

时效处理对 1Cr17/1Cr18Ni9Ti 异种钢“TIG 冷焊+ UNGW”组合焊接头耐蚀性的影响

汪军平¹, 李金泽¹, 刘国良¹, 王 群¹, 郑韶先²

(1. 酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司, 嘉峪关 735100; 2. 兰州交通大学, 兰州 730070)

摘要: 采用“TIG 冷焊+UNGW”组合焊工艺制备了 1Cr17/1Cr18Ni9Ti 异种钢接头, 然后分别在 200 °C 及 350 °C 下对该接头进行了 144 h 的时效处理以模拟其在 400 °C 以下高温的长时间服役过程。通过光学显微镜和扫描电镜观察了组合焊接头各区域的显微组织, 通过电化学测试和晶间腐蚀试验研究了时效温度对接头耐蚀性能的影响。结果表明: 经 200 °C×144 h 及 350 °C×144 h 时效处理后, 组合焊接头不同区域的显微组织与其焊态比无明显变化; 组合焊接头的腐蚀倾向并未随着时效温度的上升而显著增大; 组合焊接头的腐蚀速率随着时效温度的上升呈增大趋势, 但变化并不显著。

关键词: 异种不锈钢焊接; 时效处理; 显微组织; 耐蚀性能

中图分类号: TG457

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2025)10-0015-06

铁素体不锈钢(FSS)与奥氏体不锈钢(ASS)异种接头因具有优良的性能而被广泛用于核电、船舶、造纸业及石化等行业^[1-3]。然而, 采用常规弧焊方法焊接 FSS/ASS 异种不锈钢时, 热输入往往过高。这一方面易导致 FSS 的热影响区(HAZ)晶粒粗化, 韧性显著降低^[4-6], 另一方面易造成 ASS 的 HAZ 发生敏化而降低其耐蚀性^[7]。此外, 文献[8]研究表明, 采用热输入较低的超窄间隙焊接(UNGW)方法焊接 1Cr18Ni9Ti 时, 接头熔合区及其附近 HAZ 内会形成较多粗大蠕虫状 δ 铁素体, 晶间腐蚀试验显示该区域因 δ 铁素体存在而成为整个接头中耐蚀性最差的部分。基于此, 为同时解决 FSS 与 ASS 焊接中的上述问题并最大限度降低制造成本, 郑韶先等^[9]提出了一种“钨极惰性气体保护(TIG)冷焊+UNGW”的组合焊接方法, 用于焊接 1Cr17/1Cr18Ni9Ti 异种不锈钢。结果表明, 1Cr17 侧 HAZ 晶粒未出现粗化, 1Cr18Ni9Ti 侧部分熔合区及其附近 HAZ 内并未形成粗大的蠕虫状 δ 铁素体, 且耐蚀性优良。

在实际服役中, FSS/ASS 异种钢接头难免在高温并伴有腐蚀性介质的环境中工作。文献[10-12]研究表明, FSS 在 425~550 °C 温度区间内极易析出富铬铁素体 α' , 而使接头塑韧性显著降低; 在 500~

800 °C 温度区间内, FSS 因 Cr 含量相对较高而使 σ 相在短时间内析出, 即出现严重的 σ 相脆化。为避免 FSS 的析出脆化, 其服役温度通常不高于 400 °C^[10]。另外, 常见的 ASS 接头在 450~850 °C 腐蚀性环境中极易发生晶间腐蚀, 故在腐蚀性环境中其最高服役温度通常为 400~500 °C^[13-14]。由此可见, FSS/ASS 异种不锈钢焊接接头通常应用于温度不高于 400 °C 的腐蚀性环境中。

为进一步明确服役温度(≤ 400 °C)对长时间服役过程中 FSS/ASS 异种钢接头耐蚀性的影响, 作者采用“TIG 冷焊+UNGW”组合焊方法对异种不锈钢 1Cr17/1Cr18Ni9Ti 进行焊接, 然后分别在 200 °C 及 350 °C 下对该组合焊接头进行时效处理, 采用电化学方法和晶间腐蚀试验对时效处理后的组合焊接头的耐蚀性进行了研究。该研究将为 FSS/ASS 异种不锈钢“TIG 冷焊+UNGW”组合焊接头的实际工程化应用提供理论支持。

