

Q235钢窄间隙TIG焊接头的组织性能

高辉, 陆宇, 程进才, 林渊浩, 王伟

(北京石油化工学院北京市高等学校能源工程先进连接技术中心, 北京 102617)

摘要 对Q235厚壁管材对接深U型坡口进行了窄间隙TIG焊,对焊接接头进行拉伸、弯曲、冲击等力学性能试验,用金相显微镜、电子显微镜、电化学工作站和硬度计对接头的显微组织、断口形貌、硬度和耐蚀性进行分析。结果表明:Q235碳素钢窄间隙TIG焊接接头具有良好的焊接性和力学性能;焊接接头的平均抗拉强度为450 MPa,平均伸长率为26.3%,拉伸断口呈现明显韧窝形貌;焊缝区的平均冲击功为91.1 J,热影响区平均冲击功为60.1 J,冲击断口以准解理断裂为主;焊缝区组织重结晶形成细小等轴晶体,提高了硬度和抗拉强度,热影响区组织为粗大的铁素体和珠光体,但由于材料均匀性遭到破坏,耐蚀性明显低于焊缝区和母材区。

关键词 窄间隙TIG焊;焊接接头;显微组织;力学性能;腐蚀行为

中图分类号 TG457.11

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2025)06-0037-06

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250725.001

Study on microstructure and properties of narrow gap TIG welded joints of Q235 steel

GAO Hui, LU Yu, CHENG Jincai, LIN Yuanhao, WANG Wei

(Engineering Research Center for Advanced Energy Connection Technology in Beijing University,
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract In this study, narrow-gap TIG welding was performed on the butt joint of Q235 thick-walled pipes featuring a deep U-shaped groove. Subsequently, mechanical property evaluations, including tensile, bending, and impact tests, were conducted on the welded joints. Additionally, the microstructure, fracture morphology, hardness, and corrosion resistance of the joints were comprehensively analyzed using metallographic microscopy, electron microscopy, electrochemical workstations, and hardness testing equipment. The results show that the narrow-gap TIG welded joints of Q235 carbon steel exhibit excellent weldability and mechanical properties. The average tensile strength of the welded joint is approximately 450 MPa, and the average elongation is about 26.3%. The tensile fracture surface shows obvious dimple morphology. The average impact energy of the weld zone is 91.1 J, and that of the heat-affected zone is 60.1 J. The impact fracture surface is mainly quasi-cleavage fracture. The microstructure within the weld zone undergoes recrystallization, forming fine equiaxed grains, which enhances hardness and tensile strength. Notably, due to the disruption of material uniformity in the heat-affected zone (HAZ), the corrosion resistance of the HAZ is substantially lower than that of both the weld zone and the base metal zone.

Keywords narrow-gap TIG welding; welding joint; microstructure; mechanical properties; corrosion behavior

Q235钢广泛应用于工业和民用领域,其力学性能优秀,可加工性强,焊接性良好^[1-2]。然而在Q235厚壁管道焊接中,传统焊接技术普遍存在焊接效率低、焊材浪费多、焊接变形量大及焊接质量不稳定等问题^[3-5]。目前大厚度的Q235钢焊接,一般采用埋弧焊,但埋弧焊具有易使母材过热、增大焊接变形、工作量及设备复杂等缺点^[6-7],限制了其应用场景。

窄间隙TIG焊是一种针对厚板焊接的高效、高质量技术,具有减少焊接时的热输入,接头焊后残余应力减小,减少焊接变形,提高焊接质量和效率的优点^[8-10]。窄间隙TIG焊是通过在狭窄焊接空间内使用TIG焊,通过焊枪和焊丝的摆动,确保在深坡口内

侧壁熔合。窄间隙TIG焊由于其高效节能、质量可靠、适应性强及成本低等优势,在厚板结构的焊接方面具有广阔的应用前景^[11-14]。

本文作者采用窄间隙TIG焊对40 mm深坡口的Q235钢进行多层单道焊,分析了Q235钢焊接头显微组织、力学性能和耐蚀性,为Q235厚壁窄坡口焊接的工业化应用提供了理论基础。

