DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260340

城镇污水厂钢筋混凝土结构腐蚀调研与分析

陈　平
(福建海峡环保集团股份有限公司,福建 福州 350001)

摘　要: 针对城镇污水处理厂钢筋混凝土结构的腐蚀问题,选取福州市5座城镇污水处理厂作为调研对象,通过现场调查与取样微观检测的方式,探究了污水环境下钢筋混凝土结构的腐蚀分布特征、影响因素及其腐蚀机理。结果表明,污水处理厂钢筋混凝土腐蚀集中于进水泵房、细格栅等预处理工艺段,H_2S气体浓度与相对湿度是核心影响因素,封闭、通风不畅导致腐蚀性气体富集的环境显著加剧破坏。微观分析证实,硫酸盐侵蚀与碳化作用生成的膨胀性产物(钙矾石、石膏),是导致混凝土开裂及剥落的直接原因。基于调研结论,从除臭设置、结构设计及运营期维护等方面提出了针对性的建议,为污水处理厂构筑物的耐久性提高提供了科学参考。

关键词: 污水处理厂;腐蚀机理;微观结构;耐久性
中图分类号: TU992.3　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0299-05

Investigation and Analysis of Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Urban WWTPs

CHEN Ping
(Fujian Haixia Environmental Protection Group Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: To address the corrosion problem of reinforced concrete structures in urban wastewater treatment plants (WWTP)s, 5 urban WWTPs in Fuzhou are selected as the investigation objects. Through on-site investigations and microscopic sampling analysis, the corrosion distribution characteristics, influencing factors and corrosion mechanisms of reinforced concrete structures in wastewater environments are explored. The results indicate that the corrosion of reinforced concrete in WWTPs is mainly concentrated in the pretreatment process sections such as the intake pump rooms and the fine screens. The concentration of H_2S gas and relative humidity are the core influencing factors. Enclosed spaces with poor ventilation that lead to the accumulation of corrosive gases will significantly exacerbate the damage. Microscopic analysis confirms that expansion products (ettringite, gypsum) generated from sulfate attack and carbonation are the direct causes of concrete cracking and spalling. Based on the research, the targeted suggestions are proposed in terms of odor removal settings, structural design and maintenance during operation, providing a scientific reference for improving the durability of WWTPs.

Keywords: WWTP; corrosion mechanism; microstructure; durability

0　引　言

随着城市污水处理设施使用年限的增加,对污水处理构筑物的耐久性的要求也越来越高。污水处理厂的预处理、生化处理、深度处理等环节一般都采用钢筋混凝土结构,这些构筑物有封闭、半封闭或敞口露天等形态,长期承受着污水浸泡、腐蚀性气体侵蚀、固体颗粒冲刷及微生物活动等多因素的耦合作用,对污水处理系统的稳定运行构成了潜在的隐患[1-4]。因此,深入研究污水环境下钢筋混凝土结构的腐蚀分布特征及腐蚀机理,对于保障城镇污水处理厂的稳定运行具有重要意义。本文以福州市5座城镇污水处理厂为调查对象,通过系统的现场调研与微观分析,以期为污水处理厂耐久性的设计优化和运维管理提供科学依据。

收稿日期:XXXX-XX-XX
作者简介:陈平(1990—),男,硕士,工程师,从事给排水工程项目的建设管理工作。

1　污水厂运行现状概况

1.1　调研对象与腐蚀等级判定

本文调研福州市5座城镇污水处理厂,投产运行年限14—28年,设计处理工艺覆盖A^2O、MBR、CASS、氧化沟等当前城镇污水处理主流工艺,各厂

核心基础信息如下：A厂（1997年投产，A^2O+MBR工艺）、B厂（2002年投产，A^2O+MBR工艺）、C厂（2011年投产，CASS工艺）、D厂（2010年投产，氧化沟工艺）、E厂（2005年投产，A^2O+MBR工艺），各厂均已根据环保要求完成相应提标改造，处理规模适配所属区域的污水排放需求。参照《混凝土结构现场检测技术标准》（GB/T 50784）、《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082等规范，在调研前拟定了腐蚀等级判定标准（见表1），用于评估各厂主要工艺段钢筋混凝土结构的腐蚀情况。

