

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.10

34CrNi1Mo+Q355B 异种钢高效埋弧焊接工艺研究

李园园^{1,3}, 李利霞^{1,3}, 娄安东^{1,2}, 王孟阳¹

1. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039
2. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001
3. 智能矿山重型装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039

摘要: 针对中碳调质钢34CrNi1Mo与低合金钢Q355B异种焊接时冷裂纹敏感性高、碳迁移显著及接头性能不均等难题,开展了高效埋弧焊接工艺研究。基于低强匹配原则,选用H10Mn2焊丝与SJ101焊剂组合,并制定了包含预热(200~250℃)、控制层间温度及焊后560℃×8h退火的关键工艺。试验结果表明,所得接头力学性能优异:抗拉强度(≥490 MPa)满足Q355B母材要求且断裂发生于母材;焊缝、34CrNi1Mo侧热影响区、Q355B侧热影响区的20℃冲击功均值分别为106.3 J、125.2 J、182.2 J;显微硬度呈梯度分布,34CrNi1Mo侧热影响区最高(平均314 HBW),Q355B母材最低(平均163 HBW)。金相分析显示焊缝组织为贝氏体+铁素体,热影响区组织过渡均匀。本研究证实所开发的埋弧焊工艺可实现34CrNi1Mo与Q355B异种钢的高质量连接,为工程应用提供了可靠依据。

关键词: 中碳调质钢; 异种钢焊接; 埋弧焊; 低强匹配; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0072-07

Study on the High-Efficiency SAW Process of 34CrNi1Mo/Q355B Dissimilar Steel Joints

LI Yuanyuan^{1,3}, LI Lixia^{1,3}, LOU Andong^{1,2}, WANG Mengyang¹

1. Citic Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China
2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China
3. State Key Laboratory of Intelligent Mining Heavy Equipment, Luoyang 471039, China

Abstract: To address the challenges of high cold cracking susceptibility, significant carbon migration, and mismatched joint properties in welding dissimilar steels between medium-carbon quenched and tempered steel 34CrNi1Mo and low-alloy structural steel Q355B, this study investigates a high-efficiency Submerged Arc Welding (SAW) process. Based on the undermatching principle, a combination of H10Mn2 welding wire and SJ101 flux was selected, supported by key procedures including preheating (200-250 °C), strict interpass temperature control, and post-weld annealing at 560°C for 8 hours. Mechanical tests demonstrate excellent joint performance: the tensile strength (≥490 MPa) meets the design requirement, with fractures consistently occurring in the Q355B base metal; the average impact energies at 20°C are 106.3 J for the weld metal, 125.2 J for the heat-affected zone (HAZ) on the 34CrNi1Mo side, and 182.2 J for the HAZ on the Q355B side, all exceeding the respective base metal requirements; microhardness exhibits a gradient distribution, with the highest average value in the HAZ on the 34CrNi1Mo side (314 HBW) and the lowest in the Q355B base metal (163 HBW). Metallographic analysis reveals a weld microstructure consisting of bainite and ferrite, with a reasonable microstructural transition in both HAZs and no welding defects. This process successfully achieves high-quality and efficient joining of 34CrNi1Mo and Q355B dissimilar steels, providing reliable parameters for engineering applications.

Keywords: medium carbon quenched and tempered steel; dissimilar steel welding; SAW; undermatching; mechanical properties; microstructure

收稿日期: 2025-01-09 修回日期: 2025-01-25

作者简介: 李园园(1990—), 学士, 工程师, 主要从事焊接工艺技术等方面研究工作。E-mail: haustlyy@126.com。

引用格式:李园园,李利霞,娄安东,等. 34CrNi1Mo+Q355B 异种钢高效埋弧焊接工艺研究[J]. 电焊机,2025,55(12):72–78.
Citation:LI Yuanyuan, LI Lixia, LOU Andong, et al. Study on the High-Efficiency SAW Process of 34CrNi1Mo/Q355B Dissimilar Steel Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 72–78.

