

海洋环境中双相不锈钢的腐蚀行为研究进展

林育锋¹, 林育云², 李竹影^{1*}, 王炜桐¹

(1. 海军工程大学, 武汉 430033; 2. 中国海警局直属第五局, 海南三亚 572022)

摘要: 针对 DSS 海洋环境自适应相关研究进行了总结, 指出除元素组成外, 组织晶粒大小、第二相及铁素体和奥氏体两相组织比例变化、海水温度、钝化膜中载流子浓度等相比其他因素对双相不锈钢的点蚀性能更能起到关键性的影响。同时分析了 DSS 主要组成相铁素体和奥氏体组织发生选择性腐蚀相关研究, 指出发生选择性腐蚀与电极电位、介质环境有较大关系。最后, 指出了 DSS 在不同因素下的腐蚀研究还存在不足和下一步需要继续深入研究方向。

关键词: 双相不锈钢; 点蚀; 选择性腐蚀; 组织; 钝化膜; 温度; 耐蚀性

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0118-12

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.015

Research Progress in Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel in Marine Environments

LIN Yufeng¹, LIN Yuyun², LI Zhuying^{1*}, WANG Weitong¹

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. The fifth Bureau for Marine Police of China, Hainan Sanya 572022, China)

ABSTRACT: The work aims to summarize the relevant research on DSS Marine environment adaptation and point out that in addition to the element composition, the microstructure grain size, the second phase and the ratio of ferrite and austenite, sea temperature, carrier concentration in passivated film and other factors play a more critical role in the corrosion resistance of duplex stainless steel. At the same time, the research on selective corrosion in ferrite and austenite structures which are the main components of DSS is analyzed. It is pointed out that selective corrosion is closely related to electrode potential and medium environment. Finally, the shortcomings of the corrosion research of DSS under different factors are pointed out and the further research directions are needed.

KEY WORDS: duplex stainless steel; pitting; selective corrosion; microstructure; passivation film; temperature; corrosion resistance

双相不锈钢 (DSS) 既有奥氏体不锈钢的韧性, 较高的力学性能, 良好的焊接性能, 又有铁素体不锈钢耐氯化物应力腐蚀的性能和耐海水磨蚀性能, 是近年来开发的新型耐海水腐蚀不锈钢材料, 在石油、化

工、天然气管路和舰船海水管路系统等众多领域得到了广泛的应用^[1]。在海洋等苛刻的使用环境中, 在海水盐度、温度, 材料组织结构, 钝化膜表面状态, 电极电位和溶液酸性环境等因素作用下^[2-3], DSS 容易

收稿日期: 2024-06-18; 修订日期: 2024-08-27

Received: 2024-06-18; Revised: 2024-08-27

引文格式: 林育锋, 林育云, 李竹影, 等. 海洋环境中双相不锈钢的腐蚀行为研究进展[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 118-129.

LIN Yufeng, LIN Yuyun, LI Zhuying, et al. Research Progress in Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel in Marine Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 118-129.

*通信作者 (Corresponding author)

发生点蚀和选择性腐蚀, 导致其发生不均匀溶解的现象^[4-5], 甚至引起 DSS 管材在短时间内失效, 给舰船管路带来了极大的安全风险。同时, 由于双相不锈钢具有多相复杂组织结构^[6-10], 当其中一相为弱相时, 腐蚀就可能会在弱相上发生^[11-12]。因此, 深入理解 DSS 在各种因素下发生点蚀和选择性腐蚀的机理, 成为科研人员的研究重点。

1 双相不锈钢点蚀的相关研究

点蚀是金属表面的局部地区发生的腐蚀, 一旦形成这种腐蚀, 短期内可以使金属材料穿孔^[2]。双相不锈钢点蚀发生的主要原因由内因和外因 2 个方面, 内因指不锈钢的合金成分 (Cr、Ni、Mo、C、N 等元素) 和组织结构 (晶粒尺寸、夹杂物、两相组织分布比例等), 而外因是环境介质成分 (温度、溶液组成、外加电位等) 方面。

元素对 DSS 的耐蚀性有重要影响, 有研究表明, C、P、S 和非金属夹杂物等对 DSS 的耐点蚀性能会产生不利影响, 而 Si 和 W 等元素却有利于 DSS 耐点蚀能力的提高^[13]。另外, 材料中 Cr、Mo、N 可作为金属耐点蚀能力的评估元素, 赋予这些元素一定的权重, 被称为耐点蚀值 (PREN) 方法, PREN 被定义为: $PREN = Cr(\%) + 3.3Mo(\%) + 16N(\%)$ ^[14], 可有效评价 DSS 的点蚀敏感性, PREN 值越大, 耐点蚀能力越强。

PREN 虽然能够从材料部分元素含量的角度分析 DSS 的耐点蚀能力, 但晶粒尺寸、合金元素分配、组织比例变化却不能从 PREN 中体现, 而这些恰好是影响双相不锈钢腐蚀关键问题, 特别是海水环境中高 Cl^- 浓度和高温作用, 往往会影响钝化膜的溶解、再生速率, 发生钝化膜局部破坏, 造成腐蚀的发生。因而, 在 DSS 海洋环境自适应研究中, 除元素组成外, 相比其他因素对双相不锈钢点蚀的影响, 两相组织晶粒大小、铁素体和奥氏体两相组织比例、海水温度、钝化膜的变化均对其耐点蚀性能的影响更为关键。

1.1 晶粒大小对 DSS 点蚀的影响

DSS 中不同的组织会显示不同的晶粒大小, 而晶粒大小对其耐蚀性有重要影响。Qiu 等^[15]指出, 2205DSS 中, 铁素体主要是(001)平面晶粒, 塑性差较差; 而奥氏体以(111)平面晶粒为主, 塑性和择优取向较好。固溶温度升高, 铁素体含量增加, 奥氏体含量减小, 双相不锈钢组织发生再结晶和晶粒长大。在晶粒结晶和长大的过程中, 虽然铁素体与奥氏体中 Cr、Ni 元素发生均匀化^[16], 但组织晶粒经常出现大小不一的特征^[17-20], 而晶粒大小对其耐蚀性有较大影响^[21-22]。曹欣锋等^[23-24]指出, 2205 双相不锈钢随着固溶处理时间的延长, 铁素体和奥氏体相发生了晶粒粗化。在 1 mol/L H_2SO_4 +1 mol/L NaCl 溶液中进行耐

蚀性测试, 虽然发现其耐蚀性随着晶粒粗化而降低, 但铁素体相耐蚀性随晶粒粗化呈降低趋势, 而奥氏体相耐蚀性随晶粒粗化呈先升高、后降低的趋势, 出现耐蚀性变化不一致的现象。贾传宝^[25]指出, 超级双相不锈钢 (SDSS) 2507 采用穿孔等离子弧焊 (K-PAW), 在接头中焊缝区 (WM) 得到了较小晶粒尺寸的组织, 其耐点蚀性能与母材相当, 而热影响区 (HAZ) 形成了粗大的铁素体晶粒, 恶化了其耐点蚀性能。刘泽辉等^[26]指出, 18.7Cr5.8Mn1.0Ni0.23N 节镍型双相不锈钢, 在 1050 °C 下, 0.1、1 s⁻¹ 变形时, 奥氏体相再结晶细化有利于钝化膜稳定性和致密性的增强, 增大了耐晶间腐蚀性, 铁素体相晶粒细化则有利于自身钝化。Heon 等^[27]研究了在含 Cl 的水溶液中, 通过冷轧退火处理后的双相不锈钢晶粒尺寸减小, 钝化膜中点缺陷密度减小, 厚度却增加, 膜中 Cr 阳离子分数增加, 抗点蚀性能明显增强。

虽然晶粒细化可以促进 DSS 的耐蚀性提高, 但是晶粒尺寸的变化, 往往伴随着组成元素的重新分布, 各相元素含量和构成重新分布也会对 DSS 的耐蚀性产生重要影响。因此, 上述研究中有关 DSS 耐蚀性变化是由晶粒大小引起, 还是由组成元素重新分布引起的不是特别明确, 需要更加深入地研究在晶粒大小变化而组成元素不变的情况下, DSS 耐蚀性变化的特点。

