

SU304/Q235B 不锈钢复合管环焊及 补焊工艺研究 *

张 君^{1,2}, 赵红波^{1,2}, 李中祥³, 牛 辉^{1,2},
姜 帆³, 李 鹏¹, 赵颇如⁴

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008; 3. 上海宝世威石油钢管制造有限公司,
上海 200941; 4. 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007)

摘 要: 针对 SU304/Q235B $\Phi 820$ mm \times 8 (6.7+1.3) mm 不锈钢复合管生产制造过程中内外断弧补焊、烧穿补焊、管内 304 不锈钢覆层损伤堆焊以及管道建设施工环缝焊接进行工艺试验研究。通过试验分析, 采用的 U 形坡口 GTAW+SMAW 环焊、内外断弧 SMAW 补焊、烧穿 SMAW 补焊及覆层 GTAW/SMAW ERNiCrMo-3 堆焊工艺, 均可使焊缝理化性能达到标准要求, 且抗腐蚀性能良好。同时, 对不同焊接坡口、焊接工艺及错边量对焊缝组织及性能影响进行了对比研究, 进一步掌握了不锈钢复合管熔焊关键技术, 对实际生产及管道施工提供参考。

关键词: 不锈钢复合管; Q235B; 环焊工艺; 补焊工艺

中图分类号: TG445

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.12.004

Research on Ring Welding and Repair Welding Technologies of SU304/Q235B Stainless Steel Composite Pipe

ZHANG Jun^{1,2}, ZHAO Hongbo^{1,2}, LI Zhongxiang³, NIU Hui^{1,2},
JIANG Fan³, LI Peng¹, ZHAO Poru⁴

(1. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Chinese National Engineering Research Center for
Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. Shanghai BSW Petroleum Steel Pipe
Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200941, China; 4. China National Petroleum Corporation, Beijing 100007)

Abstract: The process of repair welding of internal and external broken arc, repair welding of burn through, surfacing of 304 stainless steel coating damage in the pipe and ring seam welding in pipeline construction were studied in the production and manufacturing process of SU304/Q235B $\Phi 820$ mm \times 8 (6.7+1.3) mm stainless steel composite pipe. Through the test and analysis, the physical and chemical properties of welds of U-groove GTAW+SMAW ring welding, internal and external broken arc SMAW repair welding, burn through SMAW repair welding and GTAW/SMAW ERNCRMO-3 surfacing welding process all meet the standard requirements, and the anti-corrosion performance is good. At the same time, the effects of different groove, welding process and the amount of misalignment on the weld microstructure and performance were compared and tested. The basic rules and important matters of stainless steel composite pipe fusion welding were basically mastered through the study, which provided the references for the actual production and pipeline application.

Key words: stainless steel composite pipe; Q235B; ring welding; repair welding technology

*基金项目: 国家高新技术发展计划 (863 计划) “金属间及其无机非金属复合层状材料研发——双金属层状结构复合管材技术研究” (项目编号 2013AA031303)。

0 前 言

SU304 不锈钢复合管是近年来在输水、热力等民用管道市场逐步获得广泛认可的一种经济型新产品^[1],可有效克服熔结环氧 (FBE)、水泥砂浆内衬及塑料衬里钢管的诸多缺点^[2-3]。由于基层碳钢与覆层不锈钢采用冶金结合的方式,不会形成空腔和长时间服役后的防腐层脱落,适合管径范围大,不需要现场内补口,覆层为不锈钢,非常适用城市热力管道等高温介质,是未来比较发展前景的一种管材类型^[4]。但在实际制管过程中,因断弧、烧穿及机械损伤等需要对焊缝进行

补焊和修补,同时在管道施工中需对不锈钢复合管进行环缝焊接。故本研究针对以上问题开展了一系列试验研究,为不锈钢复合管生产及工程应用提供技术参考。

1 试验管材及其焊接性

1.1 试验用管材

本试验选用规格为 $\Phi 820 \text{ mm} \times 8 (6.7+1.3) \text{ mm}$ SU304/Q235B 螺旋埋弧焊不锈钢复合管为试验材料,复合管基层 Q235B 和覆层 SU304 的化学成分见表 1。

表 1 覆层和基层材料化学成分

材质	化学成分/%								
	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Cu})$
Q235B	0.04	0.13	0.78	0.018	0.006	0.001	0.04	0.007	—
SU304	0.03	0.34	0.98	0.044	0.002	7.64	18.02	0.13	0.18