1 试 验

1.1 “TIG 冷焊+UNGW”组合焊接头的制备

采用 TIG 冷焊在工件表面熔敷丝材, 制备出厚度约 7.5 mm 的熔敷层。该厚度设计基于以下考虑: 后续对接焊将熔化 1.5~2.5 mm 的熔敷层, 并形成约 2 mm 宽的 HAZ, 因此剩余未受热循环影响的熔敷层厚度约为 3 mm。TIG 冷焊的具体焊接参数见表 1。表 1 中熔敷层的前 5 层采用 $\phi 0.8$ mm 焊丝和小电流进行熔敷, 以尽可能降低 HAZ 的峰值

收稿日期: 2022-10-23

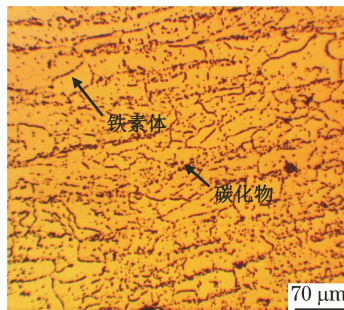
通信作者: 汪军平(1994—), 工程师, 硕士, 研究方向为金属材料轧制及焊接工艺, 17339830424, 1098399307@qq.com

温度,缩短高温停留时间,从而有效抑制 HAZ 的晶粒粗化及敏化;为提高熔敷效率,熔敷层的其余层采用 $\phi 1.6$ mm 的焊丝和大电流进行熔敷。TIG 冷焊后,采用细颗粒焊剂约束的 UNGW 方法^[15]及 $\phi 1.6$ mm 焊丝对带熔敷层工件进行对接焊,UNGW 具体焊接参数见表 2。

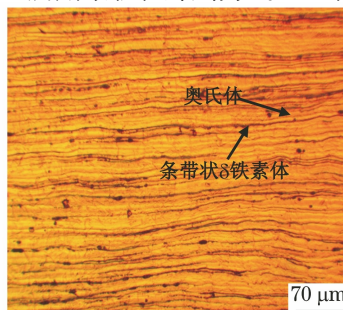
表 1 TIG 冷焊参数

Tab. 1 Parameters of TIG cold welding

熔敷层 ($h=7.5$ mm)	焊丝直径 d /mm	氩气流量 Q /(L·min ⁻¹)	冷焊时间 t /ms	冷焊电流 I /A
1~5 层	0.8	8	160	170
其余层	1.6	10	200	250



(a) 1Cr17



(b) 1Cr18Ni9Ti

图 1 试验钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of test steels

表 3 母材及 ER347L 焊丝化学成分

Tab. 3 Chemical composition of base metals and ER347L welding wire

材料	质量分数/%											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Nb	Ti	Fe
1Cr17	0.043	0.31	0.31	0.020	0.035	16.18	0.18	—	0.035	—	—	余量
1Cr18Ni9Ti	0.100	0.88	1.56	0.020	0.020	18.60	9.70	—	—	—	0.60	余量
ER347L	0.021	0.46	1.72	0.005	0.018	19.49	9.42	0.08	—	0.52	—	余量

1.2 时效处理

在 SG-QF1200 型箱式炉中对组合焊接头进行时效处理,时效温度分别为 200 °C 及 350 °C,时效时间均为 144 h。然后,采用 10%(质量分数)的 CrO₃ 溶液对接头进行电解腐蚀,其电解电流及电解时间分别为 3.5~5 A 和 60~90 s。采用 HAL-100 型光学显微镜和 GeminiSEM500 型扫描电镜对时效处理后接头的显微组织进行观察。

1.3 电化学测试

电化学测试在 CHI660D 型电化学工作站完成,并采用三电极系统。试样为工作电极,Pt 片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。采用线切割分别在焊态及时效处理态组合焊接头 UNGW 焊缝区、熔敷层(取自熔敷层中心)及完整接

表 2 UNGW 焊接参数

Tab. 2 Welding parameters of UNGW

焊接电压 U /V	焊接电流 I /A	焊接速度 v /(mm·s ⁻¹)	脉冲频率 f /Hz	焊丝伸出长度 L_s /mm
30	290	7.3	139	24

试验选用的 FSS 和 ASS 材料分别为 1Cr17 (120 mm×80 mm×10 mm)和 1Cr18Ni9Ti(120 mm×80 mm×16 mm),其显微组织见图 1。垫板为 1Cr18Ni9Ti(260 mm×30 mm×4 mm);TIG 冷焊熔敷及 UNGW 所用焊丝均为 ER347L 焊丝。1Cr17、1Cr18Ni9Ti 及 ER347L 的化学成分见表 3。UNGW 所用细颗粒焊剂为 SJ601,粒径为 0.6~0.8 mm。