1 试验与方法

1.1 材料

试验所用的Q235低碳钢厚壁管材的外径为220 mm,

收稿日期:2025-05-14;修回日期:2025-07-09

基金项目:国家重点研发计划课题(2023YFB3407705)

第一作者:高辉,男,副教授,硕士生导师。E-mail:gaohui@bipet.edu.cn。

通讯作者:王伟,女,副教授,硕士生导师。E-mail:shaodeqi@bipet.edu.cn。

内径为 120 mm, 长为 120 mm。用 MG-51T 低碳钢焊丝, 焊丝直径为 1.2 mm。母材和焊丝化学成分见表 1。

表 1 Q235 钢管材与焊丝化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of Q235 steel pipe and welding wire (mass fraction/%)

材料	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu	Cr
Q235	0.14~0.22	≤0.35	≤1.40	≤0.045	≤0.045	—	—	—
MG-51T	0.11	0.53	1.15	0.011	0.012	0.021	0.18	0.02

1.2 焊接试验

焊接设备选用自制窄间隙 TIG 焊枪, 焊接时钨极和焊丝同时摆动, 能够避免局部过热, 改善焊缝组织性能; 选用 EWM Tetrix 551 型焊接电源, 该焊接电源会按照所采用的钨极直径大小提供最佳的引弧效果, 从而保证焊接时电弧稳定及最佳的钨极端头球状成型效果; 选用的 EWM TigSpeed drive 45 hotwire 型送丝机, 采用动态送丝系统, 可以提高焊接速度和质量, 同时减少材料沉积, 有利于提高熔透性。

图 1 为焊接坡口尺寸示意图。对接焊管材的焊道

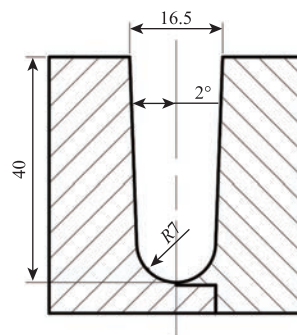


图 1 焊接坡口尺寸示意图(mm)

Fig.1 Schematic diagram of welding groove dimensions(mm)

深度为 40 mm, 所开的深 U 型坡口单边角度为 2° , 根部焊道半径为 7 mm。焊接前用无水乙醇对焊材进行清洗, 去除焊材表面的油污及氧化物等杂质, 并等待焊缝表面温度降至 180°C 后, 进行下一层焊接。钨极直径为 3.2 mm, 钨极伸出长度约为 3 mm, 保护气体采用 99.999% (质量分数) 的氩气, 焊接前 3 s 通气, 焊后 8 s 停气。窄间隙 TIG 焊接试验时, 焊接电压恒为 18 V, 其余焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 Q235 钢窄间隙 TIG 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters for narrow gap TIG of Q235 steel

区域	焊接电流/A	气流量/(L·min ⁻¹)	单侧摆角/(°)	摆动速度/(°·s ⁻¹)	送丝速度/(mm·min ⁻¹)	侧壁停留时间/s	焊接速度/(mm·min ⁻¹)
顶部	180~185	20	7~8	25	650~700	3~3.5	33~39
中部	175~180	19	6~7	22	550~600	2.5~3	26~33
根部	160~170	18	6~7	20	500~550	2~2.5	20~26