1.2 焊接性分析

SU304 组织为奥氏体,单相合金焊缝多边化晶界的形成与发展易产生多边化裂纹,此外,在焊接过程中, Ni 易与 S 等非金属元素及 Pb、Zn 等形成低熔点共晶物,增大焊接热裂纹倾向^[5]。其次,焊缝流动性和润湿性差,电弧穿透力小且熔深较浅,从而易产生未熔合与未焊透等缺陷。

SU304+Q235B 不锈钢复合管的焊接主要特点是:一是覆层在焊接时,焊缝中的 Ni、Cr 等合金元素易发生稀释,造成腐蚀性能下降,尤其是抗晶间腐蚀性能;二是基层 Q235B 焊接时因覆层高合金元素掺入易导致焊缝金属硬化与脆化,在应力条件下易产生结晶裂纹^[6];三是由于覆层 SU304 与基层 Q235B 的热导系数和热膨胀系数差别较大,焊接作业的高温及金属结晶冷却收缩(尤其是较厚的基层焊缝收缩)导致过渡层与基层底部焊缝拘束应力集中^[7]。

2 试验方案及焊接工艺参数

2.1 试验方案

本研究主要针对 SU304+Q235B $\Phi 820 \text{ mm} \times 8 (6.7+1.3) \text{ mm}$ 不锈钢复合管生产过程焊缝修补与管道施工环缝焊接工艺进行试验研究。具体

工艺方案为:环焊对接工艺试验、内外断弧补焊工艺试验、烧穿补焊工艺试验以及不锈钢覆层 SU304 的损伤堆焊修补工艺试验。

首先,针对 SU304 和 SU304+Q235B 焊接性研究与分析,本次焊接选用 GTAW、GMAW 及 GTAW+SMAW 组合焊方法和内外双面焊工艺,并采用较小的焊接参数以降低热输入。

其次,通过合理的焊缝接头设计,有效减少焊缝稀释并改善焊缝局部拘束应力过渡集中。一方面,覆层焊缝设计在保证较小焊接参数可充分融合的条件下,尽量降低基层母材 Fe、C 的过渡;另一方面,基层采用多层多道焊接工艺,且减少每层熔敷金属厚度,尽可能降低因焊接热源引起的局部应力过高现象。

最后,优化焊缝合金元素,选用 Ni、Cr 等合金成分较高的焊材,通过焊接冶金过渡方式,解决覆层焊缝稀释问题^[8]。覆层选用 AWS A-5.9 ER309L 不锈钢焊丝和 AWS A-5.14 ER-NiCrMo-3 镍基合金焊丝;基层选用 GB/T 5117 E5015 细晶粒钢焊条、AWS A-5.4 E309-16 不锈钢焊条及 AWS A-5.11 ENiCrMo-3 镍基合金焊条。

根据焊接工艺要求和实际加工能力,坡口设计为 U 形和 V 形,环缝坡口如图 1 所示。

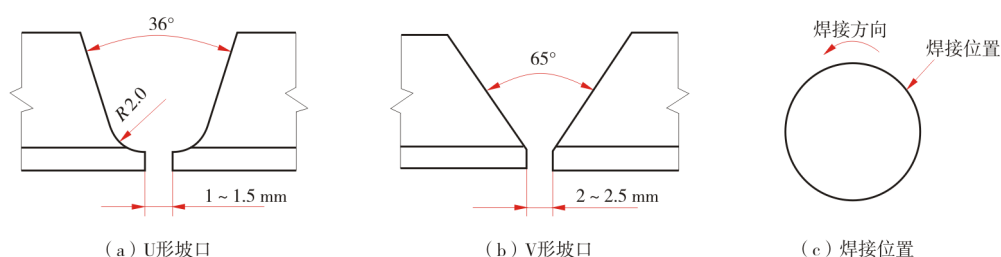


图 1 环缝对接坡口形式及焊接位置示意图

由于小直径不锈钢复合管环焊对接难以实现单面焊双面成形,本研究增加环缝单面焊双面成形焊接工艺,为避免管内通 Ar 气进行环境保护的复杂工序,选用 Ni、Cr 成分较高且具有药皮自保

护的 AWS A-5.9/ASME SFA-5.9 TGF309L 焊丝。

2.2 焊接工艺参数

针对环缝对接,设计内外双面焊接和单面焊双面成形 2 种工艺,焊接工艺参数见表 2 和表 3。

表 2 环缝内外双面焊接工艺参数

焊层焊道	焊材	焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	速度/(mm·min ⁻¹)	电特性	坡口形式
1-GTAW 覆层打底	TGF309L	2.0	90~100	10.5~13.5	70~80	直流正接	U 形
2-SMAW 基层填充	ENiCrMo-3	3.2	100~120	26.5~28.5	90~110	直流反接	
3-SMAW 基层盖面	ENiCrMo-3	3.2	80~100	24.5~26.5	80~90	直流反接	
4-SMAW 覆层盖面	ENiCrMo-3	3.2	100~110	26.5~28.5	80~100	直流正接	