0 引言

随着机械制造领域越来越多地采用异种钢连接结构,异种材料焊接也受到广泛重视^[1]。针对异种材料焊接,要综合评估选择合适的焊接方法、焊接工艺,才能获得具有良好性能的焊接接头。34Cr-Ni1Mo 是中碳调质钢,因其易获得均匀的强度、高的塑性、韧性、疲劳强度及较好的切削加工性能,已成为轴类、齿轮类零件的优选材料,但是其碳当量高,淬硬倾向大,具有很高的冷裂纹敏感性,焊接难度大^[2]。Q355B 钢是一种低合金结构钢,其碳及合金元素的含量均较低,塑性、抗高温蠕变性强,耐腐蚀性与焊接性能好,在各类工程结构中得到了广泛应用^[3]。埋弧焊是一种高效的焊接方法,有优质、深熔能力强、熔敷率高等特点,所具有的优势是其他焊接方法无法相比的。迄今为止,国内针对 34Cr-Ni1Mo 和 Q355B 两种材料焊接的研究很少,为了实现 34CrNi1Mo+Q355B 异种钢优质、高效焊接,本文采用高效埋弧自动焊接方法,开展焊接工艺试验,研究焊接接头的力学性能和微观组织,为实际生产制造提供有效指导。

1 34CrNi1Mo 与 Q355B 材料焊接性分析

试验母材 34CrNi1Mo 钢供货状态为调质态, Q355B 钢供货状态为热轧态;34CrNi1Mo 钢化学成分和机械性能如表 1、表 2 所示。Q355B 钢化学成分和机械性能如表 3、表 4 所示。

材料焊接性通常采用碳当量法进行衡量,当碳

表 1 34CrNi1Mo 钢化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of the 34CrNi1Mo steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr
0.30~0.38	0.17~0.37	0.4~0.7	1.4~1.7
Ni	Mo	S	P
1.4~1.7	0.15~0.30	≤0.025	≤0.025

表 2 34CrNi1Mo 钢机械性能

Table 2 Mechanical properties of the 34CrNi1Mo steel

抗拉强度	屈服强度	延伸率	断面收缩率	冲击功(20℃)
/MPa	/MPa	/%	/%	KV2/J
900~1 100	≥700	≥12	≥55	≥45

表 3 Q355B 钢化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of the Q355B steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S
≤0.14	≤0.50	≤1.6	≤0.3	≤0.5	≤0.1	≤0.035
P	Cu	N	Nb	V	Ti	
≤0.035	≤0.4	≤0.015	≤0.1	0.01~0.10	0.006~0.050	

表 4 Q355B 钢机械性能

Table 4 Mechanical properties of the Q355B steel

抗拉强度	屈服强度	延伸率	断面收缩率	冲击功
/MPa	/MPa	/%	/%	Akv/J
470~630	≥335	≥19	≥55	≥27(20℃)

当量 $Ceq \leq 0.45\%$, 焊接性良好; $0.45\% < Ceq < 0.6\%$ 时, 焊接性较好; $Ceq \geq 0.6\%$ 时焊接性差。

根据国际焊接学会(IIW)推荐的碳当量计算公式:

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

中碳调质钢 34CrNi1Mo 的含碳量较高,加入的合金元素也较多,经上述公式计算,其碳当量 Ceq 达 0.77%~1.01%,焊接性差,焊接热影响区容易产生大量粗大的高碳马氏体^[4],具有较高的焊接淬硬性和冷裂纹敏感性。

Q355B 是在 16Mn 的基础上添加 V、Ti、Nb 元素从而析出碳化物和氮化物来提高强度并细化晶粒的一种低合金高强钢,综合力学性能良好^[4]。经上述公式计算 Q355B 碳当量 $Ceq \leq 0.45$,其淬硬倾向不太明显,冷裂纹不太敏感,焊接性良好。

