

埋弧焊热输入对 Q355B 厚板焊接接头组织及性能的影响

孙艳芬¹, 朱天一¹, 田松亚²

(1.常州机电职业技术学院 机械工程学院, 江苏 常州 213164;

2.河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 目的 确定 Q355B 厚板埋弧焊的最佳热输入参数, 分析热输入对其焊接接头组织和性能的影响规律。方法 选取 32 mm 厚 Q355B 钢板, 选用 H10Mn2 焊丝和 SJ101 焊剂, 匹配 27.43、30.17、34.97、39.00 kJ/cm 4 种热输入进行焊接。采用光学显微镜、洛氏显微硬度计、液压万能试验机和摆锤冲击试验机分别对接头组织、硬度、拉伸性能和冲击性能进行测试。结果 当热输入为 27.43 kJ/cm 时, 焊缝和粗晶区组织以铁素体为主, 存在少量的珠光体和贝氏体, 接头硬度为 83HRB~90.5HRB, 抗拉强度为 524.5 MPa, 冲击功为 112.7 J 和 121.3 J; 当热输入增加到 30.17 kJ/cm 时, 焊缝组织基本无变化, 粗晶区铁素体和珠光体增多, 粒状贝氏体减少, 接头硬度为 82.7HRB~88.7HRB, 抗拉强度为 518 MPa, 冲击功为 121 J 和 132 J; 继续增加热输入到 34.97 kJ/cm, 焊缝和粗晶区块状铁素体增多, 粒状贝氏体和珠光体减少, 晶粒变粗大且出现魏氏组织, 接头硬度为 83.5HRB~88.1HRB, 抗拉强度为 522 MPa, 冲击功为 106.7 J 和 118 J; 当热输入达到 39 kJ/cm 时, 焊缝以块状铁素体为主, 同时存在少量的先共析铁素体和珠光体, 与 34.97 kJ 时相比, 粗晶区组织基本无变化, 接头硬度为 83.1HRB~85.8HRB, 抗拉强度为 516 MPa, 冲击功为 92.3 J 和 91.7 J。结论 随热输入的增加, 焊缝和热影响区组织变粗大, 热影响区会出现魏氏组织; 同时焊接接头的强度和硬度呈下降趋势, 冲击性能呈先增大后减小的趋势; 当热输入为 30.17 kJ/cm 时, 焊接接头的组织和综合力学性能最好。

关键词: Q355B 厚板; 埋弧焊工艺; 低中高热输入; 焊缝和热影响区组织; 焊接接头力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.02.014

中图分类号: TG407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2025)02-0122-08

Influence of Heat Input of Submerged Arc Welding on Micro-structure and Properties of Q355B Thick Steel Welded Joint

SUN Yanfen¹, ZHU Tianyi¹, TIAN Songya²

(1. College of Mechanical Engineering, Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Jiangsu Changzhou 213164, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hehai University, Jiangsu Changzhou 213164, China)

收稿日期: 2024-03-25

Received: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (52175223); 江苏省产学研合作项目 (BY2021589)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52175223); Jiangsu Provincial Industry-University-Research Cooperation Project (BY2021589)

引文格式: 孙艳芬, 朱天一, 田松亚. 埋弧焊热输入对 Q355B 厚板焊接接头组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2025, 17(2): 122-129.

SUN Yanfen, ZHU Tianyi, TIAN Songya. Influence of Heat Input of Submerged Arc Welding on Micro-structure and Properties of Q355B Thick Steel Welded Joint[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(2): 122-129.

*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: The work aims to find the optimal heat input parameters of submerged arc welding of Q355B thick plates, and analyze the influence of heat input on the micro-structure and performance of welded joints. A 32 mm thick Q355B steel plate was selected, a H10Mn2 welding wire and SJ101 flux were used to match four kinds of low, medium and high heat inputs (27.43, 30.17, 34.97 and 39.00 kJ/cm) for welding. Optical microscope, Rockwell micro-hardness tester, hydraulic universal testing machine and pendulum impact testing machine were used to test micro-structure, hardness, tensile and impact performance of the joint. When heat input was 27.43 kJ/cm, weld and coarse crystal structure were mainly ferrite, with a small amount of pearlite and bainite, joint hardness was 83HRB-90.5HRB, tensile strength was 524.5 MPa, and impact power was 112.7 J and 121.3 J; When heat input was increased to 30.17 kJ/cm, weld structure was basically unchanged, ferrite and pearlite in coarse crystal structure increased, granular bainite decreased, joint hardness was 82.7HRB-88.7HRB, tensile strength was 518 MPa, and impact power was 121 J and 132 J; When heat input was increased to 34.97 kJ/cm, weld and coarse crystal structure were mainly massive ferrite, granular bainite and pearlite decreased, grains became coarse and Weishi structure appeared, joint hardness was 83.5HRB-88.1HRB, tensile strength was 522 MPa, and impact power was 106.7 J and 118 J; When heat input was 39 kJ/cm, weld was mainly massive ferrite, with a small amount of eutectic ferrite and pearlite, coarse crystal structure was basically unchanged with 34.97 kJ, joint hardness was 83.1HRB-85.8HRB, tensile strength was 516 MPa, and impact power was 92.3 J. In conclusion, with the increase of heat input, micro-structure of weld and heat affected zone becomes thicker, and Widmanstatten micro-structure appears in the heat affected zone. At the same time, strength and hardness properties of the welded joint show a downward trend, and impact performance shows a trend of first increasing and then decreasing. When heat input is 30.17 kJ/cm, micro-structure and comprehensive mechanical properties of the welded joint are the best.