表1　调研腐蚀等级判定标准表

腐蚀程度评定	腐蚀情况描述
完好	防腐层无剥落或剥落后的混凝土表面无蜂窝麻面、无锈迹
轻微	防腐层局部剥落，混凝土表面蜂窝麻面面积小于腐蚀区域面积的5%，无锈迹
中等	防腐层剥落，混凝土表面蜂窝麻面面积占腐蚀区域面积的5%～20%，沿钢筋出现裂缝且有锈迹，但钢筋无外露
严重	防腐层大面积剥落，混凝土表面蜂窝麻面面积大于腐蚀区域面积的20%，钢筋锈蚀引起混凝土保护层剥落、钢筋外露

1.2　各污水厂关键指标与腐蚀现状汇总

本次调研对5座污水厂各工艺段的水质指标（pH、COD、Cl^-、SO_4^{2-}、NO^{3-}）、气体成分（H_2S、CO、O_2）与相对湿度（RH）、结构封闭形式进行系统检测[5]，并结合判定标准确定腐蚀等级。为便于分析，本文将调查结果按工艺段进行整合，关键数据与腐蚀等级汇总于表2。

表2　各污水处理厂主要工艺段环境参数及腐蚀等级汇总表

工艺段	厂区示例	封闭情况	除臭系统	H2S/10^{-6}	相对湿度(%RH)	腐蚀等级
进水泵房	A、C厂	封闭	有	0-9	49-62	完好
	B厂	封闭	无	18	68	严重
	E厂	露天	无	0	58	完好
细格栅	A厂	封闭	风压不足	13	72	严重
	D厂	封闭	无	96	79	严重
	B、C、E厂	封闭	有	0	51-63	轻微
生化池	B、C、D、E厂	封闭/露天	有/无	0	43-58	完好
	A厂	封闭	有	0	51	中等
MBR膜池	A、B厂	封闭	有	0	45-52	轻微
	E厂	露天	无	0	53	中等
二沉池	各厂	露天	无	0	44	完好
消毒池	各厂	封闭	无	0	52	完好

1.3　腐蚀分布特征

调查结果显示，腐蚀最明显的区域主要集中在预处理段（进水泵房、细格栅），而生化处理及二沉池等区域腐蚀程度普遍较轻。钢筋混凝土结构的腐蚀等级与结构的封闭性、通风能力高度相关，通风不足引发H_2S气体富集是腐蚀加剧的核心诱因：

高腐蚀区：集中于封闭、通风条件差的构筑物内部，空间密闭无气流交换会造成H_2S持续富集。如D厂细格栅（H_2S达96ppm，RH79%）腐蚀最为严重，混凝土保护层明显剥落、大量钢筋外露（见图1）。某些特定环境也会诱发中等腐蚀，如E厂膜池因周期性酸碱清洗导致的短期极限pH冲击造成大量混凝土表面麻面，运行长达28年的A厂生化池在好氧区渠道底板出现了混凝土表面蜂窝麻面，沿钢筋方向裂缝的情况（见图2）。

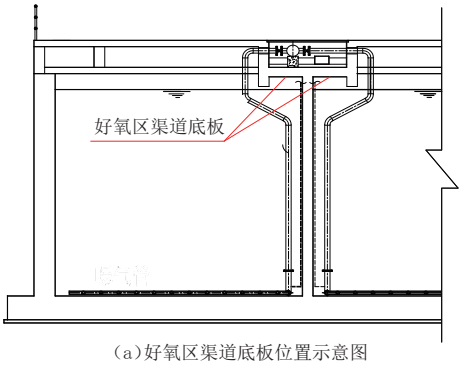


图1　D厂细格栅钢筋混凝土结构腐蚀情况

低腐蚀区：封闭但通风效果好（如配置高效除臭系统），可避免H_2S气体富集的工艺段（如A、B、C厂的大部分区域）且湿度较低；露天或半敞开的构筑物（如生化池、二沉池等），通风条件好，防止腐蚀性气体的积聚；虽为封闭结构但环境洁净的后续工艺段（如消毒池），不产生腐蚀性气体。