头(由两侧熔敷层、UNGW 焊缝区及很少量的 1Cr18Ni9Ti 和 1Cr17 母材组成)上各切取三块电极试样,然后试样经 200[#]、400[#]、600[#]、800[#]、1200[#]、1600[#]及 2000[#]砂纸逐级打磨并抛光,再经酒精擦拭表面后烘干存放。测试时试样预留 1 cm² 的有效工作面积,其余面均用环氧树脂密封,动电位扫描区间为 -0.4~0.1 V(相对于 SCE),扫描速率为 1 mV/s,试验介质为 3.5%(质量分数)的 NaCl 溶液。

1.4 晶间腐蚀试验

依据 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀不锈钢晶间腐蚀试验方法》对焊态及 200 °C×144 h 与 350 °C×144 h 时效处理后三块组合焊完整接头试样进行了晶间腐蚀试验。晶间腐蚀试验设备为

ICT-4 型晶间腐蚀仪,腐蚀介质为 65%(体积分数)的硝酸溶液,晶间腐蚀共进行 3 个周期(每个周期 48 h)。采用失重法计算 3 个腐蚀周期内试样的腐蚀速率,如式(1)所示,并以其平均值作为组合焊接头的腐蚀速率。

$$v = (m_0 - m_i) / (S \cdot t) \quad (1)$$

式中: m_0 为试样腐蚀前的质量,g; m_i 为试样经第 i 个周期腐蚀并清除腐蚀产物后的质量,g; S 为试样总表面积, m^2 ; t 为腐蚀时间,h。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

由图 2 可以看出,组合焊接头两侧熔敷层成形

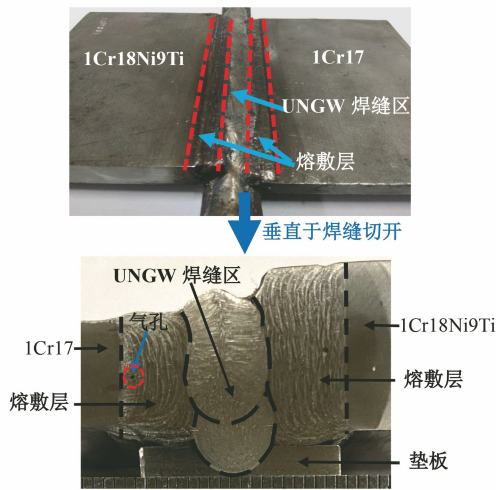


图 2 组合焊接头横截面宏观形貌

Fig. 2 Cross section macromorphology of the combined welding joint

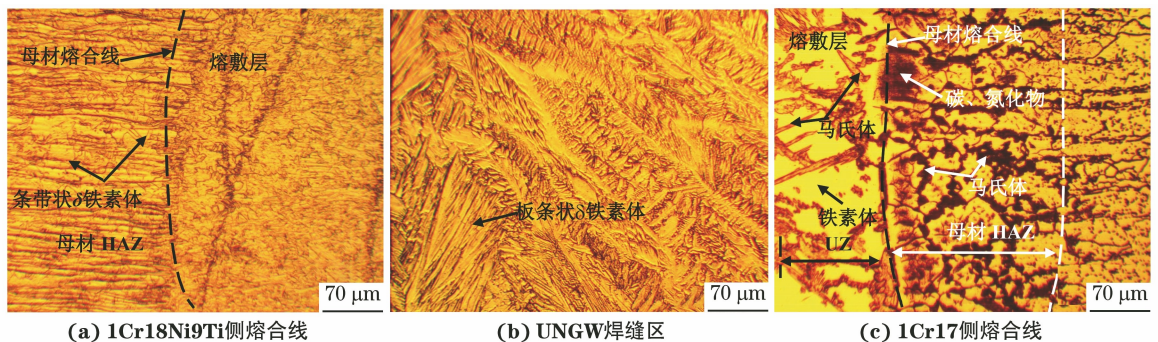


图 3 焊态组合焊接头不同区域的显微组织

Fig. 3 Microstructure of different zones of combined welding joint in welded state: (a) fusion line on 1Cr18Ni9Ti side; (b) UNGW weld zone; (c) fusion line on 1Cr17 side

2.3 电化学性能

焊态及时效处理后组合焊接头的不同区域在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线及其电化学参数分别见图 6 和表 4。自腐蚀电位(E_{corr})可表征材料的

