

高氯离子环境下化工管道不锈钢点蚀机理

李皓志(神华工程技术有限公司安徽分公司,安徽 合肥 230000)

摘要:在化工生产中,不锈钢管道因其优良的耐蚀性能被广泛应用,但在高氯离子环境下仍面临严重的点蚀风险。氯离子具有较强的渗透性和亲合性,能够破坏不锈钢表面的钝化膜,诱发局部阳极反应并加速微孔扩展,最终导致点蚀坑的形成与演化。本文分析了氯离子在金属/溶液界面上的吸附行为、扩散特征及其对钝化膜稳定性的削弱机制,阐释点蚀萌生、扩展与失稳破裂的微观路径。在此基础上,提出点蚀风险的评估思路及防控策略,包括材料设计、表面改性与环境调控等方法。研究表明,高氯离子环境下点蚀机理呈现复杂的界面电化学与微观组织耦合效应,只有通过机理层面的深入研究与多技术路径的协同优化,才能实现管道系统的长期安全运行。

关键词:高氯离子;不锈钢;点蚀机理;钝化膜;界面电化学

中图分类号: TG172.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)030-0163-03

Mechanism of stainless steel pitting corrosion in chemical pipelines under high chloride ion environment

Li Haozhi (Shenhua Engineering Technology Co. Hefei Anhui 230000, China)

Abstract: In chemical production, stainless steel pipeline is widely used because of its excellent corrosion resistance, but it still faces serious pitting corrosion risk in high chloride ion environment. Chlorine ions have strong permeability and affinity, which can destroy the passivation film on the surface of stainless steel, induce local anodic reaction and accelerate the expansion of micropores, and ultimately lead to the formation and evolution of pitting pits. This paper analyzes the adsorption behavior and diffusion characteristics of chloride ions at the metal/solution interface and its weakening mechanism on the stability of the passivation film, and explains the microscopic paths of pitting emergence, expansion and destabilization rupture. On this basis, the pitting corrosion risk assessment ideas and prevention and control strategies are proposed, including material design, surface modification and environmental control methods. The study shows that the pitting corrosion mechanism under high chloride ion environment presents complex interface electrochemical and microstructure coupling effect, only through the in-depth study of the mechanism and the synergistic optimization of multi-technology paths, can we realize the long-term safe operation of pipeline system.

Keywords: high chloride ion; stainless steel; pitting mechanism; passivation film; interface electrochemistry

化工管道中广泛使用的不锈钢材料长期处于多变的介质环境,其耐点蚀能力直接决定了管网运行的稳定性与服役寿命。大量工程实践与失效案例表明,高浓度氯离子对钝化膜的稳定性构成持续威胁,往往诱发局部腐蚀,成为制约设施安全的核心隐患之一。点蚀作为最具代表性的局部腐蚀模式,其发生过程涵盖膜层破裂、活性位点生成、电化学反应扩展及环境因子耦合等多个阶段。现有研究虽然在点蚀形貌与宏观表现方面积累了较多成果,但在机理链条的完整构建与跨尺度解析上仍存在空缺。基于此,本文对氯离子环境下点蚀的作用机制展开系统梳理,力图形成从微观吸附行为到宏观失效演化的全景框架,为合金设计与工程防控方案提供理论支撑与参考。

1 钝化膜破坏与氯离子作用机制

1.1 氯离子在金属表面的吸附与竞争反应路径

在高氯离子环境下,不锈钢材料常表现出孔蚀、间隙腐蚀及应力腐蚀开裂等局部破坏形式,其根源在于钝化膜稳定性的下降。该膜层主要由富铬氧化物及

少量羟基化合物组成,其防护作用依赖于致密结构与自修复能力。研究表明,氯离子由于半径较小、迁移速度快,能够快速抵达金属/膜界面,并与表面羟基或氧离子发生竞争吸附^[1]。这一过程直接削弱了膜层与基体的结合强度,使得局部防护屏障受到破坏。与此同时,氯离子的亲核反应活性使其更易与金属离子生成可溶性氯化物,从而诱导局部溶解反应加剧,在膜层表面形成不稳定区域,最终降低整体耐蚀性能。

