

化工给排水管网腐蚀机理及防护材料的性能优化研究

郝杰

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]现代化工产业的发展建设作为推动我国现代经济社会稳步发展的重要途径,化工给排水系统作为保障化工产业安全运行的核心工程设施之一,其运行的稳定性直接影响着生产的安全与经济效益。化工行业区别于其他行业的显著特征,在于其强腐蚀性环境易导致管网发生腐蚀失效,引发泄漏、堵塞等问题,造成严重经济损失与环境风险。文中聚焦化工给排水管网腐蚀机理,系统分析化学腐蚀、电化学腐蚀、微生物腐蚀三大机制及关键影响因素,梳理常用防护材料的性能特点与应用局限,从材料成分改性、表面改性技术、复合制备工艺三方面提出针对性优化策略,建立防护材料与腐蚀环境的适配关系,为提升化工给排水管网抗腐蚀能力提供技术支撑与参考。

[关键词]化工给排水管网; 腐蚀机理; 防护材料; 性能优化; 表面改性

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18841

中图分类号: TU992

文献标识码: A

Research on Corrosion Mechanism of Chemical Water Supply and Drainage Pipeline Network and Performance Optimization of Protective Materials

HAO Jie

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The development and construction of the modern chemical industry is an important way to promote the steady development of China's modern economy and society. As one of the core engineering facilities to ensure the safe operation of the chemical industry, the stability of the chemical water supply and drainage system directly affects the safety and economic benefits of production. The significant feature that sets the chemical industry apart from other industries is its highly corrosive environment, which can easily lead to corrosion and failure of pipeline networks, causing problems such as leaks and blockages, resulting in serious economic losses and environmental risks. The article focuses on the corrosion mechanism of chemical water supply and drainage pipelines, systematically analyzes the three major mechanisms and key influencing factors of chemical corrosion, electrochemical corrosion, and microbial corrosion, sorts out the performance characteristics and application limitations of commonly used protective materials, proposes targeted optimization strategies from three aspects: material composition modification, surface modification technology, and composite preparation process, establishes the adaptation relationship between protective materials and corrosive environments, and provides technical support and reference for improving the corrosion resistance of chemical water supply and drainage pipelines.

Keywords: chemical water supply and drainage pipeline network; corrosion mechanism; protective materials; performance optimization; surface modification

引言

随着我国现代经济社会的稳步建设,现代化工行业也迎来了发展的黄金周期,但化工安全隐患问题却越发频繁,化工行业的发展建设涉及多种高危化学材料以及设备^[1],其给排水管网覆盖广、工况复杂,且腐蚀环境特殊,常含腐蚀性物质,面临恶劣运行条件,腐蚀问题频发^[2]。腐蚀造成重大经济损失,甚至会引发泄漏、污染环境、威胁安全等危害^[3]。防护材料是抑制腐蚀的核心,但常用材料存在局限。因此,深入研究化工给排水管网腐蚀机理、优化防护材料性能、开发适配化工工况的高性能防护材料,对保障化工园区安全稳定运行具有重要意义。

1 化工给排水管网腐蚀机理分析

1.1 化学腐蚀的发生机制

化学腐蚀即金属直接接触到还原剂发生氧化还原反

应,生成的产物覆盖在金属表面。这一反应并没有产生电流,在金属表面形成的沉积物,它由腐蚀产物和来自溶液沉积物膜组成^[4]。腐蚀产物可分为两类:一类是可见厚膜,部分膜体隔透性好、几乎不透水,具有一定防护作用;部分膜体透水率高,防护效果差,还可能引发局部腐蚀,导致金属表面粗糙,加速沉积结晶(如氧化铁);另一类是极薄钝化膜,防护性能优异,可近乎阻断腐蚀反应(如氧化铝)。化工给排水管网中,化学腐蚀多见于输送酸、碱性介质的管道。输送酸性废水(如含盐酸、硫酸)时,金属与酸置换生成金属盐和氢气;输送碱性废水(如含氢氧化钠、氢氧化钾)时,金属与碱反应生成金属氢氧化物。