基本良好,偶尔有微小气孔,这主要是因为 TIG 冷焊熔敷过程中点状熔池冷却速度极快使得熔池内冶金反应形成的气体来不及逸出;UNGW 焊缝区成形良好,并且两道焊缝均与熔敷层熔合良好。

2.2 显微组织

由图 3 可以看出:焊态下组合焊接头的 1Cr18Ni9Ti 侧 HAZ 组织与 1Cr18Ni9Ti 母材组织相同,由奥氏体和沿轧制方向分布的条带状 δ 铁素体组成,未见文献[8]中所述的粗大蠕虫状 δ 铁素体;1Cr18Ni9Ti 侧熔合线附近熔敷层组织一般由按奥氏体凝固模式凝固的细小奥氏体胞状晶构成^[9];UNGW 焊缝区组织主要为较粗大的奥氏体柱状晶,并且在奥氏体柱状晶内分布有板条状及针状 δ 铁素体,其凝固模式为铁素体-奥氏体凝固模式;1Cr17 侧 HAZ 较窄($<250 \mu\text{m}$),其组织主要由等轴铁素体及晶界马氏体构成,同时在晶内有少量铬的碳氮化物[主要为 Cr_{23}C_6 或 $\text{Cr}_{23}(\text{C},\text{N})_6$]析出;与 1Cr17 母材相比,HAZ 的过热区晶粒未见明显粗化,这主要是由于 TIG 冷焊熔敷过程中热输入极低,显著降低了 HAZ 的峰值温度与高温停留时间。在 1Cr17 侧熔合线附近存在不均匀混合区,其组织由铁素体柱状晶及晶界和晶内马氏体构成^[2];在不均匀混合区以外的熔敷层内,其组织与熔敷层组织相同,如图 3(a)所示。

图 4 和图 5 分别为经 $200 \text{ }^\circ\text{C} \times 144 \text{ h}$ 和 $350 \text{ }^\circ\text{C} \times 144 \text{ h}$ 时效处理后组合焊接头的显微组织。与焊态组合焊接头的组织相比,时效处理后组合焊接头的组织并未发生明显的变化。

腐蚀倾向,即腐蚀的难易程度;自腐蚀电流密度(J_{corr})与腐蚀速率呈正比关系,反映了材料腐蚀的快慢。由图 6 及表 4 数据可知:从热力学方面考虑, $200 \text{ }^\circ\text{C} \times 144 \text{ h}$ 及 $350 \text{ }^\circ\text{C} \times 144 \text{ h}$ 时效态熔敷层、

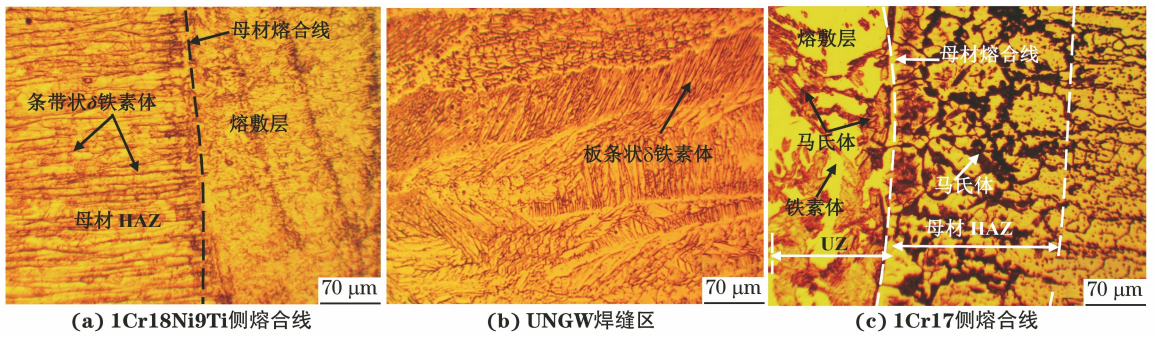


图 4 200 °C × 144 h 时效处理后组合焊接头不同区域的显微组织

Fig. 4 Microstructure of the different zones of combined welding joint after 200 °C × 144 h aging treatment: (a) fusion line on 1Cr18Ni9Ti side; (b) UNGW weld zone; (c) fusion line on 1Cr17 side

