

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.04

双相不锈钢的冲蚀行为及其影响因素研究进展

孙浩辰, 包晔峰*, 韦尚志, 范晨阳, 王子睿, 郭林坡, 曹冲, 武竹雨

河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213200

摘要: 冲蚀(erosion-corrosion)是材料在腐蚀流体中因高速相对运动而遭受破坏的现象,尤其在石油化工、船舶和管道输送等领域造成重大损失。双相不锈钢因其优异的耐蚀性和力学性能,成为研究冲蚀行为的理想材料。综述了双相不锈钢(DSS)在冲蚀条件下的研究现状,重点分析了显微组织、化学成分、热处理工艺和流体环境等因素对其冲蚀行为的影响。结果表明,DSS的耐冲蚀性能与其钝化膜的形成、两相比比例、析出相、力学性能以及流速、冲击角、颗粒物、温度和pH值等密切相关。通过合理调整合金成分,利用固溶处理、时效处理和表面改性等热处理工艺,可以有效提高DSS的耐冲蚀性能。最后,展望了DSS冲蚀研究未来的发展方向,包括深入研究腐蚀与冲刷磨损的交互作用机理,揭示“临界流速”的冲蚀机理,挖掘钝化膜的作用,以及开展DSS堆焊层和焊接接头的耐冲蚀性能研究。

关键词: 双相不锈钢; 冲蚀行为; 显微组织; 热处理工艺; 流体环境

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)04-0023-11

Research Progress on the Erosion-corrosion Behavior and its Influence Factors of Duplex Stainless Steels

SUN Haochen, BAO Yefeng*, WEI Shangzhi, FAN Chenyang, WANG Zirui, GUO Linpo, CAO Chong, WU Zhuyun

College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China

Abstract: Erosion-corrosion, characterized by the damage of materials due to high-speed relative motion in corrosive fluids, poses significant challenges in industries such as petrochemical, maritime, and pipeline transportation. Duplex stainless steel (DSS) is an ideal material for studying erosion-corrosion behavior due to its superior corrosion resistance and mechanical properties. This review summarizes the current research on DSS under erosion conditions, focusing on the impact of microstructure, chemical composition, heat treatment processes, and fluid environment on its erosion-corrosion behavior. The findings indicate that the erosion-corrosion resistance of DSS is closely related to the formation of its passive film, phase balance, precipitate formation, mechanical properties, as well as factors such as flow rate, impact angle, particulate matter, temperature, and pH. By optimizing alloy composition and employing heat treatment processes such as solution treatment, aging treatment, and surface modification, the erosion-corrosion resistance of DSS can be effectively enhanced. The review concludes with an outlook on future research directions, including a deeper understanding of the interaction mechanisms between corrosion and erosive wear, elucidating the erosion-corrosion mechanisms at "critical flow rates," exploring the role of passive films, and investigating the erosion-corrosion resistance of DSS weld overlays and welded joints.

Keywords: duplex stainless steel; erosion-corrosion behavior; microstructure; heat treatment; fluid environment

引用格式: 孙浩辰, 包晔峰, 韦尚志, 等. 双相不锈钢的冲蚀行为及其影响因素研究进展[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 23-33.

Citation: SUN Haochen, BAO Yefeng, WEI Shangzhi, et al. Research Progress on the Erosion-corrosion Behavior and its Influence Factors of Duplex Stainless Steels[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 23-33.

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879089); 江苏省自然科学基金(BK20241783)

作者简介: 孙浩辰(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事双相不锈钢及其焊接方面的研究。

通讯作者: 包晔峰(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事焊接材料及焊接设备方面的研究。E-mail: baoyf@hhuc.edu.cn。

0 引言

冲蚀(erosion-corrosion)是材料表面与腐蚀流体之间产生高速相对运动而引起材料损坏的现象。按照介质的不同,常将冲蚀分为单相流型、双相流型和多相流型三类。其中,单相流型的介质可为气体、固体或液体等单相腐蚀流体;双相流型的介质为气液,气固或液固等双相腐蚀流体;而多相流型的介质为固、气、液等相组成的多相腐蚀流体^[1]。冲蚀后材料表面的形貌一般表现为沟槽和凹坑,存在河流花样,并且腐蚀形貌与腐蚀流体的流向存在明显关系^[2-4]。冲蚀问题是石油化工、船舶、管道输送和水利等方面需解决的一大难题,在这些领域内,许多过流部件都极易遭受到冲蚀破坏,常见的有水轮机叶片、输送管道和舰船的螺旋桨等。冲蚀造成了设备使用寿命和效率的大幅下降,带来了部件服役时的巨大安全隐患,以及难以估量的经济损失。因此,非常有必要研发一种耐冲蚀的金属材料来应对极易发生冲蚀的应用环境,以降低冲蚀造成的安全危害和经济效益上的损失。

经过多年的理论研究和实际工程应用,双相不锈钢已被认为是一种具有优异耐蚀性的钢种,这与其表面形成的钝化膜存在非常密切的联系。研究表明,双相不锈钢的表面易形成致密的氧化物薄膜,能够将金属基体与腐蚀介质间隔开,使双相不锈钢表面与腐蚀介质的反应速率明显下降。这种由于金属表面的状态发生改变而使得金属表面材料的反应速率下降的现象被称为钝化^[5-6]。双相不锈钢的显微组织由铁素体(α)和奥氏体(γ)两相组成,一般来说较少相的含量不低于30%^[7]。由于其两相的组织特征,双相不锈钢兼具了铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的优点^[8]。与铁素体不锈钢相比,双相不锈钢的韧性更高、脆性转变温度较低、耐晶间腐蚀的性能和焊接性能也较好。而与奥氏体不锈钢相比,双相不锈钢则具有线膨胀系数小,耐氯化物应力腐蚀的性能优异等优点。双相不锈钢常作为化学容器,同时也被广泛应用于管道输送和船舶等领域^[9-11]。因此,开展针对双相不锈钢的冲蚀行为及其影响因素方面的研究,具有明确且重要的工程意义。

目前国内外针对冲蚀问题的研究较多,但针对

双相不锈钢这一特殊钢种的冲蚀问题的研究则较少,并且对这类工作的总结也缺乏系统性和针对性。本文较为详细地总结了冲蚀的研究方法、双相不锈钢的冲蚀行为及冲蚀的影响因素方面的研究进展,并展望了双相不锈钢冲蚀问题的研究方向。