1.2 组织变化对点蚀影响

与单相奥氏体、铁素体不锈钢相比, 双相不锈钢因有多相组织结构而导致其局部腐蚀过程更加复杂。各相组织的 PREN 值越大, DSS 的耐点蚀性能就越好。研究发现, DSS 随着相组织变化, 其耐蚀性会随之改变, 特别是第二相、铁素体和奥氏体两相比比例变化对其耐点蚀性能的影响较为显著。

现实中, DSS 各相合金元素的溶解度存在差异和偏析, 因而各相 PREN 并不是总是随固溶温度升高而增大, 尤其是铁素体和奥氏体组织的 PREN 值, 随着固溶温度增大, 两者变化趋势恰好相反。Bernhardsson 等^[28]根据 PREN 计算得出, 在 2 条 PREN 曲线交叉的地方存在最佳退火温度。采用这种方法, 在特超级双相不锈钢 S33207 工业生产中, 提出选择 1100~1130 °C 温度范围进行固溶处理^[29]。

对 DSS 进行不同温度固溶处理后, 两相比比例、第二相以及合金元素等会重新分布, 而上述变化往往会导致其耐点蚀性能的改变。DSS 在 600~1000 °C 内进行固溶处理往往会出现二次相的沉淀, 二次相主要由碳化物、氮化物、 σ 相和 χ 相等组成^[30], 而二次相会耗尽周围的 Cr 和 Mo 相^[31-33], 形成了贫 Cr、Mo 区, 导致其耐蚀性降低。武栋才等^[34-35]指出, SAF2304 双相不锈钢在 600~800 °C 内, 析出相随着温度的升高先增加、后减小; 700 °C 是 SAF2304 析出相析出敏感

温度,铁素体 α 相和奥氏体 γ 相相界面析出相最多,对应的耐蚀能力最差;温度继续升高至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,析出相明显减少,耐蚀性能增强; $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着时效时间的增加,析出相更多,钝化膜越来越不均匀不致密,耐蚀性能越来越差。Kim等^[36]指出,UNS S32750在 $900\sim 1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内进行固溶处理时,会有二次相出现,降低了活化极化和临界点蚀温度,提高了腐蚀速率,耐蚀性降低。

随着固溶温度升高到 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,第二相析出物逐渐减少^[37],甚至消失,只剩下铁素体和奥氏体,有利于提高DSS的耐蚀性^[38]。吴忠忠等^[39]研究了超级双相不锈钢00Cr25Ni7Mo4N不同固溶温度下相组织变化规律,如图1a所示,在 $900\sim 1\ 020\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,有金属间化合物 σ 相析出,耐点蚀性能较差;而在 $1\ 040\sim 1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,固溶处理无金属间化合物 σ 相析出,耐点蚀性能明显提高。随着固溶温度升高,第二相析出消失,使DSS主要含有铁素体和奥氏体两相组

织^[40],且两相组织比例为1:1时,耐点蚀能力最好^[41-43],再提高固溶温度时,耐蚀能力下降。张建涛^[44]指出,2205双相不锈钢在 $975\sim 1\ 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,随着固溶温度升高,发生奥氏体 γ 相向铁素体 α 相转变,两相比比例趋于相同,不锈钢耐蚀性能提高。在 $1\ 075\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理2h后,耐蚀能力最强。进一步升高固溶温度或过度延长等温时效,会使双相不锈钢中铁素体含量过高,耐蚀性能下降。另外,双相不锈钢两相间的电偶腐蚀受两相比比例和组成相化学元素成分的双重影响,因此不同型号的DSS最佳耐点蚀温度也会不一样。曹欣锋^[23]指出,2205双相不锈钢在 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理后,主要为铁素体和奥氏体两相组织结构,如图1b所示。当温度为 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,两相比比例相近,双相不锈钢的耐电偶腐蚀性最佳。Zhou等^[45]指出,2101型贫双相不锈钢(LDSS)在 $1\ 000\sim 1\ 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶处理后,虽然其主要组织也是铁素体和奥氏体两相组织结构,但热处理温度在 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钝化行为最强,抗点蚀性能最高。

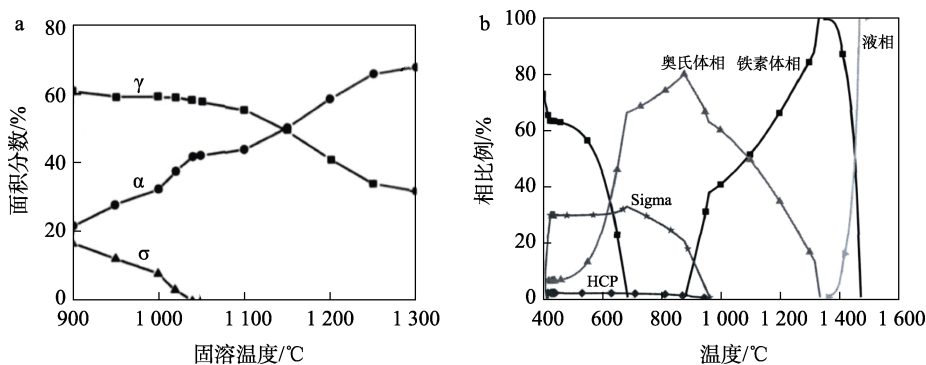


图1 00Cr25Ni7Mo4N^[39]、SAF2205^[23]双相不锈钢相平衡图

Fig.1 Equilibrium phase diagram of 00Cr25Ni7Mo4N^[39] and SAF2205^[23] duplex stainless steel

由此可以看出,固溶温度控制在 $600\sim 1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$,容易析出第二相,导致DSS耐点蚀能力较差;固溶温度控制在 $1\ 000\sim 1\ 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,可使DSS仅含有铁素体和奥氏体两相组织,耐点蚀性能可有效提升。因此,DSS耐点蚀最佳热处理温度既要无第二相析出,又要尽量保证两相组织比例相近和耐蚀元素重新分配更合理。现实应用过程中,能有效控制第二相的析出,但不同型号的DSS往往受组成相中化学元素成分不同的影响,导致耐点蚀最佳热处理温度存在一定的差异。针对新型DSS耐点蚀最佳热处理温度,还需结合其组织分布比例和组织中元素成分含量进行深入研究,才能找到最佳的耐蚀点。

1.3 钝化膜对点蚀影响

双相不锈钢之所以具有良好的耐腐蚀性能,是由于其表面容易生成了一层致密的钝化膜^[46-47],能有效隔离腐蚀介质与金属直接接触,从而实现耐蚀性强的特点。金属表面钝化膜具有半导体结构,其耐蚀性差异性主要由载流子浓度来实现。因此,DSS等金属的

耐蚀性能与其表面形成的半导体钝化膜结构和载流子浓度相关。根据点缺陷模型(PDM)理论^[48],当钝化膜为n型半导体时,为施主缺陷,载流子是带负电的自由电子, Fe^{2+} 空隙和氧空位是钝化膜主要缺陷形式;当钝化膜为p型半导体时,载流子是带正电的空穴,此时高价阳离子空位是主要的受主缺陷。故金属表面在腐蚀介质形成的钝化膜有缺陷时,就容易引起钝化膜破裂以及点蚀萌发,并且这种半导体钝化膜缺陷越严重时,载流子掺杂浓度越高,膜破裂和点蚀的可能性越高,材料的耐蚀性下降越严重^[49]。

一般来说,纯Fe上生成的钝化膜为n型半导体,纯Cr上生成的钝化膜为p型半导体^[23]。双相不锈钢等金属表面形成的半导体钝化膜的性能很大程度上依赖于其成分和结构,其成分主要为Cr、Fe、Ni、Mo、O等组成元素,组成内层是富铬p型半导体、外层为富铁n型半导体的两层氧化膜层^[50]结构,并以 Cr_2O_3 、FeO、NiO等氧化物的形式存在。当钝化膜中的Fe、Cr氧化物其中一类氧化物半导体占主导时,将决定其半导体类型。钝化膜半导体性质随着极化电位的升

