

引文格式: 降龙楠, 李国平, 陈洪胜, 等. S32001 双相不锈钢 TIG 接头微观组织力学性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(10): 62 – 69.
JIANG Longnan, LI Guoping, CHEN Hongsheng, *et al.* Microstructure and mechanical properties of S32001 duplex stainless steel TIG joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(10): 62 – 69.



S32001 双相不锈钢 TIG 接头微观组织力学性能

降龙楠¹, 李国平², 陈洪胜¹, 裴明德², 王文先³, 李昊霖¹

(1. 太原理工大学, 机械工程学院, 太原, 030024; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司, 太原, 030024;
3. 太原理工大学, 材料科学与工程学院, 太原, 030024)

摘要: 以低镍型双相不锈钢 S32001 为研究对象, 采用非熔化极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas welding, TIG) 进行自动焊接, 探究不同的焊接工艺参数对接头微观组织和物相组成的影响, 并研究微观组织与力学性能的关系. 结果表明, 不同的焊接工艺参数下, 焊接接头表面成形良好, 微观组织由奥氏体相与铁素体相组成, 焊缝铁素体内部与铁素体/奥氏体相界面处析出二次奥氏体相. 接头的硬度呈现“W”形分布, 母材 (base metal, BM) 的显微硬度略高, 而热影响区 (heat-affected zone, HAZ) 的显微硬度略低. 随着焊接接头处热输入的增加, 焊缝区域的晶粒尺寸增大, 硬度值降低, 试样的抗拉强度与断后伸长率也呈现下降趋势. 焊接电流为 52 A, 焊接速度为 0.3 m/min, 焊接频率为 2 Hz 接头显微硬度与抗拉强度最高, 分别为 $254.1 \text{ HV} \pm 5.7 \text{ HV}$ 与 702.3 MPa. 拉伸试样断口由小平面、微孔和撕裂棱组成, 并可观察到一些微米尺度的夹杂物, 焊缝表现为准解理断裂.

创新点: (1) 采用 TIG 来焊接低镍型双相不锈钢 S32001, 并获得成形良好的焊接接头.

(2) 研究了焊接工艺对接头物相组成、微观组织和力学性能的影响, 并分析了强化机制.

关键词: 双相不锈钢; 非熔化极惰性气体保护焊; 二次奥氏体; 强化机制; 显微硬度; 抗拉强度

中图分类号: TG 444.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20240810001

Microstructure and mechanical properties of S32001 duplex stainless steel TIG joints

JIANG Longnan¹, LI Guoping², CHEN Hongsheng¹, PEI Mingde², WANG Wenxian³, LI Haolin¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China; 2. Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan, 030024, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China)

Abstract: With the low nickel duplex stainless steel S32001 as the research object, the tungsten inert gas welding (TIG) was used for automatic welding. The effects of different welding process parameters on the microstructure and phase composition of the joint were investigated, and the relationship between microstructure and mechanical properties was studied. The results have shown that under different welding process parameters, the surface of the welded joint is well formed. The microstructure is composed of austenite phase and ferrite phase, and the secondary austenite phase is precipitated at the boundary between the ferrite and the ferrite/austenite phase in the weld. The hardness of the joint presents a “W” shaped distribution, and the microhardness of the base metal (BM) is slightly higher, while the microhardness of the heat-affected zone (HAZ) is slightly lower. With the increase of heat input at the welded joint, the grain size in the weld area increases, the hardness value decreases, and the tensile strength and elongation after fracture of the specimen show a decreasing trend. The microhardness and tensile strength of the W_1 group were the highest, which were $254.1 \text{ HV} \pm 5.7 \text{ HV}$ and 702.3 MPa, respectively. The fracture of the tensile specimen is composed of facets,

micropores, and tear ridges, and some micron-scale inclusions can be observed. The weld is characterized by quasi-cleavage fracture.

Highlights: (1) The low-nickel duplex stainless steel S32001 is welded by tungsten inert gas welding, and a well-formed welded joint is obtained.

(2) The effects of the welding process on the phase composition, microstructure and mechanical properties of the joints were studied, and the strengthening mechanism was analyzed.

Key words: duplex stainless steel; tungsten inert gas welding; secondary austenite; reinforcement mechanism; microhardness; tensile strength

0 序言

不锈钢作为国民经济发展的基础材料,在船舶重工、机械建筑和石油化工等领域具有广泛的应用,成为了工业技术发展的不可或缺材料.随着碳达峰、碳中和的提出,发展高性能、资源节约型不锈钢成为了主要的发展趋势之一^[1].双相不锈钢是高性能、资源节约型不锈钢的典型代表,如 S32001 低镍型双相不锈钢实现了极限低成本与高性能的完美结合,极具发展潜力. S32001 是铁素体/奥氏体型双相不锈钢,铁素体含量占比为 40%~50%,具有强度高、韧性好、脆性转变温度低和耐晶间腐蚀等优势,被广泛用于结构件使用,在使用过程中,材料的焊接性成为了重要的研究内容之一^[2].