2　腐蚀机理微观表征

为深入探究污水处理厂的钢筋混凝土的腐蚀破坏机理，选取本次调研中腐蚀最严重的D厂细格栅



（a）好氧区渠道底板位置示意图



（b）好氧区渠道底板腐蚀情况

图 2　A 厂生化池好氧区渠道底板位置及腐蚀情况

池体（已废弃）为研究对象，通过现场取芯、X 射线衍射（XRD）与扫描电子显微镜（SEM）技术，明确微观结构演变规律[6]。

2.1　结构取样分析

对 D 厂细格栅池体选取 4 个典型部位进行取芯，分别为：设计水位液面以上池壁（P1）、设计水位液面以下池壁（P2）、池顶板（P3）、池底板（P4）（取样位置见图 3，芯样见图 4）。池体设计厚度为：池壁 20 cm、底板 20 cm、顶板 10 cm；现场取芯样品（见图 4）实际厚度为 14.5 cm（P1）、19 cm（P2）、8 cm（P3）、20 cm（P4）。宏观观测显示，P1（液面以上池壁）与 P3（池顶板）混凝土保护层剥落严重，P2（液面以下池壁）与 P4（池底板）结构相对完整。表明液面波动区（干湿交替区）是污水处理厂钢筋混凝土腐蚀破坏的最集中区域。

2.2　微观结构分析

采用 X 射线衍射（XRD）与扫描电子显微镜（SEM）技术，重点对 P1 腐蚀样品进行物相组成与微观形貌表征，对比 P2 未腐蚀样品，明确不同位置混凝土的物质变化与微观结构破坏特征：

从 P1、P2 取芯样品表面取粉，研磨过 75 μm 筛筛除粗颗粒后置于 40 ℃真空干燥箱中干燥至恒重，扫描范围为 5°~65°。扫描速度为 10°/min[7]。对比 P1 和 P2 的 XRD 图谱（见图 5），两个样品中的物相组成相同。与 P2 样品相比，P1 样品中石膏的衍射峰数量较多，强度较高，钙矾石的衍射峰强度显著较高。钙矾石和石膏均为典型硫酸盐侵蚀产物，其生成与污水环境中高浓度 H_2S 气体密切相关[8-11]。此外，P1 和 P2 中均存在 $Ca(OH)_2$ 和 $CaCO_3$ 的衍射峰，$Ca(OH)_2$ 为水泥水化产物，$CaCO_3$ 为 CO_2 碳化作用产物。与 P2 样品相比，P1 样品中的 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度较低，而 $CaCO_3$ 衍射峰强度较高，这说明在 P1 区域碳化作用较为显著，干湿交接区的腐蚀是硫酸盐侵蚀和长龄期碳化作用的共同结果。

