

304 不锈钢窄间隙摆动 TIG 焊接接头 组织及性能分析

高辉*, 屈嘉俊, 张东升, 程进才

(北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102600)

摘要: **目的** 探究窄间隙摆动 TIG 焊接技术对不锈钢管材的适用性以及 304 不锈钢 U 型坡口管道搭配 316L 焊丝窄间隙单道多层焊焊接接头显微组织与力学性能的分布规律。**方法** 采用窄间隙摆动 TIG 焊接技术对 304 不锈钢进行焊接, 采用光学显微镜对焊接接头的显微组织分布进行观察, 并使用拉伸性能试验机、维氏硬度计、冲击性能实验机等设备对焊接接头进行拉伸测试、冲击测试、显微硬度测试以及电化学腐蚀测试, 并进行分析。**结果** 获得了 20 mm 厚的优良焊接接头, 焊缝成形美观, 无焊接气孔, 侧壁熔合良好。焊缝组织为具有方向性的奥氏体, 基体上分布有微量断续骨架状铁素体, 其形态主要取决于焊丝中 Ni、Mo 元素对铁素体的抑制作用, 以及多层焊接引发的相变与组织演变。焊接热影响区 (HAZ) 的组织呈现明显的梯度特征: 紧邻熔合线区域, 奥氏体晶粒发生显著粗化。随着远离熔合线, 晶粒逐渐细化, 最终恢复至与母材相近的状态。相较于焊缝区域的方向性组织, HAZ 的组织以等轴晶为主, 方向性较弱。各区域按接头硬度从大到小的顺序依次为焊缝中心、热影响区、母材; 焊缝的平均抗拉强度为 563 MPa, 断后延伸率在 31.2% 左右, 热影响区的冲击韧性均值为 407 J/cm², 高于焊缝区以及熔合线区域的冲击韧性; 焊缝处的耐腐蚀性以及稳定性均优于热影响区以及母材的。**结论** 窄间隙摆动 TIG 焊接技术适用于不锈钢焊接, 304 不锈钢搭配 316L 焊丝的焊接接头性能优异。

关键词: 304 不锈钢; 窄间隙; 单道多层焊; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.04.012

中图分类号: TG422.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)04-0117-09

Microstructural and Performance Analysis of 304 Stainless Steel Narrow Gap Oscillating TIG Welded Joints

GAO Hui*, QU Jiajun, ZHANG Dongsheng, CHENG Jincai

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the applicability of narrow-gap oscillating TIG welding technology for stainless steel pipes and the microstructural and mechanical property distribution patterns of narrow-gap single-pass multi-layer welded

收稿日期: 2025-06-10

Received: 2025-06-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3407700)

Fund: National Key Research and Development Program Project (2023YFB3407700)

引文格式: 高辉, 屈嘉俊, 张东升, 等. 304 不锈钢窄间隙摆动 TIG 焊接接头组织及性能分析[J]. 精密成形工程, 2026, 18(4): 117-125.

GAO Hui, QU Jiajun, ZHANG Dongsheng, et al. Microstructural and Performance Analysis of 304 Stainless Steel Narrow Gap Oscillating TIG Welded Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(4): 117-125.

*通信作者 (Corresponding author)

joints in 304 stainless steel U-groove pipes using 316L welding wires. Narrow-gap oscillating TIG welding technology was employed to weld 304 stainless steel. The microstructural distribution of the welded joints was observed with an optical microscope. Additionally, tensile experiment, impact experiment, microhardness experiment, and electrochemical corrosion experiment were conducted on the welded joints using equipment such as a tensile testing machine, Vickers hardness tester, and impact testing machine, followed by analysis. The results showed that a high-quality welded joint with a thickness of 20 mm was obtained, featuring an aesthetically pleasing weld bead formation, no weld porosity, and no incomplete fusion on the side walls. The weld microstructure consists of directional austenite with a small amount of discontinuous skeletal ferrite dispersed in the matrix. Its morphological characteristics are mainly determined by the inhibitory effect of Ni and Mo in the welding wire on ferrite formation, as well as the phase transformation and microstructure evolution during multilayer welding. The weld heat-affected zone (HAZ) exhibited a microstructural gradient: near the fusion line, the austenite grains were significantly coarsened, while in the distant regions, the grains were refined to the base metal state. The weld microstructure was significantly directional, while the HAZ was weakly directional, primarily consisting of equiaxed grains. The hardness of the joint decreased in the following order: weld center, heat-affected zone, and base metal. The average tensile strength of the weld was 563 MPa, the average elongation after fracture was 31.2%, and the average impact toughness of the HAZ was 407 J/cm², which was higher than that of the weld zone and the fusion line region. The corrosion resistance and stability of the weld zone were superior to those of the HAZ and the base metal. Narrow-gap oscillating TIG welding technology is suitable for stainless steel welding, and the welded joint performance of 304 stainless steel paired with 316L welding wire is excellent.