常用于双相不锈钢的焊接方法,目前主要有手工电弧焊、熔化极气体保护焊、埋弧自动焊和 TIG^[3-6]等. TIG 具有生产效率高、电弧稳定性好、焊缝质量高、焊接方便和工艺适用性强等优点,在实际生产中应用广泛^[7].高站起等人^[8]通过对 2507 双相不锈钢板进行钨极氩弧焊多层多道焊接发现由于受焊接道次和热输入的影响,接头焊缝中盖面和焊根处奥氏体含量较少,焊缝中心奥氏体含量充分.王纯等人^[9]采用热丝 TIG 方法,对 UNSS32707 特超级双相不锈钢进行堆焊试验,并对堆焊层化学成分、力学性能、金相组织和耐腐蚀性能进行了测试.结果表明,热丝 TIG 是堆焊该材料的有效焊接方法,在一定的焊接及热处理规范下堆焊层各项性

能均符合相关要求.马兆炫等人^[10]使用水下 TIG 焊枪对 2507 双相不锈钢进行焊接,获得了与陆上环境性能相似的焊缝,并发现水的快速冷却作用会促使铁素体晶粒内析出的奥氏体形状由针状转变为粒状,晶粒明显细化.目前,关于 S32001 低镍型双相不锈钢的焊接性能及工艺参数尚不明确,相关组织性能与强化机理有待进一步研究.

文中采用 TIG 对 S32001 双相不锈钢薄板进行焊接,探究不同焊接工艺参数下焊接接头不同区域的微观组织演变规律及物相组成,对焊接接头的显微硬度和拉伸强度进行测试分析,结合断口微观组织形貌对 S32001 双相不锈钢焊接接头的强韧化机理和断裂机制进行讨论分析,为相关研究及应用提供一定依据和参考.

1 试验方法

原材料选用的 S32001,化学成分如表 1 所示,微观形貌如图 1 所示,晶粒沿着板材轧制方向呈长条状分布,通过 ImageJ 软件对微观形貌中的奥氏体和铁素体相进行占比分析,其中奥氏体相占比为 48.14%,铁素体相占比为 51.86%.焊接板材厚度为 0.8 mm,试板尺寸为 300 mm×200 mm×0.8 mm,对接接头形式焊接,采用电火花线切割,切割焊接试板,焊接前对待焊区进行机械打磨后用酒精擦拭试板,去除表面的油污、铁锈和水分等杂物,直至露出金属光泽.

表 1 不锈钢化学成分(质量分数, %)
Table 1 Stainless steel chemical compositions

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Fe
0.016	4.10	0.56	0.026	0.004	20.00	1.80	0.22	0.14	1.00	余量

选用 TIG 焊机进行 S32001 双相不锈钢薄板的焊接,表 2 为焊接工艺参数,焊接时的平均实时电

压为 8 V.采用光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对不同焊接工艺参数下焊接接头的微观

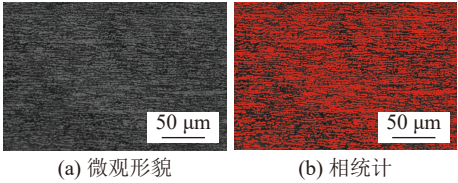


图 1 原始板材 S32001 微观形貌及相统计

Fig. 1 Microscopic morphology and phase statistics of the original plate S32001. (a) microscopic morphology; (b) phase-statistical

形貌进行观察,采用 X 射线衍射仪 (XRD) 结合能谱仪 (EDS) 对焊接接头的物相成分进行分析. 通过维氏硬度仪对焊接接头的硬度进行测试分析,测试点间距为 0.25 mm,载荷为 1.96 N,通过万能拉伸试验机对焊接接头的力学性能进行测试,焊接试板及拉伸试件尺寸,如图 2 所示. 拉伸速度为 1 mm/min,每组测试 3 个试样,选取平均值,结合断口形貌对焊接接头的强韧化机理和断裂机制进行讨论.

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

编号	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	焊接频率 f_p/Hz
W_1	52	0.30	2
W_2	60	0.30	2
W_3	65	0.30	2
W_4	52	0.25	2
W_5	60	0.25	2

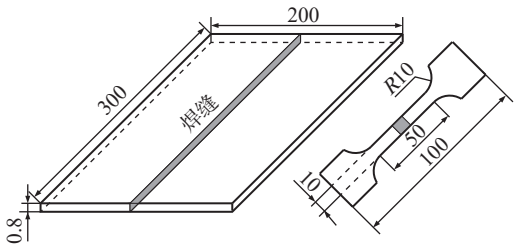


图 2 焊接试板及拉伸试件尺寸 (mm)

Fig. 2 Dimensions of welding test plates and tensile test pieces

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形与微观组织分析

不同焊接工艺参数下焊缝的宏观形貌,如图 3 所示. 焊缝表面成形良好,未见咬边等焊接缺陷产生,不同焊缝的微观形貌,如图 4 所示. 焊接接

头由 BM、HAZ 和焊缝组成,5 组焊接接头在相应区域中呈现出相似的微观结构. 在研究双相不锈钢凝固过程中的组织转变规律时,常引入铬当量 Cr_{eq} 和镍当量 Ni_{eq} 两个概念, Cr_{eq}/Ni_{eq} 为当量比 $P^{[11]}$,由表 1 可得, BM 的铬当量、BM 镍当量和当量比分别为

