

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.09

410S铁素体不锈钢焊接接头组织及力学性能研究

于小芳¹, 于道伟², 杜华云^{2*}, 舒兴旺¹, 廖霖¹

1. 山西省交通科技研发有限公司, 山西 太原 030032
2. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030002

摘要: 为了研究高频感应焊接技术在铁素体不锈钢焊接中的应用潜力, 采用高频感应焊接技术对两种不同成分的410S铁素体不锈钢进行焊接试验。通过光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对焊接接头的微观组织进行表征, 并利用拉伸试验与冲击韧性试验对接头的力学性能进行综合评估。研究发现, 高频焊接的410S铁素体不锈钢接头具有较窄的热影响区, 晶粒长大不明显, 且晶粒和组织在基体间呈垂直取向分布。两种不锈钢因Ni含量差异, 导致焊接接头的力学性能存在显著差异: Ni含量较高的钢焊接接头展现出更优的抗拉强度和冲击韧性。然而, Si含量的降低致使焊缝出现空隙和氧化物杂质等缺陷。尽管如此, 高频焊接接头的强度仍显著高于使用标准。研究结果表明, 高频感应焊接技术有望成为铁素体不锈钢焊接的一种高效、可靠的工艺方法, 为该不锈钢在工业领域的更广泛应用提供了试验依据和技术参考。

关键词: 410S铁素体不锈钢; 高频焊; 焊接接头; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0069-08

Study on Microstructure and Mechanical Properties of 410S Ferritic Stainless Steel Welded Joint

YU Xiaofang¹, YU Daoyi², DU Huayun^{2*}, SHU Xingwang¹, LIAO Lin¹

1. Shanxi Transportation Technology R & D Co., Ltd., Taiyuan 030032, China
2. University of Taiyuan University of Technology, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan 030002, China

Abstract: In this study, to explore the potential of high-frequency induction welding technology in welding ferritic stainless steel, we welded two types of 410S ferritic stainless steels with different compositions using this technology. The microstructure of the welded joints was characterized by OM and SEM, and their mechanical properties were evaluated by tensile and impact toughness tests. Results show that the welded joints of 410S ferritic stainless steel by high-frequency welding have a narrow heat-affected zone, no significant grain growth, and grains and microstructures distributed vertically between the matrix and the matrix due to external forces and heat input. The two stainless steels showed significant differences in the mechanical properties of the welded joints due to different Ni content, with the steel containing more Ni exhibiting better tensile strength and impact toughness. However, the decrease in Si content led to defects such as voids and oxide impurities in the weld. Nevertheless, the strength of the high-frequency welded joints was still significantly higher than the standard requirements. The study indicates that high-frequency induction welding technology has the potential to become an efficient and reliable welding method for ferritic stainless steel, offering experimental evidence and technical reference for the broader application of this type of stainless steel in the industrial field.

Keywords: 410S ferritic stainless steel; high frequency welding; welded joints; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2024-10-09 修回日期: 2024-12-25

基金项目: 山西省交通运输厅科技项目(2022-03-01); 山西交科集团创新发展计划项目(重大专项)(22-JKCF-01)

作者简介: 于小芳(1996—), 女, 硕士, 主要从事公路安全防护设施的研究。E-mail: 3155922730@qq.com。

通讯作者: 杜华云(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事焊接电弧熔池模拟计算、极端条件不锈钢性能研究与设计的教研工作。E-mail: duhuayun@tyut.edu。

引用格式:于小芳,于道伟,杜华云,等. 410S 铁素体不锈钢焊接接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机,2025,55(5):69–76.

Citation: YU Xiaofang, YU Daoyi, DU Huayun, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of 410S Ferritic Stainless Steel Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 69–76.

0 引言

不锈钢由于其优异的耐蚀性和机械性能,能够满足大部分工业领域重要结构和零部件选材需求。特别是奥氏体不锈钢由于其高 Cr、Ni 的添加,更是有着优异的耐蚀性、机械加工性及可焊性^[1]。然而铁素体不锈钢在耐蚀性能方面与奥氏体不锈钢差别不大,但由于微观组织和相的差异导致性能上稍逊于奥氏体,具体局限性体现在铁素体的低延展性、韧性及可焊性^[2]。铁素体不锈钢 Ni 含量较低,这大大降低了生产成本。不锈钢在生产中常应用于大型结构和管道,其连接和连接的可靠性对其服役寿命和安全性具有重大意义。因此开发新的焊接方法或调整焊接参数进行深入研究从而扩展铁素体不锈钢的应用具有很大意义。

