

DOI: 10.11973/jxgccl202109003

双相不锈钢焊接性能及接头耐腐蚀性能的研究现状

秦 琴, 田金欣, 唐诗佳, 杨昊东, 颜子镒, 黄泰博, 李昀坤

(成都锦城学院智能制造学院, 成都 611731)

摘 要: 双相不锈钢因具有良好的力学性能和耐腐蚀性能而得到广泛的应用, 其焊接性能也成为重要研究对象。介绍了双相不锈钢的焊接方法及焊接接头的显微组织, 重点讨论了焊接接头的点蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀以及脆化和裂纹产生的机理, 最后对双相不锈钢焊接性能的研究方向进行了展望。

关键词: 双相不锈钢; 焊接性能; 腐蚀; 裂纹; 脆化

中图分类号: TG444; TG445

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)09-0013-06

Research Status on Weldability of Duplex Stainless Steel and Corrosion Resistance of Joint

QIN Qin, TIAN Jinxin, TANG Shijia, YANG Haodong, YAN Ziyi, HUANG Taibo, LI Yunkun

(College of Mechanical Engineering, Chengdu Jincheng College, Chengdu 611731, China)

Abstract: Dual-phase stainless steel has been widely used because of its good mechanical properties and corrosion resistance, and its weldability has also become an important research object. The welding method and microstructure of the welded joint of duplex stainless steel are introduced, and pitting corrosion, stress corrosion, intergranular corrosion and the generation mechanism of embrittlement and cracks of the welded joint are discussed. Finally, the research direction of duplex stainless steel weldability is prospected.

Key words: duplex stainless steel; weldability; corrosion; crack; embrittlement

0 引言

双相不锈钢具有优异的力学特性、抗氯化物腐蚀能力、耐腐蚀疲劳性能、耐磨损腐蚀性能和焊接性能, 广泛应用于化学品运输、深海采油、海水淡化、烟气脱硫等方面。双相不锈钢的焊接性是其应用推广的主要障碍之一。在焊接过程中, 母材和焊接材料要经过加热熔化和冷却结晶的非平衡凝固过程, 该过程是一个复杂的化学冶金过程。在焊接过程中, 如何获得平衡的铁素体相和奥氏体相组织, 避免碳化物、氮化物、 σ 相等有害相的析出, 避免熔合区和热影响区的晶粒粗大以及热裂纹和使用中腐蚀都是目前研究的难点和重点。目前, 国内外学者对双相不锈钢的焊接性能

进行了大量研究, 但是系统地分析双相不锈钢焊接过程的文献较少。作者综述了双相不锈钢焊接性能的研究进展, 介绍了其焊接方法, 探讨了双相不锈钢的焊接接头组织变化, 分析焊接接头的耐腐蚀性能以及可能出现的焊接缺陷, 为后续双相不锈钢焊接性能的研究提供理论支撑。

1 焊接方法

目前, 双相不锈钢已由第一代的 3RE60 不锈钢发展到第三代的 SAF2507 不锈钢。相比于第一代双相不锈钢, 第三代双相不锈钢降低了碳、镍含量, 增加了铬、钼、硅、氮的含量, 并添加一些稀土元素, 因此具有更优良的焊接性能。双相不锈钢的焊接方法除了常规的惰性气体保护电弧焊(TIG)、熔化极惰性气体保护焊(MIG)、熔化极活性气体保护电弧焊(MAG)和药芯焊丝电弧焊接(FCAW)外, 还包括电子束焊接法、激光焊接法、等离子焊、搅拌摩擦焊、双弧焊接法以及复合型焊接方法等。通过改良和创新焊接方法

收稿日期: 2021-01-24; 修订日期: 2021-08-24

基金项目: 国家科技专项项目(2009ZX040412-023); 四川省科技创新苗子工程项目(2017122); 四川省粉末冶金工程技术研究中心开放基金课题(SC-FMYJ2018-07, SC-FMYJ2018-01)