34CrNi1Mo+Q355B 两种材料的焊接属于异种钢焊接,由于两种金属之间及母材与填充材料之间的组织不同、强度等级不同、化学成分不同,导致其焊接性远远差于同种金属材料的焊接^[3],接头易发生脆化或软化、易产生熔合区和焊缝区的焊接冷裂纹、焊接接头性能劣于母材等问题,因此需要制定

合适的焊接工艺以保证该异种钢焊接接头的强韧性。

2 焊接工艺试验

2.1 焊接方法和焊接材料

焊接方法的选择需兼顾焊接效率、接头质量稳定性及母材焊接性特点。埋弧焊作为一种高效的熔焊方法,具有能量密度集中、效率高、工人的劳动强度小、焊接环境好、焊缝的内在质量易保证等优点。张云孟等^[5]提出了对于以调质状态供货的钢材选择焊接方法以热量愈集中、能量密度愈大的方法愈好,CO₂焊是较为适宜的焊接方法,其次是埋弧焊。因此,本次对 34CrNi1Mo+Q355B 焊接试验采用埋弧焊的焊接方法。

34CrNi1Mo 的碳含量在 0.3%~0.38% 之间,比 Q355B 的碳含量($\leq 0.14\%$)高一倍以上,二者焊接时会存在碳浓度梯度,焊缝在熔合区附近会形成碳迁移扩散层,根据扩散原理焊接过程中部分碳原子会从高浓度向低浓度迁移。碳迁移扩散层的形成会引起熔合区材料性能发生突变,为保证焊接接头性能圆滑过渡,焊接时要正确选择填充材料^[4]。

李亚江等^[6]通过对 $\sigma_s \geq 1\ 300\ \text{MPa}$ 和 $\sigma_s \geq 700\ \text{MPa}$ 异种钢的焊接性进行研究,提出了防止焊缝产生裂纹最主要的措施是正确选择焊接填充材料,采用“低强匹配”焊接材料进行焊接,可以使焊缝强度达到甚至超过 $\sigma_s \geq 700\ \text{MPa}$ 强度。

高杰等^[7]提出了针对不同强度级别的低合金高强度钢焊接,为防止焊缝产生裂纹最主要的措施是正确选择焊接填充材料,采用“低强匹配”焊接材料进行焊接,采用“低强匹配”原则选择焊材不能一味追求“低强”,要与母材的强度匹配。

王振家等^[5,8]提出了,焊缝低强组配可以降低预热温度,在难以实现实际等强组配时,焊缝低强组配较超强组配更合理。同时低强度焊缝金属在高强度母材的拘束下强度会提高。

综合上述论述,针对 34CrNi1Mo+Q355B 两种不同强度级别的钢的焊接,按照低强匹配原则选择与 Q355B 化学成分和强度相近的焊接材料。同时综合考虑焊缝金属的塑韧性及抗裂性能^[6,9],选择焊

材 H10Mn2($\varnothing 4\ \text{mm}$)和匹配焊剂 SJ101,焊接材料的力学性能如表 5 所示。焊剂焊前按照厂家提供的材质书进行烘干处理,烘干温度 400 °C,保温 90 min。焊接试验参考标准为 AWS D1.1/D1.1M—2015《美国钢结构焊接规范》。

表 5 焊接材料的力学性能

数值	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	冲击功 KV2 /J(-20 °C)
规范值	490~670	≥ 390	≥ 18	≥ 27
实测值	520	398	32	141.8

2.2 焊接接头形式及焊接设备

按照焊接工艺评定标准 AWS D1.1《美国钢结构焊接规范》设计 34CrNi1Mo+Q355B 的焊接坡口形式,采用 K 形对接坡口、连续焊接,试板焊后规格为 $\delta=40\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$,焊缝长度 400 mm,焊接接头形式如图 1 所示。焊接设备采用埋弧自动焊机,设备型号 ZP5(E)-1250。