高而改变^[51-53],呈 p 型或 n 型半导体特征。研究表明^[54],304 不锈钢表面的钝化膜在-0.5~0 V 极化电位范围呈 n 型半导体,钝化膜的主要成分包括 Cr_2O_3 、 CrO_3 、 Fe_2O_3 、 FeOOH 、 NiO 等。陈旭等^[55]指出,在 3.5%NaCl 溶液中,2205DSS 钝化膜半导体性能测试结果如图 2 所示。在线性区域 I,钝化膜在-1.00~-0.50 V 极化电位范围内呈 p 型半导体特性;在线性区域 II,钝化膜在-0.50~-0.30 V 极化电位范围内呈 n 型半导体特性;线性区域 III 为过渡区域;在线性区域 IV,即在 0.80~1.10 V,电位处于过钝化区间,钝化膜呈 n 型半导体。同时指出,2205DSS 钝化膜随成膜电位增加厚度增厚,但其钝化膜外层具有缺陷和多孔性特点,导致其钝化膜在 0.60 V 的成膜电位下致密性最好。随着成膜电位增加至 0.90 V 时,内层氧化物变为多孔,载流子浓度较高,钝化膜致密性退化,耐蚀性明显下降。

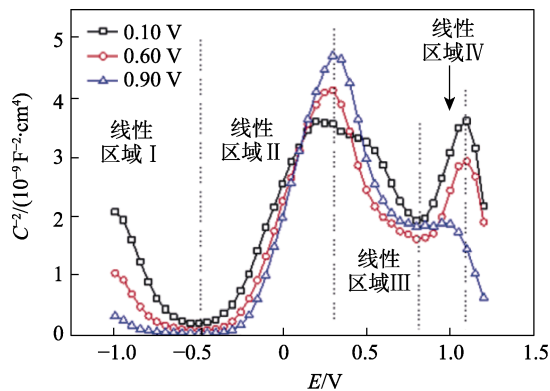


图 2 2205DSS 不同成膜电位下的 M-S 曲线^[55]
Fig.2 M-S curves of 2205DSS at different film forming potentials^[55]

半导体钝化膜不仅对外部腐蚀介质起到隔绝作用,而且对载流子的迁移也会有阻碍作用,使载流子浓度降低,实现金属的腐蚀速率减小^[56],从而提升 DSS 等耐点蚀性能。特别是 DSS 等不锈钢在钝化区电位内形成致密的钝化膜,可以实现载流子浓度降低,可有效增强 DSS 等金属的耐蚀性能;而在过钝化区电位成膜,钝化膜致密性明显下降,因而载流子浓度会升高,导致金属的耐蚀性变差^[57-58]。Fattah-alhosseini^[59]发现,在 H_2SO_4 溶液中,AISI316L 和 AISI321 不锈钢钝化膜的载流子浓度随其成膜电位的升高呈指数级下降,耐点蚀性能增强,而过钝化区电位成膜载流子浓度较高,容易导致不锈钢基体发生严重的局部腐蚀。

由此可知,DSS 钝化膜对金属的保护效果与半导体载流子浓度成反比,不同成膜电位会使钝化膜显示不同的半导体类型,导致耐蚀性有较大区别。目前,针对 DSS 自然成膜与不同钝化电位形成的钝化膜进行半导体结构和耐蚀性对比的研究较少,特别是对耐蚀性差异形成原因的研究更是缺乏。因此,要掌握自然成膜与钝化电位下形成的钝化膜耐蚀机理的差异,

以及耐蚀性与钝化膜载流子浓度变化关系,为后续 DSS 找到更好的成膜条件提供重要的理论基础。

1.4 介质温度对点蚀影响

因海水中溶解了多种无机盐、气体、有机物质和多种悬浮物,形成了一种组成成分复杂的电解质,极易引起不锈钢等金属的腐蚀。因季节变换、海水深度和地区差异等,会引起海水温度发生变化。另外,双相不锈钢管常被用作舰船冷凝管、消防管等海水管路,因其服役环境特点,管路中的海水温度会发生变化,极易促使双相不锈钢抗腐蚀性能产生差异^[60]。研究表明,温度是影响双相不锈钢耐蚀性能的重要因素之一^[61],适当的较高海水温度有助于金属表面钝化膜的形成,但如果海水温度过高,海水中溶解氧将会减少,并且钝化膜溶解加快,反而影响钝化膜的生成。与此同时,随着温度的升高,海水中的 Cl^- 等侵蚀性离子的破坏性却在增强,导致其表面氧化膜局部有加速破坏的风险。

随着腐蚀介质温度的升高到一定值,双相不锈钢等金属表面钝化膜的致密度会降低^[62-63],稳定性下降^[64],表面氧化膜载流子浓度增大^[65],缺陷增多^[66],耐蚀性均出现下降的趋势^[67]。不锈钢耐蚀性会随着温度升高耐蚀性存在差异^[68-70],特别是双相不锈钢随温度变化差异会更大。首先,DSS 存在临界点蚀温度,低于临界温度,其耐蚀性较好,高于临界温度时,其耐蚀性急剧下降^[71-72]。何进等^[73]指出,S32750 不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中,其临界点蚀温度为 71 °C,低于临界点蚀温度时,不锈钢表面能形成稳定的钝化膜;高于临界点蚀温度时,由于 Cl^- 的活性增加及钝化膜的溶解,不锈钢表面产生点蚀现象,且温度越高,点蚀越剧烈,形成点蚀形貌如图 3 所示。Zhao 等^[74]指出,2507SDSS 形成的钝化膜属于 n 型半导体,在任何情况下都主要由铁、铬的氢氧化物和氧化物组成。随温度的升高,钝化膜中的缺陷密度增加,导致钝化膜的防护性降低,并且其耐蚀性随海水浓度的增加而降低,临界点蚀温度也随之降低。其次,随着介质温度升高,其钝化膜组成结构会出现变化。Liu 等^[75]指出,2205DSS 暴露于地热环境中,150 °C 时钝化膜为非晶结构,主要为 Cr_2O_3 和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$;300 °C 时,腐蚀产物为纳米多晶结构,主要为 FeCr_2O_4 、 CrOOH 和 NiFe_2O_4 ,钝化膜结构发生变化,耐蚀性也会存在差异。随着介质温度升高,其腐蚀后的组织硬度值也会有较大变化。Saefuloh 等^[76]发现,在腐蚀性盐酸溶液中,AISI 不锈钢 304 (AISI SS304) 的腐蚀多以均匀腐蚀和部分点蚀的形式出现,组织结构完整性遭到破坏,且腐蚀后硬度值下降。加入稀有元素,可改善 DSS 相组织元素的组成,减弱海水介质温度升高对 DSS 腐蚀性能的影响。梁奕明等^[77]指出,在 3.5%NaCl 溶液中,虽然 Nb 质量分数为 0.1%的 2120

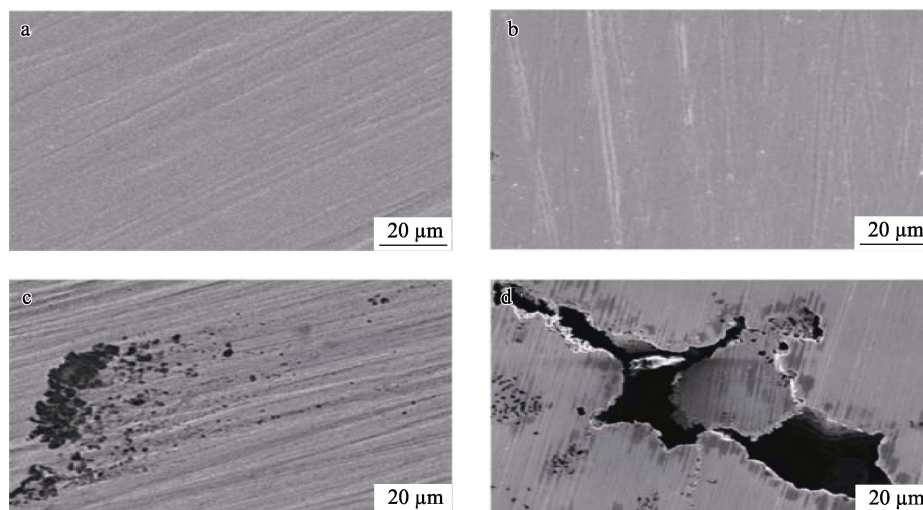


图3 S32750 不锈钢原始形貌 (a) 以及在 65 (b)、75 (c)、85 °C (d) 时 0.6 V 的腐蚀电位下腐蚀后形貌^[73]
Fig.3 SEM images of duplex stainless steel S32750 before corrosion (a) and after corrosion at 65 (b), 75 (c), and 85 °C (d) in NaCl solution at applied voltage of 0.6 V (vs SCE)^[73]