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.73Si + 0.88\%Mo = 21.16\% \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 24.55\%C + 21.75\%N + 0.4\%Cu = 5.637\% \quad (2)$$

$$P = Cr_{eq}/Ni_{eq} = 3.75 \quad (3)$$

根据图 5 的 Fe-Cr-Ni 伪二元相图,在 TIG 过程中,双相不锈钢会由液相 L 凝固为铁素体 δ ,再通过固态相变使部分铁素体转变为平衡组织中的奥氏体 γ ,即 $L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma$. 形核过程中, S32001 双相不锈钢焊接过程中熔池内部以凝固的 δ 相为主,而 γ 相则主要通过 δ 相的固态相变转化形成,形成的奥氏体可根据形貌与析出位置分为晶界奥氏体 (grain boundary austenite, GBA)、魏氏奥氏体 (widmanstatten austenite, WA) 和晶内奥氏体 (intragranular

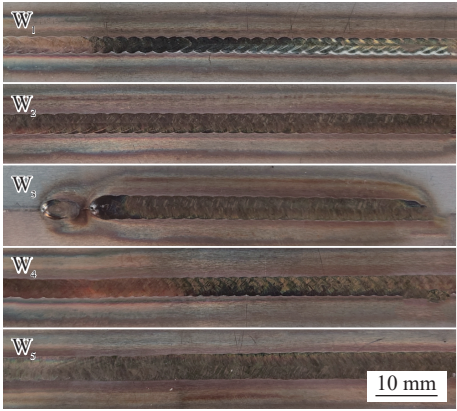


图 3 不同焊接工艺参数下焊缝宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of weld under different welding process parameters

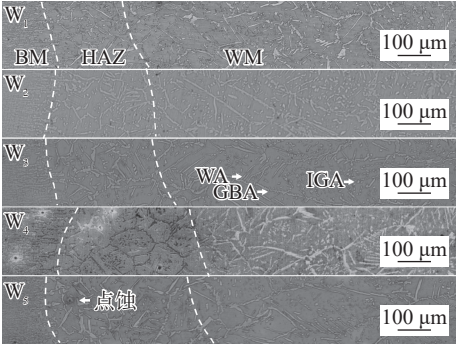


图 4 不同焊接工艺参数下焊缝微观形貌

Fig. 4 Micromorphology of weld under different welding process parameters

austenite, IGA)3 类^[12]. GBA 为由于 δ 相晶界处的形核能最低而自由能高,因而在较高的温度下即可优先在晶界析出的奥氏体,WA 为由于铁素体晶界处形核位置减少,从晶界奥氏体形核并以一定角度生长到铁素体晶粒内,形态以针状为主的奥氏体,晶界奥氏体和魏氏奥氏体的演变需要较小的驱动力,因此在较高的温度下形成,几乎没有过冷,IGA 则为由快速冷却造成过冷度较大,在铁素体晶粒内部最后析出的奥氏体。

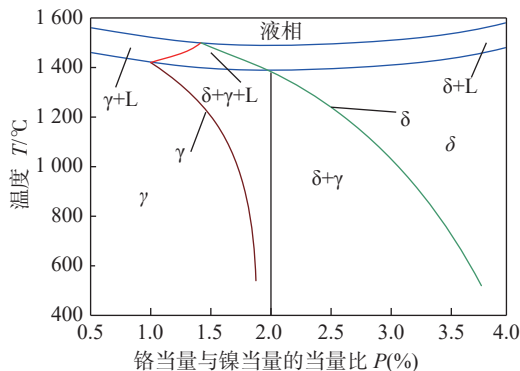


图 5 双相不锈钢伪二元相图

Fig. 5 Pseudo-binary phase diagram of duplex stainless steels

根据热输入理论可计算焊接过程中的平均热输入^[13]为

$$E = \frac{UI}{v} \cdot \eta \quad (4)$$

式中: U 为电弧电压; I 为焊接电流; v 为焊接速度; η 为 TIG 的焊接效率,取 0.65。

焊缝的平均热输入分别为 54.08, 62.40, 67.60, 64.90 J/mm 和 74.88 J/mm。此外,由图 5 可知相变主要发生在 400~600 °C 之间,而在低温下元素扩散和固态相变都比较缓慢。因此,若熔池在高温下停留时间越长,则其固态相转变就越充分,而热输入较高时,高温停留时间长,使得 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变更为充分。从图 4 可以看出后几组试样晶粒更粗大,即随着焊接热输入的增加奥氏体晶粒尺寸也越大,说明奥氏体相转变更充分。而所有试样中 HAZ 中晶粒尺寸均明显小于焊缝区,因为焊缝区的固态相转变是 $\delta \rightarrow \gamma + \delta$,而 HAZ 的固态相转变是 $\delta + \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma$,由于 HAZ 固态相转变需要先 $\delta + \gamma \rightarrow \delta$,再由 $\delta \rightarrow \delta + \gamma$,所需转变时间较长,而相比焊缝区却具有相对较低的热输入和较大的冷却速率,因此形成的奥氏体晶粒更小,固态相转变不充分。