表 3 环缝单面焊双面成形工艺参数

焊层焊道	焊材	焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	速度/(mm·min ⁻¹)	电特性	坡口形式
1-GTAW 覆层焊接	TGF309L	2.4	120~130	12.5~15.0	50~60	直流正接	V 形
2-SMAW 基层填充	ENiCrMo-3	3.2	100~120	27.5~29.5	90~110	直流反接	
3-SMAW 基层盖面	ENiCrMo-3	3.2	80~100	27.5~29.5	80~90	直流反接	

生产中螺旋缝内外断弧的补焊,设计气刨+SMAW 工艺,即依次先将基层焊缝刨开后进行填充与盖面焊,再将覆层刨开清理补焊。为避免基

层焊缝中因合金元素过量与覆层中 Fe、C 的扩散,工艺设计要求基层气刨深度小于基层厚度,覆层气刨深度则大于覆层厚度,补焊工艺参数见表 4。

表 4 螺旋缝缺陷补焊工艺参数

焊层焊道	焊材	焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	速度/(mm·min ⁻¹)	电特性
1-SMAW 基层填充	E5015	3.2	100~120	24.5~26.5	140~160	直流反接
2-SMAW 基层盖面	E5015	3.2	90~110	24.5~26.5	160~180	直流反接
3-SMAW 覆层焊接	ENiCrMo-3	3.2	80~100	27.5~29.5	80~90	直流反接

SAW 螺旋缝烧穿补焊,首先采用气刨将内外焊缝全部刨开,清理焊渣后先进行基层焊

接,再进行覆层焊接的补焊工艺。焊接参数见表 5。

表 5 螺旋缝烧穿补焊工艺参数

焊层焊道	焊材	焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	速度/(mm·min ⁻¹)	电特性
1-SMAW 基层打底	ENiCrMo-3	3.2	75~95	26.5~28.5	100~120	直流反接
2-SMAW 基层盖面	E309-16	3.2	110~120	26.5~28.5	110~120	直流反接
3-SMAW 覆层打底	ENiCrMo-3	3.2	80~100	26.5~28.5	90~100	直流反接
4-SMAW 覆层盖面	ENiCrMo-3	3.2	80~100	27.5~29.5	80~90	直流反接

管内 SU304 覆层的损伤修补,采用 GTAW 和 SMAW 工艺方法进行堆焊修复对比,其中

GTAW 采用 TGF309L 和 ERNiCrMo-3 不同合金成分焊丝进行试验研究,焊接工艺参数见表 6。

表 6 管内覆层损伤堆焊修补工艺参数

焊层焊道	焊材	焊丝直径/mm	电流/A	电压/V	速度/(mm·min ⁻¹)	电特性
1-GTAW 堆焊	TGF309L	2.4	80~100	10.5~13.5	90~100	直流正接
2-GTAW 堆焊	ERNiCrMo-3	2.0	95~110	10.5~13.5	90~100	直流正接
3-SMAW 堆焊	ENiCrMo-3	3.2	80~100	27.5~29.5	80~90	直流反接

3 试验结果及分析

3.1 金相组织

焊接接头宏观形貌如图 2 所示。由图 2 可知，覆层、基层及母材融合良好，未发现微裂纹等缺陷。U 形坡口焊接接头、内外断弧补焊接头及烧穿补焊接头采用内、外双面焊工艺，

焊缝形貌为标准高斯曲线状，经测量焊缝成形系数为 1.3；V 形坡口焊接采用单面焊双面成形工艺，为获得良好的背面焊缝成形效果，覆层打底焊的焊接速度较低，焊缝熔覆量较大，焊缝形貌呈垂直状，焊缝成形系数为 1.0，且覆层焊缝较易被腐蚀液（CuSO₄）腐蚀，宏观照片颜色浅，如图 2（a）、图 2（b）所示。