与未加入 Nb 元素的 2120 双相不锈钢表面钝化膜稳定性均随温度的升高而降低, 但含 Nb 的 2120 双相不锈钢的点蚀电位相对更高, α 相含量增加, 且基体上有富 Nb 相析出, 其耐蚀性有所增强。因此, 随海水介质温度的升高, DSS 的临界点蚀温度和耐点蚀性能会有差异, 虽然可以通过添加稀有元素来增强其耐蚀性, 但缺乏分析随着介质温度升高后, 海水中氧气溶解度、Cl⁻活性以及金属腐蚀产物溶解度等协同作用对其耐蚀性的影响。

2 双相不锈钢选择性腐蚀的相关研究

多组分材料会形成多个相组织结构, 不同的相组织的腐蚀速率会存在差异。阳极曲线仅给出关于整个试样表面上的平均溶解速率信息, 而其局部独特的腐蚀信息往往只能通过曲线的局部变化来解析。DSS 两相结构意味着它们的腐蚀行为会有一些特殊特征, 其阳极极化曲线的局部变化, 必定是铁素体相或奥氏体相不同腐蚀速率引起的, 从而导致一个相的优先溶解, 引起了 DSS 表面状态发生改变^[78], 导致材料快速失效, 影响其服役周期。Kolotyryn 等^[79]指出, 多相材料的腐蚀行为相对比较复杂, 因为多相材料之间会相互影响, 即使是相同的成分材料, 也会呈现不同的相组织状态, 从而导致整个材料耐蚀性降低或者增强。经研究发现, DSS 中铁素体相或奥氏体相的优先溶解, 往往取决于其在介质中的电极电位和所处溶液的介质环境改变。

2.1 电极电位对选择性腐蚀的影响

在腐蚀介质不变时, DSS 等金属腐蚀是各相腐蚀的线性组合。Tsai 等^[80]指出, 在 2 mol/L H₂SO₄+0.5 mol/L HCl 混合溶液中, 2205 双相不锈钢 (DSS)

的极化曲线会出现 2 个不同峰, 实际上对应于单个奥氏体和铁素体相的各自阳极峰。DSS 极化曲线是相同极化电位下铁素体腐蚀速率和奥氏体腐蚀速率的线性组合。Symniotis^[81]指出, SAF2205 在 2 mol/L H₂SO₄+0.1 mol/L HCl 混合溶液中, 腐蚀速率与奥氏体和铁素体腐蚀的速率之和变化趋势相近, 如图 4a 所示, 均显示有 2 个局部变化点。在各不同腐蚀电位下, SAF2205 选择性腐蚀形貌与此电位下铁素体和奥氏体的腐蚀速率变化有很好的 consistency, 如图 4b~d 所示。

施加不同的极化电位, DSS 两相组织会以不同的溶解速率进行腐蚀, 使其呈现选择性腐蚀的特点。Tsai 等^[80]研究了 2205DSS 在 2 mol/L H₂SO₄与 0.5 mol/L HCl 溶液中选择性腐蚀的特点, 其在溶液中形成的极化曲线如图 5a 所示, 并指出阳极曲线上低电位峰对应的是铁素体阳极峰, 主要是铁素体组织腐蚀; 高电位峰对应的是奥氏体阳极峰, 主要是奥氏体组织腐蚀。Aldykiewicz 等^[82]在 1 mol/L H₂SO₄与 1 mol/L HCl 的混合酸性溶液中对 2205DSS 进行了原位研究, 通过模型计算和实验相结合验证了在两相电位下的溶解速率峰值, 进一步证实了腐蚀电流最大值出现在各相峰值电位处。陈学群等^[83]选择 2 mol/L H₂SO₄+0.5 mol/L HCl 混合溶液作为 2205DSS 的选择性腐蚀溶液, 在两相特征峰电位下进行腐蚀, 分别制备了 2 种化学成分几乎精确的单独相组成的样品, 两相组织如图 5b 所示, 实现了在不受相邻相影响的情况下, 直接测量每个组成相的电化学行为, 从而探索了 2 个组成相在不同溶液中的电偶腐蚀行为。

关于 DSS 的铁素体相在酸中优先溶解的机制, 还有一种解释是两相之间的电流作用可以导致铁素体相加速溶解。对 DSS 在 1 mol/L H₂SO₄和 2 mol/L H₂SO₄+0.1 mol/L HCl 的 2 种溶液中腐蚀研究表明^[80,84],

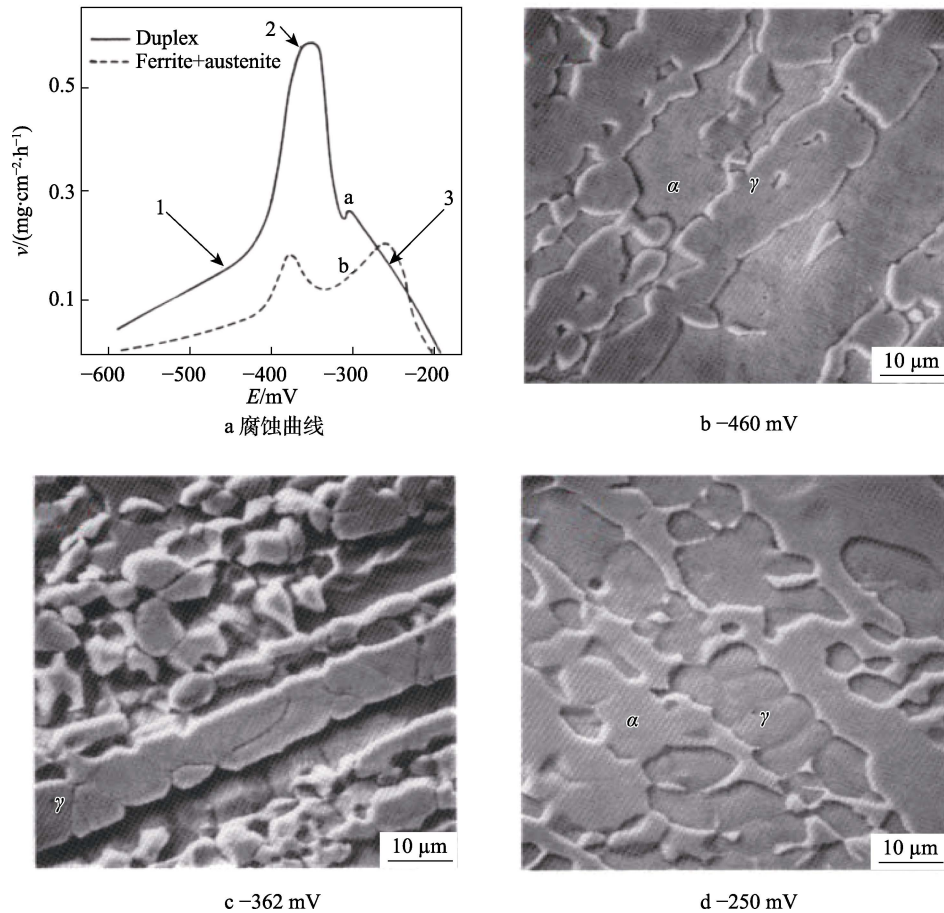


图 4 SAF2205、单个铁素体和单个奥氏体腐蚀曲线及不同腐蚀电位下的腐蚀形貌^[81]

Fig.4 Potentiostatic curves and corrosion morphology for SAF 2205 and corresponding ferritic and austenitic alloys at different corrosion potentials^[81]: a) corrosion curves; b) -460 mV; c) -362 mV; d) -250 mV