1 冲蚀的研究方法

1.1 冲蚀试验装置

模拟冲蚀的试验装置主要有旋转式试验装置、管流式试验装置和喷射式试验装置^[1,12]。旋转式试验装置将试验材料放置于圆盘上,通过调速电机带动圆盘在流体介质中高速运动,来模拟流体介质的流动对试验材料的冲蚀。这种试验装置,设备简单、试验方便、成本较低、试验误差相对较小,而且可以配合电化学工作站进行电化学试验,因此使用广泛。旋转式试验装置的缺点主要有:试验过程中溶液会因旋转而形成涡流,导致流态变得复杂;溶液随试件一起运动会降低流体与试件的相对运动速度;冲击角难以控制^[13]。管流式试验装置通过将试验材料固定于管道中,利用循环泵使流体介质不断冲刷试验材料表面,模拟冲蚀试验。这种试验装置精度较高,能较好地模拟管道受液体冲刷的实际工况,易于控制各种参数,而且有良好的流体力学模型支持,但设备成本较高、试验条件要求较高、试验周期长、占用空间大^[14]。喷射式试验装置利用喷嘴将流体介质喷射到试验材料上,适用于研究流体流经复杂形状部件时的冲刷作用。它可以较为精确地控制流速、冲击角、固体颗粒物浓度等参数,试验周期短,但是不能较好地模拟实际工况^[12,15]。

1.2 冲蚀试验评价方法

失重法用被试材料在冲蚀前后的质量差来判断冲蚀的破坏程度^[12],可以较为直观、方便地计算冲蚀的总速率。旋转式、管流式和喷射式试验都可用失重法来评价冲蚀效果。任莹等人^[16]使用旋转圆盘试验模拟20号钢在油田中的冲蚀现象,用失重法评价冲蚀效果,发现砂粒粒径的增大和温度的升高对冲蚀的破坏有明显的促进作用。谢明^[17]等人使用喷射式冲蚀试验机,在模拟气田水环境中,采用失重法,研究了流速、含砂量、冲击角与L245M冲

蚀破坏程度之间的关系。

电化学技术在一定程度上能反映金属在冲蚀工况下的耐腐蚀性能。常用的电化学评价方法包括极化曲线和电化学阻抗谱等^[18-20]。Chung等人^[21]测试了双相不锈钢、耐磨钢和管线钢在不同氧气浓度下进行冲蚀实验时的极化曲线,指出双相不锈钢耐冲蚀性能优越的原因是双相不锈钢在冲蚀过程中能产生稳定的 Cr_2O_3 薄膜。张斌等人^[22]测试了304不锈钢在人工模拟海水冲蚀条件下的极化曲线,发现304不锈钢的自腐蚀电流密度随着温度的升高而增大,表明冲蚀速率随温度升高而加快。

冲蚀特征表征也是评价冲蚀试验结果的重要方法,该方法利用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、X射线衍射(XRD)和能谱仪(EDS)等手段,观察冲蚀后试样的表面形貌和腐蚀状况,分析腐蚀产物,来评价冲蚀试验结果^[23-24]。马爱利^[2]等人对B10铜镍合金管道的失效部位的SEM/EDS图像进行分析和处理,通过蚀坑微观形貌、腐蚀产物化学成分和晶粒状况等重要信息,评价了冲蚀的破坏程度,分析了冲蚀机理。金曦^[3]等人用光学显微镜和扫描电镜分析了冲蚀失效部件,观察到冲蚀表面形貌主要特征呈现沟槽、马蹄形状,与流体的流向有明显的位相关系;XRD分析发现,材料表面腐蚀产物主要由结构疏松的各种铁的氧化物组成,说明冲蚀过程中有腐蚀存在。姚新阳^[25]等人用金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜,分析了Co基合金层中硬质相 Cr_2Ni_3 、 AlCo 、 AlNi 的析出情况,以及对Co基合金层耐力学冲刷性能的影响。

冲蚀试验的主要评价方法如表1所示。

表1 冲蚀试验的主要评价方法

Table 1 The main evaluation methods of erosion-corrosion		
评价方法	具体措施	目的
失重法	测量材料冲蚀前后的质量差	计算冲蚀总速率
电化学技术	极化曲线和电化学阻抗谱	记录和监控冲蚀状况
冲蚀特征表征	SEM、EDS、TEM、XRD	了解冲蚀状况,分析腐蚀产物

2 双相不锈钢的冲蚀行为研究

冲蚀造成材料损坏有两种主要形式:冲刷磨损和腐蚀^[26]。冲刷磨损是颗粒物体冲击材料表面造

成磨损破坏的现象,这些颗粒物体可以是固体,也可以是液滴或气泡^[5]。腐蚀是材料与周围介质发生相互作用导致材料损失的过程。相关文献表明^[12,27-31],冲刷磨损和腐蚀具有交互促进作用。冲刷磨损对腐蚀的促进作用主要通过以下方式实行:一是使材料表面的钝化膜变薄和破裂,导致材料基体直接暴露于腐蚀介质中;二是加速传质过程,促进材料表面离子交换;三是通过能量差、塑性变形及位错聚集等方式形成原电池。腐蚀对冲刷磨损的促进作用主要是通过以下方式实行:一是溶解材料表面硬化层;二是降低材料的疲劳强度;三是使材料表面疏松多孔而易脱落。当冲刷磨损与腐蚀共同作用于材料时,造成的材料损坏总量大于二者单独作用时所造成的材料损坏量之和^[20,27]。材料的冲蚀总失重可表示为^[32]:

$$S=E+\Delta E+C+\Delta C \quad (1)$$

式中 S 为冲蚀作用引起的总质量损失; E 为纯冲刷磨损作用引起的质量损失; C 为纯腐蚀作用引起的质量损失; ΔE 为腐蚀对冲刷磨损促进作用引起的质量损失; ΔC 为冲刷磨损对腐蚀促进作用引起的质量损失^[12]。 $\Delta E+\Delta C$ 是冲刷磨损与腐蚀交互作用造成的质量损失。

Xiang等人^[33]使用失重法,并结合动电位极化曲线和SEM形貌观察,测试了SAF3207双相不锈钢的耐冲蚀性能,试验得到的SAF3207双相不锈钢的冲蚀失重率随时间变化曲线如图1所示,由图可见,冲蚀过程由孕育期、持续期和稳定期三个阶段组成。孕育期钝化膜尚未完全破裂,材料损伤轻微,

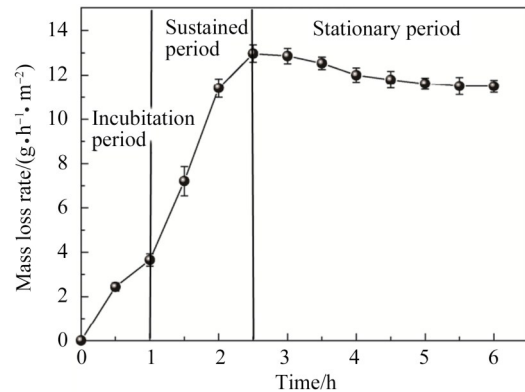


图1 SAF3207双相不锈钢的冲蚀失重率随时间变化曲线^[33]