化工给排水管网化学腐蚀的影响因素有介质成分、浓度、温度和压力。介质成分方面,酸、碱、强氧化性介质会加速腐蚀,中性介质对腐蚀影响较小;介质浓度方面,

酸性介质浓度越高,腐蚀速率越快;碱性介质浓度过高或者过低时,腐蚀速率显著提升;温度升高会加快反应速率、降低腐蚀产物膜的致密性,从而提升腐蚀速率;压力升高会增强介质渗透性,加速介质与金属基体接触,加快化学腐蚀。

1.2 电化学腐蚀的发生机制

电化学腐蚀是金属在电解质溶液中因电化学反应形成原电池而发生溶解的现象,金属内部有杂质或成分不均会形成阴阳极,阳极金属失电子溶解,阴极氧化性物质得电子被还原。以铁材质管网为例,其中性含氯水溶液中发生电化学腐蚀的阳极反应为 $\text{Fe}-2\text{e}^{-}=\text{Fe}^{2+}$, Fe^{2+} 与溶液中的 OH^{-} 结合生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,进而被氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形成铁锈;阴极反应为 $\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^{-}=4\text{OH}^{-}$ 。电子从阳极流向阴极形成电流,持续推动腐蚀反应进行。当管网有缺陷时,缺陷处为阳极,周围为阴极,形成局部原电池,引发点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀的现象。

电化学腐蚀的影响因素如下:(1)金属材料:多数纯金属抗腐蚀性能弱于合金,工程中因力学性能需求,多采用合金管材。合金元素会影响电极电位(如铬、镍可提升抗蚀性),组织特征(晶粒大小、相组成)也对腐蚀有影响,晶粒细化可提高抗蚀性,第二相则会加速腐蚀。(2)电解质溶液:溶液导电率越高,腐蚀速率越快(如含氯盐水);pH值影响显著,pH值4.0~7.0(中性/弱酸性)时,电化学腐蚀最剧烈,此时氧浓差电池效应最显著,点蚀发生率提升,强酸性环境以化学腐蚀为主,强碱性环境腐蚀较慢。(3)环境温度与湿度:温度升高会加快电极反应和离子扩散,提高腐蚀速率;湿度增大可在金属表面形成电解质溶液膜,加速腐蚀反应。(4)流速:流速 $>2.5\text{m/s}$ 时易破坏腐蚀产物膜,加速腐蚀;流速 $<0.6\text{m/s}$ 时,腐蚀介质(如含氯盐)局部积聚,引发局部腐蚀。

1.3 微生物腐蚀

微生物是影响给水管网腐蚀的重要因素之一。目前,已知的与给水管网腐蚀有关的微生物主要包括铁氧化细菌(IOB)、铁还原细菌(IRB)、硫酸盐还原菌(SRB)、硫酸氧化细菌(SOB)、产酸菌(APB)、丝裂菌(NFB)等^[5]。化工给排水管网中,污水、循环水管道易滋生大量微生物,且微生物腐蚀常与电化学腐蚀协同作用,加速管网失效。不同微生物的腐蚀机制存在差异:SRB在厌氧环境中将硫酸盐还原为硫化物,生成 FeS 等疏松多孔沉淀膜,加速阴极反应,促进金属阳极溶解;IOB在有氧环境中将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 生成铁锈,其代谢产生的黏液吸附在金属表面形成生物膜,导致局部缺氧,引发氧浓差电池造成局部腐蚀;SOB将硫化物氧化为硫酸,降低局部pH值,加速化学腐蚀与电化学腐蚀;硝化细菌可将氨氮转化为硝酸,进一步降低局部pH值,加剧腐蚀。

微生物腐蚀的影响因素有:(1)介质营养成分:污水

中有机物、氮、磷含量越丰富,微生物繁殖越旺盛,腐蚀程度越严重。(2)温度:不同微生物有适宜生长温度范围,如硫酸盐还原菌在 $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 活性最高,腐蚀速率最快。(3)pH值:多数腐蚀微生物适宜在中性或弱酸性环境中生长,pH值过高或过低会抑制微生物活性,降低腐蚀速率。(4)溶解氧含量:有氧环境利于好氧微生物(如IOB、SOB)生长,厌氧环境利于厌氧微生物(如SRB)生长,需结合工况针对性防控。