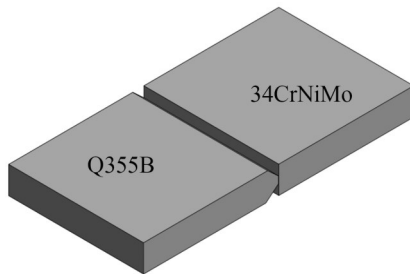


图 1 焊接接头形式示意

Fig. 1 Welding groove form

2.3 焊接工艺参数及技术措施

34CrNi1Mo+Q355B 异种钢的焊接工艺参数及技术措施的制定主要从防止冷裂纹和避免软化出发。由于 34CrNi1Mo 钢的碳当量高,冷裂性敏感性和淬硬倾向都很大,在制定焊接工艺时必须采取预热、控制层间温度、选择合理的焊接规范及焊后及时热处理等措施^[7-8]。

2.3.1 焊前预热

碳当量高、冷裂纹敏感性大的钢易产生焊接裂纹,因此焊前必须预热,其目的是降低焊接接头的冷却速度,减少马氏体淬硬组织的产生,从而改善焊接接头组织,以降低产生冷裂纹的几率^[9,12]。在焊前预热或焊后热处理的工艺参数选择中,常以异种钢中合金成分较高的钢种为依据^[10,13]。为保证

34CrNi1Mo+Q355B 焊接接头不出现焊接裂纹, 根据 34CrNi1Mo 材质斜 Y 型坡口试验结果, 同时考虑改善工人作业环境、降低工人劳动强度, 焊前预热温度 200~250 ℃。

2.3.2 层间温度及打磨

焊接过程中要严格控制层间温度, 层间温度过高, 焊接接头晶粒容易粗化, 会使焊缝强度和低温韧性下降。层间温度过低, 焊接过程中接头冷却速度过快容易形成淬硬组织, 同时影响扩散氢的溢出, 试验是控制层间温度 200~250 ℃。同时进行层间打磨, 清除焊接过程中形成的飞溅、焊渣以及氧化皮, 提高焊道之间的熔合性, 提高焊缝质量。

2.3.3 焊接参数控制

焊接采用多层多道埋弧焊接, 打底层电弧电压 27~30 V, 焊接电流为 450~500 A, 焊接速度为 250~400 mm/min, 其余层电弧电压 28~33 V, 焊接电流 500~650 A, 焊接速度 300~420 mm/min。

2.3.4 焊后热处理

焊后进行热处理, 一方面可以降低或消除焊接残余应力, 防止焊接裂纹产生, 另一方面可以改善焊接接头显微组织状况, 增加组织稳定性, 同时改善母材、焊缝及焊接热影响的性能, 提高焊接接头塑性及焊件整体强度和韧性^[1,11,14]。对该异种钢接头采用焊后进炉退火, 退火温度 560 ℃, 保温 8 h, 炉冷。

2.3.5 焊缝无损探伤及性能检测

对焊缝进行无损(超声波和磁粉)探伤检查, 均合格。然后对试样进行性能检测, 分析试验结果是否符合技术和标准要求。根据标准 AWS D1.1/1.1M—2015 对焊接接头进行板状拉伸、横向侧弯、冲击、硬度、宏观及微观金相组织等检测项目。

3 试验结果和分析

3.1 焊接接头性能

34CrNi1Mo/Q355B 异种钢焊接接头按照标准 AWS D1.1/1.1M—2015 进行力学性能试验。

(1)对焊接接头进行拉伸试验, 试验结果如表 6 所示。4 个试样的焊接接头的抗拉强度均达到母材的抗拉强度要求(Q355B 母材抗拉强度大于等于

470 MPa), 焊接接头强度与母材匹配。根据 AWS D1.1/D1.1M—2015 标准, 抗拉强度不应小于所用母材规定抗拉强度范围内的最小值, 结果完全符合标准要求。

表 6 拉伸试验结果

Table 6 The results of tensile test					
试样 编号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断面收缩率 /%	断裂 位置	结果
1-1	440	528	24	母材	合格
1-2	415	517	23.5	母材	合格
1-3	403	503	24.5	母材	合格
1-4	392	490	26	母材	合格