Fig. 1 Curve of weightlessness rate of SAF3207 duplex stainless steel during the erosion-corrosion as a function of time

故失重率低,持续期材料失重率增加并达到最大值,稳定期材料失重率略微降低后保持稳定。材料失重的主要来源是铁素体相的破坏,在冲蚀过程中,铁素体相先形成较深的冲蚀坑和厚大挤压唇,冲刷一段时间后变成薄片,薄片上有小孔洞和裂纹,并且随着冲蚀试验的进行,裂纹延伸扩展,孔洞变大,薄片脱落。奥氏体相上先形成较浅的冲蚀坑和小而薄的挤压唇,冲刷一段时间后变成“带状”并且带有微孔和裂纹^[4,33]。相关文献表明^[30,33-35],孕育期时流体介质流动产生的机械作用对双相不锈钢的钝化膜造成了磨损,但是流体介质流动的同时也带来了氧的传输,使磨损的钝化膜得到再钝化修复。再钝化修复是双相不锈钢表面再度氧化生成钝化膜的现象,钝化膜的再钝化修复是双相不锈钢在孕育期损害轻微的原因^[36]。当钝化膜逐渐破裂,钝化膜的再钝化来不及修复冲蚀所造成的损伤,材料损伤加剧并开始脱落时,便进入冲蚀持续期,此时双相不锈钢遭受的破坏远大于在冲蚀孕育期。相关文献表明^[4,31,34],持续期时,冲刷磨损使材料产生塑性变形,并产生大量沟槽、凹坑和挤压唇,位错大量聚集,能量明显升高,腐蚀作用不断得到增强。腐蚀使材料疏松多孔而易脱落,两相基体融合,相界模糊。当加工硬化层几乎完全被去除时,便进入冲蚀稳定期,此时材料塑性变形最严重,冲蚀表面存在大量裂纹和孔洞^[4,33]。

结合以上分析可知,双相不锈钢的冲蚀行为与其本身的力学性能和耐蚀性息息相关。一般情况下,提高双相不锈钢的强度、耐磨性和塑韧性,以及提高双相不锈钢的耐蚀性,如耐点蚀能力,可以提高双相不锈钢的耐冲蚀性能。

3 双相不锈钢冲蚀行为的影响因素研究

3.1 显微组织的影响

双相不锈钢显微组织的影响主要体现在以下三个方面:(1)双相不锈钢的两相比例很大程度上影响了它的耐蚀性,两相比比例越接近1:1,耐点蚀性能越好,如果两相组织比例和分布不均匀,则会出现微区电位差变大的现象,电位差越大,产生原电池的倾向性越大,越容易产生电偶腐蚀^[37-38]。(2)双

相不锈钢析出相的存在阻碍了裂纹的扩展。同时, σ 相的适量析出,以及其他氮、碳化合物,都能钉扎位错,形成高密度位错网络的胞状结构,在一定程度上提高了双相不锈钢的硬度和耐磨性^[31,39],进而提高其耐冲蚀性能。(3)双相不锈钢中的奥氏体相为面心立方晶格,属于亚稳态结构,具有较低的层错能,在应力作用下会产生大量的位错增殖,同时不同滑移系也会因交互作用而产生交割,从而表现出较强的形变强化作用,提高了双相不锈钢的强度和耐磨性,从而提高了其耐冲蚀性能^[4,31,38]。

3.2 化学元素的影响

双相不锈钢化学元素的影响主要体现在:(1)C元素含量通常被控制在0.03%以内,这是由于过高的碳含量会导致碳化物的形成,降低双相不锈钢的塑韧性和耐蚀性^[40]。(2)Cr元素对表面钝化膜的影响很大,较高的Cr元素含量使双相不锈钢的表面形成致密的氧化膜,而且富Cr的氧化膜非常稳定,可以保护基体不再被氧化,起到阻碍腐蚀产物与基体组织直接接触的作用^[11,35]。(3)N元素是奥氏体稳定化元素,在双相不锈钢中添加适量的N元素可以提升钢的强度和韧性,改善其力学性能。李平^[31]发现添加适量N元素会使奥氏体相数量增加,双相不锈钢的韧性和形变强化能力增强,耐冲蚀性能增强。(4)Ressel^[41]等人发现虽然随着Cu元素含量增加,双相不锈钢中的奥氏体相含量增加,铁素体相含量降低,导致双相不锈钢的耐蚀性有所下降,屈服强度降低,但是因奥氏体相含量的增加,使双相不锈钢的形变强化能力得到了增强,在一定程度上反而增强了其耐冲蚀性能。(5)Ni元素是奥氏体稳定元素,它可以调节双相不锈钢中奥氏体相与铁素体相的比例,稳定不锈钢的奥氏体相,增强双相不锈钢表面的钝化能力^[42]。(6)Mo元素是铁素体稳定元素,Mo元素可以影响双相不锈钢中铁素体的含量,从而影响双相不锈钢的耐点蚀能力。王国华^[43]等人通过分析不同Cr和Mo质量分数的双相不锈钢的性能,发现Cr和Mo元素含量的提高,增加了双相不锈钢 σ 相析出敏感性。 σ 相是一种硬而脆的富含Cr、Mo元素的金属间化合物,其析出往往会造成析出区域附近贫Cr而成为腐蚀优先发生的区域,降低材料的塑韧性以及耐蚀性^[44],从而影响双相不锈钢

的耐冲蚀性能。

研究文献表明,可通过调整化学元素,来调整双相不锈钢的钝化膜的形成状况、两相比比例平衡、塑韧性、耐蚀性和耐磨性,从而改变双相不锈钢的耐冲蚀性能。

3.3 热处理工艺

双相不锈钢的固溶处理是将双相不锈钢加热到较高温度并保持,使析出相溶解到固溶体中后快速冷却的一种热处理工艺,它可以消除析出相,改善元素分布。相关文献表明^[45-48],合理调整固溶温度可以使双相不锈钢中无析出相析出,奥氏体与铁素体的相比比例接近 1:1,使双相不锈钢的综合性能最好。李平^[31]对 25 wt.%Cr 双相不锈钢进行固溶处理,发现固溶温度为 1 050 °C 时,耐冲蚀性能最好,因为此时两相比比例接近 1:1,较高的奥氏体相含量,使双相不锈钢的形变强化能力增强;1 300 °C 固溶处理时耐冲蚀性能最差,因为此时两相比比例相差较大,铁素体相的含量较高,铁素体相的形变强化能力不如奥氏体相。固溶处理温度对双相不锈钢冲蚀速率的影响如图 2 所示,其中 v_c 是纯腐蚀失重速率, v_e 是纯冲刷失重速率, v_s 是腐蚀和冲刷交互作用的失重速率, v_t 是总失重速率。