1.3 性能表征

用线切割设备沿垂直于焊缝截面方向截取 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的金相试样, 取样位置分别为顶部、中部及根部的焊缝中心和热影响区。试样经镶嵌、研磨和抛光后, 用质量分数为 4% 的硝酸酒精溶液进行侵蚀, 用 Leica DMI8C 光学显微镜进行金相的显微组织观察。对焊接接头的顶部、中部、根部分别取 3 个平行拉伸试样进行拉伸性能测试。取样方式和测试按照 GB/T 2651—2023 标准进行, 用 MTS 电子拉伸试验机进行横向拉伸试验。夏比冲击试验执行 GB/T 229—2020 标准, 测试温度为 23°C 。制样时, 用 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$, 带 2 mm 深的 V 形缺口的标准夏氏冲击试样, V 型缺口位置分别开在焊缝区及距离熔合线 2 mm 处的热影响区。对焊接管道顶部、中部、根部的每个待测区域截取 3 个冲击试样分别进行夏比冲击能测试。维氏硬度试验设定载荷为 100 g, 将压头缓慢压入试样表面, 施加压力持续时间 10 s 后卸除载荷。Q235 焊接接头的硬度测试点均从左侧母材延伸到右侧母材, 分别

对顶部、中部、根部进行选点测量。

电化学腐蚀试验在 Origaflex 多通道电化学工作站进行, 试验的工作电极为 Q235 接头试样, 试样尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 焊缝试样以镶嵌方式与铜制导线相连, 并对金属试样的表面进行打磨、抛光至表面光滑。焊接接头的电化学实验中, 以饱和甘汞电极作为参比电极, 铂电极作为辅助电极, 腐蚀溶液选择质量分数为 3.5% 的 NaCl, 设定扫描速率为 1 mV/s 。

2 结果与讨论

2.1 接头宏观形貌

图 2 为 Q235 钢窄间隙 TIG 焊缝正面形貌。由图 2 可知, 采用窄间隙 TIG 焊的 Q235 钢的焊缝呈现出细密的鱼鳞状, 无气孔、裂纹、未熔合和咬边等焊接缺陷。

Q235 钢的窄间隙 TIG 焊接接头横截面宏观金相如图 3 所示。可以看出, 焊接接头成型良好, 焊缝轮廓规则且层间衔接连贯。在焊接前后, 焊接角变形几乎为 0, 焊接接头几乎无变形, 与其他焊接方式相比,

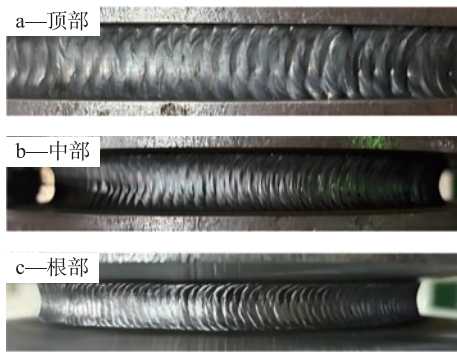


图2 各区域焊缝正面形貌

Fig.2 Surface morphology of welds in each area

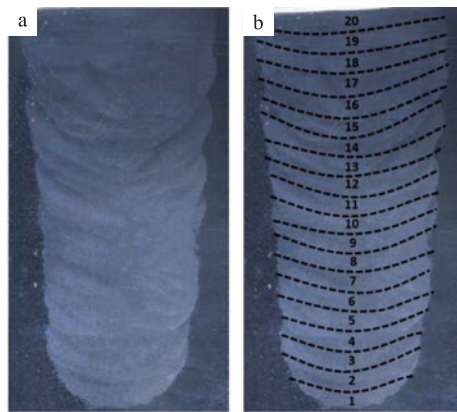


图3 焊接接头断面宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of cross-section of welded joint

窄间隙摆动TIG焊接时的热输入小,接头焊残余应力小,减小了焊接变形,最终使得焊缝成型良好。由于焊缝宽度较小,深度较大,为便于后续准确分析焊缝各区域组织和力学性能特点,将焊接接头分为上、中、下区域,分别为顶部(16~20层)、中部(7~15层)和根部(1~6层)。

2.2 接头显微组织

图4为Q235钢窄间隙TIG焊接接头的显微组织。由图4可知,由于焊接热输入的不同,焊接接头各区域的金相组织存在显著差异,内部组织呈现不均匀性。熔合区晶粒尺寸分布不均匀,熔合线靠近焊缝一侧的晶粒尺寸明显小于靠近过热区一侧,表现为密集细小等轴晶粒,而靠近过热区一侧因高温作用形成粗大晶粒。