(2)对焊接接头进行侧弯弯曲试验, 试验结果如表 7 所示。根据 AWS D1.1/D1.1M—2015 标准, 对已经弯曲的试样凸面的表面不连续性进行目检, 表面的不连续性不超过任何方向上的 3 mm、1 mm<d≤3 mm 缺陷的最大尺寸总和为 10 mm, 判定为合格试样。由弯曲试验结果可知, 所得异种钢焊接接头弯曲试样表面未出现裂纹、气孔等缺陷, 完全符合标准要求, 弯曲性能合格。

表 7 弯曲试验结果

Table 7 The results of bending test			
试验编号	弯曲类型	结果	备注
2-1	侧弯	合格	压头半径 R=20 mm, 弯曲角度 180°
2-2			
2-3			
2-4			

(3)对焊接接头进行冲击试验, 试样尺寸均为 10 mm×10 mm×55 mm, 试验温度为 20 ℃, 试验结果如表 8 所示。根据 AWS D1.1/D1.1M—2015 标准, 焊缝及热影区的冲击吸收功均不得低于母材规定的最低值。由结果显示可知, 完全符合标准要求。

(4)对焊接接头进行目视低倍试验, 试验结果如图 2 所示。焊缝的低倍试样上没有发现裂纹、气孔、夹渣、未熔合等缺陷, 焊缝熔合良好, 符合标准要求。

3.2 焊接接头硬度分布

分别测试了母材、热影响区和焊缝金属的显微硬度值, 每个区域测试 3 个点, 显微硬度结果如表 9 所示。分别取母材、热影响区和焊缝金属硬度平均值作为各区域的平均硬度, 试样焊接接头的区域显微硬度分布情况如图 3 所示。

表8 冲击试验结果

Table 8 The results of impact test

试样 编号	位置	冲击吸收能量 KV2/J	冲击吸收能量平均值 KV2/J
3-1	焊缝区	121.5	106.3
3-2		92.3	
3-3		105	
3-4	34CrNi1Mo 热影响区	124.4	125.2
3-5		139.8	
3-6		111.5	
3-7	Q355B 热影响区	214.5	182.2
3-8		150.7	
3-9		181.3	



图2 焊缝低倍形貌

Fig. 2 Low magnification morphology image of weld seam

根据试样的显微硬度值显示,靠近 34CrNi1Mo 一侧硬度值较高,靠近 Q355B 一侧硬度较低。无论是 34CrNi1Mo 侧还是 Q355B 侧,热影响区的硬度值均高于相应母材侧硬度值。34CrNi1Mo 侧 HAZ 区硬度值最高,平均硬度 314 HBW;Q355B 侧母材硬度值最低,平均硬度 163 HBW。

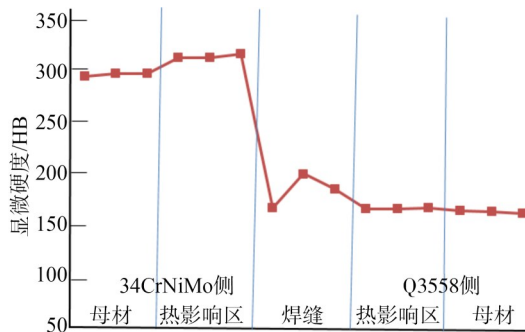


图3 显微硬度分布

Fig. 3 Microhardness distribution map

表9 显微硬度结果(HBW)

Table 9 The results of microhardness(HBW)

区域	硬度/HBW
34CrNi1Mo 母材	295, 298, 298
34CrNi1Mo 热影响区	313, 313, 317
焊缝	167, 200, 185
Q355B 热影响区	166, 166, 167, 164
Q355B 母材	163, 161