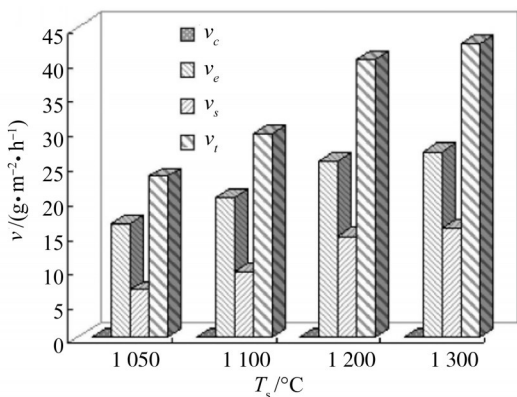


图2 固溶处理温度对25wt.%Cr双相不锈钢冲蚀速率的影响^[31]
Fig. 2 Effect of solution treatment temperature on erosion-corrosion rate of 25wt.%Cr duplex stainless steel

双相不锈钢的时效处理是指双相不锈钢经固溶处理或冷加工变形后,在室温或高于室温的条件下放置一段时间,使过饱和的固溶体分解产生析出相,进而改善其力学性能的一种热处理工艺。相关文献表明^[8,48-50],双相不锈钢在时效处理过程中随着时效温度和时效时间的不同,σ相、碳化物和Cr₂N等

析出相的析出数量不同,奥氏体相和铁素体相的分布情况也不同,进而影响双相不锈钢的耐蚀性与力学性能。李平等人^[31]发现 25 wt.%Cr 双相不锈钢在 1 050 °C 固溶,再进行 450 °C 时效处理后两相比比例较为均匀,耐冲蚀性能较好;550 °C 时效处理,析出相较多;800 °C 时效处理,σ 相析出最多,脆性加大,耐冲蚀性能较时效处理之前降低。虽然 σ 相析出在一定程度上提高了双相不锈钢的耐磨性,但是 σ 相析出过多会使双相不锈钢腐蚀倾向性增大。1 050 °C 固溶后不同时效处理温度对双相不锈钢冲蚀速率影响如表 2 所示。Kim 等人^[51]认为双相不锈钢在 850 °C 时效处理后,σ 相的大量出现导致的耐蚀性下降,是双相不锈钢耐冲蚀性能下降的原因。因此通过调整时效温度与时效时间,控制 σ 相适量析出,抑制其他有害二次相的析出,可以提高双相不锈钢的耐冲蚀性能。

表 2 时效处理温度对 25 wt.%Cr 双相不锈钢冲蚀速率的影响^[31]

Table 2 Effect of aging treatment temperature on erosion-corrosion rate of 25 wt.% Cr duplex stainless steel	
时效处理温度	失重速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$
不时效处理	36.326
450 °C×2 h 空冷	23.268
550 °C×2 h 空冷	26.216
800 °C×2 h 空冷	31.256

表面改性处理是一种仅对材料表面进行处理的技术,如渗氮、喷丸和激光处理等技术。离子渗氮是一种利用辉光放电现象,将含氮气体电离后产生的氮离子轰击零件表面加热并进行氮化,以获得表面渗氮层的热处理工艺。李小英^[52]等人证明了离子渗氮后双相不锈钢表面形成的氮化层增强了其耐磨损性能。Huang^[53]等人对 2205 双相不锈钢在 430 °C 下进行低温盐浴氮碳共渗处理,得到了未处理和不同氮碳共渗处理时间的样品的冲蚀速率,如图 3 所示。低温氮碳共渗处理可以提高双相不锈钢的耐磨损性能,处理 16 h 的试样耐冲蚀性能最好。40 h 的氮碳共渗会使大量脆性 CrN 在渗层中扩散,并使表层产生脆性,导致耐冲蚀性能下降。

3.4 流体环境的影响

3.4.1 流速的影响

流体介质的流速是产生冲蚀的重要参数之一,

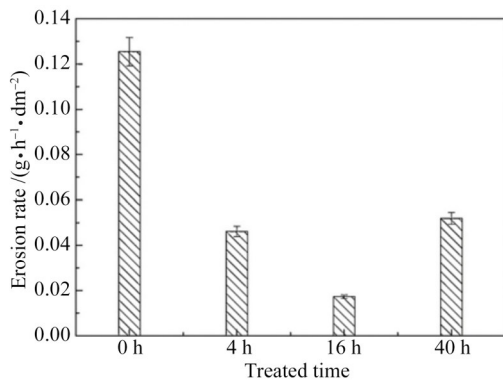


图3 氮碳共渗处理不同时间的2205双相不锈钢的冲蚀速率^[53]

Fig. 3 Erosion-corrosion rate of 2205 duplex stainless steel with different nitrocarburizing treatment times

流速的提高会加强冲刷磨损和腐蚀的交互作用^[36],即使式(1)中的 $\Delta E + \Delta C$ 变大,流速的提高也会加强冲刷对材料表面的机械作用。相关研究与文献表明^[30,34,36,54,55],双相不锈钢等易钝化材料的钝化膜在冲蚀过程中有再钝化修复功能,因此双相不锈钢在冲蚀过程中有“临界流速”现象,即当流速低于临界值时,材料损伤很小或基本没有损伤,一旦流速超过临界值,材料的损伤将急剧增大。材料在液固两相流条件下耐冲蚀性能的优劣,可以用“临界流速”的大小来评判^[36]。雍兴跃等人^[56]研究发现0Cr25Ni6Mo3CuN双相不锈钢在3.5 wt.% NaCl与5%河砂混合溶液中的临界流速为6.20 m/s。流速对双相不锈钢在溶液中冲蚀速率的影响如图4所示,其中 u 为介质流速, v 为双相不锈钢在混合溶液中的冲蚀速率。

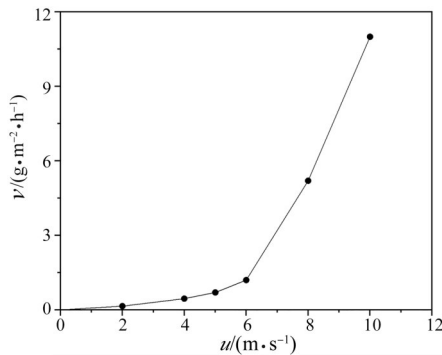


图4 流速对0Cr25Ni6Mo3CuN双相不锈钢冲蚀速率的影响^[56]

Fig. 4 Effect of flow velocity on erosion-corrosion rate of 0Cr25Ni6Mo3CuN duplex stainless steel