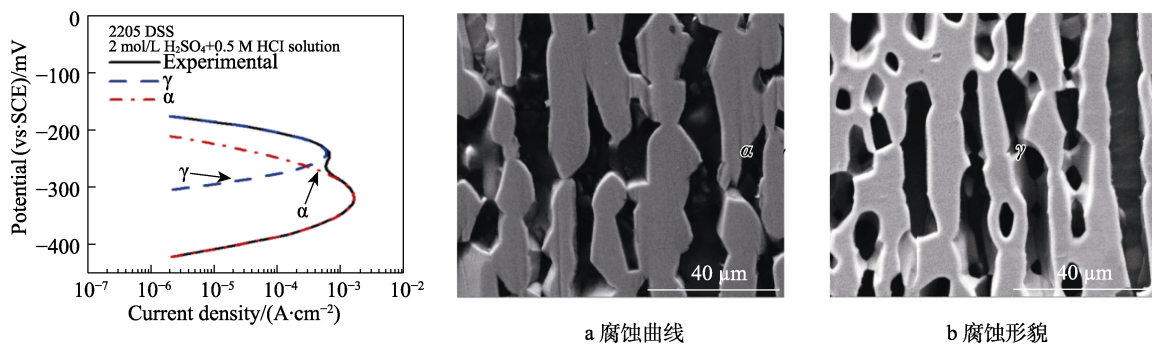


图 5 2205DSS 的铁素体和奥氏体腐蚀极化曲线^[80]和选择腐蚀形貌^[83]

Fig.5 Corrosion polarization curves^[80] and selective corrosion morphology^[83] of 2205DSS in ferrite and austenite: a) corrosion curves; b) corrosion morphologies

在自腐蚀电位附近, 阳极和阴极过程都以高速率发生, 阳极表面发生在铁素体相上, 而阴极表面(奥氏体相)上只有阴极反应, 为维持铁素体阳极相溶解, 必然使阳极铁素体腐蚀加速。

2.2 介质环境对选择性腐蚀的影响

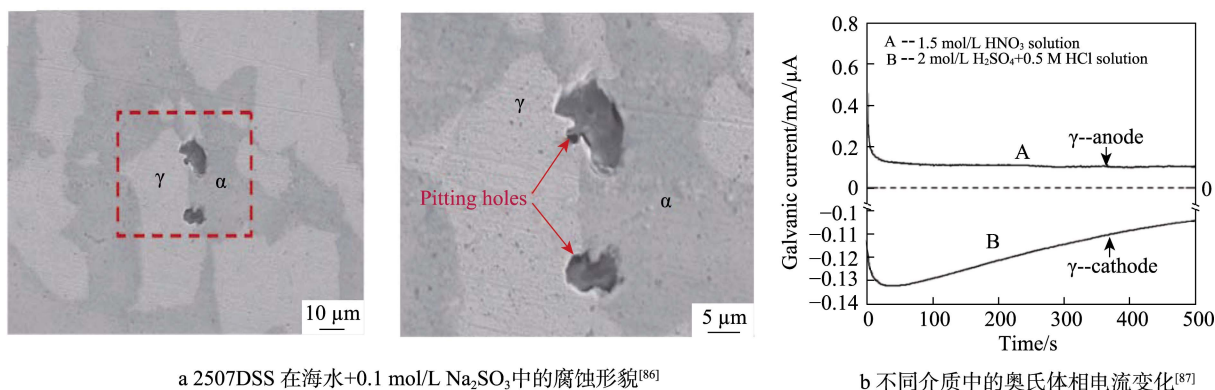
改变腐蚀介质的浓度, DSS 组织选择性溶解也会发生改变。Symnietis^[81]指出, SAF2205 双相不锈钢在酸性溶液中的腐蚀电位下, 铁素体 α 相、奥氏体 γ 相之间会产生电流, 这种电流在低 Cl^- 浓度和硫酸溶

液中加速 α 相溶解; 相反在高 Cl^- 浓度中, 铁素体 α 相、奥氏体 γ 相的腐蚀速度更加均匀, 并且与非耦合腐蚀速率相比, 耦合后奥氏体 γ 相存在对铁素体 α 相腐蚀有保护作用。DSS 选择性腐蚀电位在不同的腐蚀介质中会存在差异, 铁素体相在还原性酸中的优先溶解发生在腐蚀电位附近^[85], 而奥氏体相在氧化介质中的优先溶解发生在更高的腐蚀电位处。

改变酸性介质组分, DSS 选择性腐蚀会发生组织腐蚀反转现象。2507 双相不锈钢在人工海水环境中, 随着脱硫过程中溶液组分出现 SO_3^{2-} , HSO_3^- , DSS 发

生了选择性腐蚀,点蚀优先在 α/γ 相相界和 α 相区形核生长,点蚀孔从窄深型转变为宽深型,如图6a所示^[86]。在不同的介质中,两相组织腐蚀电流也会发生反转,腐蚀行为也会发生改变。2205DSS奥氏体在 HNO_3 溶液中为阳极,而在 $2\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4+0.5\text{ mol/L}$

HCl 混合溶液中暴露时变为阴极,如图6b所示^[87]。研究表明^[85],在 0.1 mol/L NaCl 溶液中,铁素体的电位高于奥氏体,奥氏体优先腐蚀;而在 $2\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4+x\text{ mol/L HCl}$ ($x=0\sim 2$)溶液中,在低阳极峰电位的铁素体 α 相优先发生腐蚀。



a 2507DSS 在海水+0.1 mol/L Na_2SO_3 中的腐蚀形貌^[86]

b 不同介质中的奥氏体相电流变化^[87]

图6 2507DSS 选择性腐蚀形貌与 2205DD 在不同介质中的奥氏体相电流变化

Fig.6 Selective corrosion morphology of 2507DSS and austenitic phase current changes of 2205DD in different media: a) corrosion morphology of 2507DSS in seawater+0.1 mol/L Na_2SO_3 ^[86]; b) changes of austenitic phase current in different solution^[87]

在腐蚀介质中添加其他还原性酸性介质, DSS 选择性腐蚀敏感性更强。DSS 在醋酸中有较好的耐蚀性,但加入其他还原性酸后,选择性腐蚀敏感性迅速展现。Invernizzi 等^[88]指出,双相不锈钢 SAF2205 和 SAF2507 都能在很宽的温度和浓度范围内经受醋酸溶液的腐蚀,但在醋酸溶液中加入 H_2SO_4 ,随着 H_2SO_4 浓度增加,腐蚀速率几乎呈线性增加,同时发现其奥氏体相优先发生腐蚀。

可以看出,目前研究只是分别研究了介质变化和电极电位对 DSS 选择性腐蚀的影响,而对于 2 种因素相互作用下对其选择性腐蚀相关的研究较少。另一方面,目前的研究并不一定适用于所有类型的 DSS 在酸中选择性腐蚀溶解过程,特别是不同元素含量组成的新型 DSS 材料,形成的相组织中元素含量存在差异,元素含量和成分差异对 DSS 选择性腐蚀规律的影响研究还需进一步深入研究。

3 结语

双相不锈钢因其具有铁素体和奥氏体两相组织,具有较好的耐蚀性特点,但在海洋环境和酸性环境中,还是会面临着各种腐蚀问题。因而,深入研究相关因素对其耐蚀性影响显得尤为重要,主要体现在以下方面:

1) 虽然双相不锈钢主要是由铁素体和奥氏体两相组成,即使在同一根管路中,轴向组织和径向组织的晶粒尺寸也会存在差异,从而出现耐蚀性差异。不同的热处理方式不仅会改变双相不锈钢两相比例,而且会改变合金元素在两相分配,这些改变对其耐蚀性

能会产生重大影响。另外,虽然通过 PREN 可以从 Cr、N、Mo 方面研究双相不锈钢的耐蚀性,但相形态和微观结构不均匀性的因素,以及晶粒大小变化及热处理后两相组织比例变化引起的 Mo、Ni 等元素重新分布对 DSS 耐点蚀性能的影响还没有解释清楚,需要给予更多关注。

2) DSS 表面形成的钝化膜具有半导体特性,钝化膜的缺陷、点蚀的萌发与载流子浓度有较大关系。采取极化电位的方法对 DSS 表面电化学成膜进行研究,以往更多的是关注外加电位对钝化膜载流子浓度变化及氧化物膜结构成分,缺乏外加电位对不锈钢成膜后点蚀规律和组织腐蚀演变的研究,缺乏 DSS 电化学方法成膜和自然成膜之间的成分和结构差异对 DSS 耐点蚀性能差异研究。

3) DSS 在含有侵蚀性 Cl⁻海水中,由于沉积物和腐蚀产物等造成的缝隙,会出现金属腐蚀后水解酸化自催化的过程,造成具有多相组织结构 DSS 特点极易发生选择性腐蚀。目前关于双相不锈钢选择性腐蚀更多的是关注单一的溶液介质组成或者电极电位的变化,需同时关注溶液介质和电极电位综合作用下的研究还不够,特别是出现水解酸化自催化后缝隙内产生选择性腐蚀探究更是缺乏。