3.3 焊接接头金相组织

对 34CrNi1Mo+Q355B 异种钢焊接接头进行微观金相组织分析,焊接接头微观金相组织如表 10 所示。

表10 接头微观金相组织

Table 10 Microscopic metallographic structure of the joint

区域	微观组织
34CrNi1Mo 母材	回火索氏体
34CrNi1Mo 热影响区	回火索氏体+铁素体
焊缝	贝氏体+铁素体
Q355B 热影响区	贝氏体+铁素体
Q355B 母材	铁素体+珠光体

接头各区金相显微组织照片如图4所示。Q355B 母材区主要为铁素体+珠光体,晶粒度 10 级,晶粒细小,综合力学性能良好。Q355B 侧热影响区主要为贝氏体+铁素体,晶粒度 9.5 级。另外由于碳迁移扩散层的形成,靠近热影响区的 Q345B 侧形成增碳层,其强度和硬度较 Q355B 母材均有所提高。

34CrNi1Mo 母材区主要为回火索氏体,其碳化物分散度很大,呈球状,晶粒度 9 级,有很好的韧性和强度。34CrNi1Mo 侧热影响区主要为回火索氏体和铁素体,晶粒度 9 级,其组织分布不均匀,其硬度值较 34CrNi1Mo 母材区高,说明在热影响区存在一定淬硬。

焊缝区显微组织主要为贝氏体+铁素体组织,晶粒度 9 级,接头拉伸试验的断裂位置均在 Q355B 母材,说明焊缝具有较高的强度和很好的韧性。

通过以上分析可知,焊后热处理的焊接接头组织状况良好,具有良好的综合机械性能,验证了制定的焊接工艺是正确的,可以用于实际的焊接结构件生产。

4 结论

(1)采用“低强匹配”原则,选用 H10Mn2+SJ101 焊接材料,配合 200~250℃预热与层间温度控制,并结合 560℃×8 h 焊后退火处理,能够有效抑制 34CrNi1Mo 侧冷裂纹的产生,保障焊接过程稳定。

