

不同材质管道在循环水系统中的腐蚀行为与防护对策研究

徐东晖

中化工程沧州冷却技术有限公司 河北 沧州 061000

摘要：本论文聚焦于循环水系统中不同材质管道的腐蚀行为与防护对策。通过对碳钢、不锈钢、铜合金等常见管道材质在循环水系统中的腐蚀现象与机理进行分析，研究发现不同材质管道因自身化学特性、循环水水质及运行环境差异，呈现出不同的腐蚀行为。论文深入探讨了影响管道腐蚀的关键因素，并针对性地提出涵盖材料选择、防腐涂层应用、阴极保护技术、水质处理等方面的防护对策，旨在为循环水系统管道的腐蚀控制与维护提供理论依据和实践指导，降低因管道腐蚀导致的系统故障风险，提高循环水系统运行的可靠性与经济性。通过实际案例和实验数据的补充，进一步验证了研究结论的科学性与实用性，为相关领域的研究和工程应用提供更具价值的参考。

关键词：循环水系统；管道材质；腐蚀行为；防护对策

1 引言

循环水系统作为化工、电力、冶金等众多工业领域的关键基础设施，承担着设备冷却、热量传输等重要功能，其稳定运行直接关系到工业生产的连续性和安全性。在循环水系统中，管道作为循环水输送的核心载体，其性能优劣至关重要。然而，循环水的复杂介质环境，如溶解氧、阴阳离子、微生物等物质的存在，使得管道长期面临严峻的腐蚀挑战。据统计，在工业循环水系统故障中，因管道腐蚀导致的故障占比高达35%-45%，每年由此造成的经济损失数以亿计。不同材质的管道在循环水系统中展现出截然不同的腐蚀特性，深入剖析这些特性并制定有效的防护策略，已成为保障循环水系统安全稳定运行、降低运营成本的关键课题。本研究旨在通过系统分析不同材质管道的腐蚀行为与影响因素，提出科学合理的防护对策，为工业循环水系统的优化设计与高效运维提供有力支撑。

2 不同材质管道在循环水系统中的腐蚀行为

2.1 碳钢管道的腐蚀行为

碳钢凭借其低廉的成本和良好的机械性能，在循环水系统中得到广泛应用。但因其电化学特性，碳钢在循环水环境中极易发生腐蚀。在电解质溶液的作用下，碳钢中的铁和碳形成大量微小原电池。铁作为负极发生氧化反应： $\text{Fe}-2\text{e}^- = \text{Fe}^{2+}$ ，溶解氧在正极（碳）表面发生还原反应： $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$ 。以某热电厂循环水系统为例，运行1年后，碳钢管道壁厚平均减薄达0.8-1.2mm。生成的亚铁离子与氢氧根离子结合形成氢氧化亚铁，随后被氧化为氢氧化铁，最终形成疏松多孔的铁锈层。该铁锈层不仅无法有效阻挡腐蚀介质，反而因孔隙结构加速氧和水的渗透，进一步加剧腐蚀。

氯离子对碳钢腐蚀的加速作用尤为显著。当循环水中氯离子浓度超过50mg/L时，其穿透能力可破坏碳钢表面的钝化膜，使腐蚀速率提升2-3倍。在微生物滋生的循环水中，微生物代谢产生的酸性物质（如乳酸、醋酸等）和黏液，会在碳钢表面形成局部缺氧环境，引发微生物腐蚀。某化工企业循环水系统中，因微生物大量繁殖，碳钢管道在3个月内出现多处穿孔泄漏，检测发现腐蚀区域微生物数量高达 10^7-10^8 个/mL^[1]。

