

循环水管道腐蚀成因与防护措施

王建勋 尚海 李浩 宋西平

中石化（河南）炼油化工有限公司，河南 洛阳 471012

[摘要]循环水管道作为关键输送设施，只有稳定运行才可提高生产效率、输送安全性、环保效果。由于管道在水环境中长期使用，可能会受到水质化学、运行工况、微生物活动等多元影响，从而引发腐蚀破坏。因此，本文将首先分析循环水管道的主要腐蚀形态，包括均匀腐蚀、点蚀、微生物腐蚀等，之后对腐蚀形成原因进行分析，最后提出相应防护措施，希望加强循环水管道的防护效果，并提高管道运行安全性、稳定性。

[关键词]循环水；管道；腐蚀成因；防护措施

DOI: 10.64635/ja.2026.1310

中图分类号: TG174

文献标识码: A

Corrosion Causes and Protective Measures for Circulating Water Pipelines

Wang Jianxun, Shang Hai, Li Hao, Song Xiping

Sinopec (Henan) Refining & Chemical Co., Ltd., Luoyang, Henan 471012, China

Abstract: As key conveying facilities, circulating water pipelines can improve production efficiency, transportation safety, and environmental protection performance only when they operate stably. Due to long-term service in an aqueous environment, pipelines may be affected by multiple factors, such as water chemistry, operating conditions, and microbial activity, which can lead to corrosion damage. Therefore, this paper first analyzes the main corrosion forms of circulating water pipelines, including uniform corrosion, pitting corrosion, and microbiologically influenced corrosion. It then examines the causes of corrosion and finally proposes corresponding protective measures. The aim is to strengthen the protective effect of circulating water pipelines and improve the safety and stability of pipeline operation.

Keywords: circulating water; pipeline; corrosion causes; protective measures

引言

循环冷却水系统广泛应用于石油化工、电力、冶金等行业中，是将工艺介质、设备废热通过水体传输到散热装置后释放至大气环境内。循环水管道材质多为碳钢、不锈钢、铜合金，由于水质波动、微生物滋生等因素，管道内壁常会出现腐蚀现象，最终引发安全事故，降低生产效能。因此，通过对腐蚀成因进行深度分析，并制定科学的防护措施，可大幅延缓腐蚀发生速度，甚至避免腐蚀问题出现。可以看出，对循环水管道腐蚀成因与防护措施进行研究具有重要意义。

1 循环水管道主要腐蚀形态

1.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀也被称为全面腐蚀，指在管道内壁出现较大面积、相对一致的减薄现象。这种腐蚀现象多会存在于碳钢管道中，循环水质稳定、流速适中，不会存在显著的菌藻滋生区域。均匀腐蚀的产物通常会以氧化铁、氢氧化铁

形式存在，其会附着于管道基体表面，从而增加水流阻力、降低换热效率。如果循环水质浓缩数倍失控，或存在加药系统异常情况，将会使管道失去缓蚀效果，均匀腐蚀速率会急剧上升，严重威胁管壁强度^[1]。

1.2 点蚀（孔蚀）

点蚀现象会造成循环水管道出现突发性穿透泄漏，表现为管壁内表面分布针孔状或坑状蚀孔，蚀孔周边区域仍保持金属光泽，即便壁厚测量也无法真实反映孔底残余厚度。形成点蚀的原因为电化学条件使造成金属表面局部钝化膜破裂，暴露出活性较高的裸露基体为稳定阳极，周边大面积的完整钝化膜会充当阴极，所以会构筑典型大阴极—小阳极腐蚀原电池构型。同时，氯离子离子半径小、穿透性强，是引发不锈钢、碳钢管道点蚀的关键侵蚀离子，尤其是在管道局部滞流部位，氯离子浓度会超过主体微区环境浓度，为钝化膜的修复带来阻碍，结合自催化酸化作用，点蚀坑会持续获得纵深发展。循环水管道的点蚀现象