KEY WORDS: 304 stainless steel; narrow-gap; single-pass multi-layer welding; microstructure; mechanical properties

304 奥氏体不锈钢具有良好的焊接性能、耐热性能, 不仅具有耐腐蚀等特点, 而且在低温工作条件下也能保持良好的塑性, 同时基体内存在较高的 Cr、Ni 等化学元素, 在较高温度下仍能保持较好的抗氧化性能与一定的强度水平, 在石油化工、船舶、核电、医疗设备等一些厚板焊接领域中获得了广泛应用, 在国民经济发展中占有重要地位^[1-5]。随着现代化建设的发展, 石油管道和压力容器等设备对 304 不锈钢厚板焊接结构的使用寿命和承载能力的要求越来越高, 对其焊接接头质量更提出了很高的要求^[6-10]。

非熔化极惰性气体保护电弧焊 (Tungsten Inert Gas Welding, TIG) 焊接加工技术作为一种可靠的焊接加工方法, 凭借其生产成本低、连接性能好、工艺适应性强等诸多技术优势, 被广泛应用于 304 不锈钢焊接^[10-13], 并且在推动我国社会主义现代化建设和重工业发展中起着重要作用^[14-15]。窄间隙 TIG 焊接在 304 不锈钢厚板焊接中较多采用^[16-18], 然而 TIG 焊接时存在热输入较大、焊接接头晶粒粗大、热裂纹倾向大以及力学性能差等问题, 不符合当前经济高质量发展的趋势^[19], 保证 TIG 窄间隙焊接过程侧壁熔合良好、电弧未发生攀升以及消除其焊接接头性能差的缺点, 成为了一个亟待解决的工业难题, 对我国制造业的高质量发展具有重要意义^[20-23]。徐望辉等^[22]采用钨极中心通气的方式扩展焊接电弧, 将电弧热量传导至坡口侧壁, 探究了中心气流量等参数对焊缝成形尺寸和电弧形态的影响, 结果表明, 在钨极中心通入惰性气体可以改善窄间隙 TIG 焊中侧壁熔合不良的问题。唐晓军等^[23]通过在交变磁场辅助下实现了电弧横向非对称摆动, 以此探究了磁励强度与磁励频率对焊缝

成形的影响, 获得了上下对称且接触角较小的良好焊接接头。李科等^[25]进行了 316L 不锈钢焊接接头在硫元素环境下的耐腐蚀性能研究, 发现焊缝是发生局部腐蚀的高风险区域, 其局部腐蚀速率为母材的 1.4~2 倍。

综上可知, 相关专家学者对窄间隙焊接过程的侧壁熔合、焊接接头成形以及不锈钢的耐腐蚀性能进行了相应的研究。然而, 这些方法存在设备复杂、成本高昂、控制难度大等局限。

因此, 本文通过自主研制的窄间隙摆动 TIG 焊枪对 20 mm 厚 304 不锈钢管搭配 316L 焊丝进行单道多层焊接, 并对焊缝组织及接头性能进行了相关分析, 以期对窄间隙摆动 TIG 单道多层焊的工业化应用提供一定的理论基础。

1 实验

实验材料为 304 不锈钢, 焊丝选用的是直径为 1.2 mm 的 ER316L 低碳型焊丝, 焊丝中含有钼等合金元素且可以有效抑制碳化物的析出, 降低热裂纹倾向, 并能显著提高焊缝在海洋环境及强化化学介质中的耐蚀性。该焊丝与 304 不锈钢基体在化学和物理性质上具有相似性, 成分对比如表 1 所示, 焊接时表现出

表 1 母材与焊丝成分

Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire wt. %

Materials	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Mo	Si
304	0.08	19.0	9.4	1.91	0.03	0.02	—	0.75
ER316L	0.02	18.7	12.2	1.89	0.02	0.01	2.3	0.76

优异的电弧稳定性和工艺适应性, 可获得综合性能优异的焊接接头^[27]。

2 焊接实验

实验采用自主研制的窄间隙摆动 TIG 焊枪。为解决窄间隙坡口焊接易出现侧壁未熔合问题, 焊枪增加了摆动机构, 焊枪的摆动机构由钨极摆动机构和送丝摆动机构组合而成, 两者分别由独立的伺服电机驱动, 以此来保证焊缝质量和焊接效率。焊枪示意图如图 1 所示。



图 1 窄间隙 TIG 焊枪
Fig.1 Narrow-gap TIG torch

采用机加工的方式将焊接实验的焊管加工成 U 型坡口, 如图 2 所示。坡口角度为 2°, 钝边厚度为 2 mm, 管道外径为 100 mm, 壁厚为 20 mm。在进行单道多层焊接时, 焊接热循环与焊接热累积导致不同的焊接层数对应着不同的焊接工艺参数, 合理的焊接工艺参数可以有效减少焊接残余应力和焊接变形。焊接实验工艺参数如表 2 所示。焊接全过程用体积分数为 99.99% 的氩气保护, 且每道焊层在堆焊后均进行冷却, 确保每层焊缝温度降至 150~200 °C, 再开始下一道焊接, 这种严格的层间冷却工艺有效解决了热输

