

DOI: 10.11973/jxgccl202310007

不同焊丝 TIG 焊 SUS316L/15CrMo 异种钢接头的显微组织与力学性能

李亚杰¹, 刘涛¹, 洪磊², 洪亮², 黄爱颐³

(1. 江苏理工学院材料工程学院, 常州 213001; 2. 江苏贝特管件有限责任公司, 泰州 225500;
3. 江苏省特种设备安全监督检验研究院泰州分院, 泰州 225599)

摘要: 分别采用 ERNiCrMo-3 镍基合金焊丝和 ER309 不锈钢焊丝, 通过钨极惰性气体保护 (TIG) 焊工艺对 SUS316L 不锈钢和 15CrMo 低合金钢进行异种钢焊接, 对比研究了 2 种焊接接头的显微组织和力学性能。结果表明: 采用 ERNiCrMo-3 与 ER309 焊丝所得焊缝的凝固模式分别为奥氏体与奥氏体-铁素体凝固模式, 凝固组织分别为完全奥氏体组织与奥氏体-铁素体混合组织; 相较于 ER309 焊丝, 使用 ERNiCrMo-3 焊丝可以抑制 15CrMo 钢侧焊接过程中的碳元素扩散, 获得具有更高抗拉强度和断后伸长率的焊接接头; 2 种焊接接头的峰值硬度均出现在 15CrMo 钢侧的粗晶热影响区, 采用 ERNiCrMo-3 焊丝所得焊缝因存在 Laves 相, 硬度比采用 ER309 焊丝时高出 30 HV 左右。

关键词: 镍基合金焊丝; 不锈钢焊丝; 异种钢焊接; 力学性能; 显微组织

中图分类号: TG422.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)10-0043-07

Microstructure and Mechanical Properties of SUS316L/15CrMo Dissimilar Steel Joint by TIG Welding with Different Welding Wires

LI Yajie¹, LIU Tao¹, HONG Lei², HONG Liang², HUANG Aiyi³

(1. School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. Jiangsu Beite Pipe Fittings Co., Ltd., Taizhou 225500, China;

3. Taizhou Branch of Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Taizhou 225599, China)

Abstract: Dissimilar steel welding was carried out on SUS316L stainless steel and 15CrMo low-alloy steel by tungsten inert gas (TIG) welding with nickel base alloy welding wire ERNiCrMo-3 and stainless steel welding wire ER309. The microstructure and mechanical properties of the two welded joints were studied and compared. The results show that the solidification modes of the welds obtained with ERNiCrMo-3 and ER309 welding wires were austenitic and austenite-ferrite solidification modes, respectively, and the solidification structures were complete austenitic and mixed austenite-ferrite structures, respectively. Compared with using ER309 welding wire, using ERNiCrMo-3 welding wire could inhibit the diffusion of carbon in the welding process on 15CrMo steel side, and obtain a welded joint with higher tensile strength and percentage elongation after fracture. The peak hardness of the two welded joints appeared in the coarse-grained heat affected zone on 15CrMo steel side. Due to Laves phase in the weld obtained with ERNiCrMo-3 welding wire, the hardness was about 30 HV higher than that with ER309 welding wire.

Key words: nickel base alloy welding wire; stainless steel welding wire; dissimilar steel welding; mechanical property; microstructure

收稿日期: 2022-08-31; 修订日期: 2023-08-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51601078); 江苏省政府

留学奖学金项目 (JS-2019-322)

作者简介: 李亚杰 (1994—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生

导师: 刘涛副教授

0 引言

SUS316L 奥氏体不锈钢具有良好的塑韧性, 较高的抗拉强度以及良好的耐高温酸性介质腐蚀能力, 广泛应用于化工制药、航空航天、能源运输、火力

发电等领域^[1-2]。15CrMo 珠光体低合金钢具有良好的蠕变断裂性能、抗高温断裂性能、抗氧化性能和耐腐蚀性能,广泛应用于石油化工、火力发电等领域^[3-4]。在制造机械设备时,常需要对不同材料制成的部件进行连接,例如锅炉中 15CrMo 钢集热器与 SUS316L 钢再热器管的连接^[5-6],因此异种材料焊接工艺的研究意义重大。15CrMo 低合金钢和 SUS316L 奥氏体不锈钢的异种钢焊接接头已在亚临界火电机组中得到广泛应用。然而,SUS316L 钢和 15CrMo 钢除了化学成分存在差异,物理性能如线膨胀系数、热导率等也存在较大差异^[7],这些差异不仅会导致二者焊接时在熔合线附近区域产生脆性金属化合物,还会形成裂纹等焊接缺陷^[8-9]。因此,有必要进一步对 SUS316L/15CrMo 异种钢焊接工艺参数和方法进行研究。

