

# 双金属复合管材埋弧焊工艺及 焊缝组织性能研究

杨 军<sup>1,2</sup>, 毕宗岳<sup>3</sup>, 朱 磊<sup>4</sup>, 万仁远<sup>1,2</sup>, 王雪怡<sup>1,2</sup>

(1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000; 2. 渭南市特种装备材料工程技术研究中心, 陕西 渭南 714000;  
3. 中国石油集团宝石管业有限公司, 陕西 宝鸡 721008; 4. 西安天力金属复合材料股份有限公司, 陕西 西安 710200)

**摘 要:** 利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)观察了原料热轧卷复合界面和复合管材焊缝的微观组织, 采用能谱仪(EDS)线扫描试验测定了原料界面处元素含量变化的线分布曲线, 采用能谱仪(EDS)面扫描试验测定了复合管材焊缝熔合区不同微区域内的分布情况, 同时对复合管材焊缝进行了拉伸试验、Charpy 冲击试验、弯曲试验、显微硬度试验和腐蚀试验。结果表明, 采用埋弧焊工艺技术能够实现 304/Q235B  $\text{O}610 \text{ mm} \times (6+1) \text{ mm}$  复合管材的工程化批量生产。复合管材复层焊缝组织为针片状奥氏体+条带状或蠕虫状铁素体的复相组织, 基层焊缝为少量先共析铁素体+针状铁素体的复相组织, 焊缝强度、低温韧性、显微硬度、塑性变形等各项力学性能和抗晶间腐蚀性能完全满足 GB/T 31940-2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》标准要求。研究成果将为高质量双金属复合管材的产业化生产提供一定理论参考和技术支持。

**关键词:** 双金属复合管材; 复合界面; 埋弧焊; 抗晶间腐蚀

中图分类号: TG442

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)01-0189-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.01.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听  
语  
音  
聊  
科  
研  
与  
作  
者  
互  
动

## Study on submerged arc welding process and weld microstructure and properties of bimetallic composite pipes

YANG Jun<sup>1,2</sup>, BI Zongyue<sup>3</sup>, ZHU Lei<sup>4</sup>, WAN Renyuan<sup>1,2</sup>, WANG Xueyi<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shaanxi, China; 2. Weinan Special Equipment Materials Engineering Technology Research Center, Weinan 714000, Shaanxi, China; 3. CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 4. Xi'an Tianli Clad Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710200, Shaanxi, China)

**Abstract:** The microstructures of the composite interface of the hot-rolled coil and the weld joint of the composite pipe were observed using an optical microscope (OM) and a scanning electron microscope (SEM). The line distribution curve of the element content change at the interface was determined by energy dispersive spectrometer (EDS) line scanning test, and the distribution of elements in different micro-regions of the fusion zone of the composite pipe weld joint was measured by EDS mapping analysis. Meanwhile, tensile test, Charpy impact test, bending test, microhardness test and corrosion test were carried out on the weld joint of the composite pipe. The results indicate that the submerged arc welding (SAW) process can be successfully used for the commercial production of 304/Q235B  $\text{O}610 \text{ mm} \times (6+1)$

收稿日期: 2025-07-27; 修回日期: 2025-09-09; 接受日期: 2025-09-11

基金项目: 工业和信息化部专项: 深海油气资源输送用先进双金属复合管开发及产业化项目(2240STCZB2346); 渭南市重点研发计划(2023ZDYFJH-391); 陕西铁路工程职业技术学院英才项目(2023KYCY-07); 陕西省“两链”融合重点项目-定向委托课题(2021LLRH-05-10; 2021LLRH-05-11)。

作者简介: 杨军, 1982 年出生, 男, 副教授, 高级工程师, 硕士, 主要从事双金属复合管材技术研究, E-mail: yangjun01.cool@163.com。

mm composite pipes. The microstructure of the cladding weld of the composite pipe is a duplex structure consisting of acicular austenite + banded or worm-like ferrite, while the base weld exhibits a duplex structure of reduced proeutectoid ferrite + acicular ferrite. All mechanical properties including weld strength, low-temperature toughness, microhardness, and plastic deformation, as well as intergranular corrosion resistance, fully meet the requirements specified in the national standard GB/T 31940-2015 bimetallic composite corrosion-resistant steel pipes for fluid transport. Therefore, this research results can be used as a theoretical reference and technical support for the commercial production of high-quality bimetallic composite pipes.

**Key words:** bimetallic composite pipe; composite interface; submerged arc welding; intergranular corrosion resistance

## 0 引言

双金属复合高端耐蚀管材,在城市饮用水输送工程、工业生产各领域(油气工程、海洋工程、炼化工程、核电工程、桥隧工程、沿海铁路、舰船装备等)均有很好的市场前景。但开发经济合理且易于中小型装备制造企业推广采用的双金属复合耐蚀管材生产制备技术却鲜有报道。