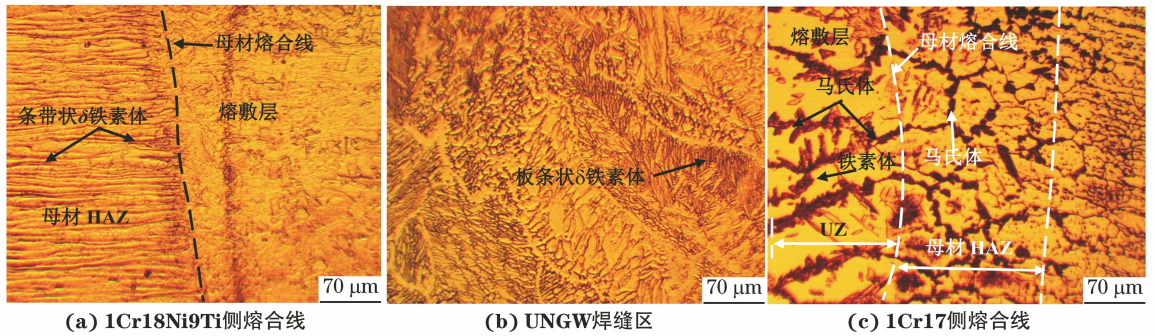


图 5 350 °C × 144 h 时效处理后组合焊接头不同区域的显微组织

Fig. 5 Microstructure of different zones of combined welding joint after 350 °C × 144 h aging treatment: (a) fusion line on 1Cr18Ni9Ti side; (b) UNGW weld zone; (c) fusion line on 1Cr17 side

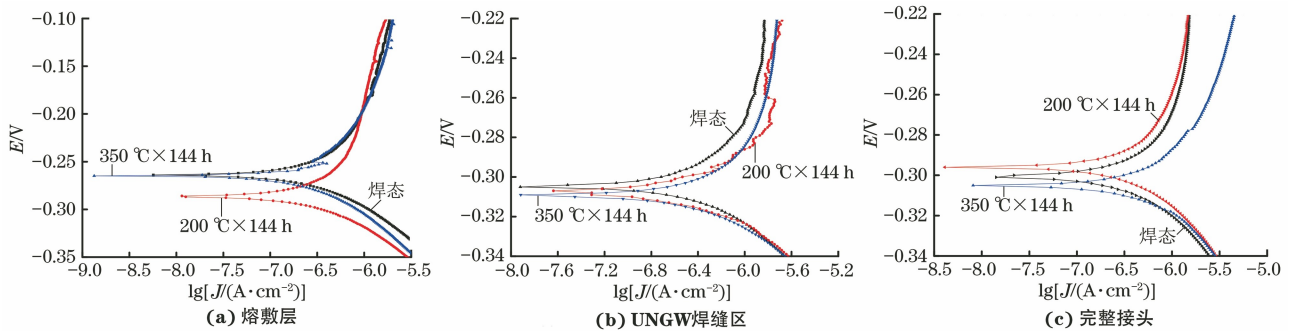


图 6 不同状态组合焊接头及其各区域在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线

Fig. 6 Polarization curves of cladding layer (a), UNGW weld zone (b) and complete joint (c) of combined welding joint in different states in 3.5% NaCl solution

表 4 极化曲线的电化学参数

Tab. 4 Electrochemical parameters of polarization curves

状态	熔敷层		UNGW 焊缝区		完整接头	
	E_{corr}/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	E_{corr}/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	E_{corr}/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
焊态	-0.264	6.196×10^{-7}	-0.305	1.108×10^{-6}	-0.301	1.190×10^{-6}
200 °C × 144 h 时效态	-0.285	6.012×10^{-7}	-0.307	1.125×10^{-6}	-0.296	1.288×10^{-6}
350 °C × 144 h 时效态	-0.266	6.735×10^{-7}	-0.309	1.187×10^{-6}	-0.305	1.474×10^{-6}

UNGW 焊缝区及完整接头的 E_{corr} 与焊态下对应区域的 E_{corr} 相当,即组合焊接头不同区域发生腐蚀的倾向并未随着时效温度的上升而显著增大;从动力学方面考虑,200 °C × 144 h 时效态熔敷层、UNGW

焊缝区及完整接头的 J_{corr} 与焊态下对应区域的 J_{corr} 相当,而 350 °C × 144 h 时效态熔敷层、UNGW 焊缝区及完整接头的 J_{corr} 比焊态下对应区域的 J_{corr} 略有上升,但其变化并不显著。