参考文献:

- [1] 李亮, 帅美荣, 田恒光, 等. 基于孔型形状系数的双相不锈钢棒材宽展模型研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(2): 78-85.
LI L, SHUAI M R, TIAN H G, et al. Spreading Model of Duplex Stainless Steel Bar Based on the Shape Coeffi-

- cient of Pass[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(2): 78-85.
- [2] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.
- WEI B M. *Theory and Application of Metal Corrosion*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984.
- [3] 夏晓健, 万芯瑗, 严康骅, 等. 高温潮湿含氯环境中304不锈钢腐蚀失效分析[J]. *热处理技术与装备*, 2022, 43(2): 33-38.
- XIA X J, WAN X Y, YAN K H, et al. Analysis on Corrosion Failure of 304 Stainless Steel in High-Temperature and Humid Environment with Chlorine Ion[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2022, 43(2): 33-38.
- [4] ZHANG W, JIANG L Z, HU J C, et al. Effect of Ageing on Precipitation and Impact Energy of 2101 Economical Duplex Stainless Steel[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(1): 50-55.
- [5] SILVA D D S, SIMÕES T A, MACEDO D A, et al. Microstructural Influence of Sigma Phase on Pitting Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel/NaCl Electrolyte Couple[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 259: 124056.
- [6] 王祺, 王洪仁, 高丛塔, 等. HDR双相不锈钢的耐局部腐蚀性能[J]. *海洋技术*, 2009, 28(3): 67-72.
- WANG Q, WANG H R, GAO C J, et al. Localized Corrosion Resistance of HDR Duplex Stainless Steel[J]. *Ocean Technology*, 2009, 28(3): 67-72.
- [7] GARFIAS-MESIAS L F, SYKES J M, TUCK C D S. The Effect of Phase Compositions on the Pitting Corrosion of 25 Cr Duplex Stainless Steel in Chloride Solutions[J]. *Corrosion Science*, 1996, 38(8): 1319-1330.
- [8] PEZZATO L, LAGO M, BRUNELLI K, et al. Effect of the Heat Treatment on the Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(8): 3859-3868.
- [9] POHL M, STORZ O. Sigma-Phase in Duplex-Stainless Steels[J]. *International Journal of Materials Research*, 2022, 95(7): 631-638.
- [10] REDJAÏMIA A, PROULT A, DONNADIEU P, et al. Morphology, Crystallography and Defects of the Intermetallic X-Phase Precipitated in a Duplex ($\delta+\gamma$) Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(7): 2371-2386.
- [11] ZHENG J C, HU X J, PAN C, et al. Effects of Inclusions on the Resistance to Pitting Corrosion of S32205 Duplex Stainless Steel[J]. *Materials and Corrosion*, 2018, 69(5): 572-579.
- [12] ZHAO Y, ZHOU E Z, XU D K, et al. Laboratory Investigation of Microbiologically Influenced Corrosion of 2205 Duplex Stainless Steel by Marine *Pseudomonas Aeruginosa* Biofilm Using Electrochemical Noise[J]. *Corrosion Science*, 2018, 143: 281-291.
- [13] 艾建阳, 胡裕龙, 王皓, 等. 双相不锈钢及其焊接接头腐蚀研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(4): 77-91.
- AI J Y, HU Y L, WANG H, et al. Research Progress on Corrosion of Duplex Stainless Steel and Its Welded Joint[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 77-91.
- [14] ZHAO Y, ZHOU E Z, LIU Y Z, et al. Comparison of Different Electrochemical Techniques for Continuous Monitoring of the Microbiologically Influenced Corrosion of 2205 Duplex Stainless Steel by Marine *Pseudomonas Aeruginosa* Biofilm[J]. *Corrosion Science*, 2017, 126: 142-151.
- [15] RAN Q X, GUO J Y, ZHAO Z L, et al. Study on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel 2205 in Real Seawater Rich Containing Mold[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(7): 220723.
- [16] 袁傲明, 任学平. 固溶时效对1Cr₂₁Ni₅Ti双相不锈钢组织的影响[J]. *材料导报*, 2021, 35(S1): 443-446.
- YUAN A M, REN X P. Effect of Solid Solution and Aging on the Microstructure of 1Cr₂₁Ni₅Ti Duplex Stainless Steel[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S1): 443-446.
- [17] 冯志慧, 李建兴, 李静媛, 等. 铸坯取样位置对经济型双相不锈钢2101热塑性的影响[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(9): 1364-1371.
- FENG Z H, LI J X, LI J Y, et al. Influence of the Sample Position of the Cast on the Thermoplasticity of Lean Duplex Stainless Steel 2101[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(9): 1364-1371.
- [18] 孙广辛. 2205双相不锈钢中厚板搅拌摩擦焊工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- SUN G X. Study on Friction Stir Welding Process, Microstructure and Properties of 2205 Duplex Stainless Steel Plate[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [19] KAKINUMA H, AJITO S, KOYAMA M, et al. Microscopic Visualization of Hydrogen Diffusion in UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel: Roles of Crystal Structure and Grain Size[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 59: 866-873.
- [20] KOGA N, NOGUCHI M, WATANABE C. Low-Temperature Tensile Properties, Deformation and Fracture Behaviors in the Ferrite and Austenite Duplex Stainless Steel with Various Grain Sizes[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 880: 145354.
- [21] 李耀州. 微观结构对双相不锈钢耐蚀性影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI Y Z. Effect of Microstructure on Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [22] 丰涵, 王宝顺, 吴晓涵, 等. 022Cr₂₅Ni₇Mo₄N双相不锈钢等温处理中的组织演变[J]. *材料工程*, 2020, 48(1): 70-76.
- FENG H, WANG B S, WU X H, et al. Microstructure Evolution of 022Cr₂₅Ni₇Mo₄N Duplex Stainless Steel during Isothermal Treatment[J]. *Journal of Materials En-*