作者简介: 秦琴(1987—), 女, 四川江油人, 副教授, 硕士

可以获得良好的焊接接头组织,并提高焊接效率。

MUTHUPANDI 等^[1]将电子束焊接法应用到双相不锈钢中,采用富镍填充材料获得高镍含量焊缝金属,发现镍元素对焊缝中铁素体和奥氏体比例的影响比冷却速率的影响大,但是对接头硬度的影响不大。SUN 等^[2]研究表明,将双弧焊技术应用于双相不锈钢时可以得到较好的焊缝外观,增加焊枪间距或者减小钨极氩弧焊(GTA)重熔电流会增大接头在质量分数 3% NaCl 溶液中的腐蚀速率,并且可以通过调整焊枪间距来改善接头的显微组织。KANG 等^[3]采用药芯焊丝电弧焊方法对双相不锈钢进行焊接,发现随着药芯焊丝中硅含量的增加,焊缝表面钝化膜的致密程度增大,在质量分数 10% 草酸溶液中接头晶界处产生的点蚀数量减少,这是因为在焊接过程中硅与氧气反应生成的 SiO_2 在晶界处不断聚集,从而减少了晶界点蚀的发生。张玥^[4]研究发现,分别采用激光焊接法和等离子焊接工艺对双相不锈钢进行焊接后,接头焊缝组织均由铁素体和奥氏体组成,但等离子焊接接头焊缝组织中的奥氏体粗大,含量较多,导致该接头的强度略低于激光束焊接接头的。BAGHDADCHI 等^[5]研究发现,采用纯氮保护气体焊与激光焊相结合的焊接方法可以显著提高双相不锈钢激光焊接接头焊缝中奥氏体相的含量,减少氮化物的形成量。ALBAIJAN 等^[6]采用活性焊剂钨极惰性气体(ATIG)保护技术对双相不锈钢进行焊接,发现:当同时使用 Fe_2O_3 - Cr_2O_3 、 ZnO - Mn_2O_3 作为焊剂时,其焊缝深度比 TIG 焊接接头的提高了近 3.7 倍,而焊缝的洛氏硬度和抗拉强度与母材的相近;与 TIG 接头相比,当使用 ZnO - Mn_2O_3 混合焊剂焊接时,焊缝具有更强的突变载荷承载能力,而使用 Fe_2O_3 - Cr_2O_3 混合焊剂焊接时,焊缝的耐腐蚀能力更强。刘绍等^[7]采用药芯焊丝双丝冷金属过渡焊接技术对双相不锈钢进行堆焊试验,发现所得焊缝均匀光滑,在冷却过程中奥氏体先在铁素体晶界析出并沿冷却方向长大,随着冷却过程的进行,尺寸均匀的细小奥氏体在铁素体晶内呈树枝状析出,接头具有良好的显微组织。WANG 等^[8]采用双面同步 TIG 焊接双相不锈钢,获得外观和性能良好的双相不锈钢焊接接头,并且在焊缝金属中产生了大量二次奥氏体;与母材相比,接头具有较高的抗拉强度和硬度,但是接头因存在魏氏体组织而容易产生延时性断裂。WANG 等^[9]研究发现,搅拌摩擦焊接双相不锈钢接头搅拌区的

硬度和抗拉强度均高于母材,且延展性也优于母材。SANTOS 等^[10]采用热丝 TIG 焊对双相不锈钢进行焊接,发现接头焊缝成形良好,没有明显的缺陷,且热丝 TIG 焊接速度是传统 TIG 焊接速度的数倍,从而大大提高了焊接效率。