KEY WORDS: Q355B thick plate; submerged arc welding process; low, medium and high heat input; micro-structure of weld and heat affected zone; mechanical properties of welded joint

作为重要的工程材料, 钢管被广泛用于流体输送、钢结构、容器等工业领域, 常用材料为 Q235。随着钢管结构向自重轻型化、材质高强化的方向发展, Q355B 作为综合力学性能优良、性价比高的低合金高强钢被大量使用^[1-2]。Q355B 通常以热轧状态供货^[3], 碳当量在 0.45 左右, 其中厚度为 30~63 mm 的规格用量最多, 主要采用埋弧焊工艺进行焊接。Q355B 含有一定的淬透性元素, 碳当量较大, 焊接接头存在一定的淬硬倾向^[4], 容易产生冷裂纹, 导致钢管失效, 因此选择合适的埋弧焊热输入参数成为保障钢管使用性能和服役寿命的关键。

埋弧焊是一种将电弧隐藏在焊剂下的(半)自动化弧焊方式, 埋弧焊焊接电流大、焊接效率高、污染少, 是目前生产效率较高的机械化焊接方法之一, 被广泛用于船舶、管道、锅炉、工程机械、核电设备等大型构件的焊接制造^[5]。埋弧焊的电弧被隐藏在焊剂之下, 难以直接观察到电弧形态和熔滴过渡方式, 这在一定程度上制约了埋弧焊工艺质量和设备性能的进一步提升。随着现代化信息技术的发展, 自动化、智能化、高度信息化已成为埋弧焊技术的发展方向, 例如采用微机控制电源, 实时监控电弧状态, 可以实现更高质量的焊接^[6]。

本文以 32 mm 厚的 Q355B 为研究对象, 该厚度可覆盖常用的规格, 从实际生产应用出发, 选取低、中、高 4 种不同的热输入进行埋弧焊焊接试验, 通过对焊接接头显微组织、硬度、拉伸性能、冲击性能进行综合测试研究, 全面分析了热输入对焊接接头组织

和性能的影响规律, 以期为低合金高强钢管的应用和发展提供一定的试验基础。

1 试验

试验母材选用 Q345B, 尺寸为 600 mm×200 mm×32 mm, 力学性能如表 1 所示。母材为热轧状态供货, 金相组织如图 1 所示, 可以观察到母材组织是由呈带状分布的白色块状铁素体和黑色珠光体组成。采用等强匹配的原则选择焊材, 焊丝牌号为 H10Mn2, 规格为 4 mm, 焊剂牌号为 SJ101, 焊丝和焊剂熔敷金属的力学性能如表 1 所示。为充分验证厚板多层多道焊接头的组织和性能特性, 试板采用 55°单面 V 型坡口的接头形式, 钝边为 6 mm, 根部间隙为 0 mm, 如图 2 所示。采用单丝埋弧焊工艺进行焊接, 焊剂使用前将焊剂在 350 °C 温度下烘干 2 h, 焊接热输入参数如表 2 所示。

焊接完毕后, 在垂直焊缝中心线的截面位置制取金相试样, 首先, 用砂纸(由粗到细)对试样进行逐级磨光; 其次, 用 1 μm 粒度的金刚石抛光剂对试样进行抛光, 直到无划痕; 最后, 在超声波环境下对其进行清洗, 并用 4% (体积分数) 硝酸酒精溶液对清洗好的试样腐蚀, 采用 LeicaMEF-4M 型光学显微镜对金相组织进行观察; 根据 GB/T 2654, 使用 HR-150 洛氏显微硬度计, 采用压痕法对接头的硬度进行单点测试; 依据 GB/T 2651, 在每个试板上制取 2 个拉伸试样, 使用 WEW-1000 液压万能试验机, 在室温下

进行拉伸测试, 拉伸速度为 1 mm/min; 依据 GB/T 2650, 在焊缝和热影响区分别制取 3 个冲击试样, 试样尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm, 使用 JB-300B 摆锤冲击试验机在室温下进行 V 型缺口冲击测试。