双金属复合耐蚀板材及其深加工管材装备是将具有良好耐腐蚀特性的复层材料与基层碳钢材料通过特种复合技术结合在一起,再采用 JCOE 渐进压制成型技术或螺旋成型技术制成管状,最后采用特种焊接技术制备成双金属层状结构耐蚀复合管材以及其他高端耐蚀装备。目前国内外双金属复合的主流技术主要有堆焊复合、热轧复合、爆炸复合、“爆炸+热轧”复合、“热轧+电镀”复合和铸造复合等。在众多复合技术中,热轧复合因其生产质量稳定可靠已成为国际上主要的生产工艺;在我国铸造复合法、堆焊复合法和爆炸+热轧复合法因其经济性、实用性仍然被大量应用。

此外,高质量焊接是双金属复合耐蚀板材用于深加工开发工业特种装备的关键。对于同质性金属复合材料的焊接,如不锈钢/碳钢复合板材系列,主要集中于焊缝抗腐蚀性能、组织相平衡、焊接接头断裂行为、焊接工艺设计等内容研究<sup>[1-9]</sup>。西交大 ZHANG 等<sup>[10]</sup>开展了激光辅助 MIG 焊的研究,能有效实现 2205/X65 双金属复合板材的对焊连接,接头性能可靠。而对于异质性金属复合材料焊接,如钛/钢复合材料、铝/钢复合材料等,首要考虑冶金相容性问题。国家石油天然气管材工程技术研究中

心毕宗岳团队<sup>[11-12]</sup>开展了多种纯金属(纯 Cu 作为近钢过渡层、纯 V 作为近钛过渡层)复合过渡焊接研究,有效避免了钛/钢复合板材焊接接头脆硬金属间化合物的产生,焊接接头无裂纹、气孔等缺陷,对复合管材工程化熔焊连接具有一定指导意义。此外,西安理工大学张敏教授团队<sup>[13-18]</sup>针对钛钢的冶金特性设计开发了专用药芯焊丝(Cu 包 V 粉、Cu 包 Mo 粉、Cu 包 Ag、Cu 包 Ag/Mo/Nb、V 混合粉等)和“三明治”型钛钢复合界面状态,实现了钛/钢复合板材的对焊连接,为钛/钢复合材料焊接提供了新途径和新方法。

针对国内中小型管材装备制造企业需求,采用高效埋弧焊工艺以及多种检测分析方法进行 304/Q235B  $\varnothing 610 \text{ mm} \times (6+1) \text{ mm}$  大直径、薄覆层双金属复合管材批量化制备研究,旨在得到最佳复合管材埋弧焊制备工艺参数和技术方案,为中小型管材制造企业提供理论参考和技术支持。

## 1 试验材料与方法

试验用 304/Q235B 双金属热轧复合钢卷料,复层厚 1 mm,基层厚 6 mm,其埋弧焊工艺及参数如表 1 所示,焊接方法为单丝埋弧焊,其中,内焊焊丝规格为 CHW-309L $\times \varnothing 3.2 \text{ mm}$ ,焊剂 CHF117;外焊焊丝规格为 BG-H08E $\times \varnothing 4.0 \text{ mm}$ ,焊剂 SJ101G(2),复合钢卷料和焊接材料的化学成分见表 2,力学性能见表 3。采用“V+I”复合型焊接坡口设计,坡口夹角为 70°,具体形状参数如图 1 所示。

焊接坡口形式及几何参数设计对熔合比影响较大,因此从降低熔合比的角度考虑,将复合管焊接坡口形式及几何参数设计如图 1 所示。

表 1 304/Q235B 双金属复合管材埋弧焊工艺方案及参数

Table 1 Submerged arc welding process scheme and parameters for 304/Q235B bimetallic composite pipes

Welding methods	Welding current/A	Arc voltage/V	Welding speed/(m·min <sup>-1</sup> )	Welding heat input/(kJ·mm <sup>-1</sup> )
Internal welding	390	30.5	1.7	0.378
External welding	850	32.5	1.7	0.829

表 2 304/Q235B 复合钢卷料和焊丝的化学成分  
Table 2 Chemical compositions of 304/Q235B composite steel coil and welding wire

Experimental materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
Q235B	0.140	0.220	0.610	0.012	0.003	0.010	0.030	0.010	0.020
304	0.054	0.506	1.085	0.035	0.006	10.150	18.680		
CHW-309L	0.025	0.530	1.580	0.016	0.006	13.620	23.890	0.016	0.007
BG-H08E	0.120	0.120	1.870	0.006	0.004	0.320		0.005	0.031

表 3 304/Q235B 复合钢卷料的力学性能  
Table 3 Mechanical properties of 304/Q235B composite steel coil materials

	Tensile strength $R_m$ /MPa	Yield strength $R_e$ /MPa	Elongation $A$ /%	Impact energy (20 °C) $A_{KV}$ /J	Shear strength $\tau$ /MPa
Measured value	437, 426, 423	265, 243, 246	26.2, 26.5, 26	122, 120, 119	388, 385
Standard requirements	370 ~ 500	$\geq 235$	$\geq 26$	$\geq 27$	$\geq 210$