焊丝显著影响着焊接接头的抗拉强度、塑性以及焊接缺陷的产生,决定着整个焊接接头的质量^[6]。选择合适的焊丝,可以有效改善异种钢焊接因材料差异而产生的问题,从而提升接头的力学性能。目前,SUS316L 钢和 15CrMo 钢之间的焊接普遍使用的焊丝是不锈钢焊丝^[3]。不锈钢焊丝的成分和性能接近于 SUS316L 钢,但与低合金钢之间存

在较大差别,容易产生热裂纹、气孔等焊接缺陷^[6]。因此,有学者开始尝试选用成分介于 15CrMo 钢和奥氏体不锈钢之间的镍基合金焊丝对 2 种钢进行焊接。为了比较 2 种焊丝的适用性,作者选用 ER309 不锈钢焊丝和 ERNiCrMo-3 镍基合金焊丝,采用钨极惰性气体保护焊(TIG),对 SUS316L 钢和 15CrMo 钢进行对接多道焊,对比了 2 种焊丝焊接接头的显微组织和力学性能,拟为 SUS316L/15CrMo 异种钢焊接焊丝的选择提供参考。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验用母材为 15CrMo 珠光体低合金钢板和 SUS316L 奥氏体不锈钢板,尺寸均为 150 mm×75 mm×10 mm,供货状态为热轧态;焊接材料分别为 ERNiCrMo-3 镍基合金焊丝和 ER309 不锈钢焊丝,直径均为 2.4 mm。母材和焊丝均由江苏贝特管件有限责任公司提供,化学成分如表 1 所示。根据铬、镍当量计算公式^[10],得到 15CrMo 钢和 SUS316L 钢的铬镍当量比分别为 0.94,1.68;按照 30%稀释率计算,采用 ER309 焊丝和 ERNiCrMo-3 焊丝形成的焊缝的铬镍当量比分别为 1.63,0.51。

表 1 母材与焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metals and welding wires

牌号	质量分数/%										
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	P	Nb	S	Fe
15CrMo	0.13	1.17	0.12	0.45	0.50	0.28	0.06	0.004		0.002	余
SUS316L	0.007 6	16.77	10.39	2.03	1.11	0.513	0.045 9	0.028 7		0.003 2	余
ERNiCrMo-3	0.012	22.23	64.89	9.23	0.37	0.091	0.01	0.008	3.5	0.001	余
ER309	0.06	23.5	13.7	0.6	2.05	0.34	0.4				余

为保证焊接质量,焊前使用角磨机和丙酮去除钢板表面的氧化膜与油渍。钢板开 V 型坡口(带钝边,尺寸为 1.5 mm),坡口角度为 75°,根部间隙为 1.5 mm,使用 Precision TIG 型 GTAW 焊机进行三层单道对接焊,使用氧-乙炔火焰对钢板进行预热和层间保温,预热和层间保温温度分别为 200,250 ℃;焊接速度为 80~90 mm·min⁻¹,氩气流量为 15 L·min⁻¹,焊接电流为 145~155 A,焊接电压为 16.2 V,热输入为 0.939~1.096 kJ·mm⁻¹。

1.2 试验方法

采用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)对焊缝进行物相分析,扫描范围为 20°~100°,扫描速率为 4(°)·min⁻¹。在焊接接头上取样,经打磨、抛光,分别使用质量分数为 6%的 FeCl₃ 溶液、王水、质量分数

为 4%的硝酸乙醇溶液对焊缝、热影响区、SUS316L 钢母材和 15CrMo 钢母材腐蚀后,采用 Olympus ModelBX51 型光学显微镜(OM)和 Sigma500 型扫描电镜(SEM)观察显微组织,采用 X-MaxN80 型能谱仪(EDS)进行微区成分分析。利用 HVS-100B 型数显转塔式显微硬度计测试硬度,相邻点之间的距离为 0.5 mm,加载力为 4.9 N,保载时间为 13 s。采用电火花线切割机以焊缝为中心切取如图 1 所示的拉伸

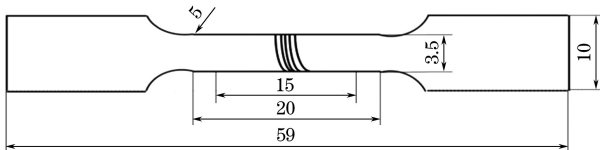


图 1 拉伸试样的形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of tensile sample

试样,标距为 15 mm,采用 WDW3200 型万能拉伸试验机在室温环境下进行拉伸试验,拉伸速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,采用 Sigma500 型扫描电镜观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