2 焊接接头的显微组织

双相不锈钢焊接接头一般由焊缝、低温热影响区、高温热影响区^[11-12]和熔合区^[13]4 个区域组成。焊缝凝固的模式主要有 2 种:一种是以 δ (铁素体)相完成整个凝固过程,该过程用 F 表示^[14];另外一种是以 δ 相为初生相,依次发生包晶和共晶反应,即 $L(\text{液相}) + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma(\text{奥氏体}) \rightarrow \delta + \gamma$,该过程用 FA 表示^[15],该模式下凝固生成的初生 δ 相一般呈蠕虫状,可以阻碍 γ 枝晶的形成。双相不锈钢焊接过程中熔池主要以 δ 相完全凝固为主,而奥氏体相主要通过 δ 相发生固态相变得到。根据奥氏体生成位置和形貌特征的不同,可将其分为晶界奥氏体、魏氏奥氏体和晶内奥氏体。由于 δ 相晶界处的形核能最低,在较高的温度下即可先生成晶界奥氏体^[16];随着铁素体晶界处形核位置的减少,新晶核在铁素体晶界处以侧板条的形态向铁素体晶内生长,生成魏氏奥氏体^[17];若冷却速率较慢,过冷度较大,则会在铁素体晶内生成奥氏体,即晶内奥氏体。由于凝固过程是非平衡过程,因此 δ 相向奥氏体相的转变是不可能完全进行的,这意味着对于具有相同成分的焊缝金属和母材,焊缝中的奥氏体相较少,且均在奥氏体化元素(镍、锰、氮等)多而铁素体化元素(铬、钼等)少的地方形核,这也导致后生成的魏氏奥氏体和晶内奥氏体中的铬、钼含量均低于晶界奥氏体中的^[18-19]。根据 NORSOK M-601 标准,双相不锈钢焊接接头中奥氏体相的占比不应低于 30%。焊后的短时间固溶处理或多层焊再加热处理均可使未充分转变的铁素体相再发生固态相变,使奥氏体相含量增加,该奥氏体称为二次奥氏体;与一次奥氏体(F 凝固模式和 FA 凝固模式生成的奥氏体)相比,二次奥氏体尺寸更细小,呈孪晶特征^[20],其结构仍为面心立方结构^[21],但是二次奥氏体更易在富镍贫铬钼区域形核,导致焊缝局部耐腐蚀性能的降低^[22]。

在焊接热循环作用下,双相不锈钢焊接接头整个热影响区受到不同峰值温度的作用。在低温热影响区,加热温度低于固溶处理温度,铁素体与奥氏体两相比例变化不大,在铁素体晶界处易析出

二次奥氏体,且与母材相比低温热影响区具有更优异的韧性^[12]。WESTIN^[23]研究发现,UNS S32205(S31803)、S32304等低合金双相不锈钢在低温热影响区不易发生 Cr_2N 和 σ 相的析出。在峰值温度超过固溶处理温度的高温热影响区,奥氏体相又溶入 δ 相中,生成过量的铁素体,且形成粗大的 δ 单相组织,这种 δ 相在冷却过程中可能会转变成魏氏奥氏体,导致该区域的耐点蚀性能降低;氮元素在铁素体中的固溶度比在奥氏体中的小,过量的铁素体会导致铁素体中氮元素含量过高,使得高温热影响区在冷却过程中析出 Cr_2N ^[14,24], Cr_2N 的析出造成铁素体边界附近的镍含量较高,而铬含量较低,从而为二次奥氏体的析出创造了条件。研究^[25-26]表明,在热影响区铁素体会发生共析反应生成二次奥氏体和 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 或者 σ 脆相。

3 焊接接头的腐蚀类型

3.1 晶间腐蚀

双相不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能主要取决于钝化元素的含量以及焊接接头铁素体和奥氏体两相比例^[27]。双相不锈钢焊接接头在腐蚀介质作用下易发生晶间腐蚀,这会引起焊缝金属及母材力学性能和耐腐蚀性能的降低,其腐蚀机理符合贫铬理论^[28]。