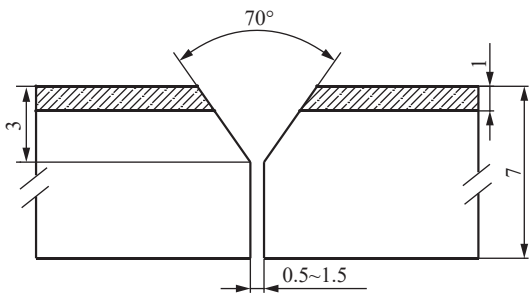


图 1 焊接坡口形状参数(单位:mm)  
Fig. 1 Dimensions of welding groove

采用 GB/T 31940-2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》对试制 304/Q235B  $\text{O}610 \text{ mm} \times (6+1) \text{ mm}$  双金属复合管材进行性能测评。沿管材焊缝横向截取毛坯样, 并加工成标准矩形焊缝拉伸试样、Charpy 冲击试样、全壁厚弯曲试样和晶间腐蚀试样。矩形焊缝拉伸试样标距段宽 38.1 mm, 长 50 mm; 内外焊缝去除余高后再各去除 1 mm 厚材料, 以外焊缝中心线为基准, 参照图 2 所示, 加工尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 55 mm 的焊缝中心和热影响区 Charpy “V” 型缺口冲击试样, “V” 型缺口夹角 45°, 试验按 GB/T 229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》在 NAI500F 摆锤式冲击试验机上进行, 试验温度为 0 °C。晶间腐蚀试样尺寸为 76.2 mm $\times$ 25.4 mm $\times$ 1 mm, 采用 GB/T 4334-2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》E 法进行晶间腐蚀试验。室温下在 Z1200KN 型万能材料试验机上进行拉伸试验, 加载速率 2 mm/min。焊缝全壁厚弯曲试验在 CSS-88100 万能材料试验机上进行, 加载方向垂直于焊缝, 加载速度为 1 mm/min。金相试样研磨并抛光后, 分别用 5%  $\text{HNO}_3$  酒精溶液和王水 ( $V(\text{HCl}) : V(\text{HNO}_3) = 3 : 1$ ) 对 Q235B 碳钢和 304 不

锈钢进行腐蚀, 并用 LeicaMEF-4M 光学显微镜及日立 S4300 冷场发射扫描电子显微镜观察环焊缝横截面微观组织形貌特征。用 Durscan-70 型维氏硬度计测试焊缝横截面显微硬度分布。

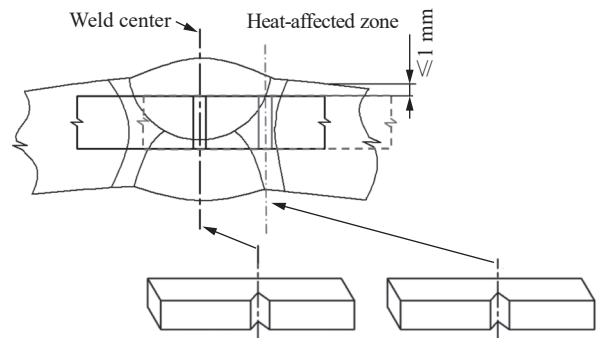


图 2 焊接接头焊缝中心、热影响区冲击试样切取及缺口开启位置示意  
Fig. 2 Schematic diagram of the cutting position and notch opening position of impact specimens in the weld center and heat-affected zone of welded joints

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 原料卷微观组织及界面质量

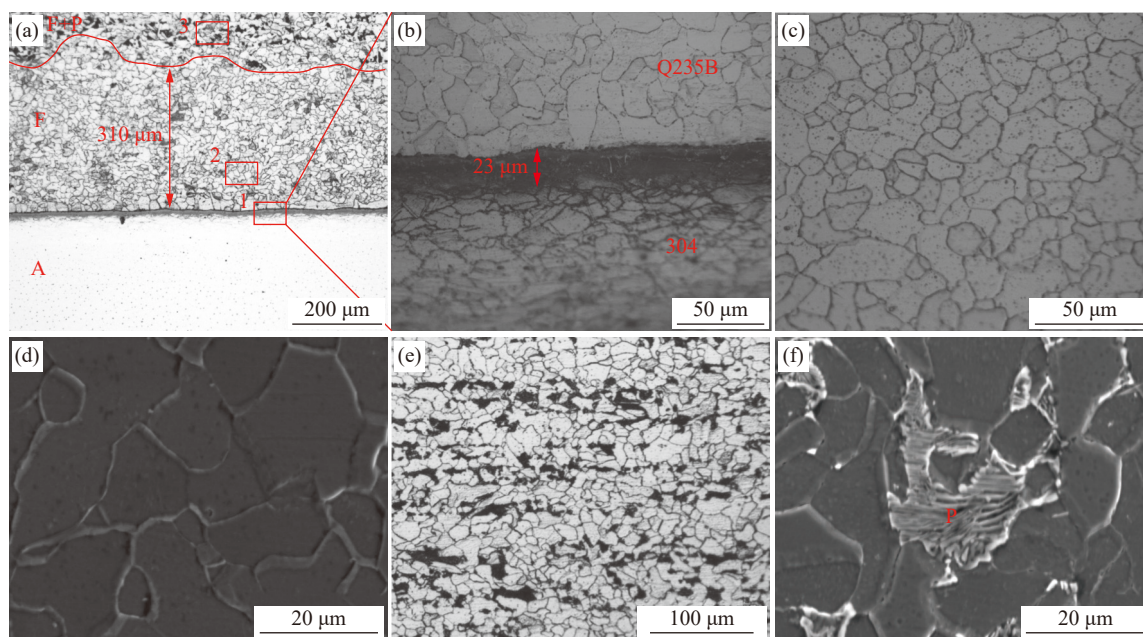
试验用 304/Q235B 双金属复合热轧卷横截面微观组织如图 3 所示。图 3(a) 和 3(b) 均为双金属钢卷料复合界面处的局部微观组织形貌特征, 由图 3(a) 发现, 304/Q235B 双金属复合卷料有着鲜明的组织形貌特征, 上部为 Q235B 碳钢层的铁素体 (F)+珠光体 (P) 组织, 中部为单相 F 组织, 下部为不锈钢的单相 A 组织。图 3(c) 和图 3(d) 分别为脱 C 层单相 F 组织的局部 OM 和 SEM 显微组织形貌, 可以发现单相 F 组织晶界清晰, 细小晶粒分布相对均匀, 其间未观察到 P 组织, 说明 C 元素发生了显著的扩散迁移。图 3(e) 和图 3(f) 分别为 Q235B 碳