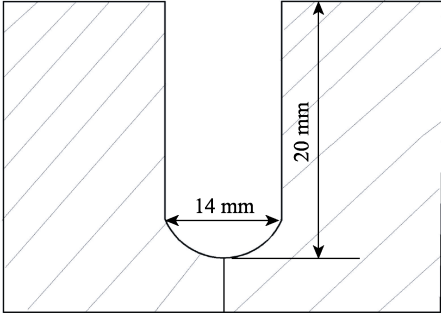


图 2 窄间隙 TIG 焊坡口示意图
Fig.2 Schematic diagram of narrow-gap TIG welding grooves

入较大的问题。

3 结果与分析

3.1 焊接接头组织和形貌

整条对接焊缝共焊接 8 道, 在最佳的焊接参数下, 焊接过程平稳, 飞溅小, 坡口内金属填充饱满, 与母材两侧壁较好地熔合, 焊缝上下整体形貌均匀, 成形良好, 且在焊缝中未能检测到气孔和未熔合缺陷。实验所得 20 mm 厚 304 不锈钢窄间隙摆动 TIG 焊接接头的宏观截面如图 3 所示。

3.2 焊接接头不同区域微观组织分析

图 4、5、6 分别为打底层 (Underlay Layer)、填充层 (Fill Layer) 以及盖面层 (Cover the Top Layer) 的焊缝和热影响微区的微观组织。304 不锈钢焊接接头焊缝组织主要由奥氏体及分布在其基体上的断续骨架状铁素体组成。焊缝中心区域受电弧摆动焊接工艺特性影响显著, 熔池受限于坡口尺寸, 形成趋向于侧壁的定向热流, 枝晶主干沿温度梯度呈放射状生长, 次级枝晶则填充枝晶间隙, 由于单道多层焊的周期性热扰动, 后续焊道对前序枝晶产生局部重熔作用, 最终形成具有方向性的混合组织。在凝固过程中, 铁素体会从液相中析出, 但由于焊丝中的镍和钼合金

表 2 焊接实验工艺参数
Tab.2 Welding experiment process parameters

Number	Welding current/A	Welding speed/(mm·min ⁻¹)	Wire feed speed/(mm·min ⁻¹)	Swing angle/(°)	Swing speed/((°)·s ⁻¹)	Dwell time/s	Air flow rate/(L·min ⁻¹)
1	170	19	700	14	24	2.5	25
2	170	19	700	14	24	2.5	25
3	170	19	700	14	24	3	25
4	160	19	770	14	24	3	25
5	160	18	770	15	24	3	25
6	150	18	800	15	24	3	25
7	150	18	800	15	24	3	25
8	150	18	800	16	24	3	25

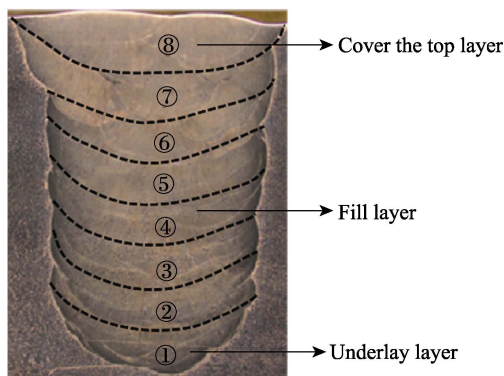


图 3 焊缝宏观横截面

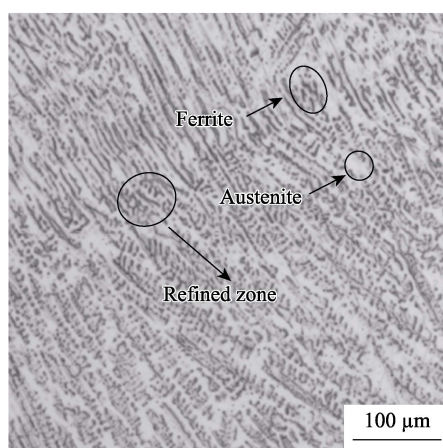
Fig.3 Macro cross section of weld seam

元素会显著抑制铁素体形成,加之多层焊的重复加热促使部分铁素体向奥氏体转变,最终以微量断续骨架状残留于基体中。

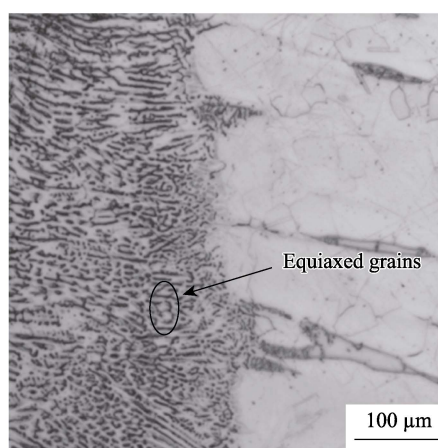
焊接接头各区域的热影响区显微组织受焊接热循环与工艺特性共同影响,呈梯度分布特征。靠近熔