隐蔽性强,无法使用常规巡检措施及时发现,蚀孔贯穿后会在系统压力驱动下形成喷射状泄漏,降低生产装置的运行安全性。

1.3 微生物腐蚀

微生物腐蚀现象并非是微生物直接对循环水管道产生腐蚀,而是会依靠其代谢活动使管道的金属、溶液界面物理化学条件出现变化,从而诱发腐蚀。微生物会在循环水管道壁形成生物膜,膜内基质的化学构成与循环水会存在差异,如溶解氧浓度梯度、pH 值梯度等,使金属表面的不同区域电化学状态发生分化,形成腐蚀微点蚀网络。并且,生物膜自身具有物理屏障作用,会阻碍缓蚀剂、杀菌剂向金属界面传导,降低水处理方案的微生物腐蚀抑制效果。

2 循环水管道腐蚀成因分析

2.1 水质化学

循环水管道受到腐蚀的原因主要为水质化学,其环境也会直接决定金属腐蚀倾向、速率,包括溶解氧、pH 值、侵蚀性阴离子、硬度组分。在溶解氧方面,对于非钝化型金属如碳钢管道,溶解氧是典型的阴极去极化剂,接受阳极溶解产生电子后会生成氢氧根离子,并构成腐蚀反应。因此,碳钢循环水中若含溶解氧,管道腐蚀速率会具有氧扩散控制特征,水温升高时虽会加速化学反应,但会降低溶解氧浓度,二者互相制约、互相关联。对于不锈钢等管道材料,一定浓度的溶解氧是重要钝化促进剂,但如果与侵蚀性离子共存,溶解氧则会在微区闭塞电池区域内驱动点蚀、缝隙腐蚀现象。在 pH 值的变化方面,其会对析氢腐蚀、吸氧腐蚀形成调节作用。循环水管道在正常运行过程中,会将 pH 值控制在弱碱性范围内。pH 值过低,会增加析氢反应热力学驱动力,尤其是水流滞流区、管道缝隙处,金属直接析氢型溶解速度加快。pH 值过高,可降低碳钢均匀腐蚀速率,但可能诱发材质特异性腐蚀,如黄铜脱锌、局部碱脆^[2]。

对于氯离子和硫酸根离子方面,其属于循环水中较为普遍的侵蚀性阴离子。氯离子具有高迁移率、强穿透力,会先吸附于钝化膜表面薄弱点,发生络合溶解,导致膜层局部塌陷,形成点蚀核。硫酸根离子可为硫酸盐还原菌提供代谢电子受体,经厌氧生化反应还原生成硫化氢,与管道的铁基材料生成疏松硫化铁,腐蚀产物膜,诱发局部腐蚀循环。此外,在硬度离子方面,其会造成结垢、垢下腐蚀,形成复合腐蚀。在该过程中,管道结垢呈非均匀多孔结构,垢层较厚区域阻碍溶解氧扩散到金属界面,与垢层较薄区域之间形成氧浓差电池,使垢下区域因贫氧成为阳极。

2.2 运行工况

在流速方面,如流速较低,水内的悬浮固体、腐蚀产物极易沉降,并于管道底部形成沉积,构成贫氧微区,引发垢下缝隙腐蚀。如水的流速适中,可减薄边界层厚度,使缓蚀剂、溶解氧向管壁面均匀传质,还会对固体颗粒的沉降现象形成抑制。若流速较快,循环水管道壁会承受更高的流体剪切应力,如果超过腐蚀产物膜的机械耐受极限,膜层会被冲刷剥离,使金属基体直接暴露在流动腐蚀介质内,形成冲刷腐蚀。在温度方面,水温升高会增加腐蚀反应活化能,加快阳极溶解、阴极去极化速度。同时,水内的难溶盐类溶解度也会伴随温度升高而下降,于高温换热表面析出结垢,形成垢下腐蚀区域。循环水的局部温度过高还会造成膜态沸腾,使管壁表面发生盐类干湿交替浓缩,群实行离子的浓度会瞬间突破钝化膜自我修复阈值,引发点蚀现象。另外,在循环水管道系统启停工况下,会对金属表面准稳态保护层形成破坏。在停机过程中,管道内的积水或是滞留,或是排空,管道壁会暴露在潮湿富氧环境内,垢层、沉积层出现裂纹。系统启动后,管道通水会形成缝隙与浓差电池,瞬间强化腐蚀活性^[3]。