钢层的局部 OM 和 SEM 显微组织形貌, 其为典型的 F+P 组织, 含 C 量相对较高的 P 组织相硬度高、塑性差, 整体呈条带状分布, 其内部呈现片层状形貌特征。

另外, 图 3(a) 和图 3(b) 中在复合界面处有 C 元素扩散迁移现象的发生, C 元素由 Q235B 碳钢一侧向 304 不锈钢一侧扩散迁移, 最终在 Q235B 珠光体钢一侧形成了脱 C 软化区, 宽度尺寸约 310  $\mu\text{m}$ , 而在 304 奥氏体不锈钢一侧产生了增 C 硬化区, 该区域不能明显区分, 尺寸亦无法定量, 但在界面处的不锈钢一侧存在宽度尺寸约 23  $\mu\text{m}$  的深黑色区域。该深黑色区域产生的原因可能为该区域合金成分异常且长时间重复过度腐蚀所致。因为在高温热轧过程, 界面处极小厚度尺寸内的两种材料必然会相互扩散形成熔合区, 该区域合金成分异常, Ni、Cr 含量相对大幅降低, 不具有不锈钢的耐腐蚀特性, 在金相腐蚀时容易被过度腐

蚀; 由于两种金属材料抗腐蚀性大不相同, 因此在腐蚀时需分开进行, 先用 5%  $\text{HNO}_3$  酒精溶液腐蚀 Q235B 碳钢一侧, 会对界面附近另一侧材料局部小区域造成腐蚀, 随后再采用王水对 304 不锈钢进行腐蚀, 这样就存在过度腐蚀。扩散区形成的原因主要是 304/Q235B 双金属复合热轧卷在高温 ( $\geq 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) 热轧过程和中温 ( $\leq 400\text{ }^\circ\text{C}$ ) 卷制过程中, 扩散能力较强的 C 元素将由溶解度低而扩散系数高的铁素体相向奥氏体相中扩散, 同时奥氏体相比珠光体含有更多的碳化物形成元素, 将进一步促使 C 原子的扩散, 在不锈钢一侧形成稳定的碳化物。

C 的扩散迁移区是 304/Q235B 双金属复合钢卷性能的最薄弱环节, 严重降低双金属复合材料的高温持久强度和抗晶间腐蚀性能。在后续管材焊接过程, 需特别注意控制焊缝熔合区的高温停留时间, 以此控制焊缝附近 C 的扩散迁移。



(a)原料卷复合界面区组织形貌; (b)图(a)中视域1的局部OM形貌; (c)图(a)中视域2的局部OM形貌; (d)图(a)中视域2的局部SEM形貌; (e)图(a)中视域3的局部OM形貌; (f)图(a)中视域3的局部SEM形貌

图3 热轧复合卷复合界面处微观组织形貌特征

Fig. 3 Microstructure morphology characteristics at the composite interface of hot-rolled composite coils

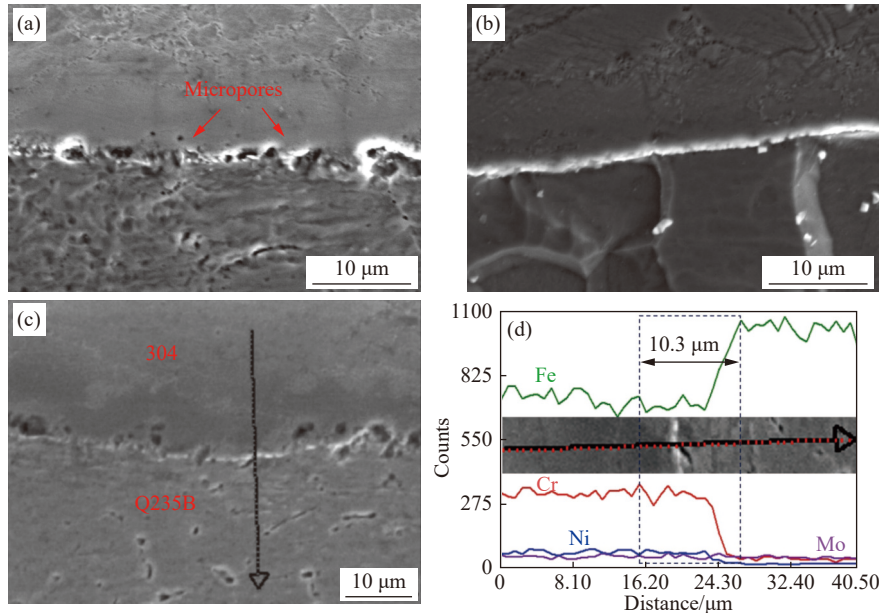
图 4 给出了 304/Q235B 双金属复合热轧卷界面处结合特征和元素分布情况。通过图 4(a) 和图 4(b) 比较发现, 复合热轧卷头部位置沿界面长度方向有微孔缺陷存在, 而尾部位置的复合界面质量较好, 界面处未观察到孔隙、裂纹等缺陷。304/Q235B 双金属复合材料在经过系列轧辊热轧