在焊接过程中,焊缝以及 HAZ 高的铁素体含量及较大的冷却速度决定了铁素体中包含大量的

过饱和 N 原子,N 元素是一种奥氏体化元素,一般认为在铁素体中的溶解度是恒定值 0.05%,N 原子在铁素体中的固溶度远小于在奥氏体中的固溶度,而 N 原子在铁素体中的扩散速度却显著大于奥氏体。结合文献 [14] 可知,铁素体的体心立方结构比奥氏体的面心立方结构更有利于元素的扩散,这时铁素体中过饱和的 N 元素向自由能更低的晶界处扩散迁移,导致铁素体不稳定,发生分解,形成一种新的奥氏体组织,即二次奥氏体 γ_2 ,二次奥氏体相通常通过扩散转变 $\delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma + \gamma_2$,形核和生长在铁素体/奥氏体型相晶界上和铁素体晶粒内^[15]。

焊缝区域 SEM 形貌,结果如图 6 所示。铁素体内部与相界处析出的二次奥氏体相。 γ_2 的存在导致铁素体和初生奥氏体之间的化学平衡丧失,从而造成图 4 中贫化区域中的点蚀。在铁素体区域内部析出了细小的二次奥氏体组织,尺寸小于 500 nm。

对图 6(a) 中不同微区进行 EDS 分析,如图 7 所示。表 3 为元素分布。点 A_1 区域铁素体内部的 Fe 元素原子分数为 60.7%、Cr 元素原子分数为 20.8%、C 元素原子分数为 11.7%,其余元素原子分数为 6.8%。点 A_3 区域奥氏体内部的元素分布中,Fe 元素原子分数为 56.7%、Cr 元素原子分数为 16.3%、C 元素原子分数为 17.4%,其余元素原子分数为 9.6%,相比铁素体,奥氏体内部的 Cr 元素和 C 元素含量较高。点 A_2 区域为焊缝区域内部铁素体和奥氏体内部的过渡区域,Fe 元素原子分数为 58.6%、Cr 元素原子分数为 19.4%、C 元素原子分数为 13.0%,其余元素原子分数为 9.0%,过渡区域的元素含量介于 A_1 区域和 A_3 区域之间。

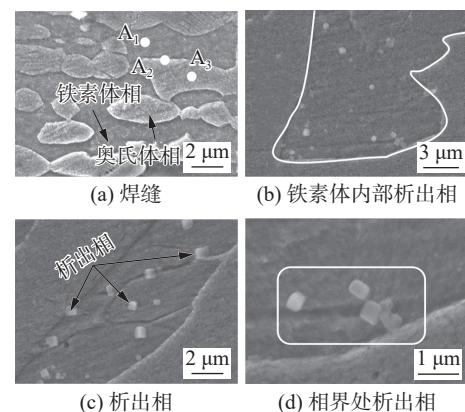


图 6 焊缝区域微观形貌

Fig. 6 Microstructure of weld region. (a) welds; (b) precipitated phase in ferrite; (c) precipitated phase; (d) precipitates at the phase boundary

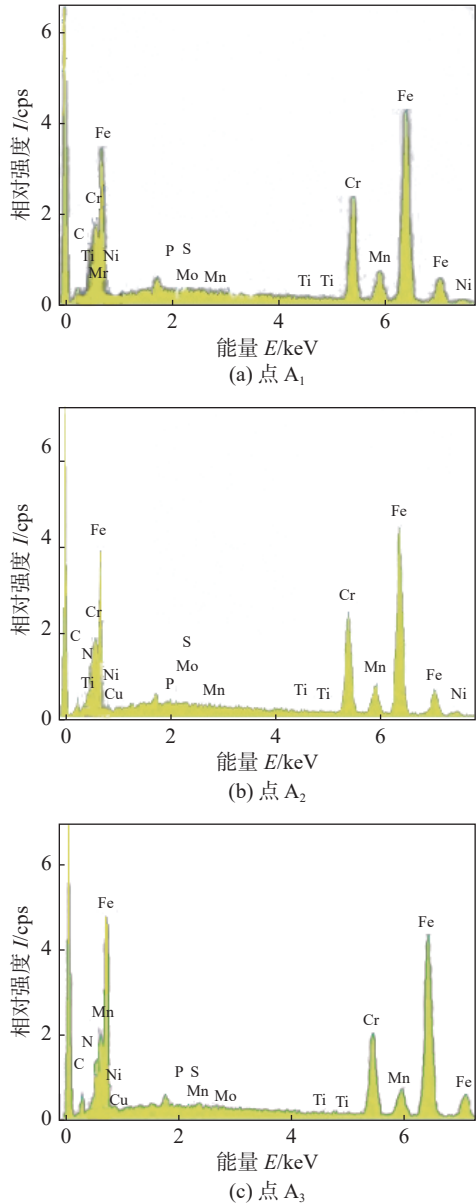


图 7 图 6(a) 中不同微区的元素 EDS 分析
Fig. 7 Elements in Fig.6(a) different micro-regions EDS analysis. (a) point A₁; (b) point A₂; (c) point A₃