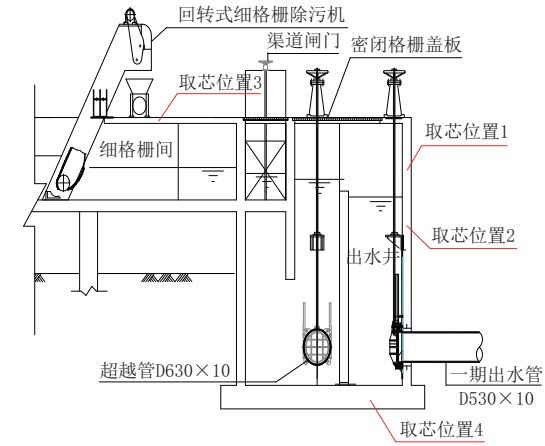


图 3　D 污水处理厂细格栅取芯位置示意图

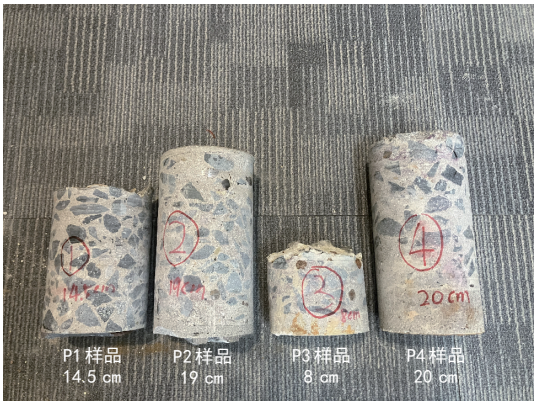


图 4　取芯样品

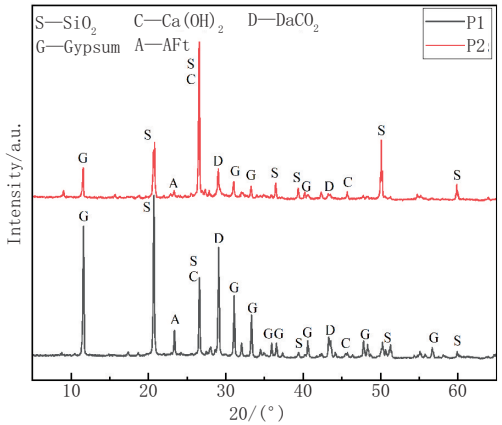
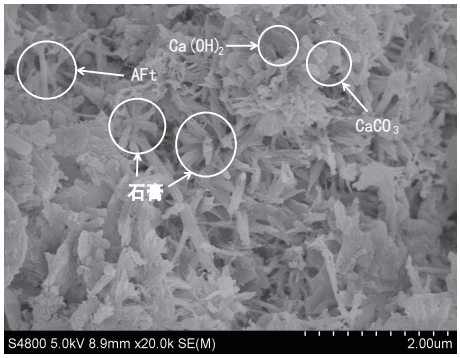


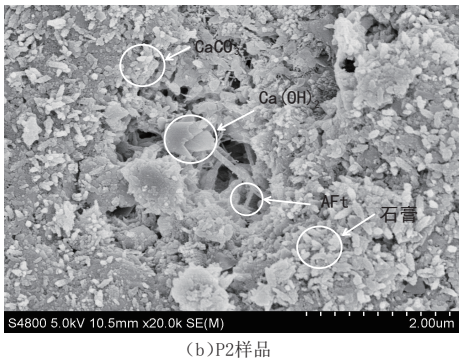
图 5　XRD 图谱

从 P1、P2 取芯样品表面分别制备出边长 0.5 cm 左右的立方体样品作为 SEM 测试样品，样品在 40 ℃

真空干燥箱中干燥至恒重，测试前进行喷金处理[12]。从P1和P2样品的扫描电镜图像（见图6）中可以看出，P1样品的微裂缝内部整体结构疏松，被大量簇状晶体和针棒状晶体填充。结合物相形貌和XRD试验结果可以表明：P1样品中有大量棱角清晰的晶簇状石膏，晶体尺寸较大，其中穿插有针棒状结晶的钙矾石[13]。这是由于P1样品处于干湿交界处，在反复溶解-再结晶的过程中生成的晶体尺寸较大。P1图像中仅可见少量的不规则板状氢氧化钙，其上附着着颗粒状碳酸钙晶体。硫酸盐侵蚀生成的产物石膏和碳化反应生成的产物碳酸钙体积较大，使得微裂缝进一步扩展。与P1样品相比，P2样品的整体形貌较为致密，以无定形C-S-H凝胶为主。其中的石膏晶体呈现细小针状和短柱状形貌，尺寸较小，分布均匀。P2图像中可见部分氢氧化钙，露出的角度仍为120°，可见其碳化程度较低。