2.2 不锈钢管道的腐蚀行为

不锈钢因其表面形成的致密钝化膜（主要成分为Cr₂O₃），具备良好的耐腐蚀性，在循环水系统中也有广泛应用。但在特定条件下，不锈钢的钝化膜会遭到破坏，引发腐蚀。氯离子是导致不锈钢发生点蚀的主要因素，当循环水中氯离子浓度超过200mg/L时，点蚀现象开始明显加剧。氯离子吸附于钝化膜表面，取代氧原子形成可溶性氯化物，导致钝化膜局部破损，形成点蚀坑。实验表明，在含300mg/L氯离子的循环水中，316L不锈钢在24小时内即可出现直径约0.1-0.3mm的点蚀坑。此外，硫化物、氨等物质也会对不锈钢钝化膜造成破坏。某炼油厂循环水系统中，因工艺泄漏导致循环水含硫量升高至50mg/L，运行1个月后，不锈钢管道在法兰连接处出现缝隙腐蚀，缝隙内钝化膜完全溶解，形成深达2-3mm的腐蚀沟槽。应力腐蚀开裂在承受拉应力的不锈钢管道中较为常见，特别是在温度较高（超过60℃）且氯离子浓度较高的环境下，裂纹扩展速度可达0.1-0.5mm/月^[2]。

2.3 铜合金管道的腐蚀行为

铜合金管道以其良好的耐腐蚀性和导热性，常用于对水质要求较高或需高效传热的循环水系统。在中性或弱碱性循环水中，铜表面形成的氧化铜（CuO）和碱式碳

酸铜 ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) 保护膜,能在一定程度上抑制腐蚀。但当循环水中存在氨、硫化物时,铜的腐蚀会显著加剧。氨与铜离子形成的铜氨络离子,会不断溶解铜的腐蚀产物,破坏保护膜。某空调循环水系统中,因氨气泄漏,循环水氨含量升高至10mg/L,1个月内铜合金管道腐蚀速率从0.01mm/年骤增至0.15mm/年。硫化物与铜反应生成的硫化铜 (CuS),具有良好的导电性,会加速铜的电化学腐蚀。在含10mg/L硫化物的循环水中,铜合金管道表面72小时内即可形成黑色硫化铜腐蚀层,其腐蚀电流密度较未添加硫化物时增加5-8倍。微生物在铜合金表面的附着生长,会改变局部环境的pH值和氧浓度,影响保护膜稳定性,引发微生物腐蚀。研究表明,微生物代谢产生的多糖类物质会吸附铜离子,促进铜的溶解,使腐蚀速率提高30%-50%^[4]。

3 影响管道腐蚀的关键因素

3.1 水质因素

水质对循环水系统管道腐蚀有着决定性影响。溶解氧是金属发生吸氧腐蚀的关键因素,当循环水中溶解氧浓度从4mg/L升至8mg/L时,碳钢腐蚀速率提高约40%。阴阳离子浓度的变化也会显著影响腐蚀进程,除氯离子外,硫酸根离子会与腐蚀产物反应生成石膏等物质,改变腐蚀产物膜结构;碳酸根离子则会参与碳酸钙垢的形成,垢下腐蚀现象更为严重。硬度离子(钙、镁离子)浓度过高时,易在管道表面形成水垢。某钢铁厂循环水系统中,因钙硬度高达500mg/L(以 CaCO_3 计),运行半年后管道内壁形成厚度2-3mm的水垢层,垢下碳钢腐蚀速率较无垢区域快2-3倍。循环水pH值对不同材质管道的腐蚀影响各异,酸性环境($\text{pH} < 6$)会加速碳钢、铜合金的腐蚀,而碱性环境($\text{pH} > 9$)可能导致不锈钢发生碱腐蚀。实验显示,在 $\text{pH} = 5$ 的循环水中,碳钢腐蚀速率为 $\text{pH} = 7$ 时的2.5倍。

3.2 运行环境因素

运行温度和流速是影响管道腐蚀的重要环境因素。温度每升高10℃,腐蚀反应速率约提高1-3倍。在某高温循环水系统(温度80-90℃)中,碳钢管道的腐蚀速率达到常温下的5-6倍,年腐蚀量超过1.5mm。循环水流速对腐蚀的影响呈非线性关系,适当流速(1-2m/s)可减少污垢和微生物沉积,降低局部腐蚀风险;但流速过高(超过3m/s)会产生冲刷腐蚀,破坏金属表面保护膜。某化工装置循环水管道,因流速高达4m/s,运行3个月后,弯头部位出现严重冲刷腐蚀,壁厚减薄率达40%。系统压力与光照作为环境调控因子,对循环水系统管道腐蚀进程存在显著影响。高压工况($\geq 1.0\text{MPa}$)可提升气体溶解