多年来,焊接工作者都在对应用于铁素体不锈钢的新的焊接方法和焊接参数进行研究。Gerbson 等^[3]将搅拌摩擦焊应用于 401S 不锈钢连接,发现在使用搅拌摩擦焊时由于工艺中不稳定性导致焊接接头存在体积缺陷。Ceyhun 等^[4]利用激光焊焊接 401S 铁素体钢,研究表明由于高热输入,导致晶粒粗化明显,焊接接头硬度下降,冲击韧性降低,机械性能大幅下降。而高频电阻焊作为一种固相焊接很好地规避了这一风险。高频焊接(HFW)是一种固态焊接工艺,其中管道的邻接边缘在通过感应线圈期间被感应电流的趋肤效应和邻近效应加热,并被焊接辊压在一起,从而产生金属流,从焊缝中排出不需要的氧化物,并通过破坏边缘之间的界面导致冶金结合^[5–7]。HFW 具有冶金工艺简单、升温速度快、热影响区(HAZ)小、焊缝成形好、无焊材、焊接成本低、生产效率高等特点,因此成为目前最常用的焊接方法之一^[8]。目前很少有将高频焊应用于铁素体焊接接头成形的研究,且没有相关的试验对高频焊焊接接头进行综合力学性能评估。

本文采用高频焊焊接 410S 铁素体不锈钢,通过焊接后的微观组织表征、硬度测试、冲击试验和拉

伸试验综合评估焊后材料的组织和力学性能以及高频焊应用于铁素体不锈钢的可靠性,并从微观组织出发对提升机械性能的机理进行综合分析和讨论。最终获得高频焊接应用于铁素体不锈钢的力学性能评估测试方法,为将来研究提供参考依据。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料及焊接工艺

本试验采用两种不同成分的 410S 铁素体不锈钢,化学成分如表 1 所示。试样采用热轧连续退火工艺处理,厚度为 5 mm。采用高频焊焊接工艺,经过连续辊弯之后高频焊连接,焊后水冷,焊后未进行任何热处理。有焊接接头的试样记作焊接试样;没有焊接接头的对比试样记作原始试样。

表 1 两种 410S 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of two 410S stainless steels (wt. %)

型号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
410SA	0.02	0.15	0.75	0.019	0.001	11.9	0.44
410SB	0.02	0.42	0.17	0.03	0.002	12.4	0.14

1.2 试验方法

采用线切割方法制备进行显微组织观察和硬度测试的试样,试样尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm。试样采用 SiC 砂纸从 180 目研磨至 2000 目,然后在抛光机上使用金刚石抛光膏抛光,使用去离子水、无水乙醇冲洗,吹风机吹干。使用蚀刻液(225 mL C₂H₅OH+40 mL HCl+24 g CuCl₂)进行蚀刻,使用光学显微镜和 TESCAN-VEGA 3 扫描电子显微镜对微观组织形貌进行表征,使用维氏硬度计进行显微硬度测试,测试点在焊接接头熔合线左右两侧分别相隔 0.1 mm 选取,每个点的数据为该位置的 3 个数据点取平均值,原始试样在试样表面随机取 5 个点测量硬度值,再取平均值。

拉伸试样按照国标 GB/T2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》和国标 GB/T228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》设计并制备。拉

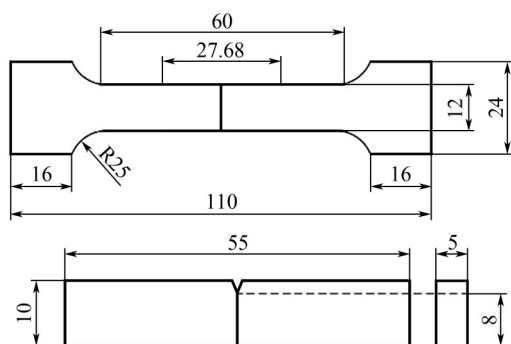


图1 拉伸试样、冲击试样尺寸示意

Fig. 1 Schematic diagram of the dimensions of tensile test specimens and impact test specimens

伸试样厚度为2 mm。平行长度为60 mm,平行宽度为12 mm,焊缝位于试样中心位置,标距计算为27.68 mm,过渡弧半径25。具体尺寸见图1a拉伸试样尺寸示意图。冲击试样按照GB/T229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》和GB/T2650—2008《焊接接头冲击试验方法》中的要求进行试样制备。冲击试样长度为55 mm,横截面积为10 mm×5 mm矩形截面,采用V型缺口,缺口位置在焊缝处,缺口面垂直于试件表面,具体尺寸见图1b。