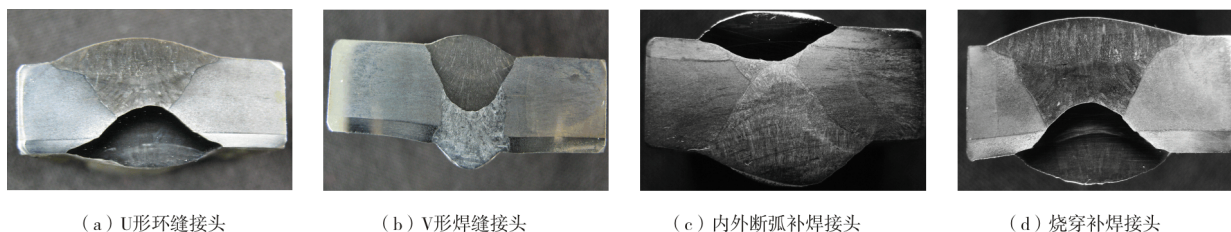


图 2 焊接接头宏观形貌

环缝接头及烧穿补焊接头的微观组织如图 3 所示，由于基层均采用了 ENiCrMo-3（625）焊材，其 Ni、Cr 含量高（ $w(\text{Ni})=58\%$ ， $w(\text{Cr})=20\%$ ），焊缝均为奥氏体（A）+网状 δF +碳化物的铸态组

织，在 HAZ 区可清晰看到焊缝金属由融合线边界形核、长大及再结晶过程，晶粒成长方向与融合线的切线垂直。覆层组织是典型的奥氏体焊缝组织 A+ δF +碳化物^[9]，基层焊缝组织相 δF 和碳化

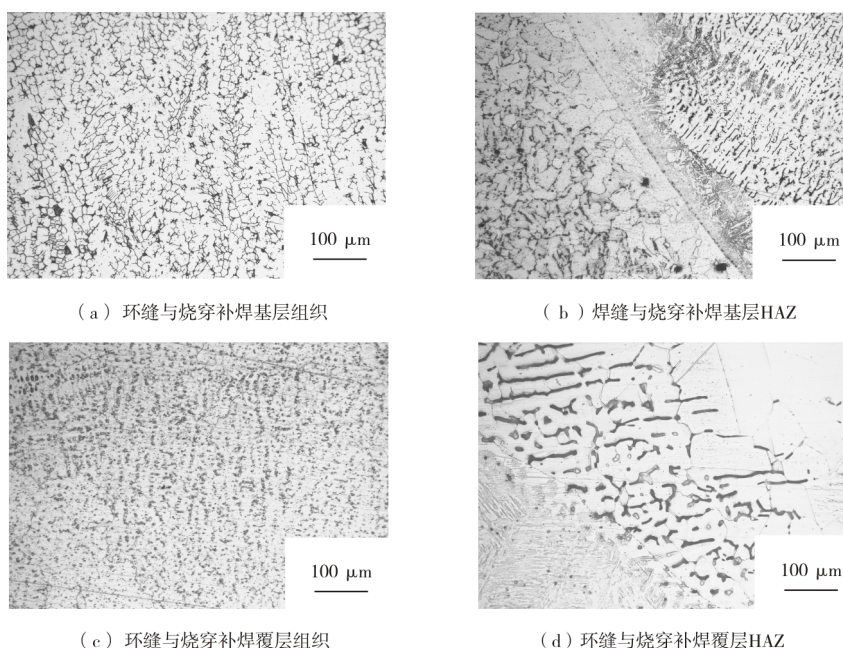


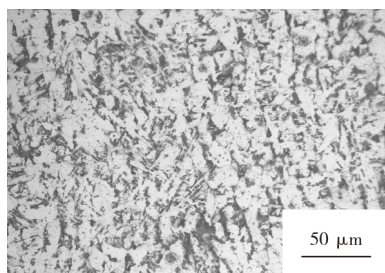
图 3 环缝及烧穿补焊接头的显微组织

物形态为点状或块状,在 HAZ 的母材侧由于焊接热源作用,可观察到在晶界过饱和 C 化物析出的蚀刻区。

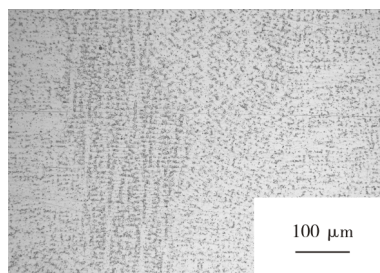
内外断弧补焊焊接接头微观组织如图 4 所示,基层采用普通低合金钢焊条,焊缝组织为