SHI等^[29]采用深熔钨极气体保护焊对S32101双相不锈钢进行焊接,并且采用双环动电位再活化法评估晶间腐蚀敏感性,发现:随着热输入的降低,接头的耐晶间腐蚀性能提高;热输入的增大使得奥氏体晶界从小角度晶界向大角度晶界转变,这在一定程度上削弱了杂质原子在晶界处的吸附和偏析,影响了晶界的稳定性,从而增大了晶间腐蚀程度。KUMAR等^[30]采用草酸腐蚀试验和双回路电化学电位活化技术研究了加钼双相不锈钢的腐蚀行为,发现钼的加入使组织中形成了碳化钼和氮化物的混合物,抑制了铬的消耗,从而提高了耐晶间腐蚀性能。ZHANG等^[31]研究表明,在纯氩保护气体中加入体积分数2%氮气可以提高双相不锈钢TIG焊接接头焊缝的耐晶间腐蚀性能,这是因为氮抑制了 Cr_2N 、 M_{23}C_6 在焊缝根部的析出,避免了铁素体边界处贫铬,从而提高了抗晶间腐蚀能力。

综上所述,防止双相不锈钢焊缝金属晶间腐蚀的措施包括:选择含有少量 δ 铁素体的双相不锈钢母材或添加适当的合金元素控制铁素体的含量;选用低热输入的焊接工艺等。

3.2 点蚀

点蚀是指在含 Cl^- 的介质中焊接接头表面钝化膜发生局部破坏而产生小孔或小坑的腐蚀形式,是腐蚀区域内产生电化学反应的结果。由于在焊接过程中金属发生不平衡相变,焊接接头熔合区附近的奥氏体相减少, δ 相增多,在 δ - δ 相界上析出 Cr_2N 、 CrN 、 Cr_{23}C_6 等,析出相周围形成贫铬层而优先发生腐蚀形成点蚀孔^[24,32-33]。在焊接接头高温热影响区,氮在 δ 相中呈过饱和状态,导致其点蚀程度更严重^[34]。曹静等^[35]通过添加微量钛元素来促进铁素体在双相不锈钢中的形成,抑制富铬相的产生,从而提高双相不锈钢的抗点蚀能力。YANG等^[36]研究发现,经1 080℃短时固溶水冷处理后,UNS S31803双相不锈钢焊接接头的耐点蚀性能得到显著提高。ZHANG等^[37]研究发现,UNS S32750双相不锈钢钨极气体保护电弧焊(GTAW)接头获得最优异耐点蚀性能的固溶处理温度为1 080℃。SANTOS等^[38]也验证了固溶处理可显著提高焊接接头和母材的耐点蚀性能的结果。综上所述,可以通过添加合金元素、固溶处理来提高双相不锈钢的耐点蚀性能。

3.3 应力腐蚀

双相不锈钢的屈服强度较高,表面钝化膜发生表面滑移而破坏所需的应力较大,且双相不锈钢中含有钼元素和较多的铬元素,因此其应力腐蚀裂纹难以萌生;同时由于 δ 相和奥氏体相的电位不同,裂纹扩展机制不同,裂纹不易扩展。但是双相不锈钢焊接接头中铁素体与奥氏体组织不平衡,导致接头易发生应力腐蚀。

ALWIN等^[39]研究发现:与双相不锈钢TIG焊接接头相比,ATIG焊接接头在155℃、质量分数45%氯化镁溶液中具有更好的耐应力腐蚀性能;ATIG焊接接头在焊缝金属处失效,而TIG焊接接头在热影响区失效。TOPOLSKA等^[40]研究发现,在2205双相不锈钢/316L奥氏体不锈钢异种金属焊接接头中,双相不锈钢侧的热影响区中含有大量的铁素体和针状奥氏体,其抗氯化物应力腐蚀开裂能力较差。韩鹏^[41]研究发现:去应力退火可消除双相不锈钢焊接接头焊缝内的残余应力,提高焊缝整体的耐应力腐蚀能力;焊接所产生的残余应力主要集中在热影响区,且奥氏体中的残余应力大于铁素体中的残余应力,因此熔合区附近的热影响区易发生应力腐蚀。