2 试验结果

2.1 微观组织表征

两种不同型号不锈钢焊接接头、母材和原始试样截面的显微组织如图2所示。图2a是410SA钢焊接接头显微组织,可以看出在焊缝区域晶粒度明显细化,且沿着试样厚度方向呈现均匀分布。焊缝熔合线明显但融合线宽度较小,融合线中间部分可以看到有细长的未完全融合区域,但是未融合区域占比十分小,集中出现在板材厚度的中间区域。热影响区晶粒与母材和焊缝相比存在明显的长大趋势,热影响区在截面焊缝中间区域宽度要大于靠近试样表面的宽度^[9],但相比于其他焊接方法热影响区范围有着大幅减小。图2b是图2a中焊缝和热影响区部分放大图,可以看出A钢焊缝熔合线明显,晶粒尺寸细小;热影响区的晶粒尺寸按照从焊缝向母材区域的方向呈现逐渐减小的趋势。图2c为试样A的焊接试样母材显微组织,可以看出A钢的晶粒尺寸细小且分布均匀,且晶粒沿轧制方向呈现明显变形,这一变化对性能的改变需要进一步讨论。

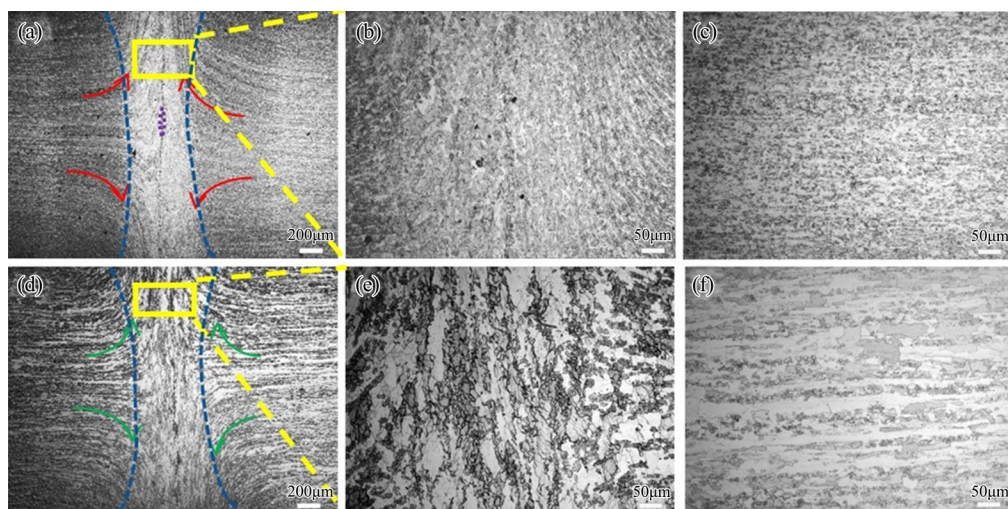


图2 焊接接头、母材截面的光学显微组织

Fig. 2 Optical microstructure of welded joint, base metal

410SB钢焊接接头显微组织如图2d所示,可以看出焊缝晶粒尺寸细小,焊缝熔合线不明显并且比较弯曲,热影响区晶粒显著长大,并且呈现靠近表面宽厚度中心窄的腰鼓状;图2e是图2d中焊缝和热影响区局部放大图,仍旧可以看出焊缝晶粒尺寸细小,熔合线比较模糊;热影响区晶粒长大,长大的晶

粒有着明显的沿着平行于焊缝方向的生长趋势,呈现椭圆形或细长条状的形貌。但是热影响区晶粒尺寸分布却不均匀,从焊缝熔合线到母材之间晶粒尺寸没有明显的变化趋势,但是尺寸较大的晶粒从熔合线到母材呈由大到小的分布趋势,小晶粒之间也呈现相似分布。图2f是B钢焊接试样母材显微

组织,可以看出B钢晶粒尺寸分布不均匀,平行于厚度方向上晶粒沿轧向明显变形。分析比较可以得出,A钢的焊缝熔合线比B钢的明显,且A钢存在未融合缺陷。热影响区A钢比B钢的更宽,分布趋势相似,但B钢中间宽的部分比A钢小,晶粒尺寸B钢明显比A钢大。母材则是A钢比B钢均匀。

A钢和B钢焊接接头扫描图片如图3所示。图3a是A钢接头,图3b是图3a中缺陷放大图,可以看

到A钢接头中存在针状铁素体组织^[10],缺陷处空隙面积少,杂质占比较高。图3d、3e分别是1、2点处的EDS元素分析,从元素占比中可以看到都含有O元素,说明是氧化物杂质。靠近空隙中间氧、铬、锰、镍元素含量高,铁元素含量减少一半,推测在空隙中间元素析出多且是氧化物形式存在。图3c是B钢焊接接头,焊缝处存在小孔洞,焊接痕迹不明显,晶粒尺寸不均匀,针状组织比A钢少。