由图 2 可见:在采用 ERNiCrMo-3 焊丝制备的焊接接头中,15CrMo 钢侧可以分为焊缝区、熔合区、粗晶热影响区、细晶热影响区、临界热影响区和母材区 6 个区域。15CrMo 钢母材的显微组织

为黑色珠光体与白色铁素体;与焊缝距离较近的粗晶热影响区由于受焊接高温影响较大,形成了脆硬的马氏体和贝氏体组织,组织明显粗化;距离焊缝较远的细晶热影响区在较低的焊接循环热影响下发生回火分解,形成细小的铁素体和粒状贝氏体组织;与母材相邻的临界热影响区受焊接循环热影响较小,只发生部分相变重结晶,形成铁素体和回火索氏体组织,晶粒尺寸与母材相比未发生明显变化。在采用 ER309 焊丝制备的焊接接头中,在 15CrMo 钢侧热影响区观察到了类似的显微组织和晶粒尺寸。

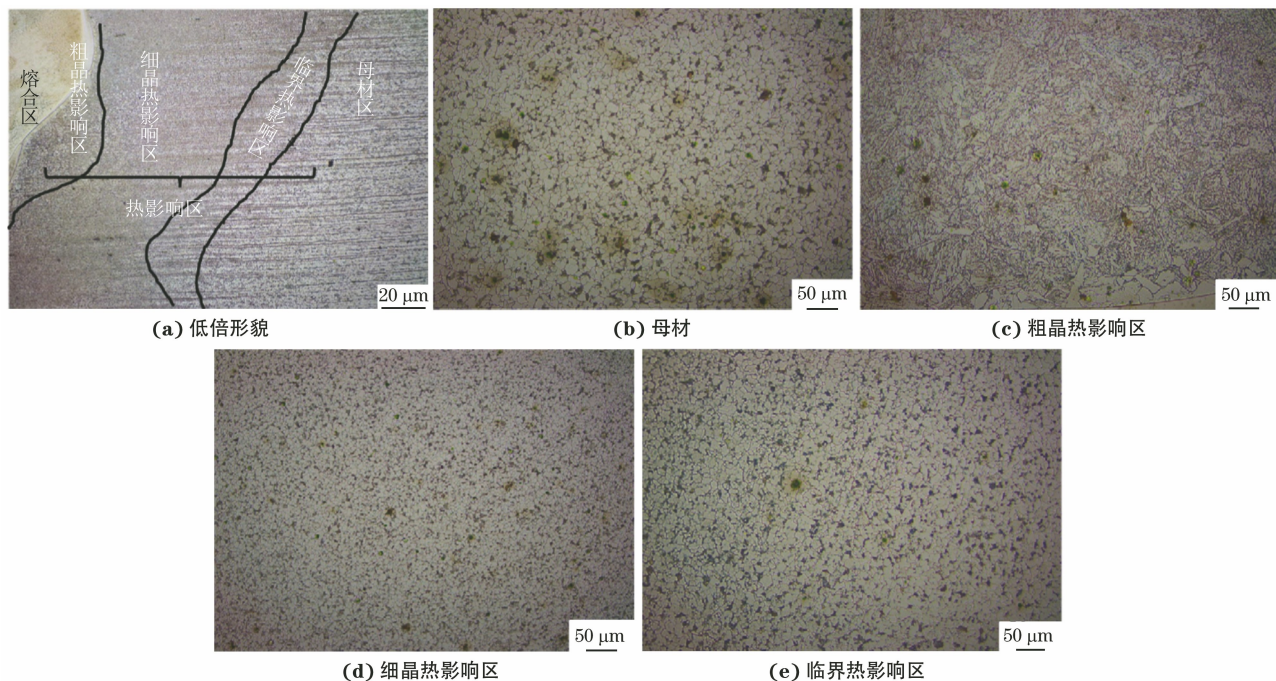


图 2 采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接接头 15CrMo 钢侧不同区域的 OM 形貌

Fig. 2 OM morphology of different areas on 15CrMo steel side of welded joint with ERNiCrMo-3 welding wire: (a) low magnification morphology; (b) base metal; (c) coarse-grained heat affected zone; (d) fine-grained heat affected zone and (e) critical heat affected zone

