# 过渡层焊材选型对薄内衬 304/Q235B 复合管 焊后耐蚀性影响

# 付晓斌<sup>1,2,3</sup>,张婷婷<sup>1,2,3</sup>,张俊伟<sup>1,2,3</sup>,王涛<sup>1,2,3</sup>,黄庆学<sup>1,2,3</sup>

(1.太原理工大学机械与运载工程学院,太原 030024; 2.太原理工大学先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程 研究中心,太原 030024; 3.太原理工大学中澳联合研究中心,太原 030024)

摘要:薄内衬双金属复合管受管壁厚度影响,无法对内衬层进行单道次焊接。文中对内衬层 304 厚度 0.6 mm,基层 Q235B 厚度 4.0 mm 的双金属复合管,采用钨极氩弧焊及过渡层 + 基层 2 层 3 道次的焊接方法,选用 ER309L 焊丝、TGF309L 焊丝及 ERNiCrMo-3 焊丝进行过渡层的焊接,选用 ER70S-6 焊丝进行基层焊接,设计了 3 种焊接方案,对焊接接头进行了显微组织和耐蚀性能分析,重点分析不同过渡层焊材的选取对焊接接头耐蚀性能的影响。结果表明,3 种焊接方案的焊缝成形良好,选用 ER309L 和 TGF309L 焊丝焊接的过渡层焊缝显微组织致密,为奥氏体 + 少量蠕虫状铁素体,焊缝-母材合金元素过渡均匀,焊后接头自腐蚀电流较小;选用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接其过渡层显微组织特点为镍元素不能充分扩散,在奥氏体中出现聚集现象,并伴有晶间组织,焊后接头钝化区间长度及击破电位较高,3 组方案耐腐蚀性能均强于复合管母材。

关键词:不锈钢复合管;焊接工艺;显微组织;耐蚀性能

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20220927002

# The influence of selection of transition layer welding materials on corrosion resistance of thin lined 304/Q235B composite pipe

Fu Xiaobin<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tingting<sup>1,2,3</sup>, Zhang Junwei<sup>1,2,3</sup>, Wang Tao<sup>1,2,3</sup>, Huang Qingxue<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. TYUT-UOW Joint Research Center, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Aiming at that the lining layer of 0.6 mm + 4.0 mm thin-lined 304/Q235B composite pipe cannot be welded alone, the two-layer three-pass welding method of transition layer+base layer (divided into filling layer and cover layer) and tungsten inert gas welding (TIG) were proposed. The ER309L welding wire, argon-free welding wire TGF309L and nickel-based alloy welding wire ERNiCrMo-3 were used to weld the transition layer. The ER70S-6 welding wire was used to weld the filling layer and the cover layer. Moreover, three welding schemes were designed and the microstructure and corrosion resistance of the welded joints were analyzed. The influence of the selection of welding materials with different transition layers on the corrosion resistance of welded joints was emphatically analyzed, the results show that the welds of the three welding schemes are well formed. The transition layer welds with ER309L and TGF309L welding wires are austenite and a small amount of wormlike ferrite. The transition layer welds with ERNiCrMo-3 welding wire are composed of fine nickel-rich austenite equiaxed grains and intercrystalline structures. The self-corrosion current of the welded joint with ER309L and TGF309L welding wire is low, while the length of passivation region and breakdown potential of the joint with ERNiCrMo-3 welding wire are higher, and the corrosion resistance of the three schemes is stronger than that of the base metal of the composite pipe.