焊缝区显微组织以细小的多边形铁素体(PF)和细密的珠光体(P)为主,焊缝区的晶粒度约为9级。焊接热输入导致部分铁素体和珠光体在加热阶段转变为奥氏体,高温下奥氏体晶粒通过晶界迁移发生粗化,在随后的冷却过程中,粗大奥氏体转变为细小的多边形铁素体和珠光体组织。本文采用多层焊道焊接工艺,

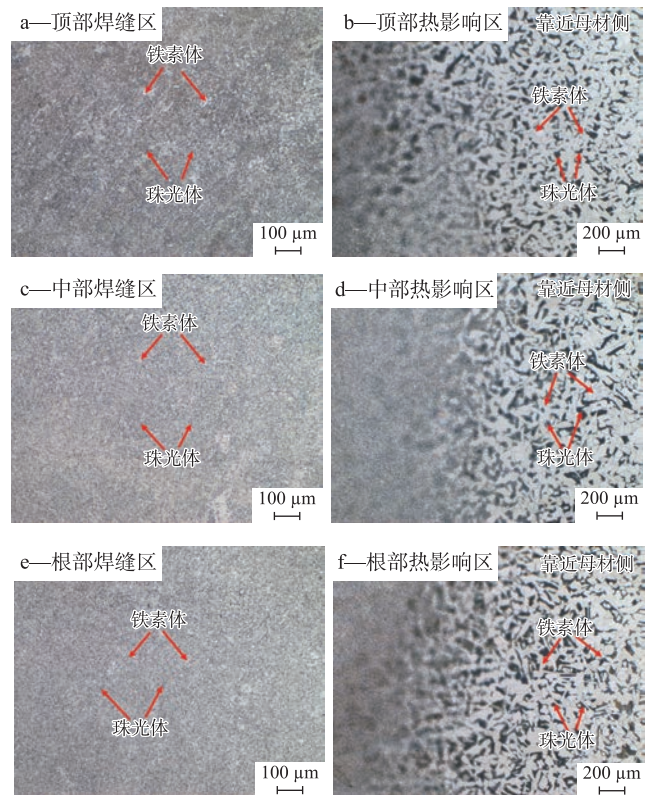


图4 焊接接头显微组织

Fig.4 Microstructure of welded joints

由于后续焊道对前一道焊缝的热循环作用,熔覆金属沿温度梯度方向向焊缝中心生长,形成等轴晶。同时,每一道焊接的热输入促使前一道焊缝组织发生相变和重结晶,进一步细化等轴晶粒^[15-16]。

热影响区是焊缝与母材之间的过渡区域,其组织演变受焊接热循环的显著影响。其中靠近母材一侧为粗晶热影响区(CGHAZ),粗晶热影响区经历1 200~1 300 ℃高温,铁素体和珠光体完全奥氏体化,高温下奥氏体晶界迁移能力增强,晶粒通过吞并相邻晶粒而显著粗化,冷却后形成粗大的多边形铁素体-珠光体混合组织,其晶粒度约为5级。靠近焊缝一侧为细晶热影响区(FGHAZ),其发生相变和重结晶,进一步细化等轴晶尺寸。细晶热影响区温度范围为Ac1(约727 ℃)至Ac3(855 ℃),在此区间内珠光体和部分铁素体转变为奥氏体,但由于热输入较低且冷却速度较快,未完全溶解的奥氏体发生相变细化,形成细小的多边形铁素体和珠光体组织,晶粒尺寸较母材更细小,晶粒度达到了7级。