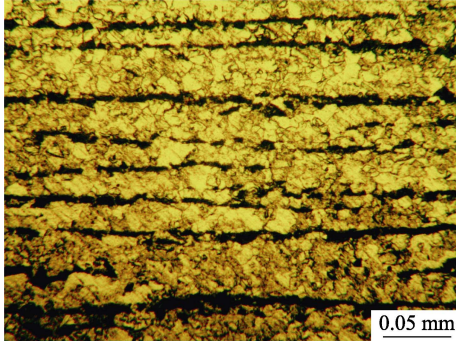


图 1 母材微观组织

Fig.1 Micro-structure of base material

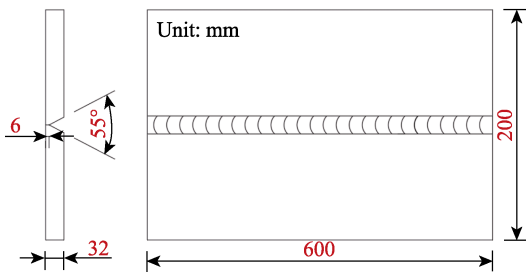


图 2 焊接试样示意图

Fig.2 Welding sample diagram

2 显微组织

2.1 焊缝区 (HF) 组织

当热输入为 27.43、30.17、34.97 和 39.00 kJ/cm 时, 对应的焊缝组织如图 3a~d 所示。可以看出, 焊缝区的组织基本一致, 均含有先共析铁素体 (形貌为长条状) 和块状铁素体, 同时存在着交错分布的珠光

体, 还可以观察到粒状特征的贝氏体。对比分析可知, 随着热输入的增加, 最先析出的铁素体和依附其生长的侧板条铁素体数量减少, 后续在晶内形成的块状铁素体增多, 针状铁素体先增多后减少。另外, 所有组织的晶粒尺寸都随热输入的增加而增大。研究认为, 热输入越大, 焊缝冷却越慢, 相对小热输入而言, 奥氏体分解温度较高, 从而为先共析铁素体的形成提供了有利条件。但由于原奥氏体的长大, 其晶界占比相对减小, 因此在晶界形核、长大的先共析铁素体数量减少, 晶内块状铁素体数量增加^[7]。对于侧板条铁素体, 它是依附在先共析铁素体上向晶内生长的, 所以其数量也随热输入的增加而减少^[7-9]。

当热输入为 27.43 kJ/cm 和 30.17 kJ/cm 时, 焊缝组织以先共析铁素体和块状铁素体为主, 在其基体周围或内部存在少量的珠光体和贝氏体; 当热输入增加到 34.97 kJ/cm 时, 最先在焊缝中析出的铁素体数量明显减少, 晶内形成的块状铁素体和珠光体数量增多; 当热输入继续增加到 39.00 kJ/cm 时, 焊缝以块状铁素体为主, 同时存在少量的先共析铁素体和珠光体。研究认为, 这种趋势是由 2 个方面因素引起的, 一方面, 热输入越大, 熔池金属在高温停留时间的越长, 从而使过热度增大, 抑制了柱状晶组织的形核与长大, 为等轴晶的形核和长大提供了有利环境^[10-11]; 另一方面, 柱状晶在自身长大过程中会释放结晶潜热, 这种潜热会阻碍其临近柱状晶核长大, 甚至不使其产生, 从而表现为柱状晶组织进一步减少^[12-13]。

2.2 热影响区 (HAZ) 组织

加热温度在固相线以下到晶粒开始寄居长大的温度范围内的区域叫过热区, 也被称作粗晶区^[14]。当加热温度在 1 100 °C 以上时, 金属处于过热状态, 一些难溶的碳化物和氮物质点也都溶入奥氏体, 因此奥氏体晶粒开始剧烈长大, 冷却后主要得到粗大的铁素体和珠光体^[15-16], 尤其在温度 1 300 °C 以上时晶粒更是十分粗大, 该区域焊接后晶粒度一般

表 1 材料及性能

Tab.1 Material and mechanical property

Material	Size/mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	A /%	A_{kv} /J
Q355B	600×200×32	≥345	470-630	≥20	≥34 J (20 °C)
H10Mn2+SJ101	φ4.0	≥390	490-610	≥20	≥41 J (-40 °C)

Note: σ_s is yield strength, σ_b is tensile strength, A is elongation, A_{kv} is impact energy.

表 2 焊接参数

Tab.2 Welding parameters

Current/A	Voltage/V	Speed/(cm·min ⁻¹)	Power polar	Heat input/(kJ·cm ⁻¹)
500	32	35	DCEN	27.43
550	32	35	DCEN	30.17
600	34	35	DCEN	34.97
650	35	35	DCEN	39.00