PF+P,覆层焊缝组织主要为 A+ δ F+碳化物。

为进一步掌握坡口形式和错边量的变化对组织的影响,本次试验针对 U 形环缝接头、V 形环缝接头以及补焊接头(错边 1.2 mm)的焊缝组织进行对比分析。



(a) 内外断弧补焊基层组织



(b) 内外断弧补焊覆层组织

图 4 内外断弧补焊焊接接头微观组织

U 形坡口底部平缓,覆层焊接区基本全部为不锈钢 SU304,同时采用 TGF309L (Ni 质量百分比为 13.25%,Cr 质量百分比为 24.5%)与合金元素较高的 ENiCrMo-3 焊材,焊接过程合金元素 Ni、Cr 过渡较多,焊缝组织以 A 为主,同时存在点状密排的 δ F+碳化物, δ F 相的出现一方面可以打乱柱状晶的方向性以免形成连续贫 Cr 层,另一方面, δ F 有良好的供 Cr 作用,可减少 A 晶粒形成贫 Cr^[1],组织形貌如图 5 所示。

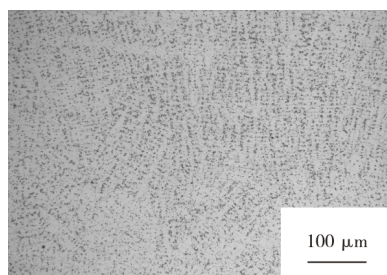


图 5 U 形坡口覆层焊缝组织

V 形坡口的钝边两侧基本为基层 Q235B,选用单面焊双面成形用 TGF309L 自保护不锈钢焊丝,焊接过程由于基层过量的 Fe、C 熔入,导致覆层焊缝合金元素被大量稀释,在焊缝组织中发现分布层状马氏体 (M) 组织^[10-12],其形貌如图 6 所示。在错边 1.2 mm 的补焊接头中,由于基层母材被熔覆到焊缝中的量较多,导致焊缝被稀释,其覆层焊缝中 δ F 呈现块状结构,补焊错边覆层组织形貌如图 7 所示。

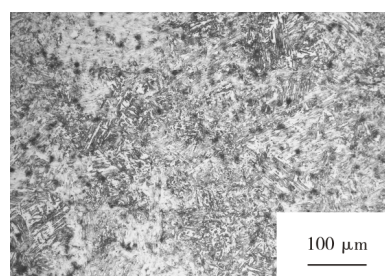


图 6 V 形坡口覆层焊缝组织

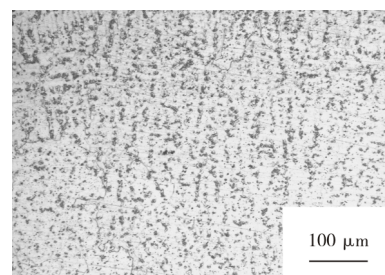


图 7 补焊错边覆层组织

3.2 力学性能

焊缝力学性能试验结果如图 8 所示。从图 8 (a) 可看出,在 0 °C 温度条件,U 形环缝冲击功范围为 34~45 J,平均值为 39 J;V 形环缝冲击功范围为 30~37 J,平均值为 31 J;内外断弧补焊冲击功范围为 53~66 J,平均值 58 J;烧穿补焊冲击功范围为 45~57 J,平均值为 49 J。由结果可以看出,V 形坡口焊缝冲击韧性值最低,内外断弧补焊焊缝冲击韧性值最高。由图 8 (b)