合线的区域因高温和热循环累积作用而发生奥氏体晶粒粗化,同时层间冷却有效抑制了晶粒过度生长,远离熔合线的区域因峰值温度降低,晶粒尺寸过渡至母材原始状态。热影响区的组织方向性受电弧摆动产生的复杂热流及多层焊干扰而被削弱,实际以等轴奥氏体晶粒为主,仅当母材存在原始轧制带状结构时存在弱化痕迹。

在施焊过程中,焊缝及热影响区经历了高温加热和随后的冷却过程,焊缝金属组织因靠近熔池而受到高温加热,其温度超过固相线温度。焊接接头各区域的焊缝组织具有显著的方向性,表现为与热流方向一致的条带状组织,这种条带状组织的形成是由于奥氏体晶粒在温度梯度和非均匀冷却的作用下沿热流方向生长。此外,热影响区晶粒的粗化受到焊接热输入的影响,窄间隙摆动 TIG 焊接通常具有较高的热集中性,加之实验中冷却速率低,导致靠近熔合区域的晶粒在高温下保持较长时间,进一步促使晶粒粗化。与此同时,在热影响区远离熔合线的区域,虽然峰值温



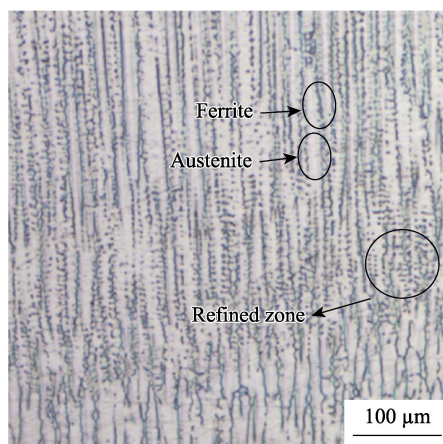
a 打底层焊缝



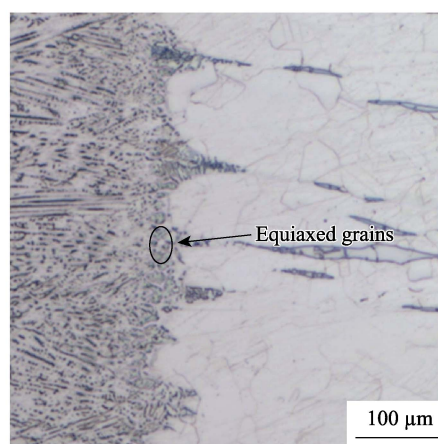
b 打底层热影响区

图 4 打底层焊缝及热影响区

Fig.4 Base layer welds and heat-affected zones: a) base layer weld; b) base layer heat-affected zone



a 填充层焊缝



b 填充层热影响区

图 5 填充层焊缝及热影响区

Fig.5 Fill layer weld seam and heat-affected zone: a) fill layer weld seam; b) fill layer heat-affected zone

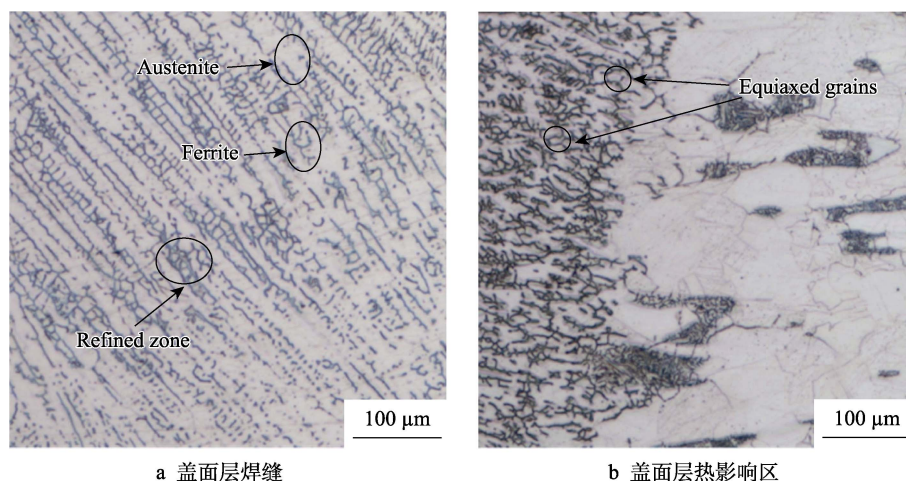


图6 盖面层焊缝及热影响区

Fig.6 Cover layer weld seam and heat-affected zone: a) cover layer weld seam; b) cover layer heat-affected zone

度相对较低且高温停留时间较短,但在焊接热循环的加热和冷却过程中,该区域材料因受到强烈的热应力约束而发生了显著的塑性变形,积累了较高的储蓄能,随着焊接热循环的进行和温度降低,这些储蓄能提供了驱动力促使该区域发生静态再结晶,形成新的细小等轴晶粒,从而细化了该区域的晶粒组织。