2.2 焊接接头物相分析

不同 TIG 工艺参数下试样的 XRD, 如图 8 所示. 双相不锈钢接头处物相主要由不同取向的奥氏体和铁素体组成, 没有发现第二相析出. 奥氏体和铁素体分别主要沿晶面 (111) 和 (110) 分布, 奥氏体的峰值衍射强度明显低于铁素体的峰值衍射强度, 间接说明了奥氏体含量低于铁素体. 在不同的焊接热循环化的作用下, 焊接工艺参数不合理, 会造成 S32001 双相不锈钢在焊接过程中析出金属间化合物, 改变焊缝内部铁素体相和奥氏体相的比例组成, 降低焊接接头的力学性能.

通过进一步比较 5 组试样的 XRD 发现, 对应于奥氏体和铁素体的衍射峰随着焊接试样的电流

表 3 图 6(a) 中不同微区的元素分布
Table 3 Elements in Fig.6(a) different micro-regions distribution

元素	元素含量(原子分数, %)		
	点A ₁	点A ₂	点A ₃
Fe	60.7	58.6	56.7
Cr	20.8	19.4	16.3
C	11.7	13.0	17.4
Mn	4.4	4.3	4.3
Ni	1.2	1.7	1.8
Cu	0.6	—	—
N	0.2	—	—
S	0.2	0.4	0.6
Mo	0.1	—	—
P	0.1	0.2	0.2

增大而出现轻微的右移倾向. 结合文献 [16] 分析认为, 这是由于 C 元素, N 元素等元素的原子半径小, 扩散速度快, 随着焊接电流的增大, 焊接过程的热输入也增大, 这提高了焊缝中元素, 尤其是 C 元素, N 元素等元素在基体相中的固溶度, 导致原始晶格畸变, 降低了原始晶格的晶面间距. 布拉格定律可描述为

$$2d\sin\theta = n\lambda \tag{5}$$

式中: d 为晶格间距, nm; θ 为入射射线与散射平面间的夹角 ($^{\circ}$); n 为常数; λ 为衍射波长, nm.

结合布拉格定律和文献 [17] 分析认为, 由于晶面间距 d 的减少而引起了衍射角 θ 的增加, 从而导致衍射峰右移.

2.3 接头显微硬度分析

不同焊接工艺参数下的接头显微硬度测试结果

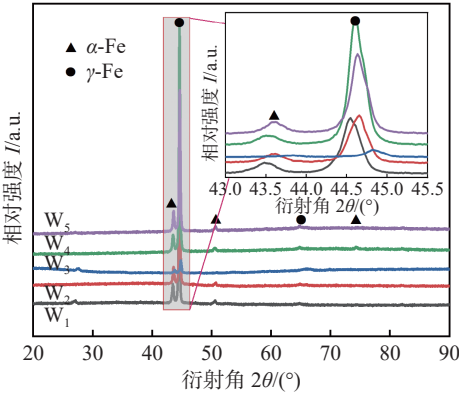


图 8 焊接接头的 XRD
Fig. 8 Welding joints XRD

果,如图 9 所示.焊接接头处硬度呈现“W”形分布.5 组试样所对应的焊缝处的平均维氏硬度值分别为 $254.1 \text{ HV} \pm 5.7 \text{ HV}$, $239.9 \text{ HV} \pm 5.9 \text{ HV}$, $244.1 \text{ HV} \pm 9.8 \text{ HV}$, $253.0 \text{ HV} \pm 7.7 \text{ HV}$, $250.3 \text{ HV} \pm 7.5 \text{ HV}$,即随着焊接电流的增大,焊缝处的硬度呈现降低的趋势.这是由于焊接电流越大,接头的热输入越高,导致焊缝晶粒尺寸增大,因此硬度值降低.