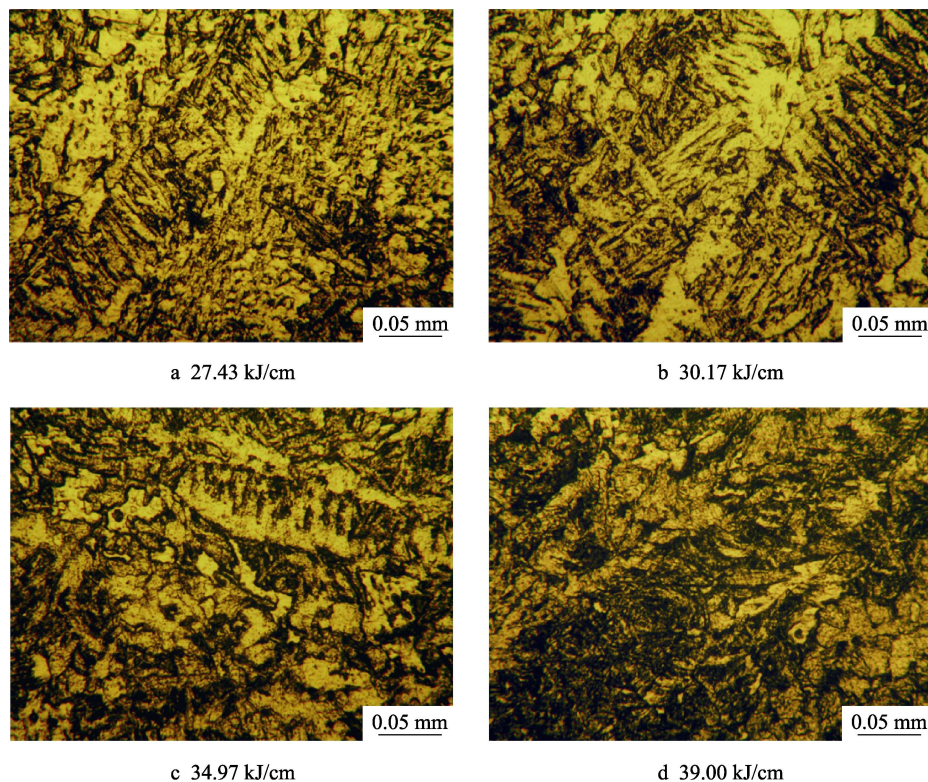


图 3 HF 组织
Fig.3 HF micro-structure

为 1~2 级^[15]。当热输入较大或高温停留时间过长时会出现魏氏组织, 使该区域内的塑性和韧性下降, 强度有所提高, 但其影响不是很大。过热区与熔合区一样, 也是焊接接头的薄弱环节^[17-19]。

当热输入为 27.43、30.17、34.97、39.00 kJ/cm 时, 对应的热影响区粗晶组织如图 4a~d 所示。可以看出, 粗晶区组织也基本一致, 主要为粗大的条状、块状铁素体以及弥散分布的珠光体。对比金相组织可以看出, 随热输入的增大, 沿晶界先共析铁素体和晶内块状铁素体逐渐增多并且变得粗大, 粒状贝氏体减少, 珠光体先增多后减少。当热输入为 27.43 kJ/cm 时, 粗晶区组织主要为在晶界内生产的铁素体以及分布在基体上的粒状特征贝氏体和弥散分布的珠光体组织, 可以明显看到原奥氏体晶界, 这是因为在低热输入条件下, 临近焊缝的母材冷却速度相对较快, 原始奥氏体晶界来不及转变而保留下来。当热输入增加到 30.17 kJ/cm 时, 原奥氏体晶界基本消失, 粗晶区组织主要为沿着晶界析出的铁素体和奥氏体晶内形成的块状铁素体, 同时粒状特征的贝氏体组织减少, 弥散分布的珠光体组织增多。当热输入继续增加到 34.97 kJ/cm 和 39.00 kJ/cm 时, 沿着晶界析出的铁素体和晶内块状铁素体晶粒尺寸变得更加粗大, 呈粒状特征的贝氏体和弥散分布的珠光体减少, 同时可在局部发现脆硬的魏氏组织, 魏氏组织特征是铁素体在原奥氏体晶界呈网状析出, 或从原奥氏体晶粒内部沿一定的方向呈长短不一的针状或片条状析出^[19], 直

接插入珠光体晶粒之中, 一般认为魏氏组织是先共析铁素体、侧板条铁素体和珠光体混合而成的多相组织^[20-21]。研究认为, 随热输入的增加, 处于高温区的粗晶区冷却速度变慢, 过冷度变小, 冷却至环境温度的速度变慢, 从而为奥氏体晶粒的长大创造了有利的条件^[22-24], 表现为依附于奥氏体晶界形核、生长的先共析铁素体增多, 奥氏体晶界内的块状铁素体增多。

3 焊接接头力学性能测试

3.1 硬度测试

通过硬度测试研究焊接接头抵抗塑性变形能力和应变硬化能力^[14]。在焊接过程中, 焊接接头的各个区域经历了不同的热循环, 导致焊接接头的硬度分布不均匀。距离焊缝越远的区域, 焊接受热升高到的最高温度越低。因此, 母材受热影响最小, 硬度变化不大。本文接头硬度测试结果如图 5 所示, 可以看出, 4 种热输入接头的硬度曲线变化一致, 热影响区硬度高于焊缝区硬度, 最大值出现在焊缝和热影响区之间, 然后向两侧降低。当热输入为 27.43 kJ/cm 时, 焊接接头硬度为 83HRB~90.5HRB; 当热输入为 30.17 kJ/cm 时, 焊接接头的硬度为 82.7HRB~88.7HRB; 当热输入为 34.97 kJ/cm 时, 焊接接头的硬度为 83.5HRB~88.1HRB; 当热输入为 39 kJ/cm 时, 焊接接头的硬度为 83.1HRB~85.8HRB。可以看出, 随热