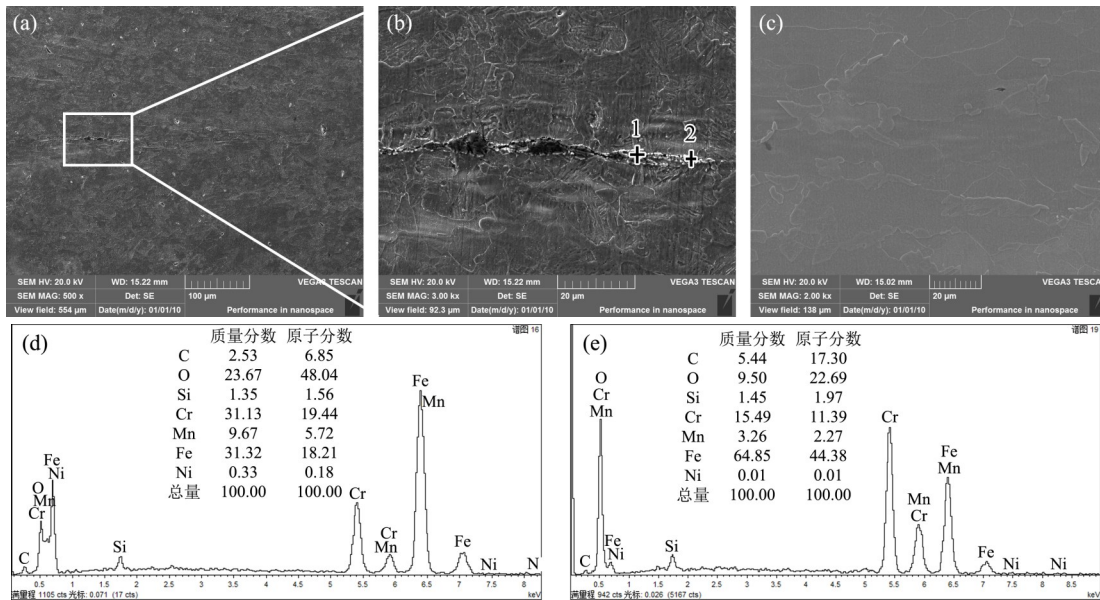


图3 A和B钢焊接接头的焊缝SEM微观组织形貌和A钢焊缝缺陷处EDS分析

Fig. 3 SEM microstructure of A and B steel welded joints and EDS analysis of A steel weld defects.

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸性能

图4为两种材料焊接试样和原始试样的应力-应变曲线以及断裂宏观图片,焊缝用黑色线标示。可以看出焊接试件断裂在母材处,断裂没有发生在焊缝,表明焊缝机械性能良好。A、B原始试样的抗拉强度分别为562.82 MPa、561.41 MPa;焊接试样抗拉强度分别为581.62 MPa、547.72 MPa。原始试样两种材料抗拉强度比较接近;焊接试样A材料抗拉强度比B的高33.9 MPa。A、B原始试样的屈服强度分别为420.83 MPa、425.24 MPa;焊接试样屈服强度分别为494.95 MPa、434.62 MPa,原始试样屈服强度接近,但是焊接试样的屈服强度A钢的比B钢的高60.33 MPa。A钢原始试样、焊接试样和B钢原始试样、焊接试样的断后伸长率分别是14.6%、11.51%、17.66%、10.27%;A钢的原始试样和焊接试样的断

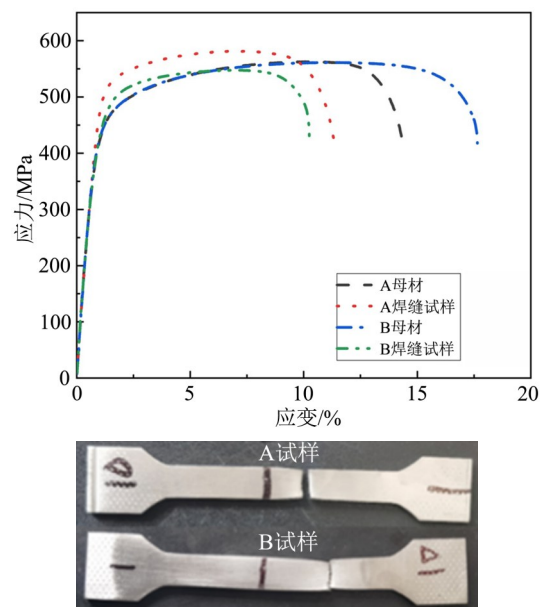


图4 焊接试样和原始试样的应力应变曲线和宏观断裂图片

Fig4 The stress-strain curves and macroscopic fracture diagram

后伸长率都比 B 钢的高, 分别高出 3.09% 和 7.39%, A 钢材料延性优于 B 钢。根据 GB/T24511—2017 给出的经退火处理的铁素体型钢室温下的力学性能和工艺性能, 410S 铁素体不锈钢规定塑性延伸强度 ≥ 205 MPa, 抗拉强度 ≥ 415 MPa, 断后伸长率 $\geq 20\%$ 。本试验的抗拉强度、屈服强度结果均表现出高于标准的良好性能; 但是断后伸长率并不理想。可能是因为经过连续辊弯成形和焊接之后没有经过热处理导致材料内部存在内应力, 使得强度提高, 塑性下降。