2 化工给排水管网常用防护材料及性能局限

2.1 金属基防护材料

(1) 碳钢与低合金钢

早期化工给排水管网主要采用力学性能优良、加工便捷且成本较低的碳钢与低合金钢。其中,碳钢主要成分为铁、碳及少量杂质,抗腐蚀性能较差,在化工腐蚀环境中易发生腐蚀,尤其在含氯、酸性介质中腐蚀更为剧烈。低合金钢在碳钢基础上添加合金元素,抗腐蚀性能较碳钢有所提升,但在化工严苛腐蚀环境中仍存在明显局限:抗点蚀、缝隙腐蚀能力弱;耐高温腐蚀性能不足;抗微生物腐蚀能力差,易被微生物代谢产物加速腐蚀。

(2) 不锈钢

不锈钢由钢加入铬、镍、钼等制成,抗腐蚀性能优良,按组织结构分奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢和双相不锈钢等。奥氏体不锈钢耐蚀且加工性能好;铁素体不锈钢耐氧化和耐蚀性好,且成本低;马氏体不锈钢强度、硬度高,但耐蚀性稍差;双相不锈钢兼具前两者优点,抗点蚀和缝隙腐蚀能力强。不锈钢在化工给排水管网应用中存在一定局限:奥氏体不锈钢在含氯浓度高、温度高的介质中,易发生点蚀、缝隙腐蚀;在强酸性介质中易发生全面腐蚀;且不锈钢原材料成本较高,大规模应用经济性欠佳。

2.2 非金属防护材料

(1) 塑料材料

塑料材料重量轻、耐腐蚀、加工方便且成本低,在化工给排水管网应用广泛,常用有PVC、PP、PE等。PVC材料耐酸、碱、盐等介质腐蚀、成本低,常输送常温的酸碱废水;PE耐冲击和腐蚀,常输送海水和污水;PP耐腐蚀且耐高温,可输送高温下的腐蚀性介质。但是,塑料材料也有局限:力学性能差,强度硬度低,高压环境受限;耐高温有限,高温易变形、老化;抗紫外线不足,户外易老化降解;连接部位密封差,易泄漏。

(2) 玻璃钢材料

玻璃钢材料由玻璃纤维与树脂基体复合而成,具重量轻、强度高、耐腐蚀、绝缘好等优点,在化工给排水管网应用广泛。其耐腐蚀性取决于树脂基体类型,常用有聚酯树脂、环氧树脂等,环氧树脂玻璃钢耐酸、碱、盐腐蚀性能佳,聚酯树脂玻璃钢耐腐蚀且加工性好,酚醛树脂玻

玻璃钢耐高温又耐腐蚀。玻璃钢材料也有局限:抗冲击性差,易被外力撞坏;耐热性有限,高温下树脂老化,强度和耐腐蚀性下降;成型工艺复杂、周期长,难大规模标准化生产;长期使用可能出现纤维外露、树脂老化脱落,对防护效果造成影响。

(3) 复合材料

复合材料由两种及以上不同性质材料经复合工艺制成,综合性能优异,在化工给排水管网防护中应用渐广。复合材料也有局限:复合界面结合强度低,长期使用可能分离;成型工艺复杂,设备投资大、成本高;高温下复合界面稳定性下降、性能劣化;回收利用难,废弃后易导致污染环境。