通过上述显微组织分析可知,200 °C×144 h 和 350 °C×144 h 时效处理后熔敷层组织与焊态下熔敷层的显微组织相似,主要为极为细小的胞状晶奥氏体,且 Cr、Ni、Nb 等合金元素含量均较高。故推测造成熔敷层 J_{corr} 变化的主要原因是熔敷层上存在少量微小气孔缺陷,因为气孔的存在会破坏熔敷层组织的致密性,进而破坏熔敷层钝化膜的完整性,故增大了点蚀发生的倾向;另外,腐蚀性离子(Cl^-)也易于向气孔缺陷处聚集,此处将作为阳极而优先腐蚀,导致电化学腐蚀反应进一步加速,即 J_{corr} 增大。完整接头由两侧熔敷层、UNGW 焊缝区及少量的 1Cr18Ni9Ti 和 1Cr17 母材组成,因此造成完整接头 J_{corr} 增大的原因主要有两方面:一方面是该熔敷层上存在少量微小气孔缺陷;另一方面则是 UNGW 焊缝区内存在一定数量的 δ 铁素体, δ 铁素体的存在会导致较高温度时效过程中富铬铁素体 α' 相的析出倾向增大,而 α' 相的析出会降低其耐腐蚀性能^[10]。

2.4 晶间腐蚀性

由表 5 可见,焊态及 200 °C×144 h 和 350 °C×144 h 时效态组合焊接头的平均腐蚀速率分别为

0.303、0.333 和 0.407 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。与焊态组合焊接头的腐蚀速率相比,200 °C×144 h 时效态组合焊接头的腐蚀速率未见明显变化,而 350 °C×144 h 时效态组合焊接头的腐蚀速率略有增大,这与极化曲线测试结果相吻合。

表 5 不同状态组合焊接头的腐蚀速率

Tab. 5 Corrosion rates of combined welding joint in different states

状态	腐蚀速率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$			
	v_1	v_2	v_3	平均值
焊态	0.279	0.207	0.423	0.303
200 °C×144 h 时效态	0.409	0.290	0.300	0.333
350 °C×144 h 时效态	0.421	0.325	0.474	0.407

350 °C×144 h 时效处理后组合焊接头不同区域的晶间腐蚀形貌如图 7 所示。1Cr17 侧的 HAZ 及不均匀混合区内的马氏体被严重腐蚀,形成了较深的腐蚀沟槽,见图 7(b);尽管熔敷层个别位置存在气孔缺陷,但由于熔敷层具有极为细小的奥氏体胞状晶组织且含有较多的 Cr、Ni、Nb 等合金元素,因此其耐蚀性在整个组合焊接头中仍然是最好的,晶间腐蚀后熔敷层中腐蚀沟槽数量极少,见图 7(c)。

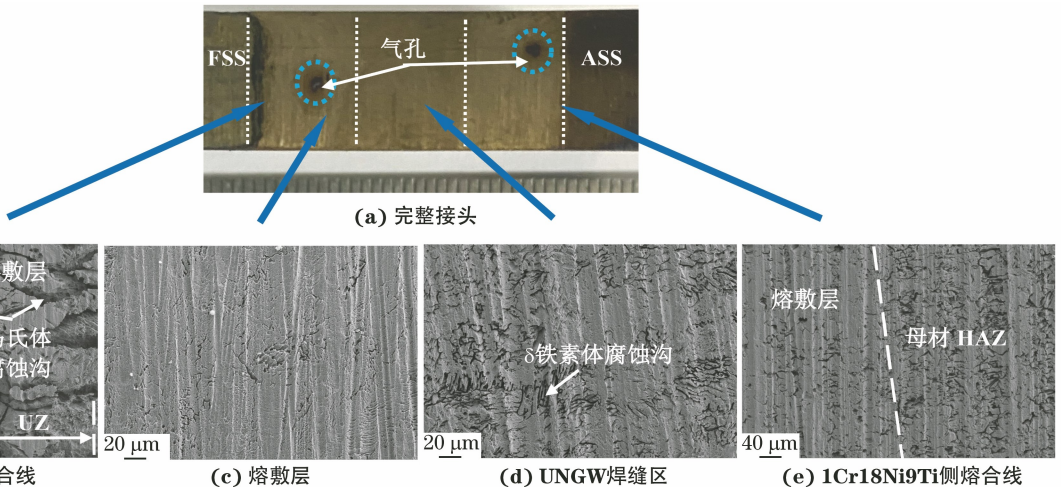


图 7 350 °C×144 h 时效处理后组合焊接头不同区域的晶间腐蚀形貌

Fig. 7 Intergranular corrosion morphology of different zones of combined welding joint after 350 °C×144 h aging treatment: (a) complete joint; (b) fusion line on 1Cr17 side; (c) cladding layer; (d) UNGW weld zone; (e) fusion line on 1Cr18Ni9Ti side