（a）P1样品



（b）P2样品

图6　SEM图像

微观结构分析从物相和形貌层面证实，H_2S气体导致硫酸盐侵蚀，协同碳化作用，是导致污水处理厂钢筋混凝土结构性能退化的主要原因。腐蚀的产物产生膨胀应力，替代了原有高强度的胶凝体系，导致混凝土保护层的开裂、剥落与钢筋锈蚀。作为强度主要来源的水化硅酸钙（C-S-H）凝胶被这些疏松的腐蚀产物所替代，导致整个混凝土的胶凝体系强度下降[14-16]。同时，裂缝的产生进一步为更多侵蚀性介质（水、H_2S、CO_2、O_2）的深入提供了通道，形成“腐蚀-开裂-加速腐蚀”的恶性循环。这一过程在干湿交替的液面波动区尤为剧烈，这个恶性循环会不断加剧腐蚀的程度，在混凝土表面形成了层层开裂、剥落的破坏形态。

3　腐蚀归因综合分析

调研结果表明，在城镇污水处理厂各工艺段中，水体的COD、Cl^-、SO_4^{2-}等指标明显低于《工业建筑防腐蚀设计标准》的腐蚀限值。钢筋混凝土结构的腐蚀等级与水质参数无显著相关性。高H_2S浓度与高湿度的气体环境，再加上封闭不通风的结构形式，使这些区域成为腐蚀情况的高发区。结合微观机理分析，污水处理厂钢筋混凝土的腐蚀主要归结为气体环境、结构形式与材料特性三者相互作用的结果。

气体中的H_2S与环境的高湿度的共同作用是引发腐蚀的主导因素。当环境相对湿度超过60%时，H_2S在潮湿的混凝土表面解离产生H^+和SO_4^{2-}等侵蚀性离子，渗入混凝土内部，并与水泥的水化产物发生反应。这个过程生成的钙矾石与石膏等膨胀性晶体，会直接引发微观结构劣化。此外，CO_2引起的碳化作用与硫酸盐膨胀协同发生，进一步加重了混凝土结构的损伤。

结构形式也会改变气体环境的作用。建（构）筑物密闭、通风缺失的结构形式会阻碍气体的扩散，导致水汽与侵蚀介质在封闭空间内富集，大幅加快了腐蚀进程。而露天结构可以削弱气体环境的作用，有效的控制腐蚀。此外，局部构造细节也会改变腐蚀分布，例如液面波动区及好氧池渠道底部，受干湿循环或气泡滞留的影响，也会成为腐蚀易发生的薄弱环节。

混凝土材料内部的化学演变（如硫酸盐侵蚀、碳化）及物理反应（如膨胀、开裂）共同构成了腐蚀的直观表现。钙矾石和石膏等产物的层层累积，将外部环境腐蚀转化为材料内部的机械拉伸应力，最终导致混凝土结构的劣化——从微观尺度上的基体损伤到宏观尺度上的分层开裂、剥落。

4　结论和建议

4.1　结论

（1）污水处理厂钢筋混凝土的腐蚀与水质情况无明显相关性，而是在H_2S/CO_2气体浓度与相对湿度高的预处理段，以及存在特殊工艺或特殊条件的区域（如膜池、生化池好氧区渠道等）。

（2）腐蚀机理是以H_2S引发的硫酸盐化学侵蚀为主，并与CO_2碳化作用相互叠加。其生成的膨胀性产物（钙矾石、石膏）导致混凝土微观结构破坏，在干湿交替等物理因素作用下，形成“腐蚀-开裂-加速腐蚀”的恶性循环。

4.2　建议

（1）对高腐蚀区应优化建（构）筑物通风设计，以避免H_2S腐蚀气体富集。设置智能监控，实现H_2S浓度与湿度的实时监测。在不可避免的气泡和污水聚集区（如好氧区渠道底板），应对混凝土表面设置强化的耐腐蚀防护层，如采用PE板包裹等，利用防腐材料来增强结构的抗腐蚀性。

（2）钢筋混凝土腐蚀情况需要定期检测，重点监测高腐蚀区，及时发现并处理腐蚀损伤。对膜池等特殊工艺单元，规范酸洗、碱洗操作规程，控制清洗频次与药剂浓度，清洗后及时中和与冲洗，避免腐蚀介质残留。

参考文献：

[1] 刘廷滨，赵建昌．城市污水环境下混凝土构筑物特殊防护后耐久性分析预测[J]．混凝土，2010（5）：46-48.