3 化工给排水管网防护材料的性能优化策略

3.1 材料成分改性

(1) 金属材料的成分优化

精准调整金属材料合金元素种类与含量、优化成分与组织结构,可提升抗腐蚀性与环境适配性。不锈钢需协同调控合金元素提升钝化膜稳定性,引入氮元素细化晶粒;碳钢和低合金钢采用“微合金化”,添加铜、铬等元素改善腐蚀产物膜;镍基合金优化时,用“铬-钼-钨”多元合金替代部分镍元素,利用铬的钝化、钼与钨对氯离子的吸附抑制作用,协同提升其在强酸、强氧化性介质中的耐蚀性,降低原材料成本;钛合金添加钽、钒等贵金属元素,提升在还原性酸介质中的耐蚀性。

(2) 非金属材料的成分改性

塑料材料以“功能助剂协同添加”为核心进行改性,通过精准调控填料、助剂的种类与配比,同步提升材料多项性能。如PVC中“无机填料-纤维增强剂”复合添加,满足中低压管网要求;PP中“抗氧剂-紫外线吸收剂-热稳定剂”协同复配,提升热变形温度、延长户外使用寿命;树脂基体加功能性填料优化耐蚀性。玻璃钢材料成分优化聚焦“树脂基体复合改性”与“增强纤维功能化”,提升耐腐蚀、力学及耐高温性能。树脂基体采用多元复合树脂基体,耐受酸碱侵蚀,加纳米二氧化硅增强耐蚀性。

3.2 表面改性技术

(1) 涂层技术

涂层技术通过在防护材料表面涂抹防腐涂料形成屏蔽层,隔绝材料与外界腐蚀介质的接触,是化工给排水管网防护中应用最广泛的表面改性技术。通常这类防腐涂料会在表面形成一层致密的保护层,它具有低透氧性、透离子性、透水性^[6]。这种物理隔离的方式使得防护材料表面与介质无法形成完整的闭合回路,进而无法发生电化学腐蚀。涂层材料依性质与防护机理分为四大类,需按管网腐蚀环境精准选用。有机涂层以高分子树脂成膜,兼具耐腐蚀、柔韧性与施工便捷性,其中环氧树脂涂层耐碱性优良,适用于碱性废水管道;聚氨酯涂层耐磨耐候性好,用于户外管网;氟碳涂层耐强腐蚀介质能力突出,但成本较高。

无机涂层以陶瓷等材料为主,硬度、耐磨性与耐高温性优异,其中氧化铝陶瓷涂层耐磨耐腐蚀,适用于含颗粒介质管道;氧化锆涂层耐高温性能好,用于高温腐蚀环境;硅玻璃涂层致密性强,可有效阻挡氯离子渗透,适用于含氯盐环境。金属涂层通过牺牲阳极或形成钝化膜实现防护,其中锌涂层用于保护碳钢管道;铬、镍涂层钝化性能优良,用于精密部件;不锈钢涂层可实现协同防护,提升材料在复杂介质中的耐蚀性。复合涂层结合各类涂层优势,通过多层结构设计实现性能协同,如“环氧-聚氨酯-氟碳”复合涂层适用于复杂腐蚀环境;“金属-陶瓷”复合涂层兼具韧性与耐腐蚀性,用于高温高压苛刻工况。

(2) 表面合金化技术

表面合金化技术借助扩散、渗透等手段,将合金元素引入防护材料表面形成合金化层,以提升材料表面抗腐蚀与力学性能。常用技术有渗铬、渗镍、渗钼、渗氮等,其中渗铬可提高材料的抗腐蚀与耐磨性,渗镍技术能提升抗腐蚀与韧性,渗钼可增强材料在含氯介质中的抗点蚀性,渗氮则能提高材料的硬度与耐腐蚀性。其优化方向包括:优化合金化工艺参数(温度、时间、气氛等),提升合金化层厚度均匀性与附着力;开发复合技术(如渗铬-渗氮、渗镍-渗钼等),融合多种合金元素优势,提升材料表面综合性能;降低成本,简化流程,推动大规模工业化应用。