4 焊接缺陷

4.1 裂纹

双相不锈钢焊接接头最薄弱的区域是熔合线附近的高温热影响区^[42-43],这与该区域的相比比例失衡和二次相的析出有关,在焊接过程中该区域中易产生裂纹。双相不锈钢焊接接头的热裂倾向较小,在应变不大于2%的条件下,其抗热裂性能较优异;但是对于含铜的双相不锈钢,铜、磷与铁会形成复杂的液态薄膜,从而增大双相不锈钢焊接接头的热裂倾向,或者当存在很高的应变时,双相不锈钢焊接接头的热裂倾向也会增大。YANG等^[44]对在工作温度100℃左右和工作压力0.2 MPa条件下运行1 a的双相不锈钢反应堆容器进行失效分析后发现:裂纹在热影响区萌生,焊缝金属出现沿晶开裂和少量穿晶开裂,焊缝组织中铁素体占比为80%~90%;导致裂纹出现的原因是焊接工艺不合理,过快的冷却速率导致焊缝金属中形成较多 δ 相,且晶粒粗大,同时易造成元素偏析,从而增大了接头的热裂倾向。

4.2 焊缝金属的脆化

双相不锈钢在焊接过程中存在粗晶脆化、 σ 相脆化以及475℃脆化现象。双相不锈钢的粗晶脆化倾向与 δ 相的存在以及焊缝冷却速率有关。18-5型、22-5型、25-5型双相不锈钢焊接接头中铬氮化物的析出对热影响区的韧性影响很大;当奥氏体相占比小于30%时,氮化物越多,热影响区的韧性越差。热影响区的韧性受制于 $\delta \rightarrow \gamma$ 转变的程度及奥氏体相的形态,当奥氏体相呈魏氏组织特征时,接头的低温韧性显著降低。ZHONG等^[45]研究发现,冷却速率是影响双相不锈钢相变和热应力的关键因素,随着冷却速率的降低,奥氏体相尺寸明显增大,从而发生粗晶脆化。

双相不锈钢中 σ 相的析出机理有2种:一种是在奥氏体及铁素体相界中通过层状共析而在 $M_{23}C_6$ 与二次奥氏体相界面处产生的 σ 脆性相;另一种是由铁素体共析反应形成的 σ 脆性相^[28]。 σ 相坚硬、易碎,易在 α/γ 相界富铬、钼处析出,会使双相不锈钢的韧性变差^[46-47]。同时, σ 相附近的铬、钼元素含量很低,造成双相不锈钢的耐点蚀性能下降^[48-49]。BADJI等^[50]研究发现:对2205双相不锈钢钨极氩弧焊接头进行退火处理后,焊缝中 δ 铁素体共析分解生成 σ 相和 $Cr_{23}C_6$ 碳化物,且主要分布在 δ/γ 相界面处;随着退火温度的升高, σ 相的数量减少。

BADJI等^[51]研究发现,预先固溶处理后2205双相不锈钢钨极氩弧焊接头中的 σ 相在 δ/γ 相界和 δ 晶粒内析出,同时提高固溶温度可延迟 σ 相的析出。WANG等^[52]研究发现,铈的加入加速了 δ 晶粒形核,细化了凝固组织,降低了钼和铬的偏析程度,并抑制了 σ 相的析出。

双相不锈钢接头在430~480℃温度区间长时间加热并缓慢冷却后,其铁素体相中会析出富铬 α' 脆性相,导致焊接接头出现475℃脆化现象,但是其耐磨性得到显著提高;可通过在700~800℃加热后空冷处理的方法来消除475℃脆化现象。