2.3 微生物

硫酸盐还原菌属于严格厌氧菌,可在循环水管壁生物膜、沉积物下方缺氧微区内大量增殖。硫酸盐还原菌会通过异化硫酸盐完成代谢还原,将硫酸根转化为硫化氢,硫化氢会与铁反应生成硫化亚铁腐蚀产物膜,降低管道金属表面的复合脱附速率,促进氢原子渗透到金属基体内部,出现氢致裂纹。相比于基体金属来说,硫化亚铁膜具有更高电化学电位,如果未能连续覆盖,会与裸露铁基体构成微电偶,促进局部阳极溶解。对于铁细菌方面,其会从二价铁氧化为三价铁,并在该过程获取代谢能量生成氢氧化铁产物,在菌体周围沉积形成结核状、鞘状瘤体。铁氧化物结核会附着在管壁表面,在其下方构筑贫氧微区,与裸露金属形成氧浓差电池,引发局部孔蚀。同时,结核结构也会加剧管道局部水流扰动、沉积状态,为其他微生物营造共生环境,进一步加剧腐蚀。另外,黏泥形成菌包含大量异养细菌,如好氧、兼性厌氧,可分泌胞外聚合物,构成生物膜骨架基质,为各类微生物的群落提供载体。

3 循环水管道腐蚀防护措施

3.1 水质调节与化学处理

在循环水内投加功能性化学药剂,可有效控制腐蚀环境。比如使用缓蚀剂,其可在循环水管道金属表面构建保护膜,阻断腐蚀介质、金属基体直接接触。使用无机缓蚀

剂可参与金属表面氧化层的构成与修复过程,加快钝化膜形成速度,提高膜效果,如铬酸盐、钼酸盐等。对于有机缓蚀剂方面,其会利用分子结构内的极性基团吸附在金属表面,非极性长链会朝外侧排列,构成输水屏障,包括脂肪胺、咪唑林等。对于复配缓蚀剂方面,可发挥不同作用机理组分之间的协同功能,减少单一组分投加浓度,提高其对不同金属材质、水质条件的适用性。为满足循环水管道的多元腐蚀要求,在进行缓蚀剂复配过程中,应充分发挥其阳极、阴极协同抑制功能,并保障其在氧化型、非氧化型组分间取得反应性平衡。还可使用阻垢分散技术对循环水管道进行腐蚀防护,可投加磷酸盐、羧酸类聚合物等药剂,使水内的成垢离子保持稳定分散状态,达到致密硬垢的抑制效果。在调节 pH 值方面,需要对循环水的主溶液化学条件进行灵活调控,确保其一直处于利于缓蚀剂成膜、膜稳定运行范围。比如,可加酸、加碱调节,使 pH 值维持在弱碱性水平,使碳酸钙类保护型性膜层快速形成。但在该过程中还要严格管控保护性膜层厚度、致密度,避免结垢方向失控^[4]。

另外,使用杀菌灭藻剂可对微生物腐蚀形成源头干预,主要包含氧化性杀菌剂、非氧化性杀菌剂两种类型。可进行定期交替投加,减少微生物群落耐药性累积速度。设置加药模式时,可结合冲击式高浓度投加、连续性低浓度维持两种方法,在生物膜不同生命阶段实施持续控制。在加药系统的自动化精准控制方面,应全面收集 pH、电导率、氧化还原电位、余氯等反馈信号,利用可编程逻辑控制器对计量泵的输出参数进行动态调节,从而实现精准加注缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂的控制效果,保障循环水化学参数处于设定范围内,防止过量加药造成环境污染、浪费成本等问题。

3.2 电化学防护

使用电化学防护措施时,要对被防护的循环水管道施加阴极电流,使其电位偏移 to 免疫腐蚀区域,有效抑制阳极溶解反应。依据阴极电流的来源、施加方式,可将电化学保护法划分成牺牲阳极、外加电流两种方式。应用牺牲阳极保护法时,需连接被防护管道电性、电位负于被防护管材的金属,如锌基、铝基等牺牲阳极,在相同的循环水介质内构成宏观原电池,牺牲阳极会对电子进行优先溶解、释放,确保管道整体电位负移到防护范围内。这种方法可被应用于防护范围存在局限、电阻率较低的介质环境中,也无需使用外部直流电源,提高工作便利性,如冷却水进水总管、海水循环水管道等。在设计过程中,应对防