1.2 钝化膜结构缺陷与局部膜溶解机理

钝化膜并非完全致密均质的屏障层,其内部常含点缺陷、空位、微裂纹以及杂质夹杂等薄弱区域,这些部位极易成为氯离子优先侵入的突破口。当氯离子渗入缺陷区后,会促使局部膜层发生溶解,使金属基体直接暴露于腐蚀介质中。此过程破坏了膜层的连续性,并在界面上造成化学与电化学条件的不均一分布。研究表明,缺陷通道可显著提升氯离子的迁移速率,使局部金属离子浓度在短时间内提高2~3倍,加速酸化环境的形成。随着溶解反应的持续,局部酸度不断

增强，削弱了钝化膜的再生能力。缺陷区的扩展与反应速率之间形成正反馈效应，使腐蚀演化呈现加速趋势，最终由微观损伤逐步演化为宏观可见的蚀坑。

1.3 氯离子穿透钝化膜的迁移与聚集规律

氯离子跨越钝化膜的过程并非单纯扩散，而是受电场驱动、化学势差以及聚集放大的协同影响。当不锈钢暴露于电解质环境中时，膜层两侧形成电位差，氯离子沿电场方向迁移并逐渐在能量较高的界面区域富集。晶界、相界及膜基结合薄弱部位通常表现为离子易聚集区，氯离子在此处持续积累，使局部电场强度进一步增加，进而吸引更多氯离子进入，形成明显的聚集放大机制。在这些聚集区域，氯离子与金属离子间的反应活性显著增强，大量生成的可溶性氯化物削弱了膜层稳定性，加速局部溶解与失稳。氯离子的迁移、聚集与反应的多重作用，共同推动膜层由局部薄化逐渐演化至完全破坏，这揭示了其行为并非单一扩散过程，而是多因素耦合驱动的结果^[2]。

2 点蚀萌生与电化学动力学特征

2.1 活性点形成与局部阳极反应加速效应

点蚀的初始阶段往往与表面活性点的生成密切相关，这些活性点通常位于钝化膜结构薄弱处，如夹杂物界面、位错交叉区域以及加工残余应力集中的位置。研究统计表明，不锈钢在腐蚀介质与拉应力共同作用下产生的应力腐蚀失效，其比例约占整体失效模式的45%。在上述敏感区域，氯离子易发生吸附与置换反应，削弱金属离子与膜层之间的结合力，使局部微区逐渐演变为阳极。当这些局部阳极被激活时，其溶解速率显著高于周围钝化区域，从而造成阳极与阴极分布的不均衡。随着溶解过程的持续，局部金属离子浓度快速升高，诱导溶液酸化和电场进一步增强，促进阳极反应的加速^[3]。由于局部阳极反应在时间与空间上表现出明显的非均匀性，该阶段往往难以通过宏观电化学参数直接识别，需要借助高分辨率的原位检测手段揭示其瞬态演化特征。

2.2 电荷转移阻抗变化与电化学噪声特征

在点蚀萌生阶段，电荷转移阻抗的变化常被用作揭示电化学动力学过程的关键信号。当钝化膜保持完整时，界面阻抗处于较高水平，阻抗谱在低频区呈现稳定的电容响应，体系整体处于受控状态。研究结果显示，一旦局部活性点生成并诱发阳极溶解，阻抗曲线在低频段会迅速下降，电荷转移速率明显加快，低频区阻抗值可降低约30%~40%。与此同时，电化学噪声表现出电流与电位的随机波动增强，这种波动主要源于活性点反复生成、扩展以及局部钝化的瞬态行为。

2.3 溶液化学环境对点蚀萌生阈值的影响

点蚀萌生阈值并非固定常数，而是受到溶液化学环境多重因素的共同制约。首先，高浓度氯离子会显著加剧界面反应竞争，使钝化膜再生能力不足，阈值因此明显下降。其次，pH值变化同样关键，在酸性条件下金属离子溶解倾向增强，活性点更易稳定转化为点蚀坑；而在碱性条件下，氧化膜的再生速度提高，萌生过程被有效延缓。再次，温度升高可加快氯离子的扩散速率并增强化学反应活性，从而进一步降低点蚀阈值。此外，研究还发现，溶液中的溶解氧、缓蚀剂及部分有机分子会通过影响阴极反应动力学或膜层稳定性，间接改变点蚀启动条件^[4]。这些规律表明，点蚀萌生阈值的演化并非单一变量决定，而是由离子迁移、电化学反应与膜层自修复等机制耦合驱动的动态过程。