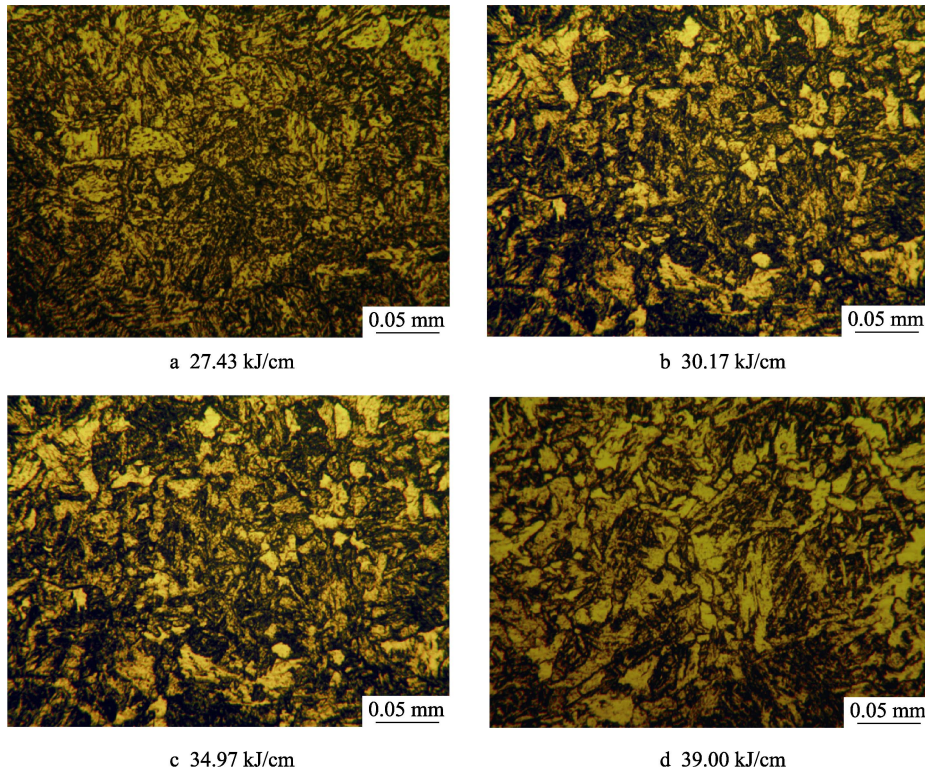


图4 热影响区粗晶区组织
Fig.4 CGHAZ micro-structure

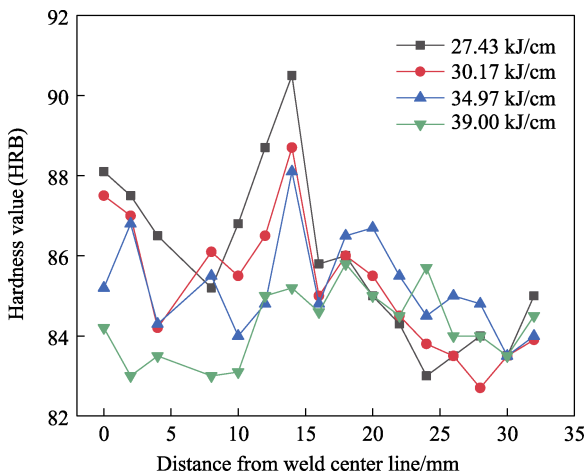


图5 焊接接头硬度分布
Fig.5 Hardness distribution of welded joint

输入增加,焊缝和热影响区硬度降低,间接说明接头强度有下降的趋势。研究认为,热输入越大,接头高温停留时间则越长,冶金反应越完全,冷却至室温的时间越长,淬硬倾向越小,因此硬度降低。硬度峰值出现在焊缝和热影响区之间,随后向两边逐渐减小,一方面是因为焊缝区为粗大的柱状晶组织,具有特性的方向性,其硬度值偏低;另一方面,处于焊缝区和热影响区之间的晶粒尺寸小、成分分布不均、空位多、应力大且晶界液化严重,伴有魏氏组织的出现,所以表现为硬度值偏高^[25-26]。