图 5 为原始试样和焊接试样拉伸断口形貌。图 5a、5b 分别是 A 钢原始试件和焊接试件的断口形貌; 图 5c、5d 分别是 B 钢原始试件和焊接试件的断口形貌。从图 5a 可以看到韧窝数量多, 细小且致密, 材料中存在缺陷、空隙和夹杂物; 在空隙和夹杂物的凹坑周围可以观察到部分的河流状解理面。图 5b 中可以看到许多细小韧窝、空隙和深凹坑, 凹坑周围有撕裂的痕迹, 解理面积大, 是由很多小解理面通过不同断层相连组成。图 5c、5d 可以看出 B 钢韧窝尺寸大而且数量少。图 5c 中, 韧窝和解理相互穿插, 大韧窝附近分布着细小的韧窝, 周围有很多凹坑, 解理面面积小。图 5d 中, 存在范围较大的河流状解理面, 而且解理面比较平整, 在其余区域则是大的韧窝和解理面交替分布。两种不同成分的钢材, 焊接试样断裂位置均在母材区域, 则焊接试样和原始试样影响拉伸的因素相同, 换言之拉伸结果都由母材性能决定。分析比较两种材料的断口形貌, 可以发现 A 钢相较于 B 钢, 断口中韧窝数量多且韧窝尺寸小, 解理数量少、面积小。

2.2.2 接头硬度

分别在两种材料原始试样上选取 5 个点测量硬度值, 如表 2 所示。A 钢基材平均硬度为 200 HV, B 钢基材平均硬度为 200.8 HV, 两种钢材硬度相差不大。

图 6 为 A 钢和 B 钢焊接接头硬度曲线, A 钢焊缝处硬度约为 290 HV, 热影响区硬度约为 300 HV, 母材硬度约为 210 HV。焊缝熔合线处硬度比热影响区低约 10 HV, 热影响区处硬度最大。从焊缝到母材硬度呈现先增大后降低的趋势, 热影响区过渡到母材硬度急剧下降。B 钢焊缝熔合线处的硬度约

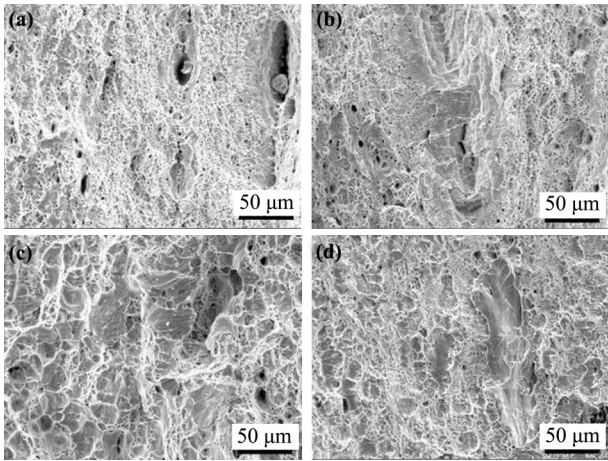


图 5 原始试样和焊接试样拉伸断口形貌

Fig. 5 The tensile fracture morphology of the original sample and the welded sample

表 2 两种材料原始试样硬度及平均值

Table 2 The hardness and average value of the original samples of the two materials

测试点	A	B
1	208	181
2	213	210
3	184	210
4	199	201
5	196	202
平均	200	200.8

为 240 HV, 热影响区硬度约为 250 HV, 母材硬度约为 210 HV。接头硬度变化和 A 钢相似, 焊缝到热影响区硬度增大, 热影响区硬度最高, 热影响区到母材硬度迅速下降。分析可得 A 钢焊缝熔合线处和热影响区处的硬度较 B 钢硬度高 50 HV, 母材硬度相近。