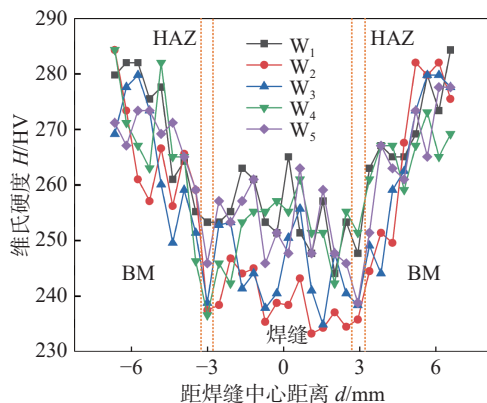


图 9 接头显微硬度分布

Fig. 9 Microhardness distribution of joints

图 9 中 BM 的显微硬度略高,而 HAZ 的显微硬度较低,这是由于 HAZ 奥氏体相转变不充分,破坏了微观组织中的相平衡.在 BM 靠近 HAZ 的两侧对称区域内形成软化区,且显微硬度值有一定程度的波动起伏,结合文献 [18] 分析认为,靠近 HAZ 处的 BM 在焊接时相当于受到一个局部快热快冷的热处理工艺,使得靠近 HAZ 处组织成为一种非平衡组织,从而造成硬度值的降低与起伏,由于远离 HAZ 处受到的影响减小,硬度呈上升趋势,直到达到 BM 的硬度.通常认为晶粒越细小,硬度值越大,即晶粒尺寸与硬度大小符合霍尔佩奇关系,但文中接头焊缝的晶粒远大于 BM 而硬度却仅比 BM 略低,结合文献 [19] 分析认为,霍尔佩奇机制的影响较小而金属强化机制占主导作用.由金属强化理论可知,焊缝强化机制主要包括固溶强化、弥散强化、位错强化和细晶强.在焊接过程中, N 元素会优先偏聚在奥氏体中,因此奥氏体中 N 元素含量远大于铁素体中的 N 元素含量. N 原子为间隙型溶质原子,可以在双相不锈钢中起到固溶强化的作用.由图 6 可知,焊缝中有许多析出的二次奥氏体相 γ_2 , 细小弥散的 γ_2 粒子能够阻碍位错的运动,提高硬度,所以可以在焊缝处起到弥散强化的作用.由于焊缝冷却速度较快,所以易于产生位错,同时由于降温过程中奥氏体向铁素体晶粒内部生长,两者相互挤压造成晶格畸变,使铁素体/奥氏体相界附

近位错密度升高,这种现象在焊缝处比 BM 更加明显.位错强化机制为位错密度越大,硬度越高,因此可以在焊缝处起到位错强化的作用.焊缝处主要的界面为铁素体和奥氏体之间的相界,相界阻碍位错运动,起到了细晶强化的作用.由参考文献 [20] 可知,焊缝处相界密度低于 BM,由细晶强化理论可知焊缝的硬度应大大低于 BM,而实际测得焊缝硬度只比 BM 略低,这是多种金属强化机制共同作用的结果.

2.4 接头拉伸性能分析

分别测试不同工艺参数下焊缝接头的拉伸性能,得到的工程应力—应变曲线,如图 10 所示.焊缝 W₁, 焊缝 W₂, 焊缝 W₃, 焊缝 W₄ 和焊缝 W₅ 的抗拉强度分别为 702.3, 666.3, 656.0, 661.2 MPa 和 626.7 MPa; 断后伸长率分别为 8.7%, 6.4%, 6.5%, 5.5% 和 5.3%; 屈服强度分别为 507.9, 518.4, 505.1, 479.7 MPa 和 486.8 MPa. W₁ 组试样的抗拉强度最高,为 702.3 MPa.平衡的铁素体/奥氏体 (δ/γ) 比例有助于提高抗拉强度^[21].奥氏体相的延展性可以有效的抑制裂纹在铁素体中的扩展.表现出较好的力学性能^[22].随着热输入的增加,接头的抗拉强度与断后伸长率均呈现下降的趋势,与显微硬度的变化规律一致,这是由于在焊接过程中,熔池中相变形成的奥氏体与铁素体之间具有相互交错的取向,如图 4 所示.焊接过程中产生的位错提高了焊缝的力学性能,而随着热输入的增加,焊缝中的奥氏体晶粒粗化,位错减少,因此抗拉强度与断后伸长率均下降.

为了进一步研究拉伸试样的失效机理,拉伸试验后的断裂表面 SEM,如图 11 所示.焊接接头的断口表现出相似的断裂特征,均可观察到由小平

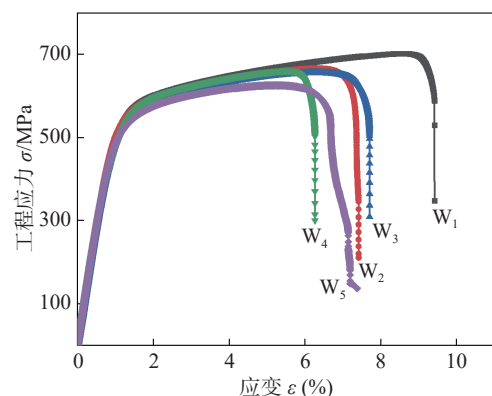


图 10 接头工程应力—应变曲线

Fig. 10 Joints engineering stress-strain curves

面、微孔和撕裂棱组成的混合断裂形貌,即焊缝断裂模式为准解理断裂.同时还可在图 11 中观察到一些微米尺度的夹杂物,这些焊缝内部存在的夹杂物可以造成塑性变形的不均匀,从而首先在塑性变形严重的地方形成显微孔洞.

除了焊接过程中产生的气孔外,夹杂物本身也

作为显微孔洞的成核位置,在外部拉力的作用下,大量的塑性变形使脆性夹杂物与基体界面脱开或断裂而形成孔洞.孔洞一经形成,即开始长大、聚集,并由此形成裂纹,最后导致断裂,如图 12 所示,这些微裂纹对试样的拉伸性能产生了负面影响,因此造成焊接试样断后伸长率较低.