5 结束语

双相不锈钢结合了奥氏体钢和铁素体钢的优点,具有良好的焊接性能、耐腐蚀性能、耐磨性能以及优良的力学性能。虽然国内外对双相不锈钢的焊接性能进行了大量的研究,并取得了许多阶段性成果,但是如何避免接头过热而保持铁素体和奥氏体两相比例平衡,如何避免焊接过程中缺陷的产生,如何抑制有害相的析出以及相关机理分析都是需要进一步解决的问题。今后双相不锈钢焊接性能的研究重点包括:探索新的焊接方法,将热输入低、焊接效率高且能使焊缝形成足够多奥氏体的焊接方法应用到双相不锈钢焊接中;改进传统焊接方法,在原有焊接方法基础上进行2种或者多种焊接方法融合;优化焊接工艺,保证熔合比的稳定,避免出现成分偏析、晶粒粗大、二次相析出、热影响区奥氏体含量不足等现象;研究二次相的析出机理以及奥氏体形态的控制,以获得性能优异的双相不锈钢焊接接头。

参考文献:

- [1] MUTHUPANDI V, BALA SRINIVASAN P, SESHADRI S K, et al. Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 358(1/2): 9-16.
- [2] SUN Z, KUO M, ANNERGREN I, et al. Effect of dual torch technique on duplex stainless steel welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 356(1/2): 274-282.
- [3] KANG D W, LEE H W. Study of pitting resistance of duplex stainless steel weldment depending on the Si content[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2014, 9(11): 5864-5876.
- [4] 张玥. 2507双相不锈钢板焊接工艺的研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
ZHANG Y. Study on the welding process of 2507 duplex stainless steel plate[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.