Key words: stainless steel composite pipe, welding process, microstructure, corrosion resistance

# 0 前言

由于铁质材料便于加工,力学性能优良,目前城 市给排水管道常采用铸铁管道或者碳钢管道,但经 常接触腐蚀性介质的管道内部极易生锈腐蚀<sup>[1-3]</sup>。双 金属复合管是基层金属(如碳钢)与覆层抗腐蚀能力 强的金属(如不锈钢)通过轧制或爆炸等方法使其界 面结合的一种管材,既具有基层材料优良的力学性 能,又具有复层材料的优良耐蚀性能<sup>[4-6]</sup>,近年来常被 用于城市输水管道、石油化工管道等场合。

复合管常用焊接方法进行接头连接,影响复合管 焊后接头耐蚀性能的主要因素是焊接工艺与焊接材 料的选取。受基层金属和内衬层金属的化学成分差 异、力学性能差异的影响,接头部分属于异种金属的 焊接,且常用的内衬层+过渡层+基层的3层焊接方 法不适用于薄壁复合管。针对这一问题,文中采用 过渡层+基层的两层焊接工艺及钨极氩弧焊(TIG) 方法,选用 ER309L, TGF309L, ERNiCrMo-33种不同 的焊丝进行复合管过渡层的焊接,分析了过渡层焊 材的选取对接头耐蚀性能的影响,为不同服役要求的 场合提供了焊材选取推荐,具有一定的实际应用价值。

## 1 试验方法

# 1.1 焊接坡口与焊接材料的选择

TIG 焊热输入较小,可以有效避免焊接接头晶粒 粗大导致的力学性能下降。文中采用 TIG 焊对复合 管进行焊接,且由于小口径复合管内径较小,选用带 钝边的 V 形坡口进行单侧焊接,其尺寸如图 1 所示。



#### 图 1 带钝边的 V 形坡口尺寸示意图

文中选用2层3道次(过渡层+基层,其中过渡 层为对内衬层不锈钢及复合界面的焊接,基层分为 填充层和盖面层2个焊接道次)的焊接方法,以进一 步减小焊接热输入。选用 ER309L, TGF309L 和镍 ERNiCrMo-33种焊丝进行过渡层焊接,其中 ER309L 焊丝常用于异种钢焊接,如碳钢和不锈钢之间的对 接焊; TGF309L 焊丝为免充氩焊丝; ERNiCrMo-3 焊丝 为镍基合金焊丝,常用于铁质管道堆焊。填充层和 盖面层焊接则选用常用的碳钢焊丝 ER70S-6。设计 了3组焊接方案,分析不同过渡层焊材对焊后接头耐 蚀性能的影响,各道次焊材的选用见表1。

表 1 焊接材料的选择

焊接方案	焊材选择
А	ER309L(1 道次)+ER70S-6(2,3 道次)
В	TGF309L(1 道次)+ER70S-6(2,3 道次)
С	ERNiCrMo-3(1 道次)+ER70S-6(2,3 道次)

#### 1.2 焊接试验参数

表2展示了不同焊接道次的焊接工艺参数。各 道次焊丝直径均为1.6 mm。焊接时保护气体为氩气, 喷嘴氩气流量为13~15 L/min;为避免焊接时焊缝背 面氧化,方案A、方案C在焊接过渡层时需进行背面 充氩保护,氩气流量为7~9 L/min,方案B采用免充 氩焊丝进行过渡层焊接,不需要背面充氩保护。试 验中发现带有药皮的免充氩TGF309L焊丝相对于其 它组,需要较大的电流与电压方可保证熔合。在施 焊时需将各焊道层的温度限制在低温下(150℃以 下),以免因高温状态下保温而产生晶粒长大;文中 通过在每道次焊接之间将试样静置空冷 20 min,再进 行下一道次的焊接来控制焊道层间温度。

表 2 焊接工艺参数

				-
相控送应	焊接	热输入	焊接电流	电弧电压
杆按坦伏	方案	$E/(J \cdot mm^{-1})$	I/A	U/V
	А	639.375	55	7.5 ~ 8.0
$\square$	В	833.625	65	8.3 ~ 8.8
	С	639.375	55	7.5 ~ 8.0
	A, B, C	500.250	46	7.0 ~ 7.5