- gineering, 2020, 48(1): 70-76.
- [23] 黄玉婷. 相形貌对双相不锈钢抗氢脆性能影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
HUANG Y T. Effect of Phase Morphology on Hydrogen Embrittlement Resistance of Duplex Stainless Steel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [24] 曹欣锋. 2205 双相不锈钢局部腐蚀及钝化性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
CAO X F. Study on Local Corrosion and Passivation of 2205 Duplex Stainless Steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [25] 王琦. SAF 2507 超级双相不锈钢非熔化极电弧焊接接头组织性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
WANG Q. Study on Microstructure and Properties of Non-Melting Electrode Arc Welded Joint of SAF 2507 Super Duplex Stainless Steel[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [26] 刘泽辉, 杨银辉, 张凤珍, 等. 大变形热压缩 18.7Cr-5.8Mn-1.0Ni-0.23N 节镍型双相不锈钢的晶间腐蚀行为研究[J]. 材料导报, 2023, 37(12): 174-183.
LIU Z H, YANG Y H, ZHANG F Z, et al. Intergranular Corrosion Behavior of 18.7Cr-5.8Mn-1.0Ni-0.23N Economical Duplex Stainless Steel under Large Deformation Thermal Compression[J]. Materials Reports, 2023, 37(12): 174-183.
- [27] HA H Y, KANG J Y, LEE T H, et al. Effect of Grain Size on the Pitting Corrosion Resistance of Lean Duplex Stainless Steel[J]. Steel Research International, 2023, 94(2): 2200227.
- [28] BERNHARDSSON J C. Duplex Stainless Steels[M]. France: Beaune Bourgogne, 1991.
- [29] 卢伦, 李骥. 固溶温度对特超级双相不锈钢 S33207 组织及成分分布的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(6): 70-73.
LU L, LI J. Effect of Solid Solution Temperature on Microstructure and Composition Distribution of Hyper Duplex Stainless Steel S33207[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(6): 70-73.
- [30] DAINEZI I., BORGES S H, SOUSA LL de, MARIANO N A. Temperature and time effect of thermal aging treatment on microstructure and corrosion resistance of UNS S31803 duplex stainless steel[J]. Research, Society and Development, 2021, 10(8): e24910817369.
- [31] GUNN RN. Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications[M]. 1stEd. Cambridge: Abington Publishing, 1997.
- [32] DOS SANTOS D C, MAGNABOSCO R, DE MOURA-NETO C. Influence of Sigma Phase Formation on Pitting Corrosion of an Aged UNS S31803 Duplex Stainless Steel[J]. Corrosion, 2013, 69(9): 900-911.
- [33] ZHANG Z Y, ZHANG H Z, ZHAO H, et al. Effect of Prolonged Thermal Cycles on the Pitting Corrosion Resistance of a Newly Developed LDX 2404 Lean Duplex Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 189-195.
- [34] 武栋才, 韩培德. 中温时效处理对 SAF2304 双相不锈钢耐蚀性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(1): 51-56.
WU D C, HAN P D. Effects of Moderate Temperature Aging Treatment on Corrosion Resistance of SAF2304 Duplex Stainless Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(1): 51-56.
- [35] 孙涛. 典型不锈钢耐局部腐蚀性能改善的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
SUN T. Study on Improvement of Local Corrosion Resistance of Typical Stainless Steel[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [36] KIM D, CHUNG W, SHIN B H. Effects of the Volume Fraction of the Secondary Phase after Solution Annealing on Electrochemical Properties of Super Duplex Stainless Steel UNS S32750[J]. Metals, 2023, 13(5): 957.
- [37] 李欣, 吴华杰, 刘颖辉, 等. 固溶处理对铸态 2101 双相钢腐蚀性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 86-91.
LI X, WU H J, LIU Y H, et al. Effect of Solid Solution Treatment on Corrosion Performance of As-Cast 2101 Duplex Steel[J]. Special Steel, 2022, 43(5): 86-91.
- [38] 苗华军. 时效处理对超级双相不锈钢 00Cr₂₉Ni₆Mo₂N 组织和耐点蚀性的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 81-84.
MIAO H J. Effect of Aging Treatment on Microstructure and Pitting Corrosion Property of 00Cr₂₉Ni₆Mo₂N Super Duplex Stainless Steel[J]. Special Steel, 2021, 42(5): 81-84.
- [39] 吴忠忠, 宋志刚, 郑文杰, 等. 固溶温度对 00Cr₂₅Ni₇Mo₄N 超级双相不锈钢显微组织及耐点蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(8): 50-54.
WU Z Z, SONG Z G, ZHENG W J, et al. Effect of Solution Temperature on Microstructure and Pitting Corrosion Resistance Property of Super Duplex Stainless Steel 00Cr₂₅Ni₇Mo₄N[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(8): 50-54.
- [40] 李科, 林义民, 王飞, 等. 固溶处理对电弧增材制造超级双相不锈钢微观组织及摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2024, 44(7): 893-902.
LI K, LIN Y M, WANG F, et al. Effect of Solution Treatment on Microstructure and Wear Resistance of Directed Energy Deposited Super Duplex Stainless Steel[J]. Tribology, 2024, 44(7): 893-902.
- [41] 沈伟, 孙丽娟, 李长荣, 等. 固溶处理对 S32707 特超级双相不锈钢析出相、组织及性能影响[J]. 工程科学学报, 2021, 43(10): 1339-1345.
SHEN W, SUN L J, LI C R, et al. Solution Treatment Effect on Precipitates, Microstructure, and Properties of S32707 Hyper-Duplex Stainless Steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(10): 1339-1345.
- [42] FEDOROV A, ZHITENEV A, STREKALOVSKAYA D. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Corrosion Properties of Cast Duplex Stainless Steels[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 225: 01003.

- [43] LIU C L, WANG A Q, WANG H, et al. Effect of Solution Treatment Temperature on Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of 5A Super Duplex Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(15): 6622-6629.
- [44] 张建涛. 2205 双相不锈钢局部腐蚀与钝化性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
ZHANG J T. Study on Local Corrosion and Passivation of 2205 Duplex Stainless Steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [45] ZHOU Y Q, MAHMOOD S, ENGELBERG D L. Application of Bipolar Electrochemistry to Assess the Corrosion Resistance of Solution Annealed Lean Duplex Stainless Steel[J]. *Materials & Design*, 2023, 232: 112145.
- [46] KAWAMI K, KINOSHITA A, TAMAI H, et al. Corrosion Resistance of SUS 304 Stainless Steel Coated with a Passive Film by a Combination of Electropolishing and Chemical Oxidation/Cathodic Electrolytic Treatment[J]. *Journal of the Surface Finishing Society of Japan*, 2023, 74(5): 280-286.
- [47] LI X J, ZHANG M, YUAN B Y, et al. Effects of the Magnetic Field on the Corrosion Dissolution of the 304 SS | FeCl₃ System[J]. *Electrochimica Acta*, 2016, 222: 619-626.
- [48] CHENG Y F, LUO J L. A Comparison of the Pitting Susceptibility and Semiconducting Properties of the Passive Films on Carbon Steel in Chromate and Bicarbonate Solutions[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 167(1/2): 113-121.
- [49] 王成. 不锈钢表面电化学处理及耐腐蚀机理研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018: 23-45.
WANG C. Study on Electrochemical Treatment and Corrosion Resistance Mechanism of Stainless Steel Surface[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018: 23-45.
- [50] MACDONALD D D, URQUIDI-MACDONALD M. Theory of Steady-State Passive Films[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, 137(8): 2395-2402.
- [51] 汪轩义, 吴荫顺, 张琳, 等. 316L 不锈钢钝化膜在 Cl⁻ 介质中的耐蚀机制[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2000, 12(6): 311-314.
WANG X Y, WU Y S, ZHANG L, et al. Corrosion Behavior in 3.5% NaCl Solution of 316L Ss Passivated in an Oxidizing Acid Liquor[J]. *Corrosion Science and Technology Protection*, 2000, 12(6): 311-314.
- [52] 程学群, 李晓刚, 杜翠薇. 316L 和 2205 不锈钢在醋酸溶液中钝化膜的生长及其半导体属性的研究[J]. *科学通报*, 2009, 54(1): 104-109.
CHENG X Q, LI X G, DU C W. Study on Growth and Semiconductor Properties of Passivation Film of 316L and 2205 Stainless Steel in Acetic Acid Solution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1): 104-109.
- [53] WANG Z, ZHANG L, TANG X, et al. The Surface Characterization and Passive Behavior of Type 316L Stainless Steel in H₂S-Containing Conditions[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 423: 457-464.
- [54] 尹瀛月, 霍金星, 马玉财, 等. 成膜电位对 GH3536 在 NaNO₃ 溶液中钝化膜性能的影响[J]. *电加工与模具*, 2020(4): 31-35.
YIN Y Y, HUO J X, MA Y C, et al. Influence of Film Formation Potential on Passivation Film Performance of GH3536 in NaNO₃ Solution[J]. *Electromachining & Mould*, 2020(4): 31-35.
- [55] 陈旭, 杨佳星, 宋博, 等. 成膜电位对 2205 双相不锈钢在 NaCl 溶液中电化学行为的影响[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2020, 40(6): 52-58.
CHEN X, YANG J X, SONG B, et al. Effect of Film-Formation Potentials on Electrochemical Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2020, 40(6): 52-58.
- [56] 胡钢, 许淳淳, 张新生. 304 不锈钢在闭塞区溶液中钝化膜组成和结构性能[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2003, 30(1): 20-23.
HU G, XU C C, ZHANG X S. Composition and Structure of the Passive Film of 304 Stainless Steel in an Occluded Solution[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2003, 30(1): 20-23.
- [57] 沈荃, 王子明, 郑大江, 等. 钝化与过钝化状态下 304 不锈钢的点蚀行为研究[J]. *电化学*, 2020, 26(6): 808-814.
SHEN J, WANG Z M, ZHENG D J, et al. Pitting Behaviors of Passivated and Trans-Passivated 304 Stainless Steel[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2020, 26(6): 808-814.
- [58] 余翠兰, 张钰柱, 宋斌杰. 2507 双相不锈钢在海水脱硫环境中的腐蚀行为[J]. *材料热处理学报*, 2023, 44(1): 95-107.
YU C L, ZHANG Y Z, SONG B J. Corrosion Behavior of 2507 Duplex Stainless Steel in Seawater Desulfurization Environment[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(1): 95-107.
- [59] FATTAH-ALHOSSEINI A, SOLTANI F, SHIRSAIMI F, et al. The Semiconducting Properties of Passive Films Formed on AISI 316 L and AISI 321 Stainless Steels: A Test of the Point Defect Model (PDM)[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(10): 3186-3192.
- [60] 潘旭东, 王向明. 循环水中氯离子控制及对不锈钢腐蚀机理探讨[J]. *工业水处理*, 2013, 33(3): 14-16.
PAN X D, WANG X M. Control of Chloride Ions in Circulating Water and Influence on Stainless Steel Corrosion[J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(3): 14-16.
- [61] 马明玉, 崔君军, 刘后龙, 等. 介质温度对耐高温铁素体不锈钢点蚀行为的影响[J]. *材料与冶金学报*, 2021, 20(2): 130-135.
MA M Y, CUI J J, LIU H L, et al. Effect of Media Temperature on the Pitting Corrosion Behavior of Anti-High Temperature Ferritic Stainless Steel[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2021, 20(2): 130-135.
- [62] NITHIN RAJ P, SIVAN A P, SEKAR K, et al. Effect of Austenite Reformation on Localized Corrosion Resistance