- [5] BAGHDADCHI A, HOSSEINI V A, HURTIG K, et al. Promoting austenite formation in laser welding of duplex stainless steel—Impact of shielding gas and laser reheating[J]. *Welding in the World*, 2021, 65(3): 499-511.
- [6] ALBAIJAN I, HEDHIBI A C, TOUILEB K, et al. Effect of binary oxide flux on weld shape, mechanical properties and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel welds[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1-13.
- [7] 刘邵, 房卫萍, 易耀勇, 等. 2205 双相不锈钢药芯双丝 CMT 焊接接头组织与性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(5): 23-26.
LIU S, FANG W P, YI Y Y, et al. Study on microstructure and properties of flux cored twin-wire CMT welded joint of 2205 duplex stainless steel[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(5): 23-26.
- [8] WANG L L, ZHAO P C, PAN J J, et al. Investigation on microstructure and mechanical properties of double-sided synchronous TIP TIG arc butt welded duplex stainless steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(1/2): 303-312.
- [9] WANG W Y, WANG Z X, XU L X, et al. Dissimilar friction stir welding of austenitic and duplex stainless steel; Effect of material position and tool offset [J]. *Steel Research International*, 2020, 91(10): 2000156.
- [10] SANTOS N F D, ESTEVES L, NERY GARCIA J H, et al. Microstructural and corrosion resistance of lean duplex stainless steel UNS S32304 welded by SAW with cold wire addition[J]. *Corrosion*, 2020, 76(7): 619-627.
- [11] ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Investigation on microstructure and impact toughness of different zones in duplex stainless steel welding joint[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(1): 134-150.
- [12] ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Microstructural characterization and electron backscatter diffraction analysis across the welded interface of duplex stainless steel [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 413: 327-343.
- [13] KHAFAGY S M, MORSY M A, EL SHERBINI H M, et al. Effect of thermal cycle on microstructure and corrosion behavior of duplex stainless steel SAF 2205 electron beam welded joint[J]. *Key Engineering Materials*, 2018, 786: 119-127.
- [14] RAMIREZ A J, LIPPOLD J C, BRANDI S D. The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34(8): 1575-1597.
- [15] 张志强, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 铁素体/奥氏体双相不锈钢焊接接头组织和性能的研究进展[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(5): 13-27.
ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Research progress on microstructure and properties of welded joint of ferrite/austenite duplex stainless steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(5): 13-27.
- [16] KAÇAR R. Effect of solidification mode and morphology of microstructure on the hydrogen content of duplex stainless steel weld metal[J]. *Materials & Design*, 2004, 25(1): 1-9.
- [17] MUTHUPANDI V, BALA SRINIVASAN P, SESHADRI S K, et al. Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 358(1/2): 9-16.
- [18] EGHLEMI A, SHAMANIAN M, RAEISSI K. Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 244: 45-51.
- [19] EGHLEMI A, SHAMANIAN M, ESKANDARIAN M, et al. Characterization of microstructure and texture across dissimilar super duplex/austenitic stainless steel weldment joint by super duplex filler metal [J]. *Materials Characterization*, 2015, 106: 27-35.
- [20] NILSSON J O, KARLSSON L, ANDERSSON J O. Secondary austenite formation and its relation to pitting corrosion in duplex stainless steel weld metal[J]. *Materials Science and Technology*, 1995, 11(3): 276-283.
- [21] ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. The influence of microstructural evolution on selective corrosion in duplex stainless steel flux-cored arc welded joints [J]. *Corrosion Science*, 2017, 120: 194-210.
- [22] CHEHUAN T, DREILICH V, DE ASSIS K S, et al. Influence of multipass pulsed gas metal arc welding on corrosion behaviour of a duplex stainless steel[J]. *Corrosion Science*, 2014, 86: 268-274.
- [23] WESTIN E M. Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101 [EB/OL]. [2020-12-24]. <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:376827>.
- [24] LIAO J S. Nitride precipitation in weld HAZs of a duplex stainless steel[J]. *ISI International*, 2001, 41(5): 460-467.
- [25] NOWACKI J, ŁUKOJC A. Microstructural transformations of heat affected zones in duplex steel welded joints [J]. *Materials Characterization*, 2006, 56(4/5): 436-441.
- [26] BADJI R, BOUABDALLAH M, BACROIX B, et al. Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds [J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(4): 447-453.
- [27] KANG D W, LEE H W. Study of pitting resistance of duplex stainless steel weldment depending on the Si content [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2014, 9(11): 5864-5876.
- [28] CRONEMBERGER M E R, NAKAMATSU S, MARIANO N A, et al. Effect of cooling rate on the corrosion behavior of as-cast SAF 2205 duplex stainless steel after solution annealing treatment[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 869: 620-624.
- [29] SHI Y H, CUI S W, ZHU T, et al. Microstructure and intergranular corrosion behavior of HAZ in DP-TIG welded DSS joints[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,