可知，焊缝抗拉强度为 511~556 MPa，数据稳定且断口位置均在母材，符合标准要求^[13-14]。

经分析可知，V 形坡口环缝对接采用单面焊双面成形工艺，焊缝融合比较大；且焊缝组织中

含有大量层状 M 蚀刻区；故降低了焊缝韧性；而内外断弧补焊采用双面焊工艺和强韧性较好的 E5015 细晶粒钢焊条；焊缝组织为 PF+P，强度及韧性均较好。

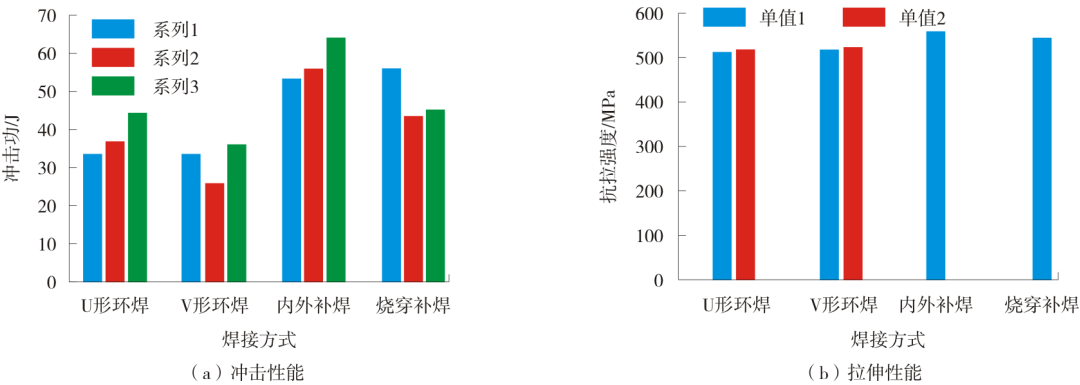


图 8 焊缝力学性能试验结果

3.3 耐腐蚀性能

盐雾腐蚀试验如图 9 所示，分别对环缝接头、内外断弧补焊接头、烧穿补焊接头及覆层损

伤堆焊接头的覆层焊缝在 5%NaCl 溶液中进行盐雾试验^[15]，经过 96 h 腐蚀，焊缝（图中红线间的区域）均未出现腐蚀锈斑。试验表明，不同工艺和焊材的焊缝均具有抗 NaCl 腐蚀性能。

晶间腐蚀试样如图 10 所示，试验结果在沸腾硫酸铜溶液中经过 20 h 腐蚀后弯曲^[16]，V 形环焊接头和 GTAW（采用 TGF309L 焊丝）堆焊试样表面出现层状裂纹，如图 10（b）、图 10（e）所示，其余试样表面光滑，在 10 倍放大镜下观察，未发现微裂纹，这表明不同坡口形式及焊材对焊缝晶间腐蚀影响较大。



图 9 盐雾腐蚀试验结果

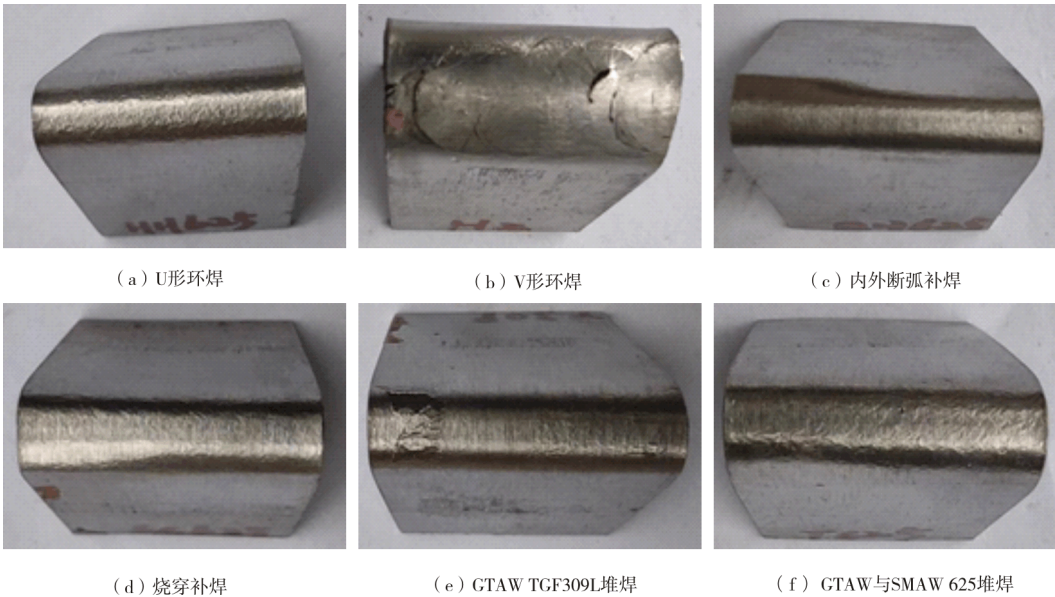
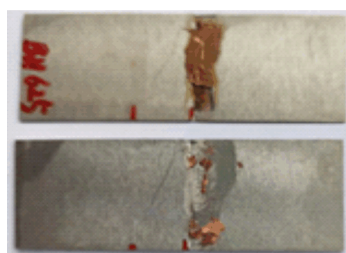