3.4.2 颗粒物的影响

颗粒物的影响主要在于颗粒物的硬度、棱角、质量、数量、粒径等参数^[57]。通常情况下,颗粒物硬

度越高,冲蚀破坏程度越严重;颗粒物棱角越多,切削破坏作用越大;颗粒物质量越大,惯性越大,冲蚀破坏程度越严重。Hussain^[30]等人发现,2205双相不锈钢的冲蚀损失量主要受流速与颗粒物的共同控制。Meng^[58]等人发现,对S31603双相不锈钢的冲蚀失重率贡献最大的是流速,其次是颗粒物浓度及流速和颗粒物的相互作用。Xiang^[33]等人通过试验得到,SAF3207双相不锈钢在流速为6 m/s的3.5 wt.% NaCl与2 wt.%~11 wt.%石榴石砂混合溶液中的失重率,如图5所示。他们发现随着含砂量增大,冲蚀速率增大,但当含砂量超过7 wt.%时,冲蚀速率降低。一般而言,固体颗粒的浓度越大,对材料的冲蚀破坏程度也越大,但当浓度提高到一定程度时,由于溶液的黏度因子、流动阻力、砂粒之间的回弹和碰撞数量均大幅增加,降低了颗粒物的总动能,使冲蚀速率降低,此效应被称为“屏蔽效应”^[59-60]。

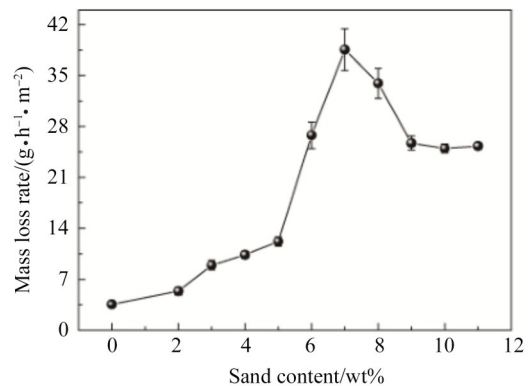


图5 SAF3207双相不锈钢在不同含砂量溶液中的失重率曲线^[33]

Fig. 5 Mass loss rate curve of SAF3207 duplex stainless steel in solutions with different sand contents

3.4.3 冲击角的影响

文献表明^[60-63],冲击角通过流体介质对材料表面作用的力影响冲蚀效果,这些作用力可分为具有撞击作用的垂直正应力和具有切削作用的水平切应力。当冲击角较大时,切应力作用较小,主要是正应力的撞击作用,使材料表面形成冲击坑和裂纹;当冲击角较小时,切应力作用较大,易使材料表面剥落。冲击角的作用机理如图6所示。Yi^[34]等人发现冲击角处于25°~50°时,中等的颗粒冲击角与较高的颗粒冲击速度对2205双相不锈钢造成了较大的冲蚀损伤;冲击角处于50°~85°时,冲蚀表面存在压痕,损伤较小;冲击角处于25°~50°时,损伤最小。刘景

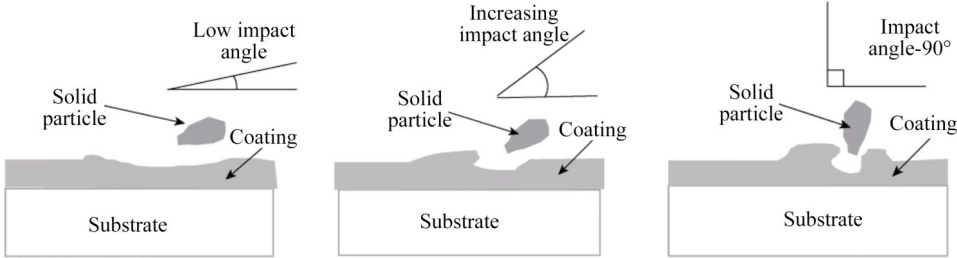


图6 冲击角的作用机理^[62]

Fig. 6 Action mechanism of erosion-corrosion angle

军^[64]等人研究了 0Cr25Ni6Mo3CuN 双相不锈钢在 3.5 wt.%NaCl 溶液中的冲蚀行为,冲击角试验表明存在一个临界切应力值(大约 145.0 N/m²),当表面切应力高于这个值时,冲蚀速率急剧增大。

综上可知,在特定环境中有一个特定的冲击角使切削和撞击的共同作用达到最大值,导致双相不锈钢的冲蚀速率达到最大值。因此可针对不同的冲蚀环境,设计特定的结构,避免双相不锈钢表面处于不利的冲击角位置,从而减少或避免冲蚀的危害。

3.4.4 温度的影响

一般情况下,温度越高,冲蚀的破坏越严重。温度对冲蚀的影响主要体现在以下 3 个方面^[20,62,65]: (1)温度的升高会提高腐蚀介质的扩散速率,增大热力学驱动力,加强腐蚀的作用;(2)温度的升高会使流体粘度降低,使粒子的总动能得到提高,加强冲刷磨损的作用;(3)温度的升高降低了氧的溶解度,对双相不锈钢表面钝化膜的形成有不利影响。

3.4.5 pH 值的影响

一般情况下,pH 值越低,冲蚀的破坏越严重。相

关文献表明^[66-67],溶液的 pH 值越低,冲刷磨损和腐蚀的交互作用越大。Moloto^[68]等人发现双相不锈钢的成膜能力在酸性条件下受到了不利影响。Kan^[69]等人证实了在低 pH 值环境下,H⁺含量的增加促进 Fe₃O₄的形成是双相不锈钢成膜能力降低的原因。

影响双相不锈钢冲蚀的因素总结如表 3 所示。

4 结论与展望

本文综述了双相不锈钢冲蚀的研究方法,和影响双相不锈钢耐冲蚀性能的因素。结合近年来的研究,提出了以下结论和展望:

冲蚀是一种腐蚀与冲刷磨损交互作用,破坏材料的现象。冲蚀试验装置主要有旋转式试验装置、管流式试验装置和喷射式试验装置,冲蚀试验评价方法主要有失重法、电化学技术和冲蚀特征表征。双相不锈钢的冲蚀行为研究表明,其耐冲蚀性能受到钝化膜的保护作用、奥氏体相的形变强化作用和流速、冲击角、颗粒物、温度、pH 值等流体环境因素

表 3 双相不锈钢的冲蚀影响因素总结

Table 3 Summary of erosion-corrosion influencing factors of duplex stainless steel