3.3 接头力学性能测试与分析

3.3.1 显微硬度

根据 GB/T 2975—2018,分别截取焊接接头包括盖面焊道、中部填充焊道和打底焊道 3 个不同区域的试样进行显微测试。本文选取焊缝横截面的第一道次、第四道次以及第七道次并采用维氏硬度计 (HVS-1000Z) 进行接头显微硬度测试,在 10 N 实验力下保载 10 s,显微硬度测量取点位置如图 7 所示,取点位置覆盖焊缝中心区域、热影响区和母材区,测试相邻点间距为 0.3 mm。硬度分布曲线及显微硬度图如图 8 所示。可以看出,在焊接接头不同位置,硬度值的变化情况呈现相同的变化趋势。母材区域的平均硬度为 170HV,热影响区的平均硬度为 265HV,焊缝区域的平均硬度为 330HV,从焊缝中心位置到母材位置,硬度逐渐减小。可以看出,母材到焊缝区域存在显著的硬度强化效应,且沿焊缝纵向呈现由顶端

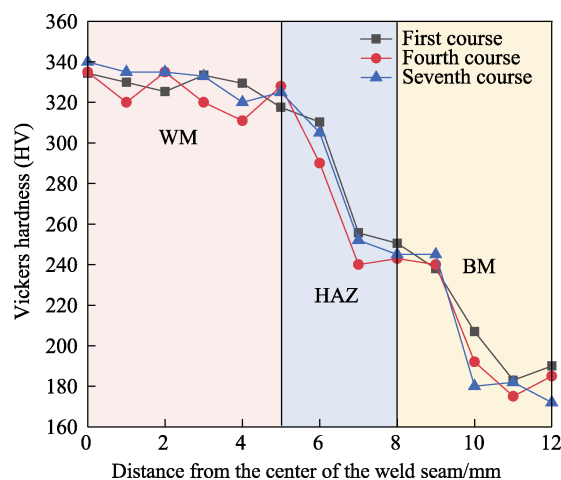


图8 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头硬度分布曲线
Fig.8 Hardness distribution curve of 304 stainless steel narrow-gap TIG welded joint

向根部递增的分布规律,焊接接头的硬度变化由多道焊接产生的热效应引起,热循环差异引发显微组织演变。焊接时焊缝区的连续骨架状的铁素体与奥氏体形成高密度相界面,除此以外,熔池过快的冷却导致了部分合金元素在凝固过程中发生微观偏析;与焊缝区相比,热影响区经历了较高温度但未完全熔化,导致发生部分再结晶现象,晶粒有所细化;母材未受焊接热影响,保持了原有的稳定组织与性能,故热影响区的平均硬度低于焊缝硬度,但高于母材硬度。

3.3.2 拉伸性能测试

图 9 为拉伸试样宏观断裂形貌,表 3 为拉伸实验结果。从图 9 可以看出,试样均断裂在母材位置,说明接头的抗拉强度高于母材强度,符合 GB/T 12467 要求。通过计算得到焊接接头的平均抗拉强度为 563 MPa,大于 304 不锈钢的标准值 515 MPa,断后平均延伸率在 31.2%左右,并且拉伸断口出现颈缩现象,发生韧性断裂。

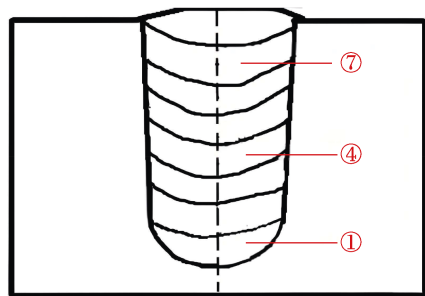


图7 显微硬度测量取点示意图
Fig.7 Diagram of microhardness measurement points

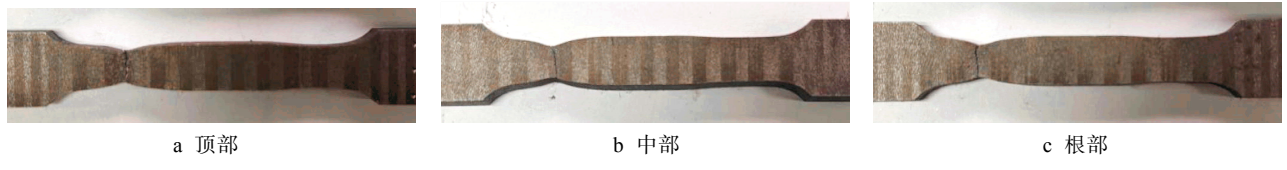


图 9 拉伸断裂试样
Fig.9 Tensile fracture specimen: a) top region; b) middle region; c) root region

表 3 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头拉伸性能
Tab.3 Tensile properties of 304 stainless steel narrow-gap TIG welded joints

Region	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Yield ratio	Cross-sectional contraction rate/%	Elongation/%
Top	546	594	0.956	52.86	31.3
	563	574	0.980	48.56	30.6
Central	545	543	0.990	43.69	31.7
	550	544	0.943	44.26	31.2
Root	546	562	0.971	47.65	32.8
	547	560	0.976	46.98	31.9