#### 1.3 焊后性能检测

焊后对3组方案焊接接头进行显微组织观察、 元素能谱分析和耐蚀性能分析。

用线切割方法切取适当大小的试样,试样要涵盖 焊缝全部、热影响区全部及部分母材;经打磨抛光并 腐蚀后用显微组织观察、扫描电镜扫描和能谱分析 对焊接接头进行组织分析。

切取 10 mm × 10 mm 的试样,并使焊缝居于试样 正中位置,设计电化学试验,通过动电位极化法研究 焊接接头内侧的腐蚀行为。

## 2 试验结果

2.1 过渡层焊缝显微组织观察

对焊接好的复合管接头进行电火花线切割,加工 尺寸为50mm×10mm×4.6mm的金相试样,并且使 焊缝位置居中。在打磨抛光后,采用4%的硝酸酒精 溶液对碳钢侧进行腐蚀,用王水溶液对不锈钢侧和 焊缝进行腐蚀。利用徕卡光学显微镜观察过渡层焊 缝中心位置的组织,具体位置如图2所示。此区域为 复合管内衬层焊接接头,其组织与性能对复合管性 能,特别是耐蚀性能影响很大。并且,各焊层金属与 母材的合金元素含量存在区别,易发生合金元素稀 释、碳迁移,为焊接接头显微组织观察的重点区域。



图 2 显微观察位置示意图

图2所选取位置3组焊接接头显微组织如图3 所示,焊缝中心为典型的等轴晶组织。观察图 3a, 3b 可知,方案A、方案B过渡层焊缝组织均为奥氏体组 织加少量铁素体组蠕虫状铁素体组织。这是由于采 用 ER309L 或 TGF309L 作为过渡层焊材时,铁素体形 成元素 Cr含量较高,焊缝的结晶形式为 FA(铁素体-奥氏体)模式,在焊缝熔融金属冷却凝固的过程中,δ 相铁素体首先析出:随着继续冷却,温度降至1573~ 1073 K 区间时, 铁素体边界处开始有 y 相奥氏体析 出;而由于冷却速率影响,焊缝中F→A的转变过程 未完全完成,会有残余铁素体出现在奥氏体晶粒间, 且焊缝区域的铬镍当量比值越大,残留铁素体越多, 且多呈蠕虫状或骨架状<sup>[7-11]</sup>。蠕虫状铁素体凝固过 程,会富集焊材中的P,S等有害元素,避免焊缝元素 偏析导致凝固裂纹的产生;蠕虫状、骨架状铁素体在 奥氏体晶粒间可以打乱单一奥氏体组织的方向性; 且其含量较多的 Cr 元素也可以诱导 C-Cr 化合物在 其晶间析出,一定程度上可以避免C-Cr化合物在奥

氏体晶间生成、贫铬层贯穿奥氏体晶粒之间导致的 晶间腐蚀<sup>[12]</sup>。方案 A、方案 B 可以得到兼具良好的力 学性能和耐腐蚀性能的焊后组织。



(c) 方案 C

图 3 1 道次焊缝显微组织

观察图 3c 可知, 方案 C 过渡层焊缝区由等轴奥 氏体晶粒及晶间组织构成, 没有粗大的柱状晶, 易得 到力学性能良好的焊接接头。由于镍基合金焊丝的 焊缝组织明显区别于方案 A、方案 B 接头和内衬层 不锈钢母材, 方案 C 能否得到具有良好耐蚀性能的 焊接接头, 需进行耐蚀性能试验评定。