3 结论

(1) 200 °C×144 h 及 350 °C×144 h 时效处理后 1Cr17/1Cr18Ni9Ti 异种不锈钢“TIG 冷焊+UNGW”组合焊接头不同区域的显微组织与其焊态组织相比未见明显变化。

(2) 极化曲线测试与晶间腐蚀试验结果表明,1Cr17/1Cr18Ni9Ti 异种不锈钢“TIG 冷焊+

UNGW”组合焊接头的腐蚀倾向并未随着时效温度的上升而增大,而腐蚀速率随时效温度的上升呈现出略微的增大趋势,但变化并不显著。

参考文献:

- [1] BALA S P, SATISH K M P. Characterisation of thin section dissimilar weld joint comprising austenitic and ferritic stainless steels [J]. Materials Science and

- Technology, 2008, 24(4):392-398.
- [2] 刘国亮,杨善武,周鲁军,等. 异种不锈钢电子束焊接接头的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(5):194-203.
LIU G L, YANG S W, ZHOU L J, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of dissimilar stainless steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(5):194-203.
- [3] AGUILAR S, TABARES R, SERNA C. Microstructural transformations of dissimilar austenite-ferrite stainless steels welded joints [J]. Journal of Materials Physics and Chemistry, 2013, 1(4):65-68.
- [4] 郑淮北,叶晓宁,张雪峰,等. 12%Cr 铁素体不锈钢粗晶区组织转变和晶粒长大及析出相分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(6):37-40, 114-115.
ZHENG H B, YE X N, ZHANG X F, et al. Microstructure transformation, grain growth and precipitated phase of 12%Cr ferritic stainless steel in coarse grain zone [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(6):37-40, 114-115.
- [5] 刘腊腊,胡绳荪,申俊琦,等. 激光焊接热输入对 26Cr-3.5Mo 铁素体不锈钢组织性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2):101-107.
LIU L L, HU S S, SHEN J Q, et al. Effect of laser welding heat input on microstructure and properties of 26Cr-3.5Mo ferritic stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2):101-107.
- [6] 蔡淑娟,朱亮,龚练. 热输入对 430 铁素体不锈钢热影响区组织和韧性的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2):24-27.
CAI S J, ZHU L, GONG L. Influence of heat input on microstructure and toughness of heat affected zone of 430 ferritic stainless steel [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(2):24-27.
- [7] 郑韶先,杜宝峰,韩峰,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢超窄间隙焊接接头组织与性能分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(10):2454-2458.
ZHENG S X, DU B F, HAN F, et al. Microstructure and mechanical property of ultra-narrow-gap welding joint of 1Cr18Ni9Ti stainless steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(10):2454-2458.
- [8] 郑韶先,徐龙强,杜宝峰,等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢脉冲超窄间隙焊接头的组织及耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料, 2021, 45(4):13-18.
ZHENG S X, XU L Q, DU B F, et al. Microstructure and corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel joint by pulsed ultra-narrow-gap welding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(4):13-18.
- [9] 郑韶先,汪军平,赵锡龙,等. FSS/ASS 厚壁异种钢“TIG 冷焊+UNGW”组合焊的接头组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2022, 43(7):28-35, 114.
ZHENG S X, WANG J P, ZHAO X L, et al. Microstructure and mechanical property of the thickwalled dissimilar steel joint of FSS/ASS with the combined “TIG cold welding + UNGW” [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(7):28-35, 114.
- [10] 利波尔德,科特基. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹,译. 北京:机械工业出版社,2008.
LIPPOLD J C, KOTECKI D J. Welding metallurgy and weldability of stainless steels[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [11] 何德孚,王晶滢. 双相不锈钢钢管性能控制的新途径——亚稳界分解热处理(上)[J]. 焊管, 2018, 41(7):1-5.
HE D F, WANG J Y. A new way for duplex stainless steel pipe performance control—spinodal decomposition heat treatment (I) [J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(7):1-5.
- [12] 王永强,杨滨,李娜,等. σ 相在核电一回路主管道不锈钢中的脆化机理[J]. 金属学报, 2016, 52(1):17-24.
WANG Y Q, YANG B, LI N, et al. Embrittlement of σ phase in stainless steel for primary coolant pipes of nuclear power plant [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(1):17-24.
- [13] 刘思维,罗强,陈勇,等. 热老化对 316LN 不锈钢焊缝微观组织和显微硬度的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(S2):267-270.
LIU S W, LUO Q, CHEN Y, et al. Effects of thermal aging on microstructure and microhardness of 316LN austenitic stainless steel weld [J]. Materials Reports, 2015, 29(S2):267-270.
- [14] 张媛,周小飞. 时效对 304 不锈钢晶间腐蚀行为的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(5):912-913, 921.
ZHANG Y, ZHOU X F. Effect of aging on intergranular corrosion behavior of 304 stainless steel [J]. Foundry Technology, 2016, 37(5):912-913, 921.
- [15] 郑韶先,时哲,韩峰,等. 超细颗粒焊剂约束电弧超窄间隙焊接 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的焊缝成形分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(2):67-70, 116.
ZHENG S X, SHI Z, HAN F, et al. Ultra-narrow-gap weld of 1Cr18Ni9Ti stainless steel with constricted arc by ultra-fine granular flux [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2):67-70, 116.