2.3 接头拉伸性能

图5为顶部、中部、根部的典型拉伸断裂试样。试样的断裂位置均为母材。拉伸试样均发生了不同程度的塑性变形,有明显的颈缩现象。

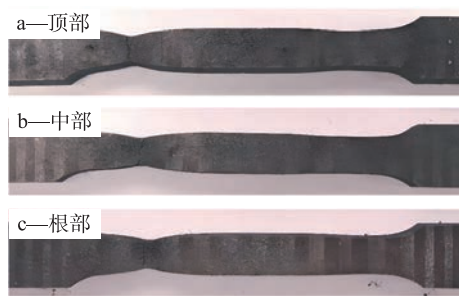


图5 拉伸断裂试样

Fig.5 Tensile fracture specimen

说明 Q235 钢采用窄间隙 TIG 焊接接头的焊缝和热影响区的抗拉强度高于母材。这是由于焊丝中 S 的含量较少,减少了焊缝区硫化物夹杂的形成,增强了焊缝区的强度,同时由于焊缝区凝固时,冷却速度快,导致形成了尺寸远小于母材区的针状或块状铁素体和珠光体,在外力作用下,晶粒之间的位错运动更加困难。

表 3 为 Q235 窄间隙 TIG 焊接接头的拉伸试验结果。结果表明,试样平均抗拉强度约为 450 MPa,平均伸长率约为 26.3%,说明焊接接头的抗拉性能表现优良,焊缝及其周围的热影响区表现出较高的强度和韧性;接头顶部、中部、根部区域的抗拉强度均优于 Q235 母材,说明接头性能满足母材性能要求;顶部焊接接头伸长率最高,说明顶部区域在焊接完成后散热条件相对较好,冷却速度较快,使材料的组织更加细小均匀,从而提高材料的强度和韧性。

图 6 为 Q235 钢窄间隙 TIG 焊接头在 FEI Quanta 400 FEG 型的扫描电子显微镜下的拉伸断口形貌。图中 3 个不同位置拉伸。断口均呈现出韧窝断口形貌,且韧窝底部十分平坦,底部中间部分有细小的裂纹,说明 Q235 钢窄间隙 TIG 焊接头具有良好的塑性,拉伸断口为韧性断裂。

表3 焊接接头的拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of welded joint

取样位置	序号	最大拉力 /kN	抗拉强度 /MPa	伸长率/%	断裂位置
根部	1	14.559	466	22.9	母材
	2	13.357	427	23.7	母材
	3	14.438	462	23.7	母材
中部	4	13.804	442	27.7	母材
	5	14.374	460	26.5	母材
	6	14.301	458	27.8	母材
	7	14.020	449	28.7	母材
顶部	8	14.496	464	28.2	母材
	9	14.374	460	27.6	母材

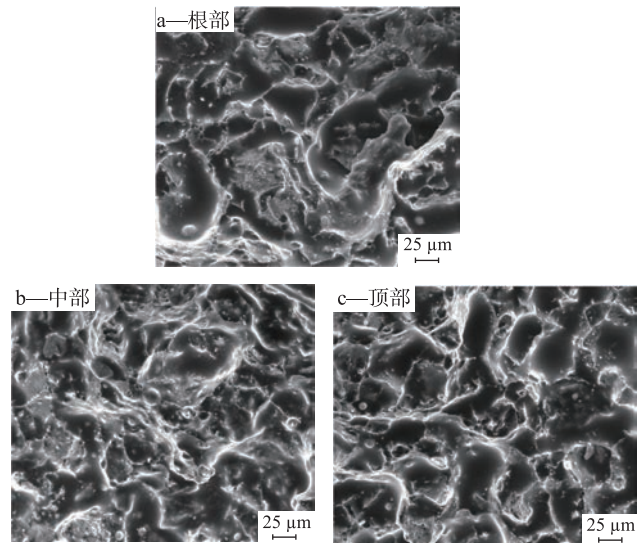


图6 焊接接头的拉伸断口形貌

Fig.6 Tensile fracture morphology of welded joint

2.4 接头冲击性能

焊缝区的冲击功平均值为 91.1 J,热影响区冲击功平均值为 60.1 J,均高于母材的最低规定值(27 J),可以看出,热影响区的韧性较差。这是由于焊缝区冷却速度较快,形成的铁素体和珠光体的晶粒度更小,分布更为细密,呈现出明显的细晶特征,提高了焊缝区的韧性。