3.2 拉伸性能测试

拉伸性能主要用于分析和评估焊接接头的抗拉强度是否满足母材的力学性能要求,本文拉伸试样示意图如图6所示,测试结果如表3所示。从各组数值可以看出,在4种热输入条件下,焊接接头的屈服强度为372~380 MPa,抗拉强度为514~527 MPa,说明接头性能均能满足母材要求。对比同组数据的差值可以看出,屈服强度在2~6 MPa之间浮动,变化很小,说明当热输入为27.43~39 kJ/cm时,接头的强度比较稳定。从抗拉强度的平均数值可以看出,随热输入的增加,平均值由524.5 MPa变化为516 MPa,说明接头强度有下降的趋势。从接头的断裂位置来看,当热输入为27.43~30.17 kJ/cm时,断裂位置出现在母材;

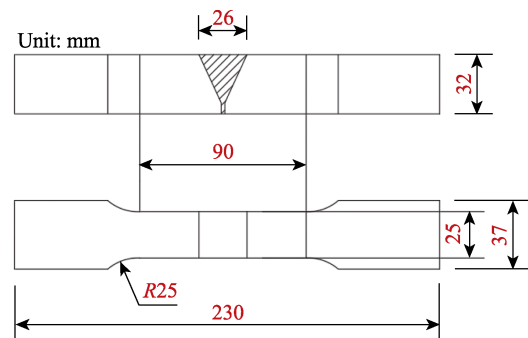


图6 拉伸试样示意图
Fig.6 Tensile specimen diagram

表 3 拉伸试验结果
Tab.3 Tensile test resultss

Heat input/ (kJ·cm ⁻¹)	σ_s /MPa		σ_b /MPa		A/%	Fracture location
	Measured value	Average value	Measured value	Average value		
27.43	376/372	374	527/522	524.5	29/29.5	Base material
30.17	380/376	378	514/522	518	28.5/29	Base material
34.97	378/372	375	520/524	522	29/29.5	HAZ & base material
39.00	372/374	373	518/514	516	29/29.5	HF & base material

当热输入为 34.97 kJ/cm 时, 断裂位置出现在母材和热影响区; 当热输入为 39.00 kJ/cm 时, 断裂位置出现在母材和焊缝; 说明随热输入的增加, 焊缝和热影响区的性能有下降的趋势, 这是由于随热输入的增加, 焊缝和热影响区的粗晶区组织变得粗大, 晶界变少, 晶面之间的交错、相互咬合减弱, 导致金属间的结合力变弱, 从而表现为强度下降。

3.3 冲击性能测试

冲击性能是反映材料塑韧性的一个重要指标, 能反映出焊接区微观缺陷和显微组织的变化^[19]。本文冲击性能测试结果如表 4 所示, 从各组数值可以看出, 在 4 种热输入条件下, 焊缝区冲击性能在 92.3~121 J 之间波动, 热影响区冲击性能在 91.7~132 J 之间波动, 数值均高于 34 J, 说明接头的韧性可以满足母材要求。对比焊缝区同组数据的差值可以看出, 当热输入为 27.43~34.97 kJ/cm 时, 冲击韧性的测量差值为 6~8 J, 变化较小, 因为在该热输入范围, 焊缝区以铁素体和珠光体为主, 对冲击性能影响小; 当热输入增大到 39 kJ/cm 时, 冲击韧性的测量差值达到 15 J, 因为此时焊缝以块状铁素体为主, 同时存在少量的先共

析铁素体和珠光体, 导致韧性波动较大。对于热影响区, 当热输入为 27.43~30.17 kJ/cm 时, 冲击韧性的测量差值达到 12 J, 由组织分析可以看出, 热影响区组织为铁素体、珠光体和少量粒状贝氏体的混合组织, 由于各组织对冲击性能的表现不一, 所以波动较大; 当热输入增加到 34.97 kJ/cm 时, 冲击韧性的测量差值为 6 J, 冲击韧性波动减小, 这是因为此时热影响区组织以铁素体组织为主; 当热输入继续增加到 39 kJ/cm 时, 冲击韧性的测量差值变为 12 J, 这是因为随着热输入的增加, 原来以铁素体为主的组织中夹杂的魏氏组织增多, 从而导致韧性差别较大。从各组冲击韧性的平均数值可以看出, 随着热输入的增加, 接头的冲击性能呈先增强后减弱的趋势, 当热输入为 30.17 kJ/cm 时, 接头冲击性能最佳, 焊缝区冲击韧性可达 121 J, 热影响区冲击韧性可达 132 J。研究认为, 随着焊接热输入的增加, 焊接接头的冷却速度变慢, 生成淬硬相的趋势减弱, 所以表现为冲击韧性提高; 当热输入继续增加到 39.00 kJ/cm 时, 焊接热输入过大, 接头在高温区停留的时间延长, 产生魏氏组织, 由于其特点是高硬度、低韧塑性, 因此接头的冲击韧性呈现下降的趋势^[27]。

表 4 冲击试验结果
Tab.4 Impact test results

Heat input/(kJ·cm ⁻¹)	$A_{KV}(HF)$ /J		$A_{KV}(HAZ)$ /J	
	Measured value	Average value	Measured value	Average value
27.43	114/116/108	112.7	128/120/116	121.3
30.17	124/118/121	121	138/132/126	132
34.97	106/104/110	106.7	122/116/116	118
39.00	90/86/101	92.3	86/98/91	91.7