(下转第 27 页)

emotion recognition based on improved K -mean clustering[J]. Computer Applications and Software, 2024,41(9):224-229.

[15] 王新颖,刘岚,陈海群,等. 基于 K 均值聚类算法和 LSTM 神经网络的管道腐蚀阶段预测方法[J]. 腐蚀与防护,2024,45(8):84-89.

WANG X Y, LIU L, CHEN H Q, et al. A pipeline stage corrosion prediction method based on K -Means clustering algorithm and LSTM neural network[J].

Corrosion & Protection,2024,45(8):84-89.

[16] 林君,杨乐辉,赵金玲,等. 基于 K 均值算法-TOF 聚类分析的复合材料板冲击损伤层析研究[J]. 压力容器,2024,41(5):12-20.

LIN J, YANG L H, ZHAO J L, et al. Clustering analysis of time of flight (TOF) for tomographic evaluation of impact damage in composites based on K -Means algorithm[J]. Pressure Vessel Technology, 2024,41(5):12-20.

A Multi-Feature Parameter Based Integrated Detection Method for Corrosion Defects in Buffer Layer of High-Voltage Cable Metal Sheaths

KE Honghai¹, TIAN Hao²

(1. Electrical Department of China Petroleum & Chemical Corporation Maoming Branch, Maoming 525000, China;

2. Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: Corrosion defects in the buffer layer of high-voltage cable metal sheaths are characterized by high latency and strong concealment, significantly compromising cable reliability and safety. To address these defects, an integrated detection method based on multiple feature parameters was proposed. The method integrated infrared detection and X-ray imaging to extract multiple feature parameters. Differential evolution algorithm was employed to optimize the parameters of the K -Means clustering algorithm. Using the multi-feature parameters as input, defect identification was accomplished through K -Means clustering. The results show that compared with three traditional detection methods, the proposed method achieved the lowest log loss, indicating it had the highest accuracy in defect detection.

Key words: high voltage cable; metal sheath buffer layer; corrosion defect; multi-feature parameter; improved K -Means clustering algorithm; integrated detection



(上接第 20 页)

Effect of Aging Treatment on Corrosion Resistance of 1Cr17/1Cr18Ni9Ti Dissimilar Steel Welded Joint by “TIG Cold Welding+UNGW” Combined Process

WANG Junping¹, LI Jinze¹, LIU Guoliang¹, WANG Qun¹, ZHENG Shaoxian²

(1. Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Jiuquan Iron and Steel(Group) Corporation, Jiayuguan 735100, China;

2. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: “TIG cold welding+UNGW” combined welding process was employed to fabricate 1Cr17/1Cr18Ni9Ti dissimilar steel joints. Subsequently, these joints underwent aging treatment at 200 °C and 350 °C for 144 hours respectively to simulate their long-term service process at high temperatures below 400 °C. The microstructure of different zones in the combined welded joint was examined using optical microscopy and scanning electron microscopy, while the effect of aging temperature on the corrosion resistance of the joint was investigated through electrochemical tests and intergranular corrosion tests. The results show that no significant microstructural changes were observed in different regions of the combined welded joint after aging treatment at 200 °C×144 h and 350 °C×144 h compared with those in the as-welded state. The corrosion tendency of the combined welding joint did not show remarkable increase with the rise of aging temperature. However, the corrosion rate demonstrated a growing trend with increasing aging temperature, though the change was not significant.

Key words: dissimilar stainless steel welding; aging treatment; microstructure; corrosion resistance