3.3.3 冲击实验

夏比冲击实验是评价焊接接头韧性的关键实验，该韧性体现试样在特定载荷下的吸收功率。在焊接接头顶部、中部、根部的焊缝中心、热影响区以及熔合线区分别截取 3 个符合冲击标准规范的冲击试样，共计 9 个，冲击实验在 20 ℃ 环境下进行。冲击试样尺寸如图 10 所示。冲击前后试样如图 11 所示。

304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头不同位置冲击测试对比结果如表 4 所示。可以看出，焊接接头焊缝区冲击韧性最大值为 318 J/cm²，最小值为 255 J/cm²，均值为 279 J/cm²，标准差约为 28 J/cm²；熔合线区域冲击韧性最大值为 446 J/cm²，最小值为 260 J/cm²，均值为 344 J/cm²，标准差约为 77 J/cm²；热影响区冲击韧性最大值为 477 J/cm²，最小值为 350 J/cm²，均

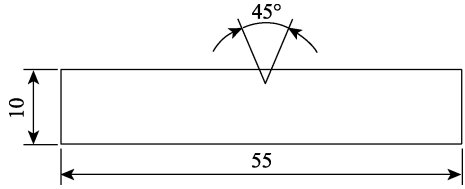


图 10 冲击试样尺寸示意图
Fig.10 Schematic diagram of impact testing specimen dimensions

值为 407 J/cm²，标准差约为 52 J/cm²。在焊接过程中，焊缝中心经历高温熔化和快速冷却的过程，合金元素发生偏析现象，形成粗大的柱状晶组织，使晶界面积减小，在受到冲击载荷时，裂纹更容易在晶粒内部扩展，从而降低了材料的冲击韧性。热影响区在焊接过程中受到焊接热循环的影响，组织发生不同程度的变

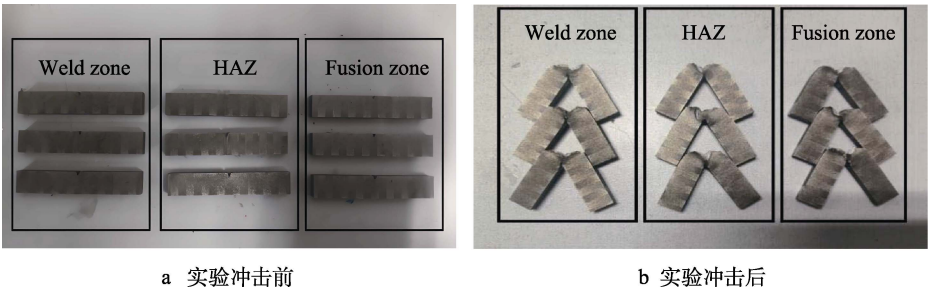


图 11 焊接接头冲击前后试样
Fig.11 Welded joints before and after impact: a) before impact testing; b) after impact testing

表 4 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头不同位置冲击测试对比结果
Tab.4 Comparative results of impact testing of 304 stainless steel narrow-gap TIG welded joints in different positions

Impact location	Temperature/℃	Impact toughness/(J·cm ⁻²)			Mean value/(J·cm ⁻²)	Result
		Sample 1	Sample 2	Sample 3		
Weld zone	20	255	318	264	279	Qualified
Fusion zone	20	260	446	326	344	Qualified
Haz	20	477	350	394	407	Qualified

化,存在过热区、正火区等不同区域,正火区组织相对细小均匀,冲击韧性较好。

3.3.4 电化学腐蚀性能

图 12 为 304 钢管搭配 316L 焊丝的焊接接头在质量分数为 3.5%的氯化钠溶液中的 Tafel 极化曲线;由极化曲线拟合得到的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度如表 5 所示。可知,焊缝的耐腐蚀性能显著优于母材的耐腐蚀性能,其自腐蚀电流密度较母材降低 58%,自腐蚀电位较母材正移约 0.2 V,表明焊缝区域兼具更低腐蚀速率与更高的稳定性,耐腐蚀性能优于母材区域。也说明了 304 管材搭配 316L 焊丝能显著提高焊接接头的耐腐蚀性。焊接热循环促使焊缝区晶粒细化,减少碳化物析出,同时多层焊的逐层回火作用进一步均匀化组织,形成连续致密的钝化膜,而母材虽为固溶态奥氏体,但未经历焊接热过程优化,因此耐腐蚀性稍逊于焊缝。

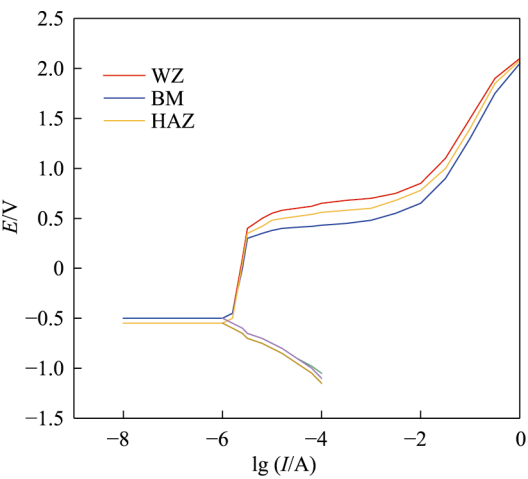


图 12 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头各分区极化曲线
Fig.12 Polarization curves of each zone of 304 stainless steel narrow-gap TIG welded joint