- of Hyper-Duplex Stainless Steel in Hot Chloride Solution[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14(1): 167-178.
- [63] 林海波, 张巨伟, 李思雨. 温度对 316L 不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀行为的影响[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2019, 39(2): 54-58.
LIN H B, ZHANG J W, LI S Y. Effect of Temperature on Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution[J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2019, 39(2): 54-58.
- [64] 汪家梅, 陆辉, 段振刚, 等. 模拟压水堆二回路水环境中温度对 690 合金电化学腐蚀行为的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(2): 113-120.
WANG J M, LU H, DUAN Z G, et al. Effect of Temperature on Electrochemical Behavior of Alloy 690 in Simulated PWR Secondary Circuit Water[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(2): 113-120.
- [65] 陈宇, 陈旭, 刘彤, 等. 温度对 316L 不锈钢在硼酸溶液中腐蚀电化学行为的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2014, 35(4): 344-347.
CHEN Y, CHEN X, LIU T, et al. Effect of Temperature on Electrochemical Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Borate Buffer Solution[J]. *Corrosion & Protection*, 2014, 35(4): 344-347.
- [66] 敬加强, 骆俊, 张金钟. 碱性介质温度对 N80 油管钢钝化膜的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2018, 39(9): 694-697.
JING J Q, LUO J, ZHANG J Z. Effect of Temperature on Passive Films of N80 Oil Tube Steel in Alkaline Solution[J].
- [67] DE SOUZA L M, PEREIRA E, AMARAL T B D S, et al. Corrosion Study on Duplex Stainless Steel UNS S31803 Subjected to Solutions Containing Chloride Ions[J]. *Materials*, 2024, 17(9): 1974.
- [68] 高磊, 王保成. 温度对 SUS304 与 SUS430 不锈钢耐腐蚀性及其钝化膜半导体性能的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2015, 46(3): 268-273.
GAO L, WANG B C. Influence of Corrosion Behaviors and Semiconductor Properties for Passive Film of SUS304 and SUS430 Stainless Steel by Temperature[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2015, 46(3): 268-273.
- [69] 龚利华, 张波, 王赛虎. 超级双相不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. *焊接学报*, 2010, 31(7): 59-62.
GONG L H, ZHANG B, WANG S H. Corrosion Resistance of Superduplex Stainless Steel Welded Joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(7): 59-62.
- [70] 聂向晖, 杜翠薇, 李晓刚. 温度对 Q235 钢在大港模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2008, 29(4): 171-174.
NIE X H, DU C W, LI X G. Corrosion of Q235 in Dagang Simulated Solution at Different Temperatures[J]. *Corrosion & Protection*, 2008, 29(4): 171-174.
- [71] SERAFIM F M F, ALABI W O, OGUOCHA I N A, et al. Stress Corrosion Cracking Behavior of Selected Stainless Steels in Saturated Potash Brine Solution at Different Temperatures[J]. *Corrosion Science*, 2021, 178: 109025.
- [72] LIU X D, ZHU X H, LIU Z G, et al. Role of Cl/F Ions Concentration, pH and Temperature on Pitting Corrosion Behavior of 2507 Duplex Stainless Steel[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2731(1): 012053.
- [73] 何进, 晏敏胜, 杨丽景, 等. S32750 超级双相不锈钢在 NaCl 溶液中的临界点蚀温度及电化学腐蚀机理[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2015, 35(2): 106-112.
HE J, YAN M S, YANG L J, et al. Electrochemical Corrosion and Critical Pitting Temperature of S32750 Super Duplex Stainless Steel in NaCl Solution[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2015, 35(2): 106-112.
- [74] ZHAO K, LI X Q, WANG L W, et al. Passivation Behavior of 2507 Super Duplex Stainless Steel in Hot Concentrated Seawater: Influence of Temperature and Seawater Concentration[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2022, 35(2): 326-340.
- [75] LIU H F, SUN J B, QIAN J, et al. Revealing the Temperature Effects on the Corrosion Behaviour of 2205 Duplex Stainless Steel from Passivation to Activation in a CO₂-Containing Geothermal Environment[J]. *Corrosion Science*, 2021, 187: 109495.
- [76] SAEFULOH I, KANANI N, RAMADHAN F G, et al. The Study of Corrosion Behavior and Hardness of AISI Stainless Steel 304 in Concentration of Chloride Acid Solution and Temperature Variations[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1477(5): 052058.
- [77] 梁奕明, 何福善, 谢文煊, 等. 介质温度对含铌 2120 双相不锈钢点蚀性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(6): 762-767.
LIANG Y M, HE F S, XIE W X, et al. Effects of Medium Temperature on Pitting Corrosion of 2120 Duplex Stainless Steel Containing Nb[J]. *Special Casting & Non-ferrous Alloys*, 2022, 42(6): 762-767.
- [78] SYMNIOTIS E. Dissolution Mechanism of Duplex Stainless Steels in the Active-to-Passive Transition Range and the Role of Microstructure[J]. *Corrosion*, 1995, 51(8): 571-580.
- [79] BAGOTZKY V S. Ya.M. Kolotyrkin Advances in Physical Chemistry. Current Developments in Electrochemistry and Corrosion 1982 MIR Moscow[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1983, 158(2): 383-384.
- [80] TSAI W T, CHEN J R. Galvanic Corrosion between the Constituent Phases in Duplex Stainless Steel[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(9): 3659-3668.
- [81] SYMNIOTIS E. Galvanic Effects on the Active Dissolution of Duplex Stainless Steels[J]. *Corrosion*, 1990, 46(1): 2-12.
- [82] ALDYKIEWICZ A J JR, ISAACS H S. Dissolution

- Characteristics of Duplex Stainless Steels in Acidic Environments[J]. *Corrosion Science*, 1998, 40(10): 1627-1646.
- [83] CHENG X Q, WANG Y, DONG C F, et al. The Beneficial Galvanic Effect of the Constituent Phases in 2205 Duplex Stainless Steel on the Passive Films Formed in a 3.5% NaCl Solution[J]. *Corrosion Science*, 2018, 134: 122-130.
- [84] YAU Y H, STREICHER M A. Galvanic Corrosion of Duplex FeCr-10%Ni Alloys in Reducing Acids[J]. *Corrosion*, 1987, 43(6): 366-373.
- [85] J. Bj rkrøth, Svetsen. The different corrosion behavior of Duplex stainless steel[J]. *Corrosion Science*, 1986, 25(2): 23-25.
- [86] 寇晓培, 张钰柱, 余翠兰, 等. 2507 双相不锈钢在海水脱硫不同阶段的腐蚀钝化行为[J]. *材料热处理学报*, 2023, 44(7): 115-126.
- KOU X P, ZHANG Y Z, YU C L, et al. Corrosion and Passivation Behavior of 2507 Duplex Stainless Steel at Different Stages of Seawater Desulfurization[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2023, 44(7): 115-126.
- [87] TSAI W T, TSAI K M, LIN C J, et al. Selective Corrosion in Duplex Stainless Steel[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2003, 9(2): 170-176.
- [88] INVERNIZZI A J, SIVIERI E, TRASATTI S P. Corrosion Behaviour of Duplex Stainless Steels in Organic Acid Aqueous Solutions[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 485(1/2): 234-242.