3 点蚀扩展与微观组织演化规律

3.1 点蚀坑形态演变与界面电流密度分布

点蚀一旦发生，其扩展过程通常呈现高度局部化的形态变化。初始阶段，蚀坑表现为细小凹陷；随着局部金属离子加速溶解，坑体逐渐向纵深和周边扩展，形成杯状或锥形等不规则结构。此时，坑内溶解金属离子浓度不断积累，局部环境酸化显著增强，进一步强化了电化学反应的自催化效应，使钝化膜再生能力明显下降，坑底长期维持活性状态。另外，界面电流密度分布出现明显差异，坑底阳极电流远高于周边钝化区，电流密度集中效应显著。这一效应不仅加快了坑底溶解，还导致电场在坑口汇聚，使氯离子更易在缺陷处富集，从而推动扩展进一步加速。

3.2 合金元素作用下的点蚀扩展调控机制

不锈钢中合金元素的分布与作用方式对点蚀扩展过程具有显著影响。钼元素在其中起到重要作用，其存在能够在蚀坑内部生成稳定的钼氧化物，相应降低金属溶解速率，并在坑壁形成保护性沉积层，有效阻碍进一步扩展。氮元素通过固溶强化和界面活化作用提升膜层再生能力，在酸化环境下能减缓钝化膜的破坏。铬元素在蚀坑周围具有富集特征，形成富铬区后可增强钝化膜的局部修复能力，从而提高对扩展的抵抗力。相反，杂质元素或夹杂物常成为点蚀演化的薄弱环节，其存在削弱了膜层稳定性，使腐蚀路径趋于复杂化。总体来看，合金元素在点蚀扩展中表现出增强抗蚀性与诱发局部失稳的双重效应^[5]。

3.3 点蚀与微裂纹耦合的失稳扩展路径

当点蚀由萌生进入深度扩展阶段后，损伤模式逐渐转变，蚀坑与内部微裂纹的耦合作用成为主导失效机制。坑底金属不断溶解使局部承载力下降，应力在

几何突变处和组织不均区集中，从而增加裂纹萌生的概率；这些微裂纹多起源于坑壁或坑底，并沿晶界、相界或夹杂物边缘扩展，使腐蚀损伤与力学裂纹逐步叠加。与此同时，酸化作用和氯离子富集加速了演化过程，局部 pH 降低削弱晶界黏结力，金属抵抗塑性变形的能力减弱，而氯离子在裂纹尖端的聚集使钝化膜修复能力下降，裂纹得以保持活性并快速延伸。在化学作用与力学应力耦合作用下，裂纹与蚀坑逐渐连通，形成动态演化通道；在更大尺度上，其扩展方向与速度受应力场和微观组织的共同影响，析出相、夹杂物及晶界走向可能引导裂纹路径，最终导致裂纹呈现分支、汇合和偏折等复杂形态。

4 防控策略与寿命提升技术

4.1 合金设计与微合金化元素的优化路径

在高氯离子环境中，不锈钢点蚀的防控应首先落实在材料设计与合金成分优化环节。研究表明，铬含量的提升在表面形成富铬氧化膜层，为钝化膜提供稳定的再钝化能力，使其在局部损伤后能够迅速再生，从而有效延缓点蚀萌生。钼元素的引入在抗蚀性方面同样起到重要作用，其在蚀坑环境中易生成不溶性氧化物沉积，抑制坑底酸化过程的加剧，显著降低金属局部溶解速率^[6]。氮元素的贡献主要体现在固溶强化和界面修复两个方面，它既能提升晶格稳定性，也可增强钝化膜在酸性环境下的再生速度，使材料在高氯离子条件下维持较高的耐蚀阈值。微合金化策略为进一步优化提供了新的思路，稀土元素通过调控夹杂物的形态与分布改善材料内部缺陷，其作用体现在促进夹杂物球化和分散化，减少层状夹杂物的延伸趋势，从而阻断点蚀与裂纹连通的通道；同时，稀土氧化物可在局部环境中形成稳定保护层，改善钝化膜再生条件，降低界面能量不均，提升整体防护性能。