之后, 会在中温条件 ( $\leq 400\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下进行连续卷制形成复合热轧卷, 而头部材料是热轧过程的初始阶段, 轧制参数易波动, 容易造成复合界面的质量问题, 出现微孔隙和微裂纹等缺陷, 同时后续卷制之后, 头部材料自然被卷制在内部被外部材料包裹, 散热条件差, 中温持续时间长, C 元素的

扩散迁移易在微缺陷周围聚集, 围绕微缺陷形成碳化物引起局部脆化, 加剧界面微孔隙、微裂纹缺陷的生长。

通过图 4(c) 和图 4(d) 的对比分析可以发现, 在复合界面处, 主要合金元素 Cr、Ni、Fe 的含量有明

显的过渡变化, 过渡变化区宽度尺寸约为 10.3  $\mu\text{m}$ 。扫描检测线由 304 不锈钢一侧到 Q235B 碳钢, Cr、Ni 元素含量逐渐降低到较低水平, Fe 元素含量逐渐升高到较高水平, 而 Mo 元素含量则无明显变化, 始终处于低水平。



(a) 热轧卷头部位置复合界面处结合特征; (b) 热轧卷尾部位置复合界面处结合特征; (c) 热轧卷复合界面处元素线扫描; (d) 热轧卷复合界面处主要合金元素分布

图 4 热轧复合卷界面处结合特征及元素分布情况

Fig. 4 Bonding characteristics and elements distribution at the composite interface of hot-rolled composite coils

## 2.2 复合管焊缝微观组织分析

图 5 给出了 304/Q235B 复合管焊缝横截面宏观结构特征和局部微观组织形貌。由图 5(a) 可看出, 焊缝横截面内熔敷金属、母材之间有明显区分, 无裂纹、气孔、夹杂和未熔合等缺陷存在。焊缝外观成形良好, 内外焊缝有焊偏且余高稍大, 外焊缝呈马鞍形。经测量, 内外焊缝焊偏量 2.83 mm, 中部焊缝金属重合量 2.34 mm, 内焊不锈钢焊缝熔深 6.59 mm、熔宽 11.91 mm、错边量 0.45 mm, 焊缝余高 2.23 mm, 外焊碳钢焊缝熔深 7.14 mm、熔宽 13.18 mm、错边量 0.85 mm, 焊缝余高 2.14 mm。焊缝成形尺寸满足 GB/T 31940-2015 《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》标准要求。

图 5(b) 和图 5(c) 给出了碳钢层焊缝的 OM 和 SEM 微观组织形貌。可看出基层碳钢焊缝为先共析铁素体(PF)+ 针状铁素体(AF)组织, 微区 SEM 呈现交错割裂形貌特征, AF 相互交错生长, 分布无序且杂乱不规则。不同组织相的交错割裂特征将极大

