流增加到380A以上，效率可提升20%左右。

参考文献：

[1] 张博炜，关博文，孙楠，等. Q355钢的焊接接头质量控制研究[J]. 辽宁工业大学学报（自然科学版），2022，42（2）：94-97.

[2] 杨永建，张绪平，祁晓乾，等. Q345钢的MAG焊接接头组织及力学性能分析[J]. 焊接技术，2011，40（12）：6-8.

[3] 徐明亮，徐文张. Q345C钢焊接接头力学性能试验研究[J]. 造纸装备及材料，2022，51（5）：144-146.

[4] 陈尹泽，李娜，温斌，等. 细晶Q345低合金高强钢焊接接头组织性能研究[J]. 河南冶金，2015，23（2）：5-7.

[5] 周培山，谢芋江，杨昕，等. 不同CO₂气保焊工艺对Q345钢焊接接头的影响[J]. 电焊机，2014，44（5）：213-216.

MW 20240508