影响因素	指标	作用机理
显微组织和化学元素	显微组织	两相比比例平衡降低腐蚀倾向;析出相在一定程度上提高了耐冲蚀性能;奥氏体相的形变强化作用,提高了耐冲蚀性能 铁素体形成元素 Cr 和 Mo 以及奥氏体形成元素 C、Ni 和 N,影响钝化膜的形成,两相比比例平衡,钢的力学性能,进而影响耐冲蚀性能
	化学元素	
热处理工艺	固溶处理	合理调整固溶温度,消除析出相,使两相比比例接近 1:1,得到最佳的综合性能
	时效处理	适当的时效处理控制σ相适量析出,提高耐冲蚀性能
	离子渗氮	氮化层提高了材料耐冲刷磨损性能
	氮碳共渗	硬化层提高了材料耐冲刷磨损性能
流体环境	流速	流速的提高会加强冲刷磨损和腐蚀的交互作用,会加强冲刷的机械作用
	颗粒物	机械作用于材料表面
	冲击角	正应力的撞击作用和切应力的切削作用
	温度	温度的升高会提高腐蚀介质的扩散速率;降低流体粘度,提高粒子动能;降低氧溶解度,不利于钝化膜形成
	pH 值	pH 值越低,冲刷磨损和腐蚀的交互作用越大;pH 值越低,越不利于膜的形成

的影响。合理调整合金元素,利用固溶处理、时效处理和氮碳共渗等热处理工艺,可以提高双相不锈钢的耐冲蚀性能。

材料的力学性能是影响其耐冲蚀性能的重要因素,因此在采用电化学技术研究冲蚀现象时,可以尝试结合力学性能测试手段,进一步探索腐蚀与冲刷磨损相互作用的机理。产生“临界流速”的机理比较复杂,它不仅仅取决于流速大小,还与颗粒物和几何因素有很大关系,可以通过研究冲蚀过程中流速、颗粒物和冲击角之间的相互作用,建立冲蚀模型,来揭示“临界流速”的冲蚀机理。

双相不锈钢的耐冲蚀性能与其表面钝化膜息息相关,在以海洋为代表的腐蚀环境中,通过研究冲蚀过程中钝化膜成膜的影响因素,可以进一步挖掘钝化膜的作用,为提高双相不锈钢耐冲蚀性能提供理论基础。目前对于双相不锈钢堆焊层金属的耐冲蚀性能方面的研究,和双相不锈钢焊接接头的耐冲蚀性能方面的研究都较为缺乏,这也是未来值得探索的一个方向。

参考文献:

- [1] 郑玉贵,姚治铭,柯伟.冲刷腐蚀的研究近况[J].材料科学与工程,1992(03):21-26.
ZHENG Y G, YANG Z M, KE W. Research Status of Erosion Corrosion[J]. Materials Science and Engineering, 1992(03):21-26.
- [2] 马爱利,张亚明,姜胜利,等.船用焊接B10铜镍环失效分析[J].腐蚀科学与防护技术,2015,27(05):473-482.
MA A L, ZHANG Y M, JIANG S L, et al. Failure Analysis of B10 Copper Nickel Ring for Marine Welding[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015,27(05):473-482.
- [3] 金曦,周小杰,孙吉星,等.海上某平台增压泵出口管线短节腐蚀失效原因分析[J].涂层与防护,2021,42(06):34-38.
JIN X, ZHOU X J, SUN J X, et al. Analysis of the Causes of Corrosion Failure of a Short Section of Pipeline at the Outlet of a Pressure Pump on an Offshore Platform[J]. Coating and Protection, 2021,42(06):34-38.
- [4] 胡育瑞.特级双相不锈钢耐冲刷腐蚀性能的研究[D].福建:福州大学,2016.
HU Y R. Study on the Erosion Corrosion Resistance of Super Duplex Stainless Steel[D]. Fujian: Fuzhou University, 2016.
- [5] 曾晓雁.表面工程学(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [6] 樊学华,于勇,张子如,等.316L奥氏体不锈钢在不同电位下的点蚀和再钝化行为研究[J].表面技术,2020,49(07):287-293.
FAN X H, YU Y, ZHANG Z R, et al. Study on Pitting Corrosion and Repassivation Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel at Different Potentials[J]. Surface Technology, 2020,49(07):287-293.
- [7] 吴玖.双相不锈钢[M].北京:冶金工业出版社,1999.
- [8] KHOSHNAW F, MARINESCU C, SOFRONIA A, et al. Microstructural and thermoanalytical characterization of super duplex stainless steel-UNS S32760-F55[J]. Materials Today Communications, 2021,28:102644.
- [9] 王宗杰.熔焊方法及设备[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [10] VARGHESE P, VETRIVENDAN E, DASH M K, et al. Weld overlay coating of Inconel 617 M on type 316 L stainless steel by cold metal transfer process[J]. Surface & Coatings Technology, 2019,357:1004-1013.
- [11] ABDO H S, SEIKH A H, SAMAD U A, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Laser Welded 2205 Duplex Stainless-Steel in Artificial Seawater Environment under Different Acidity and Alkalinity Conditions[J]. Crystals, 2021,11(9):1025.
- [12] 李强,唐晓,李焰.冲刷腐蚀研究方法进展[J].中国腐蚀与防护学报,2014,34(05):399-409.
LI Q, TANG X, LI Y. Research Progress on Erosion Corrosion Research Methods[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2014,34(05):399-409.
- [13] YUAN Q L, STACK M M, CHI K N. Comparison and analysis of erosion-corrosion test apparatus IJR and RCE[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2005,12(4):54-59.
- [14] 王坤,吴敬权,邓培昌,等.管流式冲刷腐蚀实验装置的设计及性能试验[J].装备环境工程,2019,16(12):56-60.
WANG K, WU J Q, DENG P C, et al. Design and Performance Test of a Tube Flow Erosion Corrosion Experiment Apparatus[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019,16(12):56-60.
- [15] 姜胜利,郑玉贵,乔岩欣,等.高速喷射式冲刷腐蚀实验装置的研制及其实时动态电化学测试[J].腐蚀科学与防护技术,2009,21(05):489-491.
JIANG S L, ZHENG Y G, QIAO Y X, et al. Develop-