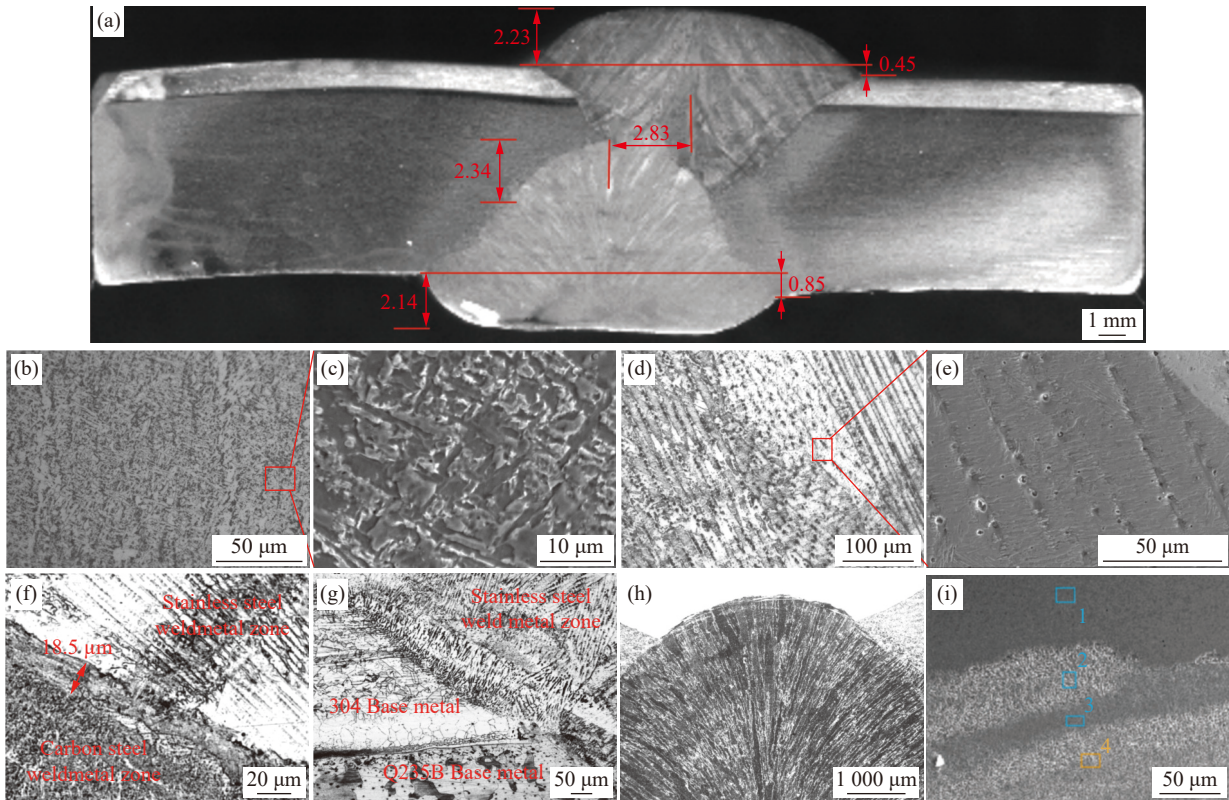
地阻碍位错运动, 易形成位错增值, 致使焊缝金属较母材有更高的强度性能, 这与焊材的匹配选用原则(超强匹配)有直接关系。

图 5(d) 和图 5(e) 给出了不锈钢层焊缝的 OM 和 SEM 微观组织形貌。可看出复层不锈钢焊缝为针片状奥氏体( $\gamma$ )+少量蠕虫状或条带状铁素体( $\delta$ )的复相组织结构。这种  $\gamma$ +少量  $\delta$  的复相组织, 少量的  $\delta$  相分布于  $\gamma$  晶界处, 可打乱粗大柱状树枝晶的生长方向, 使面积小而直的晶界变为曲折的长晶界, 从而破坏了腐蚀通道; 同时在  $\delta$  相中 Cr 溶解度较大, 对于晶间贫 Cr 区有良好的供 Cr 条件, 从而减少了贫铬层的形成, 对于提升焊缝的抗晶间腐蚀性能有较大作用<sup>[7-8]</sup>。

图 5(f) 给出了不锈钢、碳钢熔覆金属界面区 OM 微观组织形貌。可以观察到, 不锈钢熔覆金属区内柱状树枝晶具有清晰的生长方向性, 与碳钢熔覆金属之间存在一极小的熔合过渡区, 平均宽度尺寸约 18.5  $\mu\text{m}$ 。该类熔合过渡区在整个焊缝中为性

能最薄弱区,其形成的主要原因是熔池边缘液态金属温度较低,流动性较差,导致熔化的母材与填充金属或填充金属与填充金属之间不能充分混合,在靠近珠光体钢一侧熔合线的焊缝金属中就形成了一层与内部焊缝金属成分不同的过渡层。该过渡层中的

高硬马氏体组织相会使脆性增加,塑性显著下降,同时在该区域还存在 C 的扩散迁移,增大了熔合区发生脆断的倾向。因此,采用超低 C、高含 Ni 量的 CHW-309L 焊丝,以此控制熔合区马氏体脆性层的宽度和冲击韧性降低的幅度。



(a) 复合管弧焊接头宏观形貌; (b) 碳钢层焊缝中心区 OM 形貌; (c) 图 (b) 中方框区域 SEM 形貌; (d) 不锈钢层焊缝中心区 OM 形貌; (e) 图 (d) 中方框区域 SEM 形貌; (f) 焊缝熔覆金属过渡界面处 SEM 形貌; (g) 焊缝三相区微观组织形貌; (h) 焊缝金属熔合区的宏观形貌; (i) 微区元素面扫描检测

图 5 复合管焊缝宏观结构和各区微观组织形貌  
Fig. 5 Macrostructure of the composite pipe weld and microstructure of each zone

图 5(g) 给出了母材与不锈钢熔敷金属区的 OM 微观组织形貌。焊接热作用对母材复合界面处元素活度和分布有重要影响,必将加剧焊缝附近界面处 C 的扩散迁移,同时晶粒显著粗化<sup>[19]</sup>。

图 5(h) 给出了不锈钢、碳钢焊缝金属熔合区的宏观形貌,可以发现内外焊缝金属在中间部位有较好的重合量,保障了焊接质量。但外焊缝熔敷金属形貌完整,而内焊缝熔敷金属形貌不完整,充分说明先焊的内焊缝熔敷金属底部被后焊的外焊缝重熔,同时,由于不锈钢较碳钢导热性差的原因,在与不锈钢焊缝金属相对应的碳钢焊缝金属区域观察到了尺寸更大的柱状晶。