2.2 复合管焊接接头元素能谱分析

复合管复合界面焊接时,由于各焊层与母材合金

元素含量的差异,易发生合金元素偏聚、碳迁移,从 而使对焊接头的力学性能和抗腐蚀性能下降。而大 直径厚壁双金属复合管的焊接工艺成熟,常采用3层 焊接工艺,先采用异种钢焊材焊接过渡层,减少基层 母材、焊缝对内衬层焊缝的合金元素稀释;然后根据 等元素匹配原则,选用与内衬层母材元素基本一致 的焊材,保证焊缝和内衬层母材处于同一电极电位 区,避免腐蚀电池的形成;最后采用碳钢焊材焊接基 层焊缝。而文中舍弃了第二步的内衬层焊接,采用 直接焊接过渡层的方法。针对这种方法,文中对接 头各位置进行元素能谱(EDS)分析,测定接头各个位 置处的合金元素含量变化,佐证后文的电化学分析; 另一方面,通过C元素含量的变化,可以初步确定基 层母材与过渡层焊缝之间是否有脱碳层和增碳层的 形成。

2.2.1 点扫描

对基层、内衬层母材及填充层、过渡层焊缝区域 分别做 EDS 能谱分析,进行合金元素含量的测量。 选定的点扫描位置如图 4 所示,各选定位置点扫描数 据分布如图 5 所示。

由图 5 可知,方案 A、方案 B 填充层合金元素含



图 4 选定的点扫描位置示意图



图 5 各选定位置点扫描

量基本相同,而方案C的填充层焊缝含有相对较多的Cr,Ni元素,这是由于方案C过渡层焊材为镍基合金焊丝,在焊接填充层焊缝时,部分过渡层焊道材料熔入填充层焊缝中。

过渡层焊缝由于直接暴露于复合管内部,其耐蚀 性能会显著影响复合管整体的耐蚀性能。以图 4 中 位置 5 为例,方案 A、方案 B 的 Cr 含量分别为 18.7% 及 18.2%,与内衬层 304 母材(17.4%)处于同一电极电 位区,从而减弱了由于电位差异引起的电极腐蚀;方 案 C 过渡层焊缝的 Ni, Mo 含量高于内衬层 304 母材, 相当于在接头处堆焊了一层耐蚀合金<sup>[13]</sup>。

A, B, C 3 组方案在位置 4 及位置 5 处的合金元 素成分及含量基本一致,可以得知 1 道次焊缝(过渡 层)在组织和性能方面的均匀性。

2.2.2 线扫描

为了进一步观察母材与接头各焊层之间合金元 素含量变化情况,对基层母材—过渡层焊缝和内衬 层母材—过渡层焊缝区域进行线扫描分析。线扫描 位置如图6所示。



图 6 线扫描位置

基层母材—过渡层焊缝区域的合金元素稀释及 碳迁移现象,易使焊缝的力学性能劣化;而内衬层母 材—过渡层焊缝区域的元素跃迁,会对复合管的耐 蚀性能产生不利影响,需对这两个区域进行重点研究。

图 7 是 3 种焊接方案在图 6 所选取线扫描位置 1 的扫描电镜(SEM)及 EDS 线扫描结果。由图 7a~ 图 7c 可以看出,基层为常见的铁素体/珠光体碳钢, 熔合线附近受焊接热循环影响发生组织重熔,受过 冷度影响生成粗大的铁素体晶粒,且发生局部脱碳。 焊缝区域在焊接过程中呈熔融态,而相对于固态铁, 熔融状态的铁可以溶解更多的铁元素;3 组方案的过 渡层焊材的 C 含量也低于碳钢母材,进一步推动了 C 元素从基层碳钢向过渡层焊缝的迁移<sup>[14]</sup>。