- ment and Real-time Dynamic Electrochemical Test of a High-speed Jet Erosion Corrosion Experiment Apparatus [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(05): 489-491.
- [16] 任莹, 赵会军, 周昊, 等. 粒径和温度对20号钢冲刷腐蚀协同作用的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(04): 508-516.
- REN Y, ZHAO H J, ZHOU H, et al. Effect of Particle Size and Temperature on the Synergistic Action of Erosion Corrosion of 20 Steel [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2021, 41(04): 508-516.
- [17] 谢明, 胡红祥, 邓希, 等. L245管线钢在饱和二氧化碳含砂流体中的冲蚀行为研究[J]. 安全、健康和环境, 2020, 20(11): 11-17.
- XIE M, HU H X, DENG X, et al. Research on Erosion Behavior of L245 Pipeline Steel in Saturated Carbon Dioxide Sand Fluid [J]. Safety, Health and Environment, 2020, 20(11): 11-17.
- [18] STACK M M, ABDULRAHMAN G H. Mapping erosion-corrosion of carbon steel in oil exploration conditions: Some new approaches to characterizing mechanisms and synergies [J]. Tribology International, 2010, 43(7): 1268-1277.
- [19] TIAN B R, CHENG Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil sand slurry. I: Effects of hydrodynamic condition [J]. Corrosion Science, 2008, 50(3): 773-779.
- [20] 朱娟, 张乔斌, 陈宇, 等. 冲刷腐蚀的研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(03): 199-210.
- ZHU J, ZHANG Q B, CHEN Y, et al. Research Status of Erosion Corrosion [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2014, 34(03): 199-210.
- [21] CHUNG R J, JIANG J, PANG C, et al. Erosion-corrosion behaviour of steels used in slurry pipelines [J]. Wear, 2021, 477: 203771.
- [22] 张斌, 柳秉毅, 薛忠亮, 等. 304不锈钢在高温高流速模拟海水中的耐冲蚀性能[J]. 材料保护, 2018, 51(11): 25-28.
- ZHANG B, LIU B Y, XUE Z L, et al. Erosion Resistance of 304 Stainless Steel in High Temperature and High Flow Rate Simulated Seawater [J]. Materials Protection, 2018, 51(11): 25-28.
- [23] 黄新民. 材料研究方法[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 2008.
- [24] 李亚东, 唐晓, 李焰. 焊接接头局部腐蚀的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(11): 158-165.
- LI Y D, TANG X, LI Y. Research Progress on Local Corrosion of Welded Joints [J]. Materials Review, 2017, 31(11): 158-165.
- [25] 姚新阳, 赵宇航, 姜胜利, 等. 316L不锈钢表面激光熔覆Co基合金层的耐冲刷腐蚀性能[J]. 材料保护, 2015, 48(06): 32-35.
- YAO X Y, ZHAO Y H, JIANG S L, et al. Erosion Corrosion Resistance of Co-based Alloy Cladding Layer on 316L Stainless Steel Surface by Laser Cladding [J]. Materials Protection, 2015, 48(06): 32-35.
- [26] STACK M M, CORLETT N, TURGOOSE S. Some thoughts on modelling the effects of oxygen and particle concentration on the erosion-corrosion of steels in aqueous slurries [J]. Wear, 2003, 255: 225-236.
- [27] WOOD R J K. Erosion-corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials [J]. Wear, 2006, 261(9): 1012-1023.
- [28] POULSON B. Complexities in predicting erosion corrosion [J]. Wear, 1999, 233: 497-504.
- [29] 阎永贵, 郑玉贵, 姚治铭, 等. 突扩管条件下材料的冲刷腐蚀机理研究II不锈钢[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000(05): 263-268.
- YAN Y G, ZHENG Y G, YAO Z M, et al. Study on the Erosion Corrosion Mechanism of Materials under the Condition of Sudden Expansion Tube: Stainless Steel [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2000(05): 263-268.
- [30] HUSSAIN E A M, ROBINSON M J. Erosion-corrosion of 2205 duplex stainless steel in flowing seawater containing sand particles [J]. Corrosion Science, 2007, 49(4): 1737-1754.
- [31] 李平. 酸性液固两相流中不锈钢冲刷腐蚀行为的研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2006.
- LI P. Research on the Erosion Corrosion Behavior of Stainless Steel in Acidic Liquid-Solid Two-Phase Flow [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [32] HARVEY T J, WHARTON J A, WOOD R J K. Development of synergy model for erosion-corrosion of carbon steel in a slurry pot [J]. Tribology-Materials, Surfaces and Interfaces, 2007(1): 33-47.
- [33] XIANG H, HU Y, CAO H, et al. Erosion-corrosion behavior of SAF3207 hyper-duplex stainless steel [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2019, 26(11): 1415-1426.
- [34] YI J Z, HU H X, WANG Z B, et al. On the critical flow

- velocity for erosion-corrosion in local eroded regions under liquid-solid jet impingement [J]. *Wear*, 2019, 422:94-99.
- [35] 董飞,张豪,吴智信,等.双相不锈钢的磨损腐蚀与空泡腐蚀研究进展[J].全面腐蚀控制,2009,23(01):16-18. DONG F, ZHANG H, WU Z X, et al. Research Progress on Wear Corrosion and Cavitation Corrosion of Duplex Stainless Steel [J]. *Comprehensive Corrosion Control*, 2009, 23(01):16-18.
- [36] ZHENG Z B, ZHENG Y G, ZHOU X, et al. Determination of the critical flow velocities for erosion-corrosion of passive materials under impingement by NaCl solution containing sand [J]. *Corrosion Science*, 2014, 88:187-196.
- [37] 包晔峰,胡网勤,蒋永锋,等.2205双相不锈钢焊接接头微区耐点蚀性能分析[J].焊接学报,2011,32(11):81-84. BAO Y F, HU W Q, JIANG Y F, et al. Analysis of Pitting Corrosion Resistance in Microzones of 2205 Duplex Stainless Steel Welded Joints [J]. *Welding Journal*, 2011, 32(11):81-84.
- [38] 付永宏,鲍崇高.耐腐蚀冲蚀的双相不锈钢研究与应用[J].铸造技术,2009,30(08):1002-1005. FU Y H, BAO C G. Research and Application of Duplex Stainless Steel with Corrosion and Erosion Resistance [J]. *Foundry Technology*, 2009, 30(08):1002-1005.
- [39] 路新春,姜晓霞,李诗卓,等.双相不锈钢腐蚀磨损机理初探[J].中国腐蚀与防护学报,1994(03):201-207. LU X C, JIANG X X, LI S Z, et al. Preliminary Study on Corrosion and Wear Mechanism of Duplex Stainless Steel [J]. *Chinese Journal of Corrosion and Protection*, 1994(03):201-207.
- [40] 王子睿,包晔峰.双相不锈钢堆焊层金属的空化腐蚀行为及影响因素研究进展[J].电焊机,2020,50(09):161-169. WANG Z R, BAO Y F. Research Progress on Cavitation Corrosion Behavior and Influencing Factors of Duplex Stainless Steel Surfacing Layer Metal [J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(09):161-169.
- [41] RESSEL G, GSELLMANN M, BRANDL D, et al. Copper and its effects on microstructure and correlated tensile properties of super duplex stainless steels [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2021:141544.
- [42] ILEVBAR G O, BURSTEIN G T. The role of alloyed molybdenum in the inhibition of pitting corrosion in stainless steels [J]. *Corrosion Science*, 2001(3):485-513.
- [43] 王国华. σ 相的析出对双相不锈钢组织性能的影响 [J]. *中国冶金*, 2011, 21(06):15-18. WANG G H. The effect of σ phase precipitation on the microstructure and properties of duplex stainless steel [J]. *China Metallurgy*, 2011, 21(06):15-18.
- [44] 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(4):77-91. AI J Y, HU Y L, WANG H, et al. Research progress on corrosion of duplex stainless steel and its welded joints [J]. *Surface Technology*, 2022(4):77-91.
- [45] ZIRUI W, YEFENG B, WEIKANG X, et al. Effect of Solution Treatment on the Cavitation Erosion Behavior of Mn-N Duplex Stainless Steel Coating [J]. *Tribology Transactions*, 2021, 64(5):936-942.
- [46] 谢秉鎬,包晔峰,许伟康,等.固溶处理对 Mn-N 型双相不锈钢堆焊层耐点蚀性能的影响 [J]. *电焊机*, 2021, 51(09):20-24. XIE B Q, BAO Y F, XU W K, et al. Effect of Solution Treatment on the Pitting Corrosion Resistance of Mn-N Type Duplex Stainless Steel Surfacing Layer [J]. *Electric Welding Machine*, 2021, 51(09):20-24.
- [47] 杨伟杰,孟文俊,李文军,等.固溶温度对 2205 双相不锈钢微观组织和摩擦磨损性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2022(02):138-142. YANG W J, MENG W J, LI W J, et al. Effect of Solution Temperature on Microstructure and Tribological Properties of 2205 Duplex Stainless Steel [J]. *Hot Working Process*, 2022(02):138-142.
- [48] 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 Solution Aging on the Microstructure of 1Cr21Ni5Ti Duplex Stainless Steel [J]. *Materials Review*, 2021, 35(S1):443-446.
- [49] 高晓丹,任学平,李晶琨,等.时效工艺对 2205 双相不锈钢 σ 相析出行为的影响 [J]. *金属热处理*, 2020, 45(10):1-5. GAO X D, REN X P, LI J K, et al. Effect of Aging Process on σ Phase Precipitation Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(10):1-5.
- [50] YANG J Y J, ZHANG T Z T, YU J Y J, et al. Microstructure characterization of duplex stainless steel welding joint with different solution and aging treatment. [J]. *Materials Science Forum*, 2010:376-379.
- [51] KIM Y J, KIM S W, KIM H B, et al. Effects of the precipitation of secondary phases on the erosion-corrosion