4 结论

1) 当热输入为 27.43~39 kJ/cm 时, 焊缝区和热影响区粗晶区的组织主要为铁素体和珠光体, 夹杂少量的贝氏体; 随着热输入的增加, 先共析铁素体减少, 块状铁素体增多, 珠光体先增多后减少; 同时焊缝和热影响区的组织变得粗大, 当热输入达到 34.97 kJ/cm 时, 热影响区粗晶区出现魏氏组织。

2) 采用 H10Mn2 焊丝+ SJ101 焊剂, 当埋弧焊热输入为 27.43~39 kJ/cm 时, 焊接接头的力学性能均可

满足 Q355B 的要求。随热输入的增加, 接头的强度和硬度呈下降趋势, 冲击性能呈先增强后减弱的趋势; 当热输入为 30.17 kJ/cm 时, 综合力学性能最好, 焊接接头的冲击性能最佳, 焊缝和热影响区的冲击韧性分别可达 121 J 和 132 J。

参考文献:

- [1] 陈浩, 张晓, 朱瑞芳. Q355 钢焊接性及其与 Q345 钢焊接技术的关键比较[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 109-

113.
CHEN H, ZHANG X, ZHU R F. Weldability of Q355 Steel and Key Comparison of Welding Technology between It and Q345 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 109-113.
- [2] 古松, 林晓宇, 顾颖, 等. Q355 钢板对接接头裂纹扩展所致焊接残余应力重分布研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(10): 152-159.
GU S, LIN X Y, GU Y, et al. Redistribution of Welding Residual Stress Caused by Crack Propagation in Butt Joint of Q355 Steel Plate[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(10): 152-159.
- [3] 张君, 王帆, 王超凡, 等. 在能源技术装备构架中 Q355D 钢对接接头焊接工艺的研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(12): 91-93.
ZHANG J, WANG F, WANG C F, et al. Research on Butt Joint Welding Technology of Q355D Steel in Energy Technology Equipment Frame[J]. Coal Mine Machinery, 2021, 42(12): 91-93.
- [4] 陈浩, 张晓, 朱瑞芳. Q355 钢焊接性及其与 Q345 钢焊接技术的关键比较[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 109-113.
CHEN H, ZHANG X, ZHU R F. Weldability of Q355 Steel and Key Comparison of Welding Technology between It and Q345 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 109-113.
- [5] 张焱, 许天早. 焊接工艺参数对埋弧焊焊接接头力学性能影响的研究进展[J]. 石油化工设备, 2023, 52(2): 64-69.
ZHANG Y, XU T H. Research Progress on the Influence of Welding Process Parameters on Submerged Arc Welding Joint Mechanical Properties[J]. Petro-Chemical Equipment, 2023, 52(2): 64-69.
- [6] 王振民, 李栩延, 唐嘉健, 等. 高效埋弧焊工艺及设备的研究进展[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11): 1-8.
WANG Z M, LI X Y, TANG J J, et al. Development of High Efficiency Submerged Arc Welding Process and System[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(11): 1-8.
- [7] 张德勤, 田志凌, 杜则裕, 等. 热输入对 X65 钢焊缝金属组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 31-33.
ZHANG D Q, TIAN Z L, DU Z Y, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Weld Metal in X65 Steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(5): 31-33.
- [8] 张德勤, 雷毅, 刘志义. 微合金钢焊缝金属中的针状铁素体[J]. 石油大学学报, 2003, 27(4): 141-145.
ZHANG D Q, LEI Y, LIU Z Y. Acicular Ferrite in Weld Metal of Microalloy Steel[J]. Journal of the University of Petroleum, 2003, 27(4): 141-145.
- [9] 陈浩, 张晓, 朱瑞芳. Q355 钢焊接性及其与 Q345 钢焊接技术的关键比较[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 109-113.
CHEN H, ZHANG X, ZHU R F. Weldability of Q355 Steel and Key Comparison of Welding Technology between It and Q345 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 109-113.
- [10] 陈韶斌. Q345R 双面埋弧焊接头组织分析[J]. 化学工程与装备, 2014(7): 129-131.
CHEN S B. Microstructure Analysis of Q345R Double-Sided Submerged Arc Welding Joint[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2014(7): 129-131.
- [11] 吴传涛, 许祥平, 邹家生. 热输入对 F460Z 高强度埋弧焊焊接接头微观组织及性能的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(11): 10-14.
WU C T, XU X P, ZOU J S. Effect of Heat Input on Microstructure and Properties of Submerged Arc Welded Joint of F460Z High Strength Steel[J]. Welding Technology, 2017, 46(11): 10-14.
- [12] 赵卫平, 王振兴, 纪强溪, 等. 高强度埋弧焊接圆钢管多层多道焊接数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 124-131.
ZHAO W P, WANG Z X, JI Q X, et al. Numerical Simulation of High-Strength Submerged Arc Welded Circular Steel Tubes with Multi-Layer and Multi-Pass Welding[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 124-131.
- [13] 王佳骥, 李宇梁, 韩严法, 等. 大线能量焊接埋弧焊丝熔敷金属组织和性能研究[J]. 鞍钢技术, 2020(4): 30-34.
WANG J J, LI Y L, HAN Y F, et al. Study on Microstructures and Properties of Deposited Metal of Submerged Arc Welding Wires for High Heat Input Welding[J]. Angang Technology, 2020(4): 30-34.
- [14] 陈群燕. 16Mn 钢双丝埋弧焊工艺及接头性能研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.
CHEN Q Y. Study on Double-wire Submerged Arc Welding Technology and Joint Performance of 16Mn Steel[D]. Chengdu: Xihua University, 2009.
- [15] 刘静, 隋国欣, 王明山, 等. 机车车体 Q345E 钢 Ar+CO₂+O₂ 三元混合保护气体 MAG 焊接头的组织和性能[J]. 电焊机, 2017, 47(5): 104-108.
LIU J, SUI G X, WANG M S, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Welded Joints of MAG Welding with Ar+CO₂+O₂ Ternary Mixed Shielding Gas of Steel Q345E for Locomotive and Rolling Stock Body[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(5): 104-108.
- [16] 许慧. 新型堆焊焊条与耐磨堆焊层的组织性能研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
XU H. Study on Microstructure and Properties of New Surfacing Covered Electrode and Wear-resistant Surfacing Layer[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [17] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
Welding Society of China Mechanical Engineering Society. Welding Metallographic Map[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [18] 蔡立民. MZS-1250 型双弧双丝埋弧焊设备及工艺[J]. 电焊机, 2006, 36(4): 29-31.