表 5 电化学实验结果

Tab.5 Electrochemical experimental results

Zone	Self-corrosion potential/V	Self-corrosion current density/($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Weld	-3.419 64	3.2
HAZ	-3.420 21	4.68
Base	-3.686 01	5.05

4 结论

采用窄间隙摆动 TIG 焊接技术实现了 304 不锈钢 U 型坡口搭配 316L 焊丝的单道多层焊接,对获得的焊接接头进行微观组织观察与性能测试分析,得到以下结论:

1) 焊缝组织主要由具有方向性的奥氏体基体以及微量断续骨架状铁素体组成,焊缝组织方向性显

著,而热影响区组织方向性较弱,主要为等轴晶。

2) 焊接接头上中下三部分区域维氏硬度略有差异,三部分焊缝区域的维氏硬度均高于热影响区和母材硬度,热影响区硬度高于母材硬度。

3) 焊接接头顶部、中部、根部三部分的抗拉强度有所差异,顶部与根部的抗拉强度略大于中部抗拉强度,断后延伸率均在 31.2%左右,焊接接头拉伸性能测试试样的断裂位置均发生在母材处。热影响区的冲击韧性高于焊缝区的冲击韧性。焊接接头的焊缝区耐腐蚀性以及稳定性都高于母材。

参考文献:

[1] 贾登峰,夏腾辉,杜春平,等. 304/Q345R 复合板焊接接头微观组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(3): 41-44.
JIA D F, XIA T H, DU C P, et al. Research on Micro-structure and Properties of Welded Joints of 304/Q345R Composite Plate[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(3): 41-44.

[2] MILLER B D, BROCKENBROUGH J R, HICKEY F, et al. The Role of Hydrogen in Promoting Differences in Fatigue Crack Growth Rates Observed in Type 304/304L Stainless Steel at Elevated Temperature[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 136: 852-863.

[3] RADOJKOVIĆ B, JEGDIĆ B, PEJIĆ J, et al. Passive Film Properties and Corrosion Resistance of AISI 304L Stainless Steel[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2025, 60(4): 233-249.

[4] KOMBAIAH B, DASARI S, BHAVE C, et al. Creep-Induced Elemental Redistribution at Grain Boundaries of 304L Stainless Steel-an Experimental Evidence for Diffusional Creep Mechanisms[J]. Acta Materialia, 2025, 294: 121137.

[5] LIU Y, ZHANG L, WANG H, et al. Creep-Induced Cr and Mo Segregation at Grain Boundaries and Its Effect on Intergranular Creep Rupture of 304L Stainless Steel[J]. Acta Materialia, 2024, 278: 119876.

[6] GU Y L, YANG F, GUO Y Y, et al. Insights into the Effects of Oxygen Content Regulation on the Micro-structure and Mechanical Properties of in Situ ODS 304L Stainless Steel Processed by Laser Powder Bed Fusion[J]. Nuclear Science and Techniques, 2025, 36(6): 92.

[7] BENCHERIF M, ALMANSBA M, FERHOUM R, et al. Effectiveness of Digital Image Correlation in Capturing the Fracture Toughness in 304L Stainless Steel[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2025, 25(2): 649-660.