图 7 线扫描位置 1 处的扫描电镜形貌和能谱线扫描

如图 7a, 7b 所示, 方案 A、方案 B 基层母材—过 渡层焊缝熔合线附近发生碳迁移, 熔合线较模糊, 碳 扩散层较宽; 而图 7c 中, 方案 C 的熔合线清晰, 增碳 层宽度很窄, 表现为清晰的 1 条黑线, 这是由于 C 元 素在奥氏体和铁素体中的活度不同。方案 C 的过渡 层焊缝组织主要是富 Ni 奥氏体, 富 Ni 奥氏体具有密 排结构, 碳原子的扩散系数很小; 方案 A、方案 B 的 过渡层焊缝含有大量的铁素体组织, 铁素体为非密 排结构, 碳原子的扩散系数较大<sup>[15]</sup>。此外, 如图 7a, 7b 所示方案 A、方案 B 中母材到焊缝的微观组织由 铁素体(F)到奥氏体(A), 在其中模糊熔合线为类马 氏体组织, 焊接接头存在两层焊接边界; 而方案 C 采 用 Ni 含量高的 Inconel 镍基合金焊丝, 母材到焊缝只 有铁素体(F)→奥氏体(A)一层焊接边界, 碳迁移主 要集中在 F/A 边界上, 即图 7c 中清晰的熔合线处。

EDS 线扫描分析结果显示,3组方案接头熔合线 附近均发生合金元素稀释,合金元素含量均匀地梯 度分布。方案 A、方案 B的元素扩散区宽度分别为 20,26 µm,由于存在前文所述的类马氏体区,C元素 含量波动较大。方案 A、方案 B元素扩散区合金元 素含量变化趋势基本相同,由于方案 B的过渡层焊 丝带有药皮,一定程度上减少了合金元素的烧损,导 致方案 B焊缝合金元素含量略高。方案 C元素扩散 区宽度明显小于方案 A 和方案 B, 只有 6 µm, 这是由 于方案 C 过渡层焊缝中 Cr, Ni, Mo 等合金元素含量 明显高于方案 A 和方案 B, 熔合线两侧较大的元素差 异使浓度梯度增大, 增大了合金元素扩散的驱动力, 使得在较短区域内实现了扩散平衡。方案 C 的碳迁 移主要集中在 F/A 边界上, 如图 8f, 熔合线右侧出现 一个 C 元素尖峰, 此处易生成碳化铬等组织, 会对焊 接接头力学性能产生一定的不利影响。

图 8 为图 6 中线扫描位置 2 处的 SEM 及 EDS 线 扫描结果。如图 8a, 8b 所示, 内衬层母材为单一奥氏 体组织, 方案 A、方案 B 的过渡层焊缝为典型的奥氏 体 + 残余铁素体组织; 在图 8a, 8b 中熔合线处, 部分 铁素体组织侵入内衬层母材, 这是由于当工件是多 相材料时, 在施焊融化时铁素体组织会向外延伸。 靠近焊缝的内衬层母材奥氏体晶粒的生长受向外延 伸的铁素体限制, 晶粒尺寸略低于内衬层母材过热 区晶粒的平均尺寸<sup>[16]</sup>。图 8c 所示, 方案 C 的内衬层 母材--过渡层焊缝熔合线较为清晰, 受过冷度影响, 过渡层焊缝组织为垂直于熔合线生长的富镍奥氏体 柱状晶。

3 组方案内衬层母材--过渡层焊缝区域的 EDS 线 扫描结果显示,方案 A、方案 B 熔合线两侧合金元素 成分几乎没有区别。这表明 ER309L, TGF309L 焊丝





在合金元素适度烧损后,基本与304母材相当,比常 用的304焊材更适合作为过渡层焊材。方案C相当 于在焊缝内侧堆焊耐蚀合金,但这种方法能否提高 接头的耐蚀性能,需在后续进行电化学腐蚀试验进 行观测。

2.3 复合管焊接接头电化学性能

2.3.1 动电位极化曲线的测定

文中采用 DH7000 电化学工作站进行动电位极 化曲线的测定。电化学试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 5 mm。工作站电极系统采用工作电极—饱和甘汞 (SCE)—辅助铂电极三电极体系,电解液为 3.5% 的 NaCl 溶液。测量前将电化学试样在电解液中浸泡 约 40 min 以减小干扰。极化曲线测量范围为自工作 电极的开路电位-0.6 V~+1.5 V,测试扫描速率为 0.001 V/s。