(3) 氧化膜技术

氧化膜技术借助化学或电化学手段,在金属材料表面生成致密氧化膜,提升抗腐蚀性^[7]。常用方法有化学氧化和阳极氧化,前者将金属置于化学溶液反应成膜,如铝化学氧化形成耐腐蚀氧化铝膜;后者以金属为阳极电解成膜,如铝阳极氧化生成的氧化铝膜更厚、致密,耐腐蚀和耐磨性更强。其优化方向为:优化氧化工艺参数,提升氧化膜致密性、厚度均匀性与附着力;对氧化膜进行封闭处理,如热水、重铬酸盐封闭,堵塞孔隙增强耐腐蚀性;开发复合氧化膜技术,如氧化膜-涂层复合,结合两者优势提升材料防护效果。

3.3 复合制备工艺优化

(1) 金属-塑料复合工艺优化

金属-塑料复合管道是通过复合工艺结合金属管与塑料管,兼具金属高强度和塑料耐腐蚀性。常用工艺有挤出复合、黏接复合、滚塑复合。其中,挤出复合将塑料挤出包覆金属管,效率高、成本低,但界面附着力差;黏接复合用胶黏剂黏接,附着力强,但周期长、成本高;滚塑复合让塑料粉末在金属管内熔融包覆,内衬厚度均匀、耐腐蚀好,但效率低。

其优化方向为:开发高性能胶黏剂与界面处理技术,增强界面附着力;优化工艺参数(温度、压力等),提升管道质量稳定性;开发连续化、自动化设备,提高效率、降低成本;采用共挤出复合工艺制多层管道,兼顾不同塑

料优点,提升综合性能。

(2) 纤维增强复合材料制备工艺优化

纤维增强复合材料制备工艺影响材料性能,常用工艺有手糊、喷射、模压、拉挤成型等。手糊工艺简单成本低,但效率低、质量稳定性差;喷射效率较高可制大型制品,但强度低;模压能制高精度高强度制品,但模具成本高、周期长;拉挤可制连续型材,效率高、强度均匀,但截面形状受限。

4 结论

本文系统探究化工给排水管网腐蚀机理,梳理常用防护材料的性能特点与应用局限,提出针对性性能优化策略,建立防护材料与腐蚀环境的适配关系,主要结论如下:化工给排水管网腐蚀以电化学腐蚀为主,常伴随化学腐蚀、微生物腐蚀的协同作用,腐蚀过程受介质成分、温度、流速、微生物种类等多种因素影响,在化工严苛工况下腐蚀问题频发;常用防护材料各有优劣:金属基材料力学性能优良但抗腐蚀能力有限、成本差异较大;非金属材料耐腐蚀性能好、成本较低但力学性能与耐高温性不足;复合材料综合性能优异但成本偏高、生产工艺复杂;通过材料成分改性、表面改性技术及复合制备工艺优化,可显著提升防护材料的抗腐蚀性、力学性能与耐高温性能,适配化工管网复杂腐蚀工况;建立的防护材料与腐蚀环境适配关系,

可为化工给排水管网防护设计、材料选型提供精准技术参考,助力提升管网运行稳定性与使用寿命。

[参考文献]

- [1]郭浩,田一梅,张海亚,等.铁质金属供水管道的内腐蚀研究进展[J].中国给水排水,2020,36(12):70-75.
- [2]农立洪.新型管材在建筑给排水工程中的应用[J].商情,2015,11(6):302-303.
- [3]赵红梅.浅谈市政给排水管网中新型管材的应用[J].工程技术:全文版,2016,14(7):185-186.
- [4]王萌.城市生活污水对混凝土的腐蚀及防治研究[D].河北:石家庄铁道大学,2015.
- [5]毛小林.水性防腐涂层的制备及其耐腐蚀性能研究[D].甘肃:西北师范大学,2018.
- [6]刘华平,李田.上海市排水管道硫化氢腐蚀的探察与分析[J].给水排水,2005(6):91-94.
- [7]耿冰,靳长青,王杨,等.磷酸盐复合缓蚀剂对不同材质供水管道缓蚀控制的对比试验[J].净水技术,2019,38(11):98-101.

作者简介:郝杰(1986.1—),毕业院校:河北建筑工程学院,所学专业:给水排水工程,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:给排水工程师,职称级别:副高级工程师。