(2)所获焊接接头综合力学性能优异,满足 AWS D1.1/1.1M-2015 标准要求。接头抗拉强度(≥490 MPa)符合设计要求,且断裂均位于母材。接头

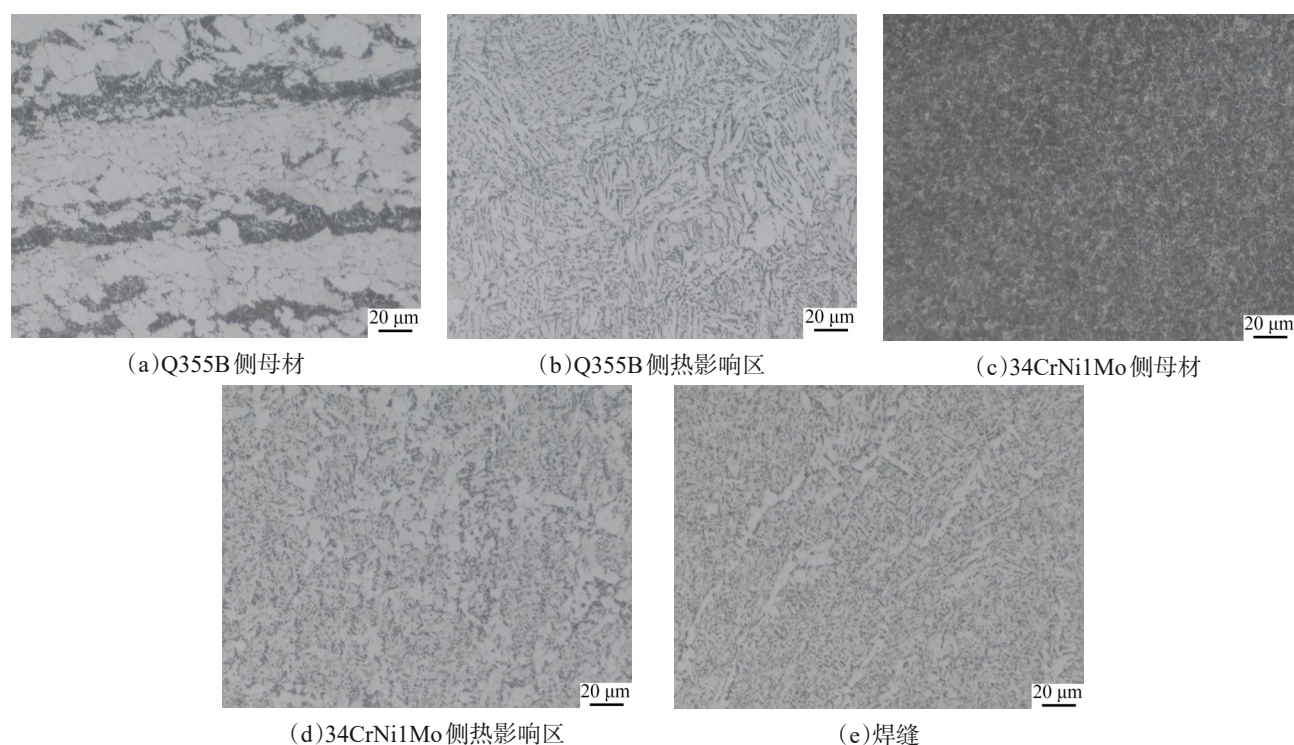


图 4 接头各区金相显微组织

Fig. 4 Metallographic microstructure of joints

在 20℃ 下表现出良好的韧性储备, 焊缝、34CrNi1Mo 侧热影响区及 Q355B 侧热影响区的冲击功平均值分别为 106.3 J、125.2 J 与 182.2 J, 满足标准要求。

(3) 接头显微硬度呈平缓分布, 34CrNi1Mo 侧热影响区平均硬度最高 (314 HBW), Q355B 母材最低 (163 HBW)。金相分析表明, 焊缝组织以贝氏体+铁素体为主, 两侧热影响区组织分别为贝氏体+铁素体 (Q355B 侧) 与回火索氏体+铁素体 (34CrNi1Mo 侧), 组织过渡连续, 无明显焊接缺陷。

本研究验证了采用高效埋弧焊实现该异种钢优质连接的可行性。提出的工艺参数与措施, 为解决高碳当量调质钢与低合金钢的焊接难题提供了明确的技术路径和可靠的数据支撑, 对工程应用具有指导价值。

参考文献:

- [1] 潘春旭, 孙国正. 异种钢焊接性的研究现状和进展[J]. 水利电力机械, 1998(3): 42-46.
PAN C X, SUN G Z. Present Research and Trends in the Dissimilar Steel Weldability[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 1998(3): 42-46.
- [2] 顾枉熹, 王宗杰. 34CrNi3Mo 低合金高强度调质钢焊接冷裂纹敏感性的研究[J]. 机械设计与制造, 1983(06): 1-9.
- [3] 叶景峰, 吴蔚峰, 林羿杰, 等. 35CrMnSi 与 Q355B 异种材料焊接工艺[J]. 机械工程与自动化, 2023(5): 138-140+143.
- [4] 蒋艳, 谢玥. ZG35Cr1Mo 与 Q345B 异种钢的焊接工艺[J]. 价值工程, 2013(13): 49-50.
- [5] 王振家, 陈伯鑫, 弋成东. 为较高强度的结构钢选择焊接材料须考虑的两个因素[J]. 热加工工艺, 2004(8): 47-50.

GU W X, WANG Z J. Research on the Cold Crack Sensitivity of Welding for 34CrNi3Mo Low-Alloy High-Strength Quenched and Tempered Steel[J]. Machinery Design & Manufacture, 1983(06): 1-9.

YE J F, WU W F, LIN Y J, et al. Welding Process of 35CrMnSi and Q355B Dissimilar Materials [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023 (5) : 138-140+143.