3组方案和母材的动电位阳极极化曲线如图9所示。在塔菲尔线性区间(开路电位范围为±60 mV~ 120 mV)内,对极化曲线进行线性拟合,得到试样的 自腐蚀电位 *E*<sub>cor</sub>和自腐蚀电流 *I*<sub>cor</sub>。如图 10 所示,3 组焊接接头的自腐蚀电位 *E*<sub>cor</sub>均高于母材,这是由于 方案 A 和方案 B 这 2 组接头微观组织为奥氏体 + 少 量蠕虫状铁素体。而方案 C 所采用的 ERNiCrMo-3 焊丝中的铬含量远高于不锈钢母材,这样就有助于



图 9 阳极极化曲线



图 10 极化曲线电参数数值

在接头外层形成钝化膜从而提高耐蚀性能。

自腐蚀电流表征了开路电位下试样腐蚀速率的 大小。3组方案焊接接头和母材自腐蚀电流密度 Icorr 的大小顺序为方案 C>母材>方案 B>方案 A,方案 C的自腐蚀电流密度明显大干方案 A、方案 B 和母材 的自腐蚀电流密度,这是由于镍基合金焊缝与304母 材在电解质溶液中构成了腐蚀原电池, 使接头在自 腐蚀电位下的腐蚀电流显著增大。

作为钝化金属,焊接接头在钝化区间的性能更重 要,需要评估3组方案的击破电位E,和维钝电流Imo。 3组方案焊接接头与母材的击破电位 Et 大小顺序为 方案 C>方案 B>方案 A>母材,钝化区间长度大小 顺序为方案 C>方案 A>方案 B>母材, 这表明方案 C接头外表面的钝化层的稳定性显著高于方案A、方 案B和母材。不锈钢外表面钝化层稳定与否与接头

中的镍铬钼成分含量相关,而方案C的镍基合金焊 缝中含有大量此类元素。3组试样与母材的维钝电 流 Im 大小顺序为方案 A>方案 B>方案 C>母材,在 钝化区间内3组方案焊接接头的自腐蚀速率均较小, 这表明3种焊接方案钝化层都能有效的减小电化学 腐蚀。

图 11 分别为母材及 3 种方案的焊接接头在电化 学腐蚀后的宏观形貌,由图 11b,11c 可以看出,方案 A、方案B经电化学腐蚀后,点蚀坑密布在整个工作 电极表面上,分布非常均匀,与图 11a 中母材电化学 腐蚀后形貌相近,这表明方案A、方案B焊缝的耐蚀 性能达到与母材相当,熔合线处过渡非常良好。方 案C经电化学腐蚀后,焊缝区域几乎无点蚀坑,这表 明方案C下接头的焊缝区抗腐蚀能力明显改善。电 化学腐蚀后产生的点蚀坑分布特点与阳极极化曲线



图 11 电化学腐蚀处理后试件宏观形貌

趋势相吻合。

2.3.2 交流阻抗分析

对方案 A、方案 B、方案 C 进行交流阻抗测试, 可以得到反映阻抗信息的奈奎斯特图和伯德图。对 试样施加幅值为5mV的交流正弦激励信号,以0.01V/s 的扫描速度扫描  $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^{-2}$  Hz 频率区间。

图 12 为母材和 3 组方案焊接接头在 3.5%NaCl 溶液中的奈奎斯特图和伯德图。母材和3组方案焊 接接头的奈奎斯特图皆展示出1个容抗弧,即所有试 件的外表面皆获得了性能良好的钝化层。3组方案 焊接接头电化学腐蚀反应由电荷转移主导,在低频 区未发生明显的物质转移,也即半无限扩散。