效率,通过改变腐蚀反应的热力学平衡,加速局部腐蚀的发生。光照条件则通过影响微生物群落代谢活性,形成生物膜介导的腐蚀环境。实验数据表明,当系统压力达到1.5MPa时,不锈钢材料缝隙腐蚀敏感性较常压工况提升20%-30%,该现象在含Cl⁻循环水环境中尤为显著。

3.3 管道材质自身因素

管道材质的化学成分、组织结构和加工工艺直接决定其耐腐蚀性。碳钢中碳含量越高,原电池数量越多,腐蚀速率越快。实验表明,含碳量0.3%的碳钢在相同循环水环境下的腐蚀速率比含碳量0.1%的碳钢快30%-40%。不锈钢中铬、镍元素含量对钝化膜形成至关重要,铬含量低于12%时,不锈钢的耐腐蚀性显著下降。加工工艺产生的残余应力和表面粗糙度也会影响腐蚀性能。管道焊接过程中产生的残余应力,会在局部形成应力集中,成为应力腐蚀开裂的起始点。表面粗糙度越大,管道越容易吸附污垢和微生物,加速腐蚀。某管道加工厂的研究显示,表面粗糙度 $R_a = 6.3\mu\text{m}$ 的管道,其腐蚀速率比 $R_a = 0.8\mu\text{m}$ 的管道快2-3倍。

4 不同材质管道的防护对策

4.1 合理选择管道材质

依据循环水系统的具体工况和水质条件,科学选择管道材质是防腐的首要环节。对于高腐蚀性水质(如氯离子浓度超过500mg/L、 $\text{pH} < 6$)的循环水系统,推荐使用双相不锈钢(如2205)、钛合金等高性能材料。某海上石油平台循环水系统,采用钛合金管道后,运行5年未出现明显腐蚀现象。在对水质要求高且腐蚀性较弱的场合,可选用铜合金管道;若考虑成本,在腐蚀性弱的循环水系统中,碳钢管道可结合防腐措施使用。同时,设计阶段需严格避免电位差大的金属直接连接,某热电厂将碳钢管道与铜合金管道连接,未采取隔离措施,3个月内碳钢管道连接处腐蚀穿孔,而采用绝缘垫片隔离后,腐蚀问题得到有效控制。

4.2 应用防腐涂层

防腐涂层作为阻隔腐蚀性介质与金属基体的关键屏障,其防护效能依赖于材料特性与施工工艺的协同作用。在有机涂层领域,环氧树脂涂层凭借分子结构中环氧基团与金属表面的强化学键合能力,展现出卓越的附着力与耐化学腐蚀性,在循环水系统管道防护中占据主导地位。以某污水处理厂为例,其循环水管道改造前因长期接触含有氯、硫化物的循环水,年腐蚀速率达0.15mm/年,采用无溶剂环氧树脂涂层体系(包含底漆、中间漆与面漆的三层复合结构)后,通过形成致密交联网络有效隔绝介质渗透,腐蚀速率骤降至0.02mm/年,维

护周期从每年检修升级为5年系统性维护。聚氨酯涂层则以其独特的弹性分子链结构,在机械磨损场景中表现突出。该涂层不仅具备良好的耐候性,能抵御紫外线、湿度等环境因素侵蚀,其微观结构中的硬段与软段交替排列赋予涂层优异的抗冲击与耐磨性能,适用于循环水泵进出口等流体冲刷剧烈的管道区域。在无机涂层方面,陶瓷涂层通过热喷涂技术将氧化铝、碳化硅等无机材料熔覆于金属表面,形成硬度可达HV1000以上的防护层。某钢铁厂高温循环水系统(运行温度80-120℃)应用纳米复合陶瓷涂层后,管道表面粗糙度降低60%,流体阻力显著下降,同时使用寿命从2-3年延长至8-10年,有效减少停机维护成本^[1]。