由图 3 可见:在采用 ERNiCrMo-3 焊丝制备的焊接接头中,SUS316L 钢侧可分为焊缝区、热影响区和母材区 3 个区域。SUS316L 钢母材为典型的多边形奥氏体晶粒和退火孪晶组织。热影响区的显微组织由长条状 δ 铁素体和多边形奥氏体晶粒组成,其宽度在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$,比 15CrMo 钢侧热影响区(约 $1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$)窄,主要原因是 SUS316L 钢的热导率较低;条状 δ 铁素体主要存在于靠近熔合区的热影响区中,其铬、镍元素的含量较高。当熔池边界铬和镍的当量比较高时,在熔池边界处往往会形成 δ 铁素体; δ 铁素体的生成可以抑制热影响区的液化开裂^[10]。在采用 ER309 焊丝制备的焊接接头中,于 316L 钢侧热影响区观察到了相似

的显微组织。

由图 4 可知:无论使用 ER309 焊丝还是 ERNiCrMo-3 焊丝,在 15CrMo 钢侧焊接边界区域内的铁、铬、镍、钼元素含量均发生了变化;采用 ER309 焊丝焊接后,在 15CrMo 钢侧焊缝的碳含量较热影响区有所增加,而热影响区中的碳含量较离焊缝侧较远的母材有所减少,说明的碳元素向焊缝中发生了迁移;而在采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接的接头中,15CrMo 钢侧焊缝区的碳含量未发生明显变化,说明碳元素未发生迁移。由此可知,采用铬和镍含量较高的 ERNiCrMo-3 焊丝对 SUS316L 钢和 15CrMo 钢进行焊接可以有效抑制 15CrMo 钢中碳元素向熔池中的迁移。

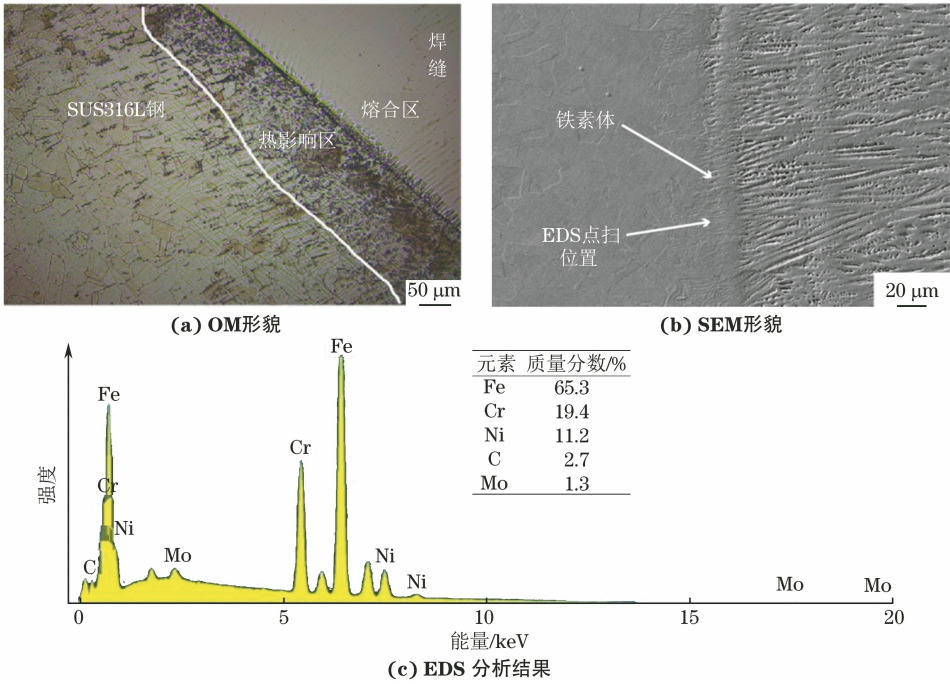


图 3 采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接接头 SUS316L 钢侧的形貌和 EDS 分析结果

Fig.3 Morphology (a-b) and EDS analysis result (b) on SUS316L steel side of welded joint with ERNiCrMo-3 welding wire:
(a) OM morphology and (b) SEM morphology