- of 25% Cr duplex stainless steel [J]. Corrosion Science, 2019, 152: 202–210.
- [52] 李小英, 田林海, 窦文博, 等. 经济型双相不锈钢的离子氮化及其组织结构和腐蚀磨损性能[J]. 中国表面工程, 2015, 28(03): 1–9.
- LI X Y, TIAN L H, DOU W B, et al. Ion Nitriding of Economic Duplex Stainless Steel and Its Microstructure and Corrosion Wear Performance [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(03): 1–9.
- [53] HUANG R B, WANG J, ZHONG S, et al. Surface modification of 2205 duplex stainless steel by low temperature salt bath nitrocarburizing at 430 degrees C [J]. Applied Surface Science, 2013, 271: 93–97.
- [54] Li L L, Wang Z B, He S Y, et al. Correlation between depassivation and repassivation processes determined by single particle impingement: Its crucial role in the phenomenon of critical flow velocity for erosion-corrosion [J]. Journal of Materials Science Technology, 2021, 89: 158–166.
- [55] WANG Z B, CA Y G Z. Critical flow velocity phenomenon in erosion-corrosion of pipelines: determination methods, mechanisms and applications [J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2021(1): 63–73.
- [56] 雍兴跃, 林玉珍, 刘景军, 等. 双相钢在流动中性含砂氯化物中的磨损腐蚀[J]. 金属学报, 2001(07): 745–748.
- YONG X Y, LIN Y Z, LIU J J, et al. Wear Corrosion of Duplex Steel in Flowing Neutral Sand Chloride [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001(07): 745–748.
- [57] LI L L, WANG Z B, HE S Y, et al. Correlation between depassivation and repassivation processes determined by single particle impingement: Its crucial role in the phenomenon of critical flow velocity for erosion-corrosion [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 89: 158–166.
- [58] MENG H, HU X, NEVILLE A. A systematic erosion-corrosion study of two stainless steels in marine conditions via experimental design [J]. Wear, 2006, 263(1): 355–362.
- [59] GREWAL H S, ARORA H S, AGRAWAL A, et al. Slurry Erosion of Thermal Spray Coatings: Effect of Sand Concentration [J]. Procedia Engineering, 2014: 484–490.
- [60] RASSE C, MARY N, ABE H, et al. Role of the Jet Angle, Particle Size, and Particle Concentration in the Degradation Behavior of Carbon Steel under Slow Slurry Erosion-Corrosion Conditions [J]. Metals, 2021, 11(8): 1152.
- [61] BURSTEIN G T, SASAKI K. Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of 304L stainless steel [J]. Wear, 2000, 240(1–2): 80–94.
- [62] 裴芮, 王勤英, 唐森, 等. 激光熔覆层冲刷腐蚀研究现状 [J]. 表面技术, 2019, 48(11): 179–187.
- PEI R, WANG Q Y, TANG M, et al. Research Status of Erosion Corrosion of Laser Cladding Layer [J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 179–187.
- [63] 胡宗武, 刘建国, 邢蕊, 等. 单相流条件下 90° 水平弯管冲刷腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(02): 115–122.
- HU Z W, LIU J G, XING R, et al. Study on Erosion Corrosion Behavior of 90° Horizontal Elbow under Single-phase Flow Conditions [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2020, 40(02): 115–122.
- [64] 刘景军, 林玉珍, 雍兴跃, 等. 铁素体/奥氏体双相钢在旋转单相流体中腐蚀的数值模拟 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003(05): 35–39.
- LIU J J, LIN Y Z, YONG X Y, et al. Numerical Simulation of Erosion-corrosion of Duplex Stainless steel in single-phase flow [J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2003(05): 35–39.
- [65] 魏木孟, 杨博均, 刘洋洋, 等. Cu-Ni 合金管海水冲刷腐蚀研究现状及展望 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(06): 513–521.
- WEI M M, YANG B J, LIU Y Y, et al. Research Status and Prospect of Erosion Corrosion of Cu-Ni Alloy Pipes in Seawater [J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2016, 36(06): 513–521.
- [66] KARAFYLLIAS G, GALLOWAY A, HUMPHRIES E. The effect of low pH in erosion-corrosion resistance of high chromium cast irons and stainless steels [J]. Wear, 2018, 420–421.
- [67] NEVILLE A, HODGKISS T, DALLAS J T. A study of the erosion-corrosion behaviour of engineering steels for marine pumping applications [J]. Wear, 1995(2): 497–507.
- [68] Moloto A, Seshweni M, Aribo S, et al. Application of Raman spectroscopy and X-ray diffraction to study the erosion-corrosion of UNS S32205 in mine water [J]. Materials Today-Proceedings, 2020, 28: 1273–1277.
- [69] KAN B, WU W J, YANG Z X, et al. Effects of hydrostatic pressure and pH on the corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2021, 886: 115134.