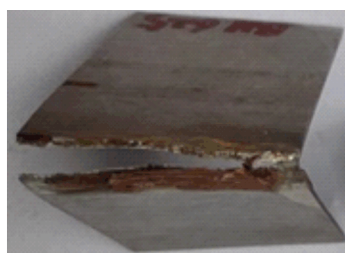
图 10 晶间腐蚀试验结果

此外,当补焊错边达到 1.2 mm 时,由于基

后,在错边处均有不同程度的腐蚀,弯曲后焊缝



(a) 弯曲前腐蚀情况



(b) 带错边内外断弧补焊晶间腐蚀

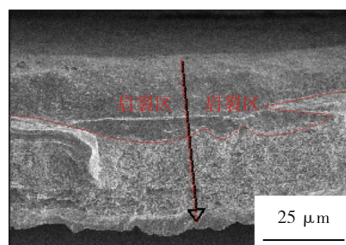


(c) 带错边烧穿补焊晶间腐蚀

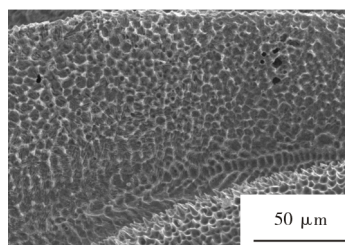
图 11 错边焊缝接头晶间腐蚀试验结果

对腐蚀开裂试样进行扫描电镜 (SEM) 及能

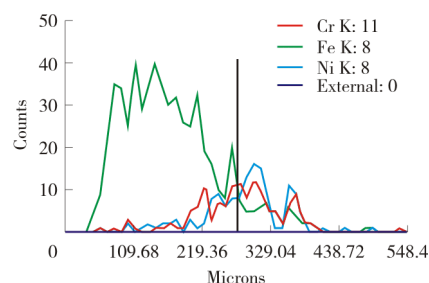
有明显腐蚀现象,能谱分析结果显示,覆层焊缝



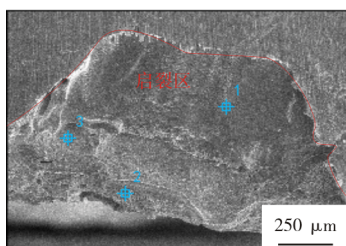
(a) 带错边内外断弧补焊断口



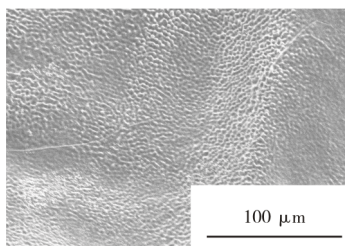
(b) 带错边内外断弧补焊断口微观图



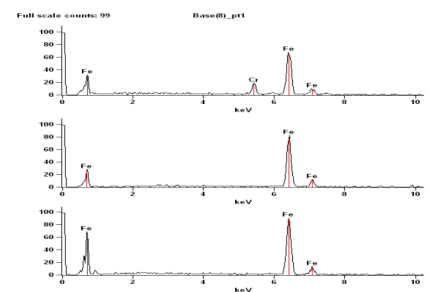
(c) 带错边内外断弧补焊能谱



(d) 带错边烧穿补焊断口



(e) 带错边烧穿补焊断口微观图



(f) 带错边烧穿补焊能谱

图 12 断口扫描电镜及能谱分析结果

4 结 论

(1) 对于 SU304+Q235B $\Phi 820$ mm \times 8 (6.7+1.3) mm 不锈钢复合管环缝焊接,当设计 U 形坡口时,采用 GTAW+SMAW 内外双面焊方法并匹配 TGF309L 和 ERNiCrMo-3 焊材的焊接工艺,焊缝覆层组织以 A 为主+点状密排 δ F 和碳化物,焊缝理化性能、盐雾腐蚀及晶间腐蚀均达到标准要求;当设计 V 形坡口时,采用 GTAW 单面焊双面成形方法并匹配 TGF309L 焊材的焊接工艺,

覆层焊缝稀释率较大,组织出现层状 M 蚀刻区,焊缝韧性差,晶间腐蚀出现开裂。

(2) SU304+Q235B $\Phi 820$ mm \times 8 (6.7+1.3) mm 不锈钢复合管内外断弧补焊和烧穿补焊采用 SMAW 方法并匹配 E5015+ERNiCrMo-3 焊材,同时采用 SMAW 方法匹配 E5015 +ERNiCrMo-3 焊材的工艺,其焊缝理化性能、盐雾腐蚀及晶间腐蚀均达到标准要求。但当焊缝错边接近覆层厚度时,覆层焊缝组织中的 δ F 呈现块状,焊缝抗晶间腐蚀性能变差。

(3) 管体覆层 SU304 损伤修补采用 GTAW 和 SMAW 方法并匹配 ERNiCrMo-3 焊材进行堆焊, 焊缝盐雾试验和晶间腐蚀试验结果均良好。

参考文献:

- [1] 王凤会, 张侠洲, 赵英建, 等. 城市输水用 Q235B+304 不锈钢复合管环焊焊接工艺[J]. 电焊机, 2017, 47(8): 104-108.
- [2] 王海玲. 铸管水泥砂浆内衬缺陷的实验研究[J]. 铸造技术, 2007(4): 561-563.
- [3] 尚修竹. 城市供水系统水质变化对供水管网管道腐蚀影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [4] 鲁流金, 段智宏. 不锈钢复合管输送生活水应用实践[J]. 昆钢科技, 2013(3): 14-16.
- [5] 李发根, 魏斌, 邵晓东, 等. 双金属复合管技术经济性分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 86-88.
- [6] 曹永胜. 奥氏体不锈钢与低碳钢异种钢焊接接头性能研究[J]. 丝路视野, 2016, 23(2): 151-152.
- [7] 张运祥, 王勇, 张利红. 低碳钢与奥氏体不锈钢焊接裂纹的预防措施[J]. 内江科技, 2009, 30(10): 91.
- [8] 李葱聪. 碳钢和奥氏体不锈钢管道焊材选用研究分析[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(5): 17.
- [9] 胡万伦. 奥氏体不锈钢焊缝中铁素体形成机理及作用[C]//全国核材料学术交流会论文集. 成都: 中国核学会, 2006: 88-90.
- [10] 袁义帆, 卢煦, 杨星红, 等. 16MND5/309L/308L/Z2CND18-12N 异种金属焊接件的组织和性能[J]. 理化检验(物理分册), 2014, 50(6): 404-408.
- [11] 赵晨光, 彭清华, 马宏伟, 等. 双金属复合管焊接技术探讨[J]. 焊管, 2013, 36(1): 60-63.
- [12] 孙志刚, 谷海龙, 袁华丽, 等. 输水用螺旋缝双金属复合管焊接工艺研究[J]. 焊管, 2021, 44(9): 19-25.
- [13] 全国钢标准化技术委员会. 流体输送用不锈钢复合钢管: GB/T 32958—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [14] 全国钢标准化技术委员会. 流体输送用双金属复合耐腐蚀钢管: GB/T 31940—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 世界贸易组织技术性贸易壁垒(TBT)委员会. 操作盐雾装置的标准实施规程: ASTM B117-19 [S]. 美国, 宾夕法尼亚州: 美国试验材料学会, 2011.
- [16] 全国钢标准化技术委员会金属和合金的腐蚀奥氏体及铁素体-奥氏体(双相)不锈钢晶间腐蚀试验方法: GB/T 4334—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

作者简介: 张 君 (1981—), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事油气输送焊接钢管产品与焊接工艺开发的研究工作。

收稿日期: 2022-09-13
修改返回日期: 2022-09-29
编辑: 董 超

(上接第 19 页)

- [5] 吴韬, 段佳伟, 陈小明, 等. 合金元素对激光熔覆高熵合金涂层影响的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 413-419.
- [6] 曾聪, 何文, 艾云龙, 等. 高熵合金研究概况[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 37-48.
- [7] 李承泽, 尤俊华, 白鹤山, 等. 高熵合金的热处理综述[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5): 1-12.
- [8] ZHANG W R, LIAW P K, ZHANG Y. Science and technology in high-entropy alloys[J]. Science China Materials, 2018, 61(1): 2-22.
- [9] 崔佳鹏. 激光熔覆技术研究现状与发展趋势[J]. 农机使用与维修, 2019(12): 25.
- [10] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 343-348.
- [11] 张彝, 谷臻, 高帅龙, 等. 激光熔覆 Al_xNbMn₂FeMoTi_{0.5} 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 146-151.
- [12] 吴韬, 吴濛婷, 陈云祥, 等. H13 钢表面激光熔覆 Al-CoCrFeNiW_x 高熵合金涂层及其性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 241-244.
- [13] 张鹏杰, 王书桓, 吕煜坤, 等. (Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀)_{100-x}C_x 浇铸态高熵合金组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2022, 46(1): 9-16.
- [14] 龙雁, 彭亮, 张伟华, 等. 放电等离子烧结 Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀ 高熵合金的显微组织演化[J]. 稀有金属, 2021, 45(7): 769-777.
- [15] ZHAO C M, WU H, ZHANG J F, et al. Effect of Nb addition on microstructure and mechanical properties of Fe_{0.5}Mn-Ni_{1.5}CrNb_x high-entropy alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(8): 2783-2788.

作者简介: 邹家豪 (2001—), 男, 合肥工业大学材料成型及控制工程专业, 本科在读。

收稿日期: 2022-04-15
修改返回日期: 2022-05-06
编辑: 董 超