为了更直观的对比3组方案的耐蚀性能,利用 ZView阻抗谱分析软件对测得的阻抗谱数据进行拟 合,得出各种对比数据如图 13 所示。基于弥散效应, 在拟合过程中,双电层电容 $C_{a}$ 常用恒相位元件 $CPE_{a}$  进行近似替代,其中,CPE<sub>dl</sub>-T代表电容量,CPE<sub>dl</sub>-P代 表与Ca的试验值与纯电容的接近程度,0为纯电阻, 0.5 为韦伯阻抗,1 为纯电容[17]。如图 14 所示,各组试 样的电荷转移电阻 R。值大小顺序为:方案 C>方案 A >方案 B, 而在阻抗测试中, R。值对接头耐腐蚀性影 响最大。方案C的R,值明显大于方案A、方案B和 母材,这证明采用镍基合金焊丝焊接过渡层焊缝来 提高焊接接头的耐蚀性能的方案是可行的。

由于方案 A、方案 B 焊缝中的铁素体组织有利 于提高焊缝的耐腐蚀性能,因而方案A、方案B的R。 值高于母材。方案 B 的 R。值略低于方案 A, 这是由 于方案 B 热输入较大, 焊接热影响区粗晶区宽度明 显大于方案 A,在电化学腐蚀过程中,粗晶区更容易 发生腐蚀。3组焊接方案焊接接头耐蚀性能均优于 未焊接的母材。经数据拟合计算出的等效电路如图 14 所示。









图 14 拟合得出的等效电路

# 3 结论

(1)文中采用的3组焊接方案各道次焊缝均成形 良好。通过对扫描电镜显微观察和元素能谱数据分 析结果表明, ER309L或 TGF309L焊丝过渡层焊缝为 奥氏体+少量蠕虫状铁素体组织,化学成分与304母 材基本一致; ERNiCrMo-3焊丝过渡层焊缝为细小的 富镍奥氏体+晶间组织。3组方案基层母材—过渡 层焊缝区域均发生明显的碳迁移现象。

(2)电化学测试结果表明,3组焊接方案接头抗腐蚀能力均优于不锈钢母材。采用 ERNiCrMo-3焊 丝,焊后接头外表面钝化层完整,性能稳定,抗腐蚀 能力显著优于其余焊接方案。

(3)采用 ER309L 及 TGF309L 焊丝对过渡层施焊, 焊后抗腐蚀能力良好,可以根据充氩难易程度,在耐 蚀性能要求不高的情况下选用;采用 ERNiCrMo-3 焊 丝对过渡层焊接可显著提升焊缝的抗腐蚀能力,但 由于成本较高,可以在对耐蚀性能有较高要求的场 合酌情选用。

#### 参考文献

- [1] 王康凤,陈旭,蔡亮,等.长输管道防腐层技术现状和发展 趋势[J].全面腐蚀控制,2022,36(1):120-122.
- [2] Feng Ma. Research on anti-corrosion and integrity management technology of gathering pipeline[J]. Scientific Journal of Intelligent Systems Research, 2021, 3(10): 78 – 81.
- [3] 刘云,杨军. Q235B/SUS304螺旋冶金复合管埋弧焊接头的组织和性能[J].焊接,2019(10):38-46.
- [4] Wang Fushan, Li Fagen, Li Yajun, et al. Analysis of welding technology about bimetallic clad pipelines[J]. Key Engineering Materials, 2022, 905: 9 – 13.
- [5] Li Liying, Niu Xianwei, Han Bin, et al. Microstructure and properties of laser cladding coating at the end of L415/316L bimetal composite pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 195:: 1 – 13.
- [6] Alabtah Fatima Ghassan, Mahdi Elsadig, Khraisheh Marwan. External corrosion behavior of steel/GFRP com-

posite pipes in harsh conditions[J]. Materials, 2021, 14(21): 26501.