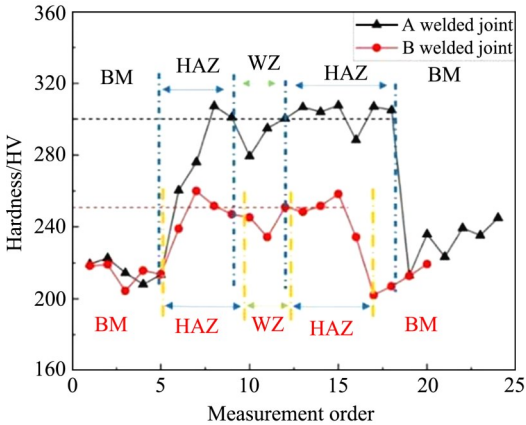


图 6 A 钢和 B 钢焊接接头硬度曲线

Fig. 6 Hardness curve of welded joint of A steel and B steel

2.2.3 接头冲击韧性

冲击韧度由冲击韧度值(a_k)和冲击功(A_k)表示

$$a_k = A_k / F \quad (1)$$

式中 a_k 为冲击韧度(单位: J/cm²); A_k 为冲击吸收功(单位: J); F 为截面面积(单位: cm²)。

冲击试样厚度 0.5 cm, 截面有效长度 0.8 cm, 截面面积 $F=0.4$ cm²。图 7a、7b 分别为 A 钢和 B 钢原始试样及焊接试样的冲击吸收功曲线。

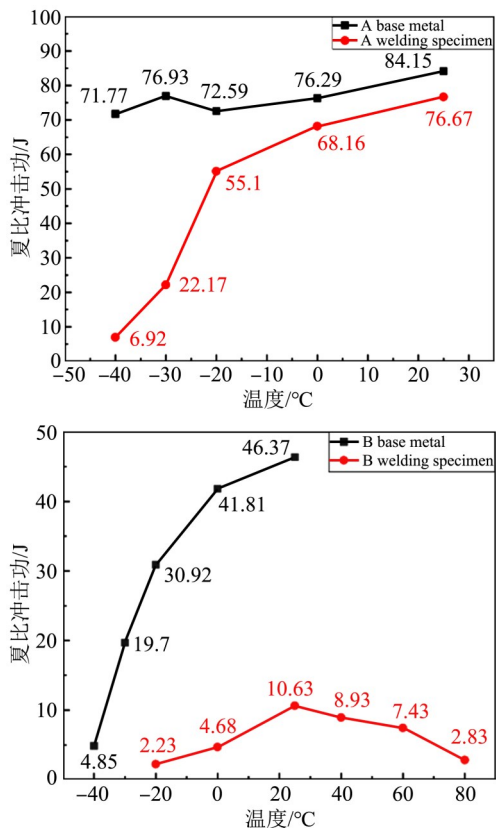


图7 A钢、B钢的原始试样和焊接试样冲击吸收功曲线

Fig. 7 The impact absorption energy curves of the original sample and the welded sample of A steel and B steel

对于A钢,原始试样在室温25℃时获得最高的冲击功,为84.15 J,对应的冲击韧度为210.38 J/cm²。随着温度降低至0℃,冲击功略有下降,但仍保持在76.29 J,冲击韧度为190.73 J/cm²。在更低的温度下(-20℃、-30℃、-40℃),A钢原始试样的冲击功始终维持在70 J以上,显示出良好的低温韧性。相比之下,A钢焊接试样在室温下的冲击功为76.67 J,略低于原始试样,冲击韧度为191.68 J/cm²。随着温度的降低,焊接试样的冲击功在-20℃时为55.1 J,冲击韧度为137.75 J/cm², -30℃时为22.17 J,冲击韧

度为55.43 J/cm²,而在-40℃时仅为6.92 J,冲击韧度为17.3 J/cm²,表明焊接接头的低温韧性较差,韧脆转变温度约为-30℃。

对于B钢,原始试样在室温下的冲击功为46.37 J,冲击韧度为115.93 J/cm²。随着温度降低至0℃和-20℃,冲击功和韧度值分别下降至30.92 J和77.28 J/cm²。在-30℃时,冲击功降至19.7 J,冲击韧度为49.25 J/cm²,不到室温的50%;而在-40℃时,冲击功仅为4.85 J,冲击韧度为12.13 J/cm²,显示出在-20℃至-40℃之间发生了材料的韧脆转变。B钢焊接试样在室温时的冲击功最高,为10.63 J,韧度值为26.58 J/cm²。在所有测试温度下(-20℃~80℃),焊接试样的冲击功均较低,表明在这个温度区间内焊缝韧度不足,有待改进。

综合对比A钢和B钢,可以看出A钢在室温至低温范围内的冲击性能优于B钢。A钢基材的冲击功在室温时是B钢的两倍多,并且在低温-20℃~-40℃之间仍能保持良好的韧性。相比之下,B钢在相同温度范围内出现了韧脆转变,韧度急剧下降。此外,A钢焊接接头的韧脆转变温度约为-30℃,而B钢焊接试样的冲击性能在所有测试温度下均不理想,其焊缝韧度显著低于A钢焊接试样。