图 5(i) 给出了不锈钢、碳钢焊缝金属熔合区微

区元素面扫描检测情况。检测结果见表 4。可发现,微区 1 完全属于不锈钢焊缝金属, Cr、Ni 含量相对较高 ( $w_{Cr}=13.73\%$ 、 $w_{Ni}=6.77\%$ ), 微区 2 ~ 微区 4 的检测逐渐过渡到碳钢侧, Cr、Ni 含量显著降低,但仍然有强烈的合金元素互熔,微区 4 仍然有较 Q235B 钢高的 Cr、Ni ( $w_{Cr}=2.50\%$ 、 $w_{Ni}=1.39\%$ ) 含量,这也侧面印证了合金元素含量异常过渡层的存在,该层是形成过渡腐蚀区的本质所在。

### 2.3 复合管焊缝力学性能

根据标准 GB/T 31940-2015 《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》,对复合管焊缝拉伸、弯曲、冲击和显微硬度等力学性能进行了测评,结果如表 5 所示。拉伸试验试样均断裂于母材,正反弯 180°,

拉伸面无裂纹。说明, 复合管焊缝的强度性能、低温韧性、变形能力和显微硬度均符合标准要求。

2.4 复合管焊缝的抗晶间腐蚀性能

沿复合管焊缝横向取样, 试验条件为: 铜-硫酸铜-16% 硫酸溶液沸腾 16 h, 得到复合管复层焊缝中心及热影响区(HAZ)抗晶间腐蚀试验结果如表 6 所示, 试样经腐蚀后再进行弯曲, 拉伸面无裂纹, 符合腐蚀样弯曲 180°拉伸面无裂纹的标准要求, 具体情况如图 6 所示。可见, 复合管复层焊缝中心及 HAZ 具有优良的抗晶间腐蚀性能, 完全满足 GB/T

31940—2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》标准要求。

表 4 焊缝金属熔合区微区元素面扫描检测结果  
Table 4 Micro-area elements mapping detection results of the weld metal fusion zone %

NO.	Cr	Mn	Fe	Ni
1	13.73	1.63	77.87	6.77
2	1.94		96.95	1.11
3	4.19	0.96	92.30	2.55
4	2.50		96.11	1.39

表 5 304/Q235B 复合管焊缝拉伸、冲击、弯曲和显微硬度试验结果

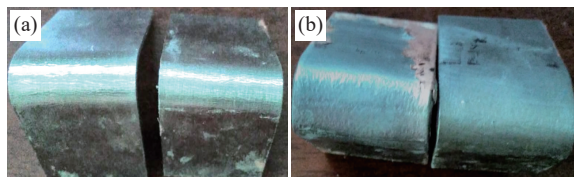
Table 5 Experimental results of tensile, impact, bending and micro-hardness tests for 304/Q235B composite pipe welds

Item	Weld joint tensile strength/MPa	Impact energy/J		Microhardness(HV10)		Bending (Bending axis $d=35$ mm)
		Weld center	HAZ	Cladding layer	Base layer	
Measured value	497, 480, 479	106, 108, 120	62, 55, 47	244, 250, 300, 296, 300, 292, 255, 242	149, 165, 196, 216, 232, 224, 162, 149	No cracks on the tensile specimen surface
Standard requirement	$\geq 370$	$\geq 24$		$\leq 300$	$\leq 248$	No cracks on the tensile specimen surface

表 6 304/Q235B 复合管不锈钢焊缝晶间腐蚀试验结果

Table 6 Intergranular corrosion test results of 304/Q235B composite pipe stainless steel welds

Sample No.	Bending axis diameter/mm	Bending angle/(°)	Result
H-1	1	180	Qualified
H-2	1	180	Qualified
HAZ-1	1	180	Qualified
HAZ-2	1	180	Qualified



(a)焊缝中心; (b)HAZ

图 6 复合管复层焊缝中心及 HAZ 抗晶间腐蚀试样弯曲结果

Fig. 6 Bending results of intergranular corrosion resistant specimens at the center of the cladding weld and in the HAZ of the composite pipe

3 结论

1) 大直径薄复层 304/Q235B  $\text{O}610 \text{ mm} \times (6+1) \text{ mm}$  双金属复合管材工程化批量生产可采用埋弧焊工艺技术实现, 焊接坡口采用“V+I”型设计, 内焊采用 CHW-309L+CHF117 的焊材匹配, 外焊采用 BG-H08E+SJ101 G(2) 的焊材匹配, 焊接速度为 1.7 m/min, 焊缝成形尺寸均符合 GB/T 31940-2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》标准要求。

2) 304/Q235B 复合管复层不锈钢焊缝为针片状  $\gamma$ +条带状或蠕虫状  $\delta$  的复相组织; 基层碳钢焊缝为少量 PF+ AF 的复相组织; 在母材热轧界面、复合管材焊缝熔合线处存在显著的 C 扩散迁移区, 属于原料卷和复合管材性能的最薄弱区。

3) 研究开发的 304/Q235B  $\text{O}610 \text{ mm} \times (6+1) \text{ mm}$  双金属复合管材具有优良的力学性能和耐腐蚀性能。焊缝强度、低温韧性、显微硬度、塑性变形等各项力学性能和抗晶间腐蚀性能完全满足 GB/T 31940-2015《流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管》标准要求。

参考文献

[ 1 ] YAO G H, LIU M, YE W H, *et al.* Effect of microstructure on the hydrogen cracking behavior of bimetallic metallurgical clad pipes: The role of precipitated phases and inclusions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 137(7): 13-25.