- [7] Nhung Le Thi, Nam Nguyen Duong, Khanh Pham Mai. Effect of temperature on  $\delta$ -ferrite morphology of carbon steel and austenitic stainless steel welds[J]. Materials Science Forum, 2021, 6: 23 – 32.
- [8] Suutala N, Takalo T, Moisio T. The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austeniticferritic stainless steel welds[J]. Metallurgical Transactions A, 1979, 10(4): 512 - 514.
- [9] Diez F M, Liu S. Compositional boundary between primary austenitic and ferritic Mn-Cr and Ni-Cr steel weld metals[J]. Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 2007, A452/453 (4): 1 7.
- [10] 朱玮,吴建祥,沈圣华.奥氏体不锈钢中铁素体含量对低 温冲击性能和焊接性能的影响[J]. 冶金与材料, 2020, 40(2):63-64.
- [11] Yuri T, Ogata T, Saito M, et al. Effect of welding structure and δ-ferrite on fatigue properties for TIG welded austenitic stainless steels at cryogenic temperatures[J]. Cryogenics, 2000, 40(4-5): 251 – 259.
- [12] 吴冰洁,王留兵,王庆田,等.奥氏体不锈钢焊缝中δ铁素

体含量测定的探讨[J]. 电焊机, 2019, 49(4): 78-81.

- [13] Tichter T, Schneider J, Roth C. Convolutive modeling of cyclic voltammetry, AC-voltammetry, sine wave voltammetry and impedance spectroscopy with interfacial CPE behaviour and uncompensated ohmic resistances: A unified theory[J]. Electrochimica Acta, 2021, 393: 139006.
- [14] Aruyama T. Arc welding technology for dissimilar joints [J]. Welding International, 2003, 17(4): 276 – 281.
- [15] 何康生,鲁雄夫.异种金属焊接[M].北京:机械工业出版 社,1988.
- [16] Huang Y, Huang J, Zhang J, et al. Microstructure and corrosion characterization of weld metal in stainless steel and low carbon steel joint under different heat input[J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102948.
- [17] 张俊伟. Q235B/304薄内衬双金属复合管TIG焊接头组织 与性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- **第一作者:** 付晓斌,博士,讲师;主要从事复合管板制备及 焊接方面研究;fuxiaobin@tyut.edu.cn。
- 通信作者: 王涛,博士,教授;主要从事复合管道焊接及金 属层状复合板制备方面研究;twang@tyut.edu.cn。

(编辑:曲畅)

#### 本文引用格式:

付晓斌,张婷婷,张俊伟,等. 过渡层焊材选型对薄内衬 304/Q235B 复合管焊后耐蚀性影响[J]. 焊接, 2023(2): 29-37. Fu Xiaobin, Zhang Tingting, Zhang Junwei, et al. The influence of selection of transition layer welding materials on corrosion resistance of thin lined 304/Q235B composite pipe[J]. Welding & Joining, 2023(2): 29-37.

(上接第28页)

- [15] Kim Kihyuk, Moon Injun, Kim Kiwon, et al. Influence of carbon equivalent value on the weld bead bending properties of high-strength low-alloy steel plates[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 33(4): 321 – 329.
- [16] Long Xiaoyan, Zhang Fucheng, Yang Zhinan. Study on microstructures and properties of carbide-free and carbide-bearing bainitic steels[J]. Materials Science and Engineering:
  A, 2018, 715(7): 10 16.
- [17] Li Xueda, Fan Yuran, Ma Xiaoping, et al. Influence of martensite-austenite constituents formed at different intercritical temperatures on toughness[J]. Materials & Design, 2015, 67: 457 - 463.
- 第一作者: 张永林,硕士;主要从事材料加工工程专业相关 工作;专利 6项,发表论文 4篇;205903004@ qq.com。

(编辑:曲畅)

#### 本文引用格式:

张永林,安同邦,郑庆,等. 屈服强度 1 400 MPa 级低合金超高强钢的 SH-CCT 曲线及其粗晶热影响区组织[J]. 焊接, 2023(2): 24-28, 37.

Zhang Yonglin, An Tongbang, Zheng Qing, et al. The SH-CCT diagram and CGHAZ microstructure of 1 400 MPa grade HSLA steel[J]. Welding & Joining, 2023(2): 24 – 28, 37.