3 分析与讨论

3.1 微观组织分析与讨论

金相分析显示,A钢和B钢的微观组织分布相同,在热影响区和母材过渡区域,从材料中间向表面晶粒逐渐变细,其分布方向由垂直于焊缝变为平行于焊缝。这是由于高频焊接过程中的集肤效应和邻近效应,这些效应通过感应线圈在钢材表面产生热量,加热待焊接的两端,在对接两端并施加压力以挤出杂质和熔融金属后,形成了焊接接头^[11]。由于在挤压过程中存在从热影响区到母材的温度梯度,热影响区的温度高、硬度低,母材的温度低、硬度高,受到挤压后,热影响区的金属向材料表面流动,导致晶粒沿着流动方向分布,并且越靠近表面材料被挤出得越多,受到的外力也越大,这促使晶粒变得更细且更密集。

焊接热输入使得热影响区晶粒长大^[12-13]。A钢

基体材料均匀,因此热影响区的晶粒也相对均匀;B钢基体材料在轧制后不均匀,晶粒分层明显,在热影响区粗晶粒受热输入影响,表面能直接控制外形的能力丧失,起决定性作用的是各晶面生长速率的各向异性,导致粗晶粒变成非等轴晶,同时,细晶粒的生长受到粗晶粒的制约,因此长大不明显^[14]。

通过对A钢的金相图和扫描图的分析,发现存在未焊接区域,EDS结果显示其中有O元素,推测可能是焊接时未进行气体保护,以及高频焊接速度快,焊接接头两端存在缺陷致使夹杂物未及时排出,空气进入熔合线与基体金属反应生成氧化物杂质。此外,A钢的热影响区较B钢宽,且中间较宽部分的长度也较长,推测可能是A钢焊接速度快,挤压时间短导致出现缺陷。

3.2 接头力学性能分析与讨论

接头强度高于母材,这在拉伸试验中得到了证实,材料断裂在母材,这是因为母材在轧制过程中有较多的缺陷,晶粒分布不均匀,轧制分层痕迹明显。相比之下,焊缝和热影响区经历了高温作用,晶粒生长,部分非等轴晶转变为等轴晶,轧制痕迹消失,晶粒间分布更加均匀,因此接头的强度和延性较高。A钢的强度和延性均高于B钢,这可能与A钢的轧制过程导致的晶粒不均匀有关。

B钢焊缝的冲击韧性差,是由于热影响区晶粒大且极不均匀。研究表明,微合金元素镍能够增加焊缝组织中贝氏体和马氏体组织的含量,从而提高焊接接头强度,并促进针状铁素体形成,改善接头低温下的冲击韧性^[15]。A钢Ni元素含量是B钢的3倍多,微观组织中也可以观察到A钢接头和热影响区中含有大量针状铁素体,因此A钢接头的低温冲击韧性优于B钢。

Si元素会引起固溶强化和二次相系数增多,导致焊缝金属变脆;但硅是良好的脱氧剂并可防止CO气孔的形成,从而避免焊缝中出现气孔。B钢中Si元素含量是A钢的2.8倍,结合微观组织分析,A钢焊缝中有未结合区域,存在空隙和氧化物杂质等缺陷,而B钢接头中熔合线痕迹不明显,说明添加Si元素有利于防止气孔生成,并且可以起到脱氧作用,但B钢接头韧性不如A钢,也表明Si元素可能导致焊缝韧性下降。

4 结论

采用高频感应焊实现了410S铁素体不锈钢有效连接,并分析了焊接接头的微观组织和力学性能。主要结论如下:

(1)410S铁素体不锈钢高频焊接头,热影响区窄,晶粒分布方向受外力挤压作用和热输入的影响发生改变,从垂直焊缝方向变为平行方向。A钢焊接接头存在未熔合区域,并伴随氧化物杂质,可能与焊接速度过快和气体保护不足有关。B钢焊接接头热影响区晶粒尺寸较大,且不均匀,可能与基体材料轧制状态和热输入导致的晶粒长大有关。

(2)两种材料焊接接头的强度均高于母材,且断裂位置均在母材,表明焊接接头质量良好。A钢焊接接头表现出更高的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率,以及更优异的低温冲击韧性,韧脆转变温度区间在 $-20^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ 。B钢焊接接头冲击韧性较差,尤其在 $-20^{\circ}\text{C}\sim-40^{\circ}\text{C}$ 区间,冲击吸收功较低,表明焊缝韧性不足。

(3)Ni元素含量较高的A钢,其焊接接头强度和低温冲击韧性更优,这可能与Ni元素促进贝氏体、马氏体和针状铁素体组织的形成有关。Si元素含量较高的B钢,其焊接接头韧性较差,这可能与Si元素引起的固溶强化和二次相增多有关。