[8] DERIMOW N, BENZING J T, WEEKS T S. A Histori-

- cal Review of Cryogenic Mechanical Testing on Type 304 Stainless Steels-State of the Art and Current Outlooks[J]. *Cryogenics*, 2025, 149: 104105.
- [9] TOMKO S, PECHOUŠEK J, TUČEK J, et al. Preparation and Physico-Chemical Characterization of AISI 304 Stainless Steel Film Deposited by DC Magnetron Sputtering[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2025, 628: 173210.
- [10] WANG Z C, LI B B, YU J T, et al. Enhanced Fatigue Resistance of 304 Stainless Steel through Cryogenic Cyclic Plastic Strengthening and Heat Treatment[J]. *Scripta Materialia*, 2025, 264: 116696.
- [11] MAO W Q, GONG W, KAWASAKI T, et al. Unique Deformation Behavior of Ultrafine-Grained 304 Stainless Steel at 20 K[J]. *Scripta Materialia*, 2025, 264: 116726.
- [12] HA H Y, KIM S H, KIM K W, et al. Effects of Long-Term Annealing on Pitting Corrosion Behavior of Type 304 Borated Stainless Steels[J]. *Corrosion Communications*, 2025, 19: 51-62.
- [13] SASHANK S S, RAJAKUMAR S, KARTHIKEYAN R. Mechanical and Metallurgical Characteristics of Hot Wire TIG Welded 304HCu Austenitic Stainless Steel and P91 Ferritic Steel Dissimilar Tube Joints[J]. *Welding International*, 2025, 39(6): 452-461.
- [14] 刘雅佳, 薛忠明, 杜会桥, 等. 304 不锈钢/5052 铝合金软钎焊用钎剂及钎料研究[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(3): 81-89.
- LIU Y J, XUE Z M, DU H Q, et al. Fluxes and Solder for Soldering of 304 Stainless Steel/5052 Aluminum Alloy Dissimilar Metals[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(3): 81-89.
- [15] 鲍庆臣, 渠怀志, 史建强, 等. 中低温热处理对 SUS304 不锈钢 TIG 焊接接头组织及力学性能的影响[J]. *电焊机*, 2022, 52(2): 63-68.
- BAO Q C, QU H Z, SHI J Q, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of SUS304 Stainless Steel TIG Welded Joint[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(2): 63-68.
- [16] 李雨, 徐望辉, 谢伟峰, 等. 超声振动对 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头组织和力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2023, 44(9): 188-194.
- LI Y, XU W H, XIE W F, et al. Effect of Ultrasonic Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Narrow Gap TIG Welded Joint[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(9): 188-194.
- [17] 聂宇, 冯巧波, 王春亮, 等. 316L 不锈钢薄板激光焊接接头微观组织及力学性能研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(24): 80-84.
- NIE Y, FENG Q B, WANG C L, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joints of 316L Stainless Steel Sheet[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(24): 80-84.
- [18] AGOSTINI P, COPPOLA R, HOFMANN M, et al. Stress Distribution in a 316L(N) Steel Narrow Gap TIG Model Weld for Gen IV Nuclear Applications[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2022, 32: 101203.
- [19] 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 B, FAN C L, XU K, 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.
- [20] 陈勇, 陆建华, 徐育娘, 等. 304 不锈钢薄壁管件纵缝焊接工艺及组织研究[J]. *应用激光*, 2022, 42(2): 8-14.
- CHEN Y, LU J H, XU Y L, et al. Study on Longitudinal Seam Welding Process and Microstructure of 304 Stainless Steel Thin Wall Pipe[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(2): 8-14.
- [21] 黄子寒, 戴安伦. CuMnNi 钎料中 Ni 含量对 304 不锈钢钎缝组织及力学性能的影响[J/OL]. *热加工工艺*, 2023: 1-5. (2023-02-16)[2025-06-07]. <https://link.cnki.net/doi/10.14158/j.cnki.1001-3814.20220882>.
- HUANG Z H, DAI A L. Effect of Ni Content in CuMnNi Solder on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Brazing Seam[J/OL]. *Hot Working Technology*, 2023: 1-5. (2023-02-16)[2025-06-07]. <https://link.cnki.net/doi/10.14158/j.cnki.1001-3814.20220882>.
- [22] 徐望辉, 贾兴华, 赵荣泽, 等. 中心通气对窄间隙 TIG 焊缝成形的影响[J]. *焊接学报*, 2025, 46(1): 121-127.
- XU W H, JIA X H, ZHAO R Z, et al. Influence of Central Ventilation on the Formation of Narrow Gap TIG Welds[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2025, 46(1): 121-127.
- [23] 唐晓军, 孙琪, 刘一搏, 等. 非对称电弧摆动对钛合金窄间隙横向焊接焊缝成形的影响[J/OL]. *焊接学报*, 2025: 1-9. (2025-01-14)[2025-06-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJXB20250113003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- TANG X J, SUN Q, LIU Y B, et al. Effects of Asymmetric Arc Oscillation on Weld Formation in Transverse Welding of Titanium Alloy with Narrow Gap[J/OL]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2025: 1-9. (2025-01-14)[2025-06-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HJXB20250113003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [24] TANG X J, SUN Q, LIU Y B, et al. Effects of Asymmetric Arc Oscillation on Weld Formation in Transverse Welding of Titanium Alloy with Narrow Gap[J/OL]. *Transactions of the China Welding Institution* 1-9 [2025-06-10]. <https://doi.org/10.12073/j.hjxb.20241010002>.

- [25] 李科, 李天雷, 曹晓燕, 等. 316L 不锈钢焊接接头在含元素硫-硫化氢环境中的腐蚀行为[J/OL]. 中国腐蚀与防护学报, 2025: 1-10. (2025-06-03)[2025-06-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGFF20250527002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LI K, LI T L, CAO X Y, et al. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Welded Joints in S-H₂S-Containing Environments[J/OL]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025: 1-10. (2025-06-03) [2025-06-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGFF20250527002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [26] LI K, LI T L, CAO X Y, et al. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Welded Joints in S-HS-containing Environments[J/OL]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1-10[2025-06-10]. <https://www.jcscp.org/CN/abstract/abstract35889.shtml>.
- [27] 陈彦龙, 舒林森, 宋少东. 304L/316 异种钢薄板激光增材焊接工艺及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 200-208.
CHEN Y L, SHU L S, SONG S D. Study on Laser Additive Welding Process and Properties of 304L/316 Dissimilar Steel Sheets[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 200-208.