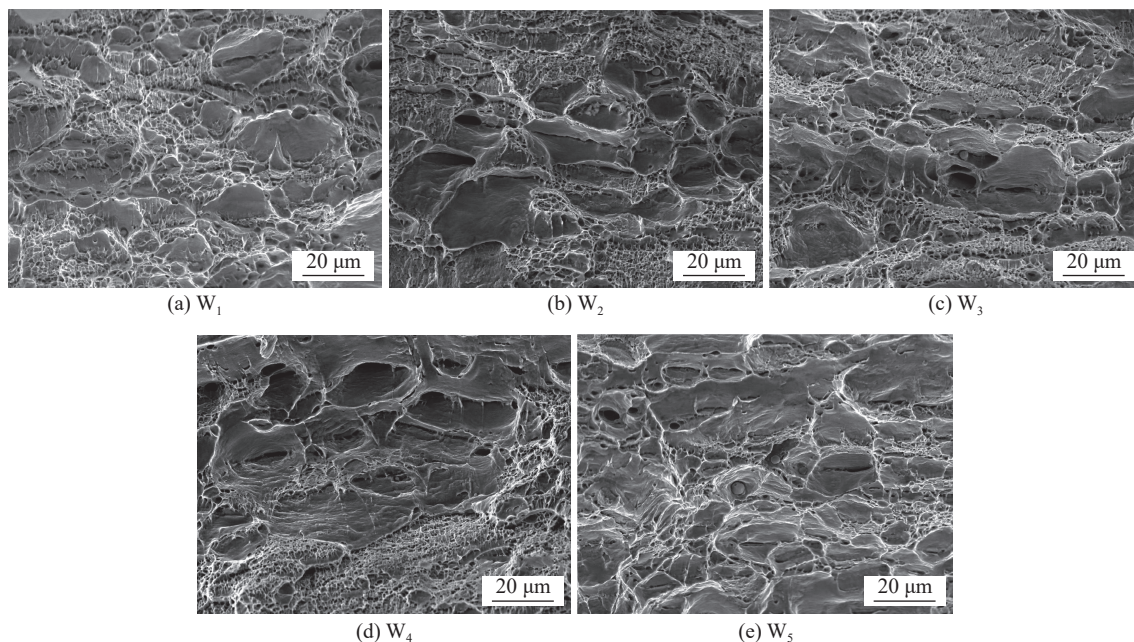


图 11 试样拉伸断口形貌

Fig. 11 Specimens tensile fracture morphology. (a) W_1 ; (b) W_2 ; (c) W_3 ; (d) W_4 ; (e) W_5

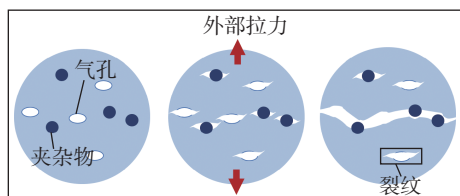


图 12 试样微观断裂机理

Fig. 12 Microscopic fracture mechanism of the specimen

3 结 论

(1) 采用 TIG 对 S32001 双相不锈钢焊接, 获得了 5 组表面成形良好的焊缝., 焊接接头由 BM、HAZ 和焊缝组成, 5 组焊接接头在相应区域中呈现出相似的微观结构, 但随着热输入的增加, 不同区域晶粒长大, 并伴随有析出的二次奥氏体相.

(2) 焊接接头处硬度呈现“W”形分布, BM 的显微硬度略高, 而 HAZ 的显微硬度较低, 因为 HAZ 奥氏体相转变不充分, 破坏了微观组织中的相平衡. 焊缝区的晶粒远大于 BM 而硬度却仅比 BM 略低, 是由固溶强化、弥散强化、位错强化和细

晶强化 4 种金属强化机制共同作用造成的.

(3) W_1 组试样的抗拉强度最高, 为 702.3 MPa, 因为平衡的铁素体/奥氏体 (δ/γ) 比例有助于提高抗拉强度. 随着热输入的增加, 焊缝中的奥氏体晶粒粗化, 位错减少, 接头的抗拉强度与断后伸长率均呈现下降的趋势, 焊缝表现为准解理断裂.

参考文献

- [1] ZHOU Y, WEI G S, ZHU R, *et al.* Process model for manufacturing 400 series stainless steel with purified CO_2 as an auxiliary oxidant and realizing carbon cycle[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 315: 123693.
- [2] PATRA S, AGRAWAL A, MANDAL A, *et al.* Characteristics and manufacturability of duplex stainless steel: a review[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(5): 1089 – 1106.
- [3] 齐新瑞, 郝辞, 冷昊凯. 2205 双相不锈钢焊接接头显微组织与力学性能研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(21): 165 – 167, 172.
QI Xinrui, HAOI Ci, LENG Haokai. Study on Microstructure and Mechanical Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joint[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21): 165 – 167, 172.