(4)虽然A钢焊接接头各项性能满足工程应用要求,但仍旧存在些许缺陷,有可以改进提升的空间。

参考文献:

- [1] 胡国栋,冯锐,李书志,等. 奥氏体耐热不锈钢中析出相研究进展[J]. 热加工工艺, 2022, 51(18): 6-11+17. HU G D, FENG R, LI S Z, et al. Research Progress of Precipitates in Austenitic Heat Resistant Stainless Steels [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(18): 6-11+17.
- [2] DONG Z, LI Y, LEE B, et al. Research status of welding technology of ferritic stainless steel[J/OL]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(9-10): 2805-2831. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08128-6>.
- [3] CAETANO G de Q, SILVA C C, MOTTA M F, et al. Influence of rotation speed and axial force on the friction stir welding of AISI 410S ferritic stainless steel[J/OL].

- Journal of Materials Processing Technology, 2018, 262: 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.018>.
- [4] KÖSE C. Laser welding of AISI 410S ferritic stainless steel[J/OL]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 0865g4. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab26c0>.
- [5] 左兰兰. HFW 焊管焊缝点状缺陷产生原因及预防措施[J]. 焊管, 2023, 46(1): 62–68.
ZUO L L. The Causal Analysis and Preventive Measures of HFW Pipe Weld Spot Defect[J]. Welded Pipe and Tube, 2023, 46(1): 62–68.
- [6] 张宝伟, 陈雪龙, 范会卿, 等. 焊接温度和挤压力对小直径高频焊管接头组织和性能的影响[J]. 焊管, 2022, 45(11): 16–20.
ZHANG B W, CHEN X L, FAN H Q, et al. Effects of Welding Temperature and Extrusion Amount on Microstructure and Mechanical Properties of Small Diameter High Frequency Welded Pipe Joints[J]. Welded Pipe and Tube, 2022, 45(11): 16–20.
- [7] 肖述广, 谢志雄, 许章华, 等. 我国高频焊管的发展及其焊接质量控制[J]. 焊接技术, 2020, 49(12): 1–5.
XIAO S G, XIE Z X, XU Z H, et al. Development of high frequency welded pipe and its welding quality control in China[J]. Welding Technology, 2020, 49(12): 1–5.
- [8] ZHANG W, ZHAO G, FU Q, et al. Study on the effects and mechanisms of induction heat treatment cycles on toughness of high frequency welded pipe welds[J/OL]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 736: 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.004>.
- [9] 肖述广, 谢志雄, 陈卓, 等. 薄壁 3003 铝合金管高频感应焊焊接接头微观组织及力学性能研究[J]. 材料导报, 2023, 37(1): 194–199.
XIAO S G, XIE Z X, CHEN Z, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of High Frequency Induction Welded Joint of Thin Walled 3003 Aluminum Alloy Tube [J]. Materials Reports, 2023, 37(1): 194–199.
- [10] 田海超, 丁成钢. S355J2W 钢高频脉冲 MAG 焊 T-HV 焊缝的组织性能[J]. 焊接技术, 2023, 52(4): 36–39.
TIAN H C, DING C G. Microstructure and properties of T-HV welds of S355J2W steel by high-frequency pulse MAG welding[J]. Welding Technology, 2023, 52(4): 36–39.
- [11] 王超. 薄壁 316 奥氏体不锈钢高频感应焊组织与性能研究[D]. 湖北: 湖北工业大学, 2021.
WANG C. Microstructure and Properties for weld of High Frequency Induction Welding for Thin-Walled 316 Austenitic Stainless Steel [D]. Hubei: Hubei University of Technology, 2021.
- [12] DONG Z, LI Y, LEE B, et al. Research status of welding technology of ferritic stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(9–10): 2805–2831.
- [13] 赵振铎, 李莎, 范光伟, 等. 低铬铁素体不锈钢 Cr12 焊接工艺研究[C]//第十三届中国钢铁年会论文集——先进钢铁材料及其用. 中国金属学会, 2022: 474–480.
- [14] AMUDA M O H. Grain Refinement in Ferritic Stainless Steel Welds: The Journey so Far[J]. Advanced Materials Research, 2009, 83–86: 1165–1172.
- [15] 刘政军, 裘荣鹏, 武丹, 等. 微合金元素镍和铌对金属粉芯焊丝焊接接头性能的影响[J]. 焊接, 2017(8): 1–6+68.
LIU Z J, QIU R P, WU D, et al. Effect of micro-alloying nickel and niobium elements on mechanical properties of welded joint with metal powdercored wire [J]. Welding & Joining, 2017(8): 1–6+68.