图 7 为 23 °C 的 V 型缺口位于焊缝区和热影响区的冲击断口形貌。由图 7 可知,焊接接头冲击断裂呈现出解理断裂、准解理断裂和韧窝断裂等多种混合特征,断口以准解理断裂为主,解理面由撕裂岭连接的小分离面组成,呈现出河流花样,且流动方向与裂纹扩展方向一致。焊缝区的解理台阶比热影响区小,说明焊缝部位韧性比热影响区好,与冲击功结果一致。

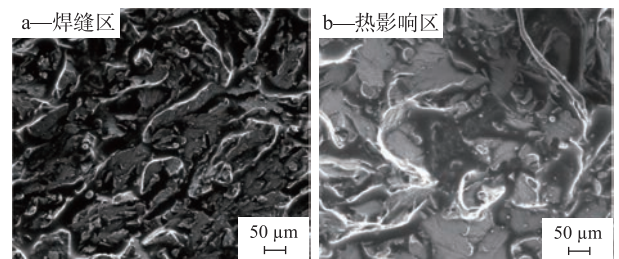


图7 焊接接头的冲击断口形貌

Fig.7 Morphology of impact fracture surface of welded joint

2.5 接头硬度分析

图 8 为 Q235 钢窄间隙 TIG 焊接接头顶部、中部和根部的硬度分布曲线。

按照从左到右的顺序测得焊缝区、热影响区及母材区的显微硬度。焊接接头顶部的母材、热影响

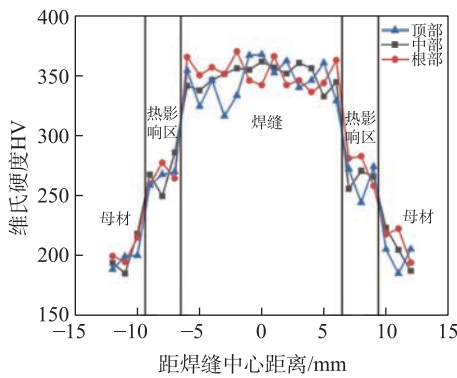


图8 焊接接头硬度分布曲线

Fig.8 Hardness distribution curves of welded joint

区、焊缝显微硬度平均值分别为 197.72HV, 264.56HV, 345.67HV。中部的母材、热影响区、焊缝显微硬度平均值分别为 202.49HV, 266.06HV, 349.74HV。根部的母材、热影响区、焊缝显微硬度平均值分别为 207.66HV, 270.55HV, 351.86HV。

上中下3个部分焊缝区的硬度明显大于热影响区和母材区,这是由于焊缝区的金属在焊接过程中经历了熔化和凝固的过程,由于焊缝熔池的冷却速度相对较快,铁素体和珠光体颗粒得到明显细化,同时由于焊接电弧的摆动和保护气体的流动,使得熔池内的成分和温度分布更加均匀,铁素体和珠光体形核更加均匀。焊丝 MG-51T 是一种低合金高强度焊丝,其熔敷金属在冷却过程中会形成针状铁素体等高强度组织,也会使得焊缝区的硬度较高。

热影响区表现出硬度逐渐上升,并在接近焊缝区域达到峰值。受焊接热循环作用,热影响区组织发生了变化,形成了再结晶组织或者局部硬化区。热影响区的平均硬度低于焊缝,但高于母材,这是由于焊缝的热影响区经历了热循环和再结晶,比母材的铁素体和珠光体晶粒更细。

在离焊缝中心较远的区域,热影响区的硬度分布呈现平滑的下降趋势,并随着与焊缝中心距离的进一步增加,硬度逐渐接近母材的硬度值。母材的组织结构较为均匀,且未经历高温处理,因此其硬度值较焊缝和热影响区较低且较为稳定。根部焊缝硬度值最高是由于后续填充焊道的再加热和重熔,导致枝晶破碎和等轴晶组织的形成,晶粒尺寸较小。