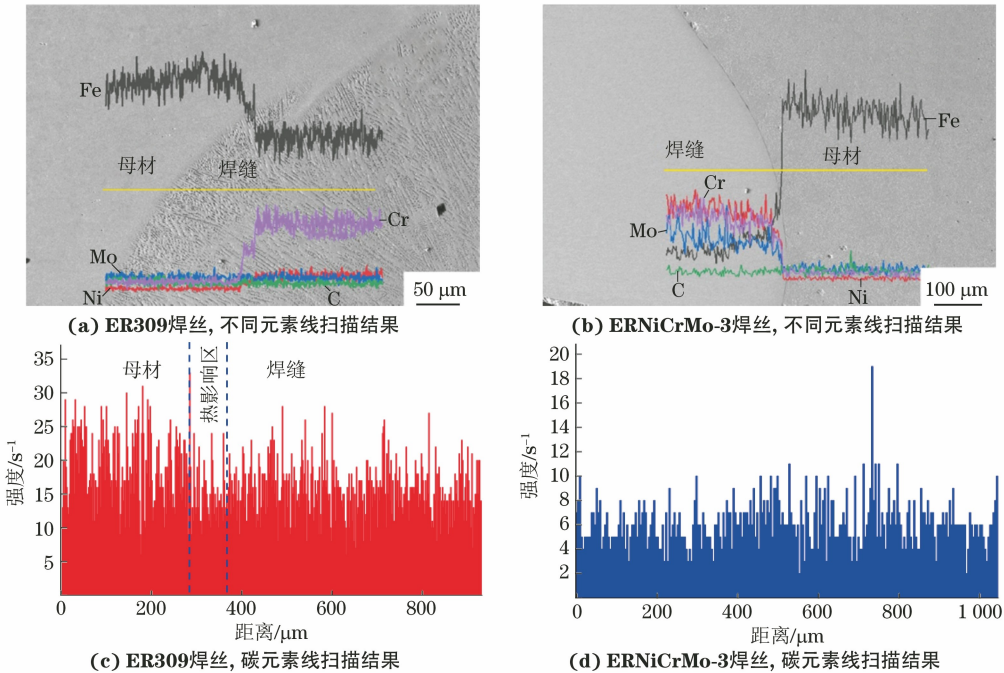


图 4 采用 ER309 和 ERNiCrMo-3 焊丝焊接接头 15CrMo 钢侧的 EDS 线扫描结果

Fig.4 EDS linear scanning results on 15CrMo steel side of joint welded with ER309 (a, c) and ERNiCrMo-3 (b, d) welding wires:
(a-b) linear scanning results of different elements and (c-d) linear scanning results of carbon element

由图 5 可以看出:采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接接头的焊缝组织为胞状奥氏体组织,采用 ER309 焊丝焊接接头的焊缝组织为骨架状铁素体和奥氏体组织。由前文可知,采用 ERNiCrMo-3 和 ER309 焊丝

焊接接头的铬镍当量比分别为 0.51,1.63,根据舍弗勒相图^[11],焊缝的凝固模式为奥氏体(A)模式和铁素体-奥氏体(FA)模式,因此分别形成了完全奥氏体组织和铁素体+奥氏体组织。在FA