- [ 2 ] SUN Y W, YU S R, WANG B Y, *et al.* Study on pitting behavior of welding joint of bimetal composite pipes in suspended sulfur solution[J]. *Crystals*, 2025, 15(2): 165-172.
- [ 3 ] EVGENIIA P, KRISTINA K, IVAN K, *et al.* Microstructure, physical-mechanical, and magnetic characteristics of a butt-welded joint obtained by rotary friction welding technology of bimetallic pipe[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8(6): 271-279.
- [ 4 ] LI B W, ZHANG M, ZHANG K R, *et al.* The nucleation and growth of fine austenitic grain at interface of the L415QS/N08825 bimetallic composite pipe by explosive welding[J]. *Materials Letters*, 2024, 367: 136593.
- [ 5 ] WANG B, LAN H X, LEI B B. Effect of elding method on microstructure and mechanical properties of L360QS/N08825 composite pipe welded joint[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2020, 73(7): 629-643.
- [ 6 ] WANG B, LEI B B, WANG W, *et al.* Investigations on the crack formation and propagation in the dissimilar pipe welds involving L360QS and N08825[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58(8): 56-63.
- [ 7 ] NING Y Q, QIU S F, TANG L, *et al.* Study on microstructure and properties of welded joint of L360QS/N08825 bimetallic composite pipe[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 34(2): 1-10.
- [ 8 ] WANG L, WU D, CUI C W, *et al.* In situ observation on fracture behavior of the three-phase zone of the L415/N08825 bimetallic composite pipe welded joint[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 276: 108898.
- [ 9 ] WANG L, WU D, XU M, *et al.* Microstructure and mechanical properties of L415/N08825 bimetallic composite pipe welded joint using GTAW + SMAW[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 23(1): 18.
- [ 10 ] GOU N N, ZHANG L J, ZHANG J X. Increased quality and welding efficiency of laser butt welding of 2205/X65 bimetallic sheets with a lagging MIG arc[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 251: 83-92.
- [ 11 ] BI Z Y, YANG J, LIU H Z, *et al.* Investigation on the welding process and microstructure and mechanical property of butt joints of TA1/X65 clad plates[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(2): 1017-1024.  
(毕宗岳, 杨军, 刘海章, 等. TA1/X65 复合板焊接工艺及焊缝组织和性能研究[J]. *金属学报*, 2016, 52(2): 1017-1024.)
- [ 12 ] YANG J, BI Z Y, NIU H, *et al.* Research on welding process, microstructure and mechanical property of TA1/X65 clad plates[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2015, 38(6): 1-10.  
(杨军, 毕宗岳, 牛辉, 等. TA1/X65 复合板焊接工艺及焊缝组织和性能研究[J]. *焊管*, 2015, 38(6): 1-10.)
- [ 13 ] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, *et al.* Effect of Cu on microstructure evolution and mechanical properties of Fe-Nb dissimilar welds[J]. *Materials Letters*, 2019, 234: 113-116.
- [ 14 ] CHU Q L, BAI R X, ZHANG M, *et al.* Microstructure and mechanical properties of titanium/steel bimetallic joints[J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 330-337.
- [ 15 ] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, *et al.* Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 689: 323-331.
- [ 16 ] LUO H L, ZHANG M, MU E L, *et al.* Microstructures and microhardness of TA1/Q235B joints welded by TIG with Cu-based flux-cored wire[J]. *Transactions of The China Welding Institution*, 2019, 40(1): 141-147.  
(罗海龙, 张敏, 慕二龙, 等. Cu 基药芯焊丝 TIG 焊 TA1/Q235B 接头微观组织和显微硬度[J]. *焊接学报*, 2019, 40(1): 141-147.)
- [ 17 ] ZHANG M, MU E L, WANG X W, *et al.* Microstructure and mechanical property of the welding joint of TA1/Cu/X65 trimetallic sheets[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(7): 1068-1076.  
(张敏, 慕二龙, 王晓伟, 等. TA1/Cu/X65 复合板焊接接头微观组织及力学性能[J]. *金属学报*, 2018, 54(7): 1068-1076.)
- [ 18 ] ZHANG M, WANG X W, HAN T, *et al.* Effect of intermediate Cu-layer on mechanical properties of welded joints of TA1/X65 composite plate[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2018, 32(2): 81-89.  
(张敏, 王晓伟, 韩挺, 等. 中间 Cu 层对 TA1/X65 复合板熔焊接头性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2018, 32(2): 81-89.)
- [ 19 ] LIU Y, YANG J. Study on microstructure and properties of Q235B/SUS304 spiral metallurgy composite pipe welded joint by submerged arc welding[J]. *Welding & Joining*, 2019(10): 38-46, 51.  
(刘云, 杨军. Q235B/SUS304 螺旋冶金复合管理弧焊接头的组织和性能[J]. *焊接*, 2019(10): 38-46, 51.)