JIANG Y, XIE Y. Welding Technology of Dissimilar Steel ZG35Cr1Mo and Q345B [J]. Value Engineering, 2013(13): 49-50.

WANG Z J, CHEN B L, YI C D. Two Factors About Selecting Welding Material for HSLA Steel [J]. Hot Working Technology, 2004(8): 47-50.

- [6] 章友谊,孙学杰,冉传海.35CrMoA+S275NL 异种钢焊接工艺研究[J].电焊机,2011,41(12):57-61.
ZHANG Y Y, SUN X J, RAN C H. Study on welding processing of dissimilar steel 35CrMoA+S275NL [J]. Electric Welding Machine, 2011(12): 57-61.
- [7] 薛根奇,张国平,陈思远.中碳调质钢 30CrNi3 焊接工艺及生产应用[J].电焊机,2013,43(7):33-36.
XUE G Q, ZHANG G P, CHEN S Y. Research and application of welding procedure on 30CrNi3 [J]. Electric Welding Machine, 2013(7): 33-36.
- [8] 刘蔚倩.中碳调质钢 34CrNiMoA 焊接性研究[J].邵阳学院学报(自然科学版),2006(1):29-30.
LIU W Q. A Research on Welding Quality of Central-carbon Steel 34CrNi3MoA [J]. Journal of Shaoyang University: Natural Science Edition, 2006(1): 29-30.
- [9] 刘须收,肖德政,吴建英.中碳调质钢 30CrNiMo8 与 S355JR 异种钢的焊接[J].金属加工(热加工),2013(18):34-36.
LIU X S, XIAO D Z, WU J Y. Welding of medium carbon quenched and tempered steel 30CrNiMo8 and dissimilar steel S355JR [J]. MW Metal Forming, 2013(18): 34-36.
- [10] 曾鑫,雷安胜,胡鹏,等.异种钢焊接缺陷产生原因及控制措施分析研究[J].建筑技术,2023(10):105-108.
ZENG X, LEI A S, HU P, et al. Analysis on the Causes and Control Measures of Dissimilar Steel Welding Defects [J]. Architecture Technology, 2023(10): 105-108.
- [11] 孟庆森.金属焊接性基础[M].化学工业出版社,2010(5):60-66.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 49 页

- Machinery, 2021, 39(3): 54-58.
- [6] 刘旺. X65 管道全位置 STT 自动根焊工艺研究及疲劳性能优化[D]. 天津:天津大学,2022.
LIU W. Study on all-position automatic root-pass welding processes of the X65 pipeline by STT technology and the optimization of fatigue property for its joint [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [7] 陈振东. X65 管道 CMT 根焊工艺及焊缝背面成形控制研究[D]. 天津:天津大学,2023.
CHEN Z D. Study on root-pass welding process of the X65 pipeline by CMT technology and its backside weld geometry control [D]. Tianjin: Tianjin University, 2023.
- [8] 丁晓明,魏海荣. GMAW 工艺仰焊咬边缺陷的研究分析与控制[J]. 锅炉制造,2024(6):28-31.
DING X M, WEI H R. Research, analysis and control of undercut defects on GMAW process overhead welding [J]. Boiler Manufacturing, 2024(6): 28-31.
- [9] 郑明涛. 耐热合金钢管子-管板仰焊工艺研究及应用[J]. 压力容器,2021,38(7):81-86.
ZHENG M T. Research and application of heat-resisting alloy steel tube-to-tubesheet welding process in overhead position [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(7): 81-86.
- [10] 冯靖,武少杰,高洪明,等. 基于熔池受力的全位置 STT 打底焊分段工艺[J]. 焊接,2022(2):1-5.
FENG J, WU S J, GAO H M, et al. Subsection process of all-position STT backing welding based on the force in molten pool [J]. Welding & Joining, 2022(2): 1-5.
- [11] Rokhlin S I, Guu A C. A study of arc force, pool depression, and weld penetration during gas tungsten arc welding [J]. Welding Journal, 1993, 72(8): 381-390.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>