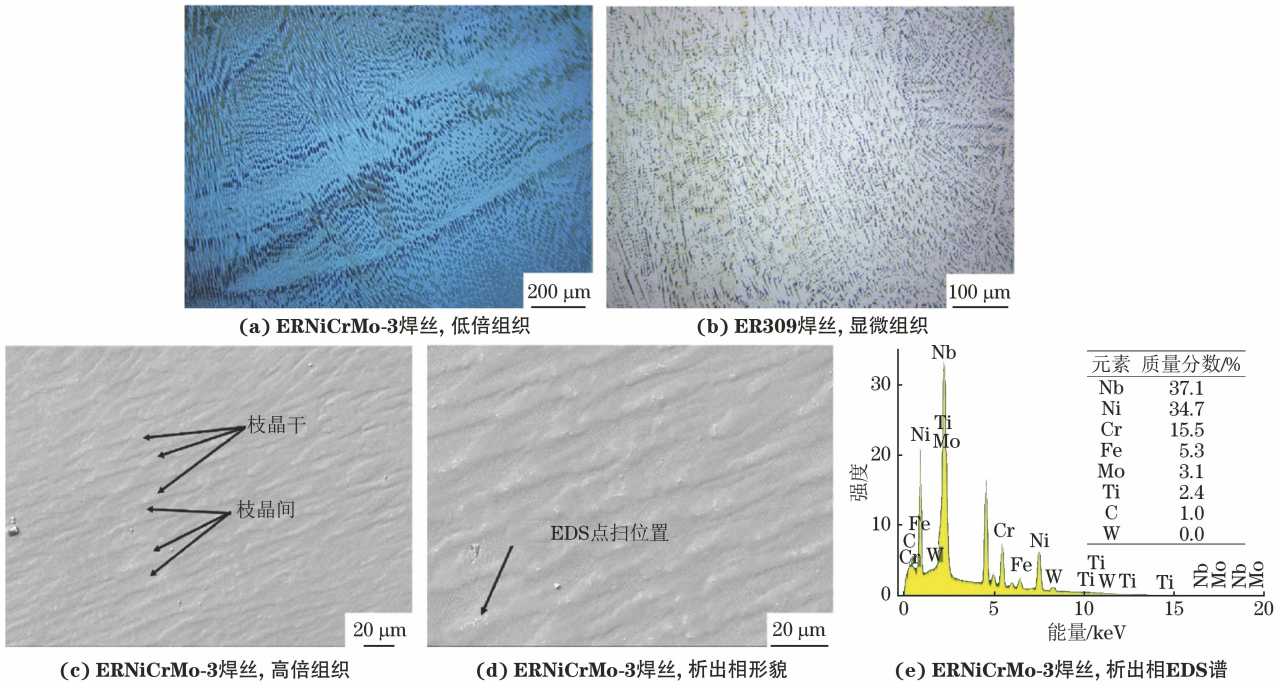


图 5 采用 ERNiCrMo-3 和 ER309 焊丝焊接接头焊缝的显微组织以及析出相的形貌和 EDS 谱

Fig.5 Microstructures (a—c) and morphology (d) and EDS pattern (e) of precipitated phase in weld seam of joints welded with ERNiCrMo-3 (a, c—e) and ER309 (b) welding wires

凝固模式下,铁素体作为初始析出相凝固,呈骨架状,而奥氏体随后通过包晶-共晶反应生成。放大后可以看出,采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接的接头焊缝中,奥氏体包含枝晶间和枝晶干 2 种结构,奥氏体基体上还出现了富含铌、钼等元素的条状白色析出相。结合图 6 分析可知,富含铌、钼等元素的析出相为 Laves 相^[12]。

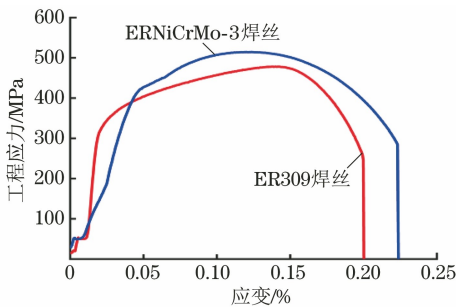


图 7 采用 ERNiCrMo-3 和 ER309 焊丝焊接接头的工程应力-应变曲线

Fig. 7 Engineering stress-strain curves of joints welded with ERNiCrMo-3 and ER309 welding wires

颈缩现象,这表明接头在拉伸断裂过程中出现了较大的塑性变形,发生了韧性断裂;2 种焊丝焊接接头微观断口均观察到了韧窝,说明接头的断裂机制为微孔聚集型韧性断裂;采用 ERNiCrMo-3 焊丝时拉伸断口上的韧窝数量较多,深度较深且分布更均匀,而采用 ER309 焊丝时韧窝数量较少,深度较浅,分布较不均匀,并且断口上还出现了数量较多的解理台阶。由此可见,采用 ERNiCrMo-3 焊丝制备的焊接接头可以获得更大的抗拉强度与塑性变形能力。

在焊接过程中,受焊接热循环的影响,15CrMo 钢侧的粗晶热影响区被加热到奥氏体转变结束温度 A_{c3} 以上,组织完全奥氏体化并且晶粒尺寸增大,在冷却过程中,形成粗大的贝氏体和马氏体组织。粗大且脆硬的马氏体和贝氏体的形成导致 15CrMo

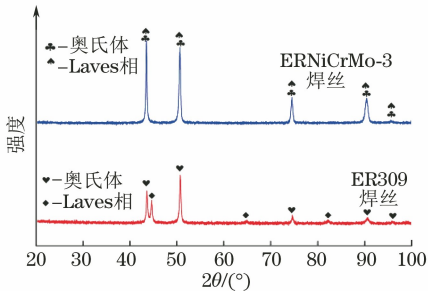


图 6 采用 ERNiCrMo-3 和 ER309 焊丝焊接接头焊缝的 XRD 谱

Fig. 6 XRD patterns of weld seam of joints welded with ERNiCrMo-3 and ER309 welding wires

2.2 拉伸性能

由图 7 可以看出,采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接的接头的抗拉强度和断后伸长率分别为 514.5 MPa 和 22.3%,高于采用 ER309 焊丝的焊接接头 (478.1 MPa 和 20.2%),分别提高约 7%和 10%。