2.6 接头腐蚀性能

图9为Q235焊接接头在20℃下,在质量分数为3.5%的NaCl溶液中Tafel曲线。工作面积为1cm²。Q235母材、焊缝及热影响区自腐蚀电位和自腐蚀电流如表4所示。

由图9、表4可知,焊缝腐蚀电位略小于母材,热影

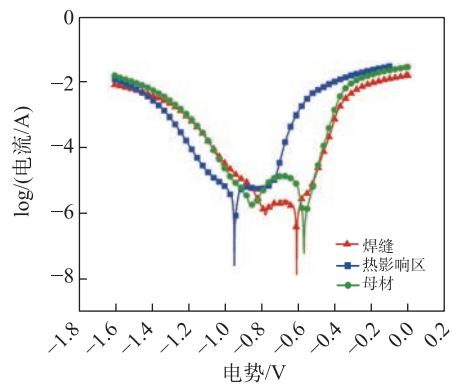


图9 焊接接头极化曲线

Fig.9 Polarization curves of welded joint

表4 自腐蚀电位和自腐蚀电流试验结果

Table 4 Results of self-corrosion potential and self-corrosion current

Q235接头区域	自腐蚀电位/mV	自腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)
焊缝	-607	1.97×10 ⁻⁴
热影响区	-847	9.00×10 ⁻⁴
母材	-567	1.27×10 ⁻⁴

响区腐蚀电位明显小于母材和焊缝。同时热影响区的自腐蚀电流也远大于焊缝区和母材区。说明接头的热影响区耐腐蚀性明显小于其他区域,并且腐速率大于其他区域。由图9可知,焊接热影响区极化曲线的阳极区曲线变得平坦甚至下降,说明材料发生了钝化,腐蚀速率下降。可能是因为热影响区形成的魏氏体造成了该区域的耐蚀性下降,但由于焊接热影响区的组织较为均匀,使得热影响区的铁素体和珠光体能够形成一层保护性的氧化膜。同时热影响区阳极部分出现了腐蚀电流波动,说明热影响区出现了点蚀现象。