4.2 表面改性与功能化涂层的阻隔作用

在管道长期服役过程中，表面作为直接与介质接触的界面，其改性措施对点蚀防控具有关键意义。传统方法如等离子体喷涂、激光熔覆和离子注入，能够在不改变母材成分的条件下形成高致密度保护层，从而显著减少氯离子的渗透通道。随着研究的深入，功能化涂层逐渐成为提升防护性能的重要途径，通过引入氟化物、硅基材料或石墨烯复合结构，可在表面构建超疏水界面，使水膜难以持续存在，有效阻隔氯离子在局部的富集条件。进一步的发展方向集中在新型自愈合与纳米结构涂层上，前者在表面出现微裂纹或缺陷时，内部活性成分能够自动填补裂口，恢复保护效果；后者则依托纳米管阵列或纳米颗粒强化层，不仅提高了抗蚀能力，还在传感与修复功能上展现潜力，为实现涂层的多功能化应用提供了新思路。

4.3 介质环境调控与阴极保护协同方法

在点蚀防控中，除材料和表面工程措施外，介质环境与电化学调控同样发挥重要作用。常见方法包括在溶液中添加缓蚀剂，研究显示有机胺类和钼酸盐类分子能够在金属表面形成稳定吸附层，降低氯离子的竞争吸附能力，从而提高钝化膜的稳定性。与此同时，pH 值的调节也是关键途径，在偏酸性条件下容易促进金属溶解，而通过提升溶液碱度则可增强氧化膜再生速率，有效延缓点蚀萌生与扩展；阴极保护则作为一种成熟的外部电化学手段，通过在管道外壁施加阴极电流，使金属表面电位维持在点蚀阈值以下，从而避免局部活化反应的发生^[7]。

5 结语

高氯离子环境下不锈钢管道的点蚀问题是材料腐蚀科学与工程应用中的突出难题，研究显示其萌生阶段主要受氯离子在金属 / 钝化膜界面的吸附与迁移控制，对膜层缺陷的捕获加速了局部溶解与阳极反应，随着电化学活性增强，蚀坑逐步扩展，电流密度集中与酸化效应共同作用推动体系进入失稳状态。在防控路径方面，合金元素如钼和氮在延缓扩展中起到重要作用，表面改性与功能化涂层在阻隔氯离子渗透上表现突出，而缓蚀剂、pH 调控与阴极保护的结合则形成多机制协同的综合防护体系，为工程应用提供支撑。未来研究需要在多尺度模拟、实时监测与材料设计融合方面进一步推进，揭示点蚀机理的动态演化并建立寿命预测框架，通过机理解析与技术创新的协同发展，有望实现不锈钢管道在高氯离子环境下的长寿命与高可靠运行，为化工工程的安全与可持续发展提供参考。

参考文献：

- [1] 张党飞, 张永芳. 浅谈不锈钢设备氯离子腐蚀分析及问题处理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(12):106-107+109.
- [2] 李长岭. 氯离子对不锈钢材料点蚀的影响 [J]. 中国氯碱, 2021(09):20-21.
- [3] 赵振兴. 高矿化度高氯离子介质条件下的注水泵选材研究 [J]. 水泵技术, 2018(04):46-48.
- [4] 沈进琪. 高氯油对加氢高压换热器的影响及对策 [J]. 中国化工装备, 2014, 16(05):32-34.
- [5] 李辉, 姚月姣. 氯离子对不锈钢冷却水管道腐蚀的分析及研究 [J]. 工程建设与设计, 2024(13):65-67.
- [6] 王晓强, 吕伟超, 赵联瑞, 等. 在氯离子环境下不锈钢腐蚀原因分析和预防措施 [J]. 安装, 2019(09):38-40.
- [7] 陈龙, 瞿彧, 汤雁冰, 等. 不锈钢钢筋的临界氯离子浓度 [J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(05):446-449.