由图 8 可见:2 种焊丝焊接接头拉伸时均在 15CrMo 钢侧热影响区发生断裂,拉伸断口均出现

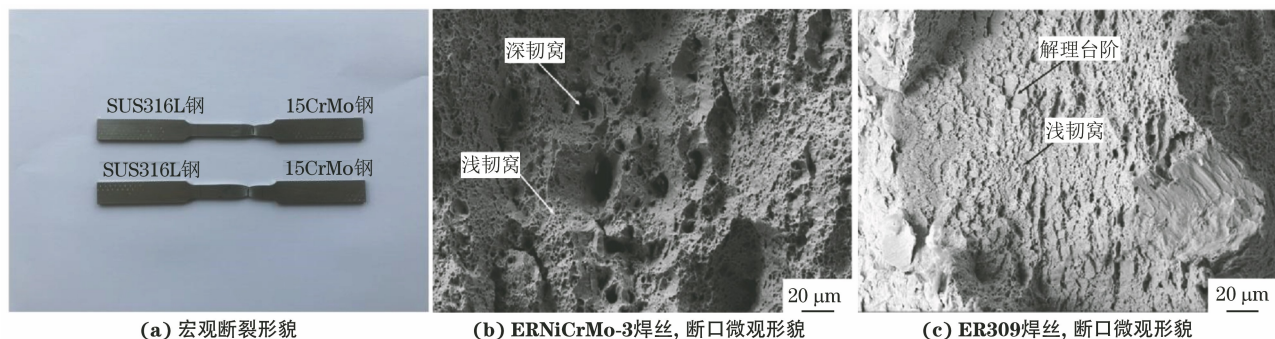


图 8 不同焊丝焊接接头拉伸试样的宏观断裂形貌和拉伸断口微观形貌

Fig.8 Macroscopic fracture morphology of tensile specimens (a) and micromorphology of tensile fracture (b-c) of joints welded with different welding wires: (b) ERNiCrMo-3 welding wire and (c) ER309 welding wire

钢侧热影响区的脆性增加,韧性减弱,因此拉伸时在此处发生断裂。试验用 15CrMo 钢母材的碳含量高于 ER309 和 ERNiCrMo-3 焊丝,在焊接过程中母材中的碳会向焊缝发生迁移,从而削弱了接头的力学性能^[11,13-15]。但是,ERNiCrMo-3 焊丝含有较高含量的铬和镍元素,可以抑制碳迁移^[16],因此采用 ERNiCrMo-3 焊丝制备的焊接接头比采用 ER309 焊丝的接头具有更高的抗拉强度和断后伸长率。

2.3 显微硬度

由图 9 可知:2 种焊丝焊接接头的硬度均在 15CrMo 钢侧热影响区急剧增加,整体硬度变化趋势相似,只是采用 ERNiCrMo-3 焊丝时的焊缝硬度略高于采用 ER309 焊丝时的焊缝硬度。15CrMo 钢和 SUS316L 钢的硬度均约为 180 HV。15CrMo 钢侧临界热影响区由于发生部分相变重结晶,形成铁素体和回火索氏体混合组织,其硬度升至约 210 HV;细晶热影响区则由于发生完全相变重结晶,形成贝氏体和细小铁素体晶粒,硬度升至约 262 HV;粗晶热影响区受焊接热循环影响最大,形成了脆硬的贝氏体和马氏体组织,其硬度最高,约为 293 HV。相较于 ER309 焊丝,采用 ERNiCrMo-3 焊丝形成的焊缝中的奥氏体晶粒上析出了富含铌和钼元素的 Laves 相,因此焊缝平

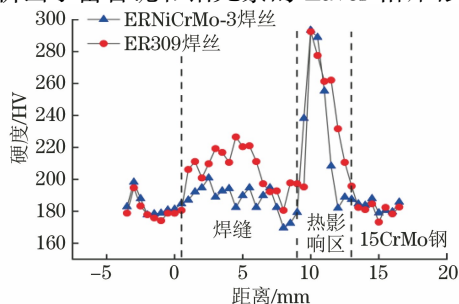


图 9 不同焊丝焊接接头截面显微硬度分布

Fig.9 Microhardness distribution on section of joints welded with different welding wires

均硬度提高了约 30 HV^[17-18]。

3 结论

(1) 分别采用 ERNiCrMo-3 和 ER309 焊丝对 15CrMo 钢和 SUS316L 钢进行异种钢焊接,焊缝两侧热影响区的组织和晶粒尺寸未见明显差异;相较于 ER309 焊丝,采用具有更高铬、镍含量的 ERNiCrMo-3 焊丝能够有效抑制 15CrMo 钢中的碳向焊缝中迁移。

(2) 采用 ER309 焊丝焊接时,其焊缝凝固模式为铁素体-奥氏体模式,因此焊缝组织为铁素体和奥氏体;采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接时,其焊缝凝固模式为奥氏体模式,焊缝组织为奥氏体。

(3) 采用 ERNiCrMo-3 焊丝可以获得具有更高抗拉强度和断后伸长率的焊接接头,该接头拉伸断口上的韧窝更多,深度更深且分布均匀;采用 ERNiCrMo-3 焊丝时,因焊缝中的奥氏体上析出了 Laves 相,其硬度比采用 ER309 焊丝时高约 30 HV。

参考文献:

- [1] HUANG B S, YANG J, LU D H, et al. Study on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of S355JR/316L dissimilar welded joint prepared by gas tungsten arc welding multi-pass welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(5): 381-388.
- [2] 陈今良. 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢与 Q235 碳钢异种金属焊接接头的组织与性能[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(3): 179-184.
CHEN J L. Microstructure and properties of 0Cr18Ni9 austenitic stainless steel and Q235 carbon steel dissimilar metal welded joint[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(3): 179-184.
- [3] DAK G, PANDEY C. A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58:

377-406.