- [4] 张心保, 吴开明, 柯睿, 等. 00Cr12Ni 双相组织不锈钢焊接接头区域特征与性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(2): 22 – 31.
ZHANG Xinbao, WU Kaiming, KE Rui, *et al.* Zone characteristics of microstructure and mechanical properties of welded joints of dual phase stainless steel with 12%Cr[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(2): 22 – 31.
- [5] CHU Q L, YANG D, CHANG Z, *et al.* Investigation on microstructure evolution, mechanical properties and corrosion resistance of dual phase stainless steel joints welded by GTAW and SAW methods[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 209: 105183.
- [6] WAGNER F P, LUCAS S D, CRISTINA E P, *et al.* Effect of solubilization heat treatment on microstructure and corrosion resistance of joints welded with the autogenous TIG process duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 261: 527 – 1536.
- [7] ZAFAR K G, SADAQAT A, UD E D, *et al.* Experimental investigation of effect of welding parameters on surface roughness, micro-hardness and tensile strength of AISI 316L stainless steel welded joints using 308L filler material by TIG welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 220 – 236.
- [8] 高站起, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 超级双相不锈钢多层多道焊接接头组织及腐蚀性能 [J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 143 – 148.
GAO Zhanqi, JING Hongyang, XU Lianyong, *et al.* Research on microstructure and corrosion behavior of multi-pass welded joints of hyper duplex stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(7): 143 – 148.
- [9] 王纯, 贾小斌, 冯伟, 等. 热丝 TIG 堆焊 UNS S32707 特超级双相不锈钢工艺试验研究 [J]. 压力容器, 2021, 38(5): 22 – 25, 86.
WANG Chun, JIA Xiaobin, FENG Wei, *et al.* Experimental research on hot wire TIG overlay welding process of UNS S32707 super duplex stainless steel[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(5): 22 – 25, 86.
- [10] 马兆炫, 刘一搏, 王建峰, 等. 双相不锈钢水下局部干法 TIG 焊接工艺 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 48 – 54.
MA Zhaoxuan, LIU Yibo, WANG Jianfeng, *et al.* Underwater local dry TIG welding of duplex stainless steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 48 – 54.
- [11] 刘先文. S32101 双相不锈钢焊接工艺及其接头组织与性能 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
LIU Xianwen. The welding process, microstructure and properties of S32101 duplex stainless steel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [12] 张志强, 张宇航, 张宏伟, 等. UNS S32750 超级双相不锈钢激光焊接接头微观组织与耐蚀性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(4): 14 – 20.
ZHANG Zhiqiang, ZHANG Yuhang, ZHANG Hongwei, *et al.* Microstructure and corrosion resistance of UNS S32750 super duplex stainless steel laser welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(4): 14 – 20.
- [13] 李亚杰, 刘瑞, 秦凤明, 等. SAF2205 双相不锈钢多层多道焊接头的组织及性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(6): 74 – 81.
LI Yajie, LIU Rui, QIN Fengming, *et al.* Study on microstructure and comprehensive properties of SAF2205 duplex stainless steel multilayer and multipass welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(6): 74 – 81.
- [14] 孟庆森, 王皓, 胡利方. Cr₂N 沉淀相对 2101 双相不锈钢焊接接头综合性能的影响 [J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 105 – 108, 118.
MENG Qingsen, WANG Hao, HU Lifang. Effect of precipitation Cr₂N on comprehensive performance of DSS 2101 welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 105 – 108, 118.
- [15] JEBARAJ V A, AJAYKUMAR L, DEEPAK C, *et al.* Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications-a recent review[J]. Journal of Advanced Research, 2017, 8(3): 183 – 199.
- [16] HAGHDADI N, BREEN A, CHEN H, *et al.* New insights into the character of austenite-ferrite boundaries in an additively manufactured duplex stainless steel[J]. Scripta Materialia, 2024, 245: 116058.
- [17] YOU J Y, LI Z Y, ZHU J L, *et al.* Underwater wet laser welding of duplex stainless steel under various water depths[J]. Materials Science & Engineering A, 2024, 891: 146358.
- [18] JI H C, HU Y, YU R D, *et al.* Experimental study on TIG full welding and single pass welding quality of 6061-T6 aluminum alloy sheet[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 5965 – 5976.
- [19] 吕光宙, 马泽铭, 许爱军, 等. 304 不锈钢激光焊接接头组织性能及断裂机理研究 [J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 74 – 82.
LYU Guangzhou, MA Zeming, XU Aijun, *et al.* Microstructure, properties and fracture mechanism of 304 stainless steel welding joint by laser[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9): 74 – 82.
- [20] 栗宏伟, 赵志毅, 薛润东. 热输入对 SAF2507 超级双相不锈钢焊接接头显微组织及硬度的影响 [J]. 焊接学报, 2022, 43(2): 20 – 26.
LI Hongwei, ZHAO Zhiyi, XUE Rundong. Effect of heat input on the microstructure and hardness of SAF2507 super duplex stainless steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(2): 20 – 26.
- [21] 李科, 牛犇, 潘琳琳, 等. 热输入对电弧增材制造超级双相不锈钢组织与性能的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(10): 94 – 101.
LI Ke, NIU Ben, PAN Linlin, *et al.* Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured super duplex stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(10): 94 – 101.
- [22] ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, *et al.* The impact of annealing temperature on improving microstructure and toughness of electron beam welded duplex stainless steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 130 – 141.

作者简介: 降龙楠, 硕士研究生; 主要从事双相不锈钢焊接技术方面的研究; Email: 1635971525@qq.com.
陈洪胜 (通信作者), 博士, 副教授, 硕士研究生导师; Email: chenhongsheng@tyut.edu.cn.