- 2018,256:254-261.
- [30] KUMAR P A, BABU S P K, VARGHESE A S. Comparative study on intergranular corrosion characteristics of cast duplex stainless steel stabilized with zirconium[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, 6(4): 324-331.
- [31] ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 404: 110-128.
- [32] KIM H J, JEON S H, KIM S T, et al. Investigation of the sensitization and intergranular corrosion of tube-to-tubesheet welds of hyper duplex stainless steel using an electrochemical reactivation method[J]. *Corrosion Science*, 2014, 87: 60-70.
- [33] 张志强, 荆洪阳, 徐连勇, 等. 双相不锈钢多层多道焊接接头微观组织表征[J]. *焊接学报*, 2017, 38(5): 79-82.
- ZHANG Z Q, JING H Y, XU L Y, et al. Microstructure characterization of duplex stainless steel multi-pass welded joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(5): 79-82.
- [34] ALWIN B, LAKSHMINARAYANAN A K, VASUDEVAN M, et al. Assessment of stress corrosion cracking resistance of activated tungsten inert gas-welded duplex stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(12): 5825-5836.
- [35] 曹静, 安立聪, 齐兴, 等. 含 Ti 铸造双相不锈钢点蚀行为研究[J]. *材料研究学报*, 2017, 31(7): 553-560.
- CAO J, AN L C, QI X, et al. Pitting corrosion behavior of cast Ti-bearing duplex stainless steel [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2017, 31(7): 553-560.
- [36] YANG Y Z, WANG Z Y, TAN H, et al. Effect of a brief post-weld heat treatment on the microstructure evolution and pitting corrosion of laser beam welded UNS S31803 duplex stainless steel[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65: 472-480.
- [37] ZHANG Z Y, ZHAO H, ZHANG H Z, et al. Microstructure evolution and pitting corrosion behavior of UNS S32750 super duplex stainless steel welds after short-time heat treatment[J]. *Corrosion Science*, 2017, 121: 22-31.
- [38] SANTOS N F D, ESTEVES L, NERY GARCIA J H, et al. Microstructural and corrosion resistance of lean duplex stainless steel UNS S32304 welded by SAW with cold wire addition[J]. *Corrosion*, 2020, 76(7): 619-627.
- [39] ALWIN B, LAKSHMINARAYANAN A K, VASUDEVAN M, et al. Assessment of stress corrosion cracking resistance of activated tungsten inert gas-welded duplex stainless steel joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(12): 5825-5836.
- [40] TOPOLSKA S, LABANOWSKI J. Environmental degradation of dissimilar austenitic 316L and duplex 2205 stainless steels welded joints[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 12(3): 2107-2112.
- [41] 韩鹏. 热处理对双相不锈钢焊接应力及其组织与性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- HAN P. Effects of heat treatment on the welding stress and microstructure and properties of duplex stainless steel[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [42] CHEN T H, YANG J R. Microstructural characterization of simulated heat affected zone in a nitrogen-containing 2205 duplex stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 338(1/2): 166-181.
- [43] RAMIREZ A J, LIPPOLD J C, BRANDI S D. The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34(8): 1575-1597.
- [44] YANG J Q, WANG Q Q, WEI Z K, et al. Weld failure analysis of 2205 duplex stainless steel nozzle[J]. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2014, 2(2): 69-75.
- [45] ZHONG H G, CHEN X R, AO L, et al. Effect of cooling rate on solidification structure and linear contraction of a duplex stainless steel[J]. *China Foundry*, 2012, 9(3): 239-243.
- [46] 宾远红, 李培芬, 李志铮, 等. 不同固溶温度对双相不锈钢 σ 相析出及冲击韧性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(8): 136-141.
- BIN Y H, LI P F, LI Z Z, et al. Precipitation of σ -phase and its effect on impact toughness of a duplex stainless steel solution-treated at different temperatures [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013, 34(8): 136-141.
- [47] 宋志刚, 陈斌, 郑文杰, 等. 固溶温度对 00Cr22Ni5Mo3N 钢组织及力学性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2004, 16(6): 47-50.
- SONG Z G, CHEN B, ZHENG W J, et al. Influence of solution temperature on microstructure and mechanical property of 00Cr22Ni5Mo3N[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2004, 16(6): 47-50.
- [48] DONG C F, LUO H, XIAO K, et al. Effect of temperature and Cl^- concentration on pitting of 2205 duplex stainless steel [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Mater Sci Ed)*, 2011, 26(4): 641-647.
- [49] 陈兴润, 潘吉祥. 固溶温度对 2205 双相不锈钢组织和点蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2014, 39(12): 38-42.
- CHEN X R, PAN J X. Influence of solution temperature on microstructure and pitting corrosion of 2205 duplex stainless steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2014, 39(12): 38-42.
- [50] BADJI R, BOUABDALLAH M, BACROIX B, et al. Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds[J]. *Materials Characterization*, 2007, 59(4): 447-453.
- [51] BADJI R, BOUABDALLAH M, BACROIX B, et al. Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of σ -phase in 2205 duplex stainless steel welds[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 496(1): 447-454.
- [52] WANG Q, WANG L J, SUN Y H, et al. The influence of Ce micro-alloying on the precipitation of intermetallic sigma phase during solidification of super-austenitic stainless steels [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 815: 152418.