- [4] 胡效东,戚振,吕建涛,等. 15CrMoR 钢多层焊缝的组织与力学性能[J]. 金属热处理,2014,39(10):131-136.
- HU X D, QI Z, LYU J T, et al. Microstructure and mechanical properties of 15CrMoR multi-layer welding seam [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(10): 131-136.
- [5] 冯琳杰,吕品正,赵永明,等. 15CrMo 钢多层堆焊过程中热影响区的组织演化行为及其对接头硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 67-70.
- FENG L J, LYU P Z, ZHAO Y M, et al. Microstructure evolution of heat affected zone of 15CrMo steel during multi-layer welding and its influence on hardness distribution of welded joint[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(11): 67-70.
- [6] 杨永磊,李海强,魏军. 镍基焊条在 A335-P12 与 TP304 异种钢的焊接实践[J]. 石油和化工设备, 2012, 15(8): 41-42.
- YANG Y L, LI H Q, WEI J. Welding practice of nickel-based covered electrode in A335-P12 and TP304 dissimilar steels[J]. Petro & Chemical Equipment, 2012, 15(8): 41-42.
- [7] 黄本生,刘阁,黄龙鹏,等. 不同焊材匹配与时效处理对异种钢焊接接头显微结构与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2013, 41(8): 75-84.
- HUANG B S, LIU G, HUANG L P, et al. Effect of different welding material matching and aging treatment on microstructure and mechanical properties of dissimilar steel welded joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(8): 75-84.
- [8] 单新华. 15CrMoR 与 06Cr19Ni10 异种钢焊接[J]. 石油和化工设备, 2017, 20(12): 36-40.
- SHAN X H. Welding of 15CrMoR and 06Cr19Ni10 dissimilar steel[J]. Petro & Chemical Equipment, 2017, 20(12): 36-40.
- [9] 凌堃. 15CrMo 和 0Cr25Ni20 异种钢焊接[J]. 热加工工艺, 2009, 38(3): 148-149.
- LING K. Dissimilar steel welding of 15CrMo and 0Cr25Ni20 [J]. Hot Working Technology, 2009, 38(3): 148-149.
- [10] KOU S. Welding Metallurgy[M]. [S. l.]: Wiley, 2002.
- [11] HAJIANNIA I, SHAMANIAN M, KASIRI M. Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding[J]. Materials & Design, 2013, 50: 566-573.
- [12] NAFFAKH H, SHAMANIAN M, ASHRAFIZADEH F. Dissimilar welding of AISI 310 austenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(7): 3628-3639.
- [13] AHMADI M, MIRSALEHI S E. Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AISI 316L stainless steel to ASTM A335-P11 low alloy steel dissimilar welding joints [J]. Materials at High Temperatures, 2015, 32(6): 627-635.
- [14] SIROHI S, PANDEY C, GOYAL A. Role of heat-treatment and filler on structure-property relationship of dissimilar welded joint of P22 and F69 steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 159: 111935.
- [15] 姜勇. 镍基和奥氏体的 Cr5Mo 异种钢焊接接头的高温性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- JIANG Y. Study on high temperature behaviour of nickel-based and austenitic Cr5Mo dissimilar welded joints [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2003.
- [16] 肖龙仁,雷玉成,朱强,等. 焊丝成分对 T91/316L 异种钢焊接接头微观组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(20): 3601-3605.
- XIAO L R, LEI Y C, ZHU Q, et al. Effect of welding wires on microstructures and mechanical properties of T91/316L dissimilar welding joints[J]. Materials Review, 2018, 32(20): 3601-3605.
- [17] SRIDHAR R, RAMKUMAR K D, ARIVAZHAGAN N. Characterization of microstructure, strength, and toughness of dissimilar weldments of Inconel 625 and duplex stainless steel SAF 2205 [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(6): 1018-1030.
- [18] TAMMASOPHON N, HOMHRAJAI W, LOTHONGKUM G. Effect of postweld heat treatment on microstructures and hardness of TIG weldment between P22 and P91 steels with Inconel 625 filler metal[J]. Journal of Metals, Materials and Minerals, 2011, 21(1): 93-99.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告