[2] 韩静云，郜志海，张小伟．城市污水对初沉池混凝土不均衡损伤特性研究[J]．土木工程学报，2005（7）：45-49.

[3] 闻宝联．城市污水环境下混凝土腐蚀及耐久性研究[D]．天津：天津大学，2005.

[4] 曹志杰，徐震，徐春蕾．城市污水处理厂混凝土结构防腐要点与设计实例[J]．城市道桥与防洪，2022（1）：234-236.

[5] 史岚岚，刘卫东，於林锋，等．污水环境下混凝土腐蚀现状调研及分析[J]．中国水运（下半月），2019，19（10）：230-231.

[6] 吴庆，朱袁洁，许耀，等．基于SEM和XRD微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析[J]．江苏科技大学学报（自然科学版），2020，34（3）：112-118.

[7] 李恒，王正君，杜英欣．纳米SiO_2对硫铝酸盐混凝土负温力学性能与微观结构的影响[J]．复合材料学报，2025，42（3）：1555-1565.

[8] 马昌龙，王晓健，韩国庆．酸性环境对高强混凝土侵蚀作用的试验研究[J]．河南城建学院学报，2024，33（5）：36-40；132.

[9] 张小伟，韩静云，田永静，等．模拟城市生活污水对混凝土的加速腐蚀[J]．腐蚀科学与防护技术，2003（4）：234-237.

[10] 方祥位，申春妮，杨德斌，等．混凝土硫酸盐侵蚀速度影响因素研究[J]．建筑材料学报，2007（1）：89-96.

[11] 赵卓，元成方，田丰，等．城市污水管道的混凝土腐蚀机理与耐久性设计[J]．中国给水排水，2020，36（05）：73-78.

[12] 吴晗晗．玄武岩纤维混凝土宏微观性能的试验研究[D]．呼和浩特：内蒙古农业大学，2021.

[13] 杨建森．混凝土中钙矾石作用的二重性及其发生条件[J]．土木工程学报，2003（2）：100-103.

[14] 高润东，赵顺波，李庆斌．复合因素作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理[J]．建筑材料学报，2009，12（1）：41-46.

[15] 牛荻涛，杨瑞希，吕瑶，等．SO_2和CO_2共同作用下混凝土性能劣化研究[J]．材料导报，2025,39（5）：152-158.

[16] 李田雨，王维康，李扬涛，等．超高性能海水海砂混凝土的硫酸盐腐蚀破坏机理研究[J]．中国腐蚀与防护学报，2023，43（5）：1101-1110.

（上接第 288 页）

[7] 陈佳蕾，朱桂娥，张枭鸣，等．城市重要水体降雨期管网溢流污染调控策略研究——以苏州河为例[J]．人民长江，2025，56（增刊1）：109-115；120.

[8] 符韵，杨森，李敏，等．黄孝河、机场河流域合流区溢流污染控制标准探索[J]．中国给水排水，2024，40（18）：29-35.

[9] 杨升．某市合流制溢流污染防控及受纳河道水质响应数值模拟研究[D]．西安：西安理工大学，2024.

[10] 安子倩，乔肖翠，刘琰，等．雨污合流制地区溢流污染影响因素及管控建议[J]．环境工程技术学报，2024，14（3）：986-994.

[11] 刘宇轩，高雅弘，王振北，等．城镇合流制排水系统溢流污染控制综述[J]．环境工程，2023，41（12）：32-47.

[12] 陈誉，阳秀春，王聪，等．高度集约开发区域污水截排后雨源型河流的生态重建——以深圳市龙岗河为例[J]．人民珠江，2022，43（9）：23-31；45.

[13] 廖华丰，赵红兵，张碧波，等．市政管网溢流污水及微污染水高标准处理探索与实践[J]．净水技术，2023，42（6）：176-182；191.

[14] 林瑞盛．基于灰绿设施联用的合流制溢流污染控制技术研究[D]．福州：福州大学，2022.

[15] 周金成．源头体积控制的区域参数差异性对合流制溢流污染削减效果影响模拟研究[D]．北京：北京建筑大学，2021.