3 结论

1) Q235钢采用窄间隙TIG焊形成的焊接接头的焊缝成型良好,焊接接头组织主要由铁素体和珠光体构成。

2) 焊接接头平均抗拉强度约为450MPa,平均伸长率约为26.3%,拉伸断裂部位均为母材,拉伸断口为韧性断裂。

3) 焊接接头的焊缝硬度>热影响区硬度>母材硬度。

4) 焊接接头的耐腐蚀顺序为母材>焊缝>热影响区,热影响区在腐蚀时发生了钝化现象。

5) 焊接接头中位于焊缝区的室温冲击功约为91.1J,热影响区的室温冲击功约为60.1J。冲击断口为解理断裂、准解理断裂和韧窝断裂等多种混合断裂。

4 参考文献

- [1] 汪小锋,刘宏,唐小波. 焊接方法对Q235钢焊接接头缺陷、组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2021,42(7):150-159.
WANG Xiaofeng, LIU Hong, TANG Xiaobo. Effects of welding method on defect, microstructure and mechanical properties of welded joints of Q235 steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(7): 150-159. (in Chinese)
- [2] 任强,姜东滨,张立峰,等. Q235钢中夹杂物演变规律和生成机理分析[J]. 钢铁,2020,55(7):47-52.
REN Qiang, JIANG Dongbin, ZHANG Lifeng, et al. Evolution and formation mechanism of inclusions in a Q235 steel[J]. Iron and Steel, 2020, 55(7): 47-52. (in Chinese)
- [3] ZHOU Y B, FANG D S, LIU L M. Root welding of v-groove thick plate without backing plate by mag-tig double-arc welding[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2017, 18(4): 623-628.
- [4] 葛可可,陈凤林,侯春明,等. 钛合金厚板窄间隙焊接残余应力模拟研究[J]. 热加工工艺,2020,49(13):132-135.
GE Keke, CHEN Fenglin, HOU Chunming, et al. Numerical simulation on residual stress for narrow gap welding of titanium alloy thick plate[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(13): 132-135. (in Chinese)
- [5] 徐起,唐新华,刘国强,等. 电弧摆动对窄间隙GMAW横焊打底焊道成形的影响[J]. 焊接,2020(1):13-20.
XU Qi, TANG Xinhua, LIU Guoqiang, et al. Influence of arc-swing on backing bead formation of narrow-gap GMAW in horizontal position[J]. Welding & Joining, 2020(1): 13-20. (in Chinese)
- [6] ZHANG W Y, ZENG L J. Experimental investigation and low-cycle fatigue life prediction of welded Q355B steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 178: 106497.
- [7] 杨津瑜. 焊接热输入对X70级管线钢埋弧焊接头热影响区组织的影响[J]. 热加工工艺,2014,43(13):164-166.
YANG Jinyu. Effect of heat input on microstructure of heat affected zone in submerged arc welded joints of X70 pipeline steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(13): 164-166. (in Chinese)
- [8] HUANG Jiankang, CHEN Huizi, HE Jing, et al. Narrow gap applications of swing TIG-MIG hybrid weldings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 609-614.
- [9] 关真宇,刘文吉,岳建锋. 窄间隙焊接摆动电弧传感试验系统的开发[J]. 热加工工艺,2021,50(11):132-136.
GUAN Zhenyu, LIU Wenji, YUE Jianfeng. Development of a narrow gap welding experiment system for oscillating arc sensing[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(11): 132-136. (in Chinese)
- [10] ZHU Zhengyu, WANG Jiayou, LIU Shubin, et al. Thick-wire swing arc narrow gap GMA welding assisted by pre-embedding cold wires[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(1): 301-313.
- [11] 朱旻,罗晓军,尹燕,等. TP321钢管的窄间隙热丝TIG焊[J]. 焊接学报,2016,37(9):79-82.
ZHU Min, LUO Xiaojun, YIN Yan, et al. Narrow gap hot wire TIG welding of TP321 steel pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 79-82. (in Chinese)
- [12] 冯东旭,谷文,艾丹凤,等. 核电用508-III钢窄间隙脉冲TIG单层单道钨极摆动焊工艺[J]. 焊接学报,2016,37(6):99-102.
FENG Dongxu, GU Wen, AI Danfeng, et al. Narrow gap pulse TIG single-pass one layer welding technology of 508-III steel for nuclear power equipment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 99-102. (in Chinese)
- [13] 滕彬,范成磊,徐锴,等. 厚板窄间隙焊接技术研究现状与应用进展[J]. 焊接学报,2024,45(1):116-128.
TENG Bin, FAN Chenglei, XU Kai, et al. Research status and application progress of narrow gap welding technology for thick plates[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 116-128. (in Chinese)
- [14] 何旌,黄健康,余淑荣,等. 窄间隙电弧摆动焊接方法研究现状[J]. 热加工工艺,2017,46(23):5-9.
HE Jing, HUANG Jiankang, YU Shurong, et al. Research status of narrow gap arc oscillation welding method[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(23): 5-9. (in Chinese)
- [15] 张勇,李如杨,马青山,等. 热处理对09MnNiDR低温钢焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理,2024,49(8):136-142.
ZHANG Yong, LI Ruyang, MA Qingshan, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 09MnNiDR low temperature steel welded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(8): 136-142. (in Chinese)
- [16] 王云浩,王魏军,岑琼瑛,等. 回火对激光焊中锰钢焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 上海金属,2021,43(5):38-44.
WANG Yunhao, WANG Weijun, CEN Qiongying, et al. Effect of tempering on microstructure and mechanical properties of laser welded medium-manganese steel joints[J]. Shanghai Metals, 2021, 43(5): 38-44. (in Chinese)