- CAI L M. Double-Arc Double-Wire SAW Equipment MZS-1250 and Technology[J]. *Electric Welding Machine*, 2006, 36(4): 29-31.
- [19] 岳宗格. 大型磨机端盖铸造工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- YUE Z G. Research on Casting Technology of Large Mill End Cover[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [20] 李宗义, 王泽荫, 马跃洲. Q345 钢的埋弧焊工艺及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2011, 40(17): 173-174.
- LI Z Y, WANG Z Y, MA Y Z. Study on Process Parameters and Properties of Q345 Steel in Using Submerged Arc Welding[J]. *Hot Working Technology*, 2011, 40(17): 173-174.
- [21] 甘红勇. 浅谈 Q345 钢构件埋弧焊焊接工艺[J]. *中国科技博览*, 2012(5): 16-19.
- GAN H Y. Discussion on Submerged Arc Welding Process of Q345 Steel Member[J]. *China Science and Technology Expo*, 2012(5): 16-19.
- [22] 田振卓. 变形和冷却对轴承钢 GCr15 相变和组织的影响规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015: 30-42.
- TIAN Z Z. Effect of Deformation and Cooling on Phase Transformation and Microstructure of GCr15 Bearing Steel[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015: 30-42.
- [23] 孙秀伟, 梁国俐. 焊接热输入对低合金高强度船板钢热影响区组织和性能的影响[J]. *电焊机*, 2019, 49(10): 97-100.
- SUN X W, LIANG G L. Effects of Welding Heat Input on CGHAZ Microstructures and Mechanical Properties for High Strength Low Alloy Steel[J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49(10): 97-100.
- [24] 李金梅, 杨兆庆, 梁小武, 等. 热输入对 09MnNiDR 钢焊接热影响区粗晶区组织和韧性的影响[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(12): 72-77.
- LI J M, YANG Z Q, LIANG X W, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Toughness of Welding Coarse-Grained Heat Affected Zone of 09MnNiDR Steel[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(12): 72-77.
- [25] 余圣甫, 杨可, 雷毅, 等. 大热输入焊接高强度低合金钢热影响区的晶粒细化[J]. *焊接学报*, 2008, 29(3): 17-20.
- YU S F, YANG K, LEI Y, et al. Grain Refinement of Heat Affected Zone of High Strength Low Alloy Steel by Large Heat Input Welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(3): 17-20.
- [26] 胡彬, 马凯夫, 彭玲阳. 基于焊接热输入对 16MnDR 钢焊接接头的影响研究[J]. *金属加工(热加工)*, 2021(4): 66-70.
- HU B, MA K F, PENG L Y. Study on the Influence of Welding Heat Input on Welded Joints of 16MnDR Steel[J]. *Metal Working*, 2021(4): 66-70.
- [27] 马清波, 黄显峰, 黄君辉, 等. 不同热输入条件下 Q345E 低合金钢焊接过热区的组织和冲击性能[J]. *电焊机*, 2019, 49(12): 95-98.
- MA Q B, HUANG X F, HUANG J H, et al. Microstructure and Impact Toughness of Welding Superheated Zone of Q345E Low Alloy Steel under Different Heat Input Conditions[J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49(12): 95-98.