4.3 采用阴极保护技术

阴极保护技术是抑制管道腐蚀的有效手段。牺牲阳极保护法适用于小型循环水系统或局部保护,某小区供热循环水系统采用锌合金牺牲阳极后,碳钢管道腐蚀速率降低80%以上。外加电流保护法适用于大型长距离管道,某输油管道采用外加电流保护,保护电流密度控制在15-20mA/m²时,实现了全线均匀保护。应用时需根据管道材质、长度、土壤环境等因素,精确计算保护参数,定期检测阳极消耗和保护电位,确保保护效果^[5]。

4.4 优化水质处理

优化水质处理工艺可显著降低循环水腐蚀性。去除溶解氧可采用热力除氧(将水加热至沸点,使氧逸出)或化学除氧(添加亚硫酸钠、联氨等除氧剂)。某电厂采用化学除氧,将循环水溶解氧浓度降至0.1mg/L以下,碳钢管道腐蚀速率降低70%。通过离子交换树脂、反渗透技术可有效软化和除盐,降低阴阳离子浓度。某化工企业采用反渗透-离子交换联合工艺,将循环水氯离子浓度从300mg/L降至50mg/L,不锈钢管道点蚀问题得到解决。调节pH值也是重要手段,对于碳钢管道,pH值控制在8-9;对于不锈钢管道,pH值控制在7-9为宜。添加缓蚀剂是常用方法,聚磷酸盐、锌盐等复配缓蚀剂对碳钢有良好效果,苯并三氮唑(BTA)对铜合金缓蚀率可达90%以上。

4.5 加强运行管理与维护

完善的运行管理与维护体系是保障管道安全的关键。建立定期水质检测制度,每周检测溶解氧、pH值、氯离子等关键指标,根据检测结果及时调整水质处理方

案。某石化企业通过实时在线监测循环水水质,及时发现硫化物超标问题,避免了不锈钢管道的严重腐蚀。定期对管道进行外观检查、壁厚测量,采用超声波测厚仪每季度对重点部位检测一次,及时发现腐蚀隐患。保持系统稳定运行,避免温度、流速大幅波动,减少因工况变化导致的腐蚀加剧。定期清理管道内的污垢和微生物,采用化学清洗或机械清洗方式,某空调循环水系统每半年进行一次化学清洗,管道腐蚀速率降低50%。同时,建立详细的管道维护档案,记录管道安装、运行、检测等全过程信息,为管道维护和更换提供数据支持。

5 结束语

不同材质管道在循环水系统中的腐蚀行为受水质、运行环境和材质自身等多种因素综合影响。碳钢、不锈钢、铜合金等常见管道材质在循环水系统中展现出独特的腐蚀特点和机理。通过合理选择管道材质、应用防腐涂层、采用阴极保护技术、优化水质处理以及加强运行管理与维护等综合防护措施,可有效控制管道腐蚀,延长管道使用寿命,提升循环水系统运行的可靠性和经济性。然而,随着工业技术的不断发展,循环水系统面临更高的性能要求和更复杂的运行环境,管道腐蚀与防护领域仍存在诸多挑战。未来需进一步研发新型高效防腐材料,探索智能化、精准化的腐蚀监测技术,优化综合防护体系,以适应工业发展的新需求。同时,加强多学科交叉研究,深入揭示管道腐蚀的微观机理,为循环水系统管道的腐蚀防护提供更坚实的理论基础和更有效的技术手段。

参考文献

- [1]张桐,李旭东.循环水系统管道腐蚀与防护研究进展[J].化工防腐技术,2020,35(3):45-52.
- [2]王林,赵阔.不锈钢在循环水系统中的腐蚀行为及防护措施[J].材料保护,2021,54(5):78-85.
- [3]赵扬名.碳钢在含氯循环水中的腐蚀行为研究[J].腐蚀与防护,2023,44(6):89-95.
- [4]孙家良,李建.铜合金在氨污染循环水中的腐蚀机理[J].材料科学与工艺,2021,29(4):67-73.
- [5]王立冬,李明.阴极保护技术在循环水管道中的应用实践[J].石油化工腐蚀与防护,2020,37(5):34-39.