护电流密度进行精准测算,科学设置阳极数量、间距,还要保障阳极、被防护循环水管道之间的电连接稳定可靠,不得使用较高电阻。对于外加电流方法来说,要组建防护系统,包含直流电源、辅助阳极、参比电极、控制系统。为确定辅助阳极,可使用高硅铸铁、混合金属氧化物阳极等材料,这类材料具有良好的耐蚀性、导电性,确保直流电源输出的阴极电流被顺利导入到循环水内,最后流至循环水管道表面。参比电极主要是监测管道对地电位,提高调节电源输出的精准性。这种方法输出电流可调控范围大、保护覆盖面积广,可将其应用到规模庞大、网络复杂的循环水管道中。并且,在设置保护电位时,要对区间进行严格控制。

3.3 涂层与衬里防护

在进行循环水管道的腐蚀防护工作时,还可使用涂层与衬里防护措施。主要是在循环水管壁与介质间构建固态物理隔离层,使腐蚀介质、金属基体有效分隔,直接阻断腐蚀导电通路。对于管道内壁的有机涂层方面,包括环氧树脂、聚氨酯两种成膜基料。环氧树脂涂层具有优异附着、低固化收缩率、良好耐化学介质性,可被高效应用于工业循环水管道内壁中。聚氨酯涂层具备弹性、耐磨性优势,更适用于含固体颗粒、存在微幅振动的循环水管道中^[5]。在涂层施工中,应严格管控施工质量,才可延长管道防护寿命。要对钢管内表面进行喷砂处理,保障清洁度、粗糙度等级满足施工要求,确保涂层、基体间获得更好的机械铆合、化学键合协同作用。同时,还可使用无气喷涂、离心浇筑等工艺,保证涂层均匀覆盖管道内壁,不得存在流挂、针孔、漏涂。涂层彻底固化后,需使用高压电火花检测仪对整个表面实施针孔探伤,及时标记、修补缺陷,避免腐蚀介质绕入膜下引发丝状腐蚀、起泡脱落。

另外,对于无机涂层与衬里防护方面,可被应用于特定工况中。对于大口径的循环水管道防护,可使用水泥砂浆衬里,其具有良好自愈性微裂纹、强碱性抑制效果。陶瓷涂层与无机硅酸锌涂层具有较强耐温、耐磨、耐酸碱性,可被应用于温度较高、冲刷严重的管道防护中。新型纳米涂层可在有机树脂基体内分散纳米级氧化锆、氧化硅、石墨烯等填料,有效提高防护涂层的阻隔性、疏水性,达到减阻、防腐一体化的应用效果。无论采用何种循环水管道的防护措施,还要积极开展原位缺陷检测、定期维护。如可采用内窥镜检查,评估涂层脱落、起泡程度;使用交流阻抗谱、电化学噪声技术,可精准评估涂层下金属腐蚀活性。

4 结语

循环水管道的腐蚀现象主要包含均匀腐蚀、点蚀、微生物腐蚀等，腐蚀成因为材质特性、水质化学环境、管道运行工况等。为提高循环水管道运行安全性、可靠性，应做好水质化学调控、电化学保护、涂层衬里隔离等防护工作，才可形成系统性的科学防护体系。相信在未来的不断进步中，腐蚀防护技术会持续进步，使防护工作更具前瞻性、主动性，彻底预防管道腐蚀现象，提高生产实效性。

[参考文献]

[1]王传同,艾凡凯,黄定宇,等.含点腐蚀管道在弯矩下的剩余极限强度评估[J].中国海洋平台,2026,41(02):60-70.

[2]李建强.埋地压力管道外腐蚀不开挖检测的数据评价标准[J].大众标准化,2026(08):184-186.

[3]马德海.循环水管道腐蚀机理与综合防护技术研究[J].机电信息,2026(07):85-88.

[4]赵雷波,俞永璋,常春阳,等.杂散电流干扰对热电联产机组间冷塔循环水管道腐蚀的影响分析[J].机电信息,2025(20):25-27+31.

[5]徐凌.化工检测技术在工业用水管道材料腐蚀分析中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(14):60-62.

作者简介：王建勋（1967.09—），男，汉族，目前职务：水务部循环水区域班长，技师。