

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.250215

实验园区废水处理模式探讨及安全影响分析

吴拓¹, 邓黛青², 林媛媛³, 张宝澜¹, 宋婷婷³, 黄炎杰³

(1. 浙江省建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310006; 2. 中国计量大学 质量与标准化学学院, 浙江 杭州 310018;
3. 浙江省环境工程有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对实验园区废水组分复杂、腐蚀性强等特性导致的管网安全问题, 设计实验室废水“浓液专业回收+预清洗废水回收+后清洗废原位预处理+综合废水处理”的四级处理模式, 结合文献计量法和预清洗废水污染程度衰减实验论证工艺的可行性。结果表明实验园区废水四级处理体系可大幅降低污水处理站进水酸碱度波动、削减75%~85%污染物总量, 从而削减80%加药量、65%~80%污泥量和50%综合固废处理成本; 预计可使管网腐蚀速率降低83.6%, 维护成本减少76%。研究成果为实验园区废水处理提供了高效低碳解决方案, 为实验园区排水管网全生命周期安全管理提供技术支撑。

关键词: 实验园区废水; 预清洗; 分质预处理; 管网腐蚀; 排水管网安全

中图分类号: TU992.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2025)05-0144-04

Exploration of Treatment Model for Wastewater in Experimental Parks
and Analysis of Impact on Safety

WU Tuo¹, DENG Daiqing², LIN Yuanyuan³, ZHANG Baolan¹, SONG Tingting³, HUANG Yanjie³

(1. Zhejiang Provincial Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310006, China; 2. School of Quality and Standardization, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 3. Zhejiang Province Environmental Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: In response to the safety issues caused of pipeline network caused by the complex composition and high corrosivity of wastewater in experimental parks, a four-level treatment model for laboratory wastewater, which includes “professional recovery of concentrated liquid + recovery of pre-cleaning wastewater + in-situ pretreatment of post-cleaning wastewater + comprehensive wastewater treatment” is designed. The feasibility of this process is demonstrated in combination with the literature metrology method and the attenuation experiment of pollution degree of pre-cleaning wastewater. The results show that the four-level treatment system of wastewater in the experimental parks can significantly reduce the fluctuation of the pH value of the influent to the sewage treatment station, cut the total amount of pollutants by 75% to 85%, thereby reducing the dosage of chemicals by 80%, the amount of sludge by 65% to 80%, and the comprehensive solid waste treatment cost by 50%. It is estimated that the corrosion rate of the pipeline network can be reduced by 83.6% and the maintenance cost can be cut by 76%. The research result provides an efficient and low-carbon solution for wastewater treatment in experimental parks, and offers the technical support for whole-life cycle safety management of drainage pipeline networks in the experimental parks.

Keywords: experimental park wastewater; pre-cleaning; separation pre-treatment; pipeline network corrosion; drainage network safety

0 引言

实验园区废水汇集不同种类实验室废水, 具有

成分复杂、浓度波动大、生物毒性强的特征, 其处理技术研发面临多重挑战。长三角实验室调研数据表明, 42% 的实验楼存在排水超标问题和腐蚀性导致的管网维护困难^[1]。实验室管网劣化典型损伤包括清洗废水强酸碱造成的均匀腐蚀、点蚀发展和穿孔泄漏等管材化学腐蚀; 氯化物造成的混凝土管表面碳化、钢筋锈胀和结构开裂; 有机溶剂引发的塑料管溶胀以及微生物引发的管道生物环腐蚀和沉积物堵塞, 不同种类实验室废水可能形成的重金属-有机物

收稿日期: 2025-02-25
基金项目: 浙江省建筑设计研究院有限公司科研项目[院(科)立字(2023)33号]
作者简介: 吴拓(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事建筑给排水及给排水管网系统优化等研究工作。
通信作者: 林媛媛(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事给排水及环境保护等工作。电子邮箱: 46705276@qq.com

协同作用使管网堵塞和腐蚀速率提高 3~5 倍^[11]。相关文献计量研究表明实验室废水污染特征图谱与管网损伤污染物贡献率关联如图 1 所示^[3]。2024 年深圳某生物医药园内涝,溯源显示排水能力下降 63%;2020—2024 年长三角实验室集群管网维修费用年均增长 18% 就是上述问题的典型表现。

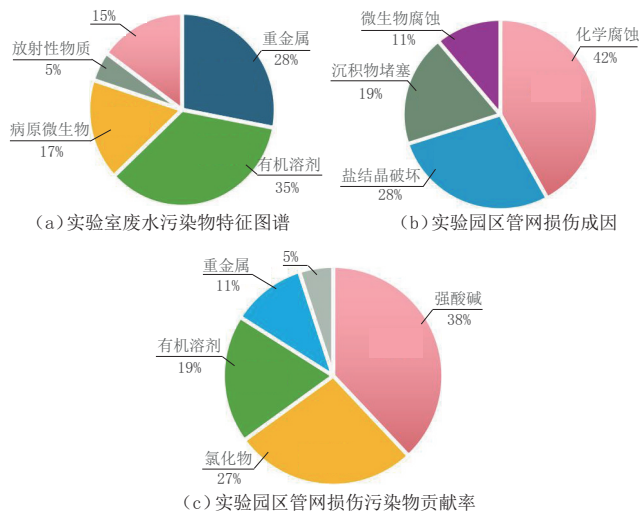


图 1 实验室废水污染特征图谱与管网损伤污染物贡献率关联

1 实验园区废水处理技术研究进展

前期研究表明,实验室废水处理主要矛盾集中于:多源性导致的瞬时冲击负荷大;高毒性导致的处理难度大、重金属/有机废水混合导致处理效率下降 30%~50%^[6-7];清洗废水占总量 65%、但污染负荷仅 18%;粗放式管理的传统混合处理效率低下、综合调节池停留时间远大于 8 h,导致药剂消耗量和化学污泥的二次污染增加;智能化缺失、仅 23% 处理站配备在线监测设备,成本控制和自动化维度存在明显短板,此外目前国内新型难降解废水处理技术突破如微界面强化氧化技术^[2]、单原子催化剂^[4]、等离子体水处理技术^[5]等并未在实验室废水处理技术中良好应用。如图 2 所示,以“工业园区废水”“实验园区废水”“实验室废水”等检索词在 CNKI—中国学术期刊(中国期刊网)进行搜索,利用 CiteSpace 软件对结果进行可视化分析可知国内外实验室废水相关研究多针对小规模、单一的实验室废水^[9-11]、而没有扩大到大规模、综合性的实验室集群、实验楼、实验园区等。如图 3 所示,以“排水管控”“排水管理”等作为检索词进行搜索可知,目前排水管控方面的研究主要针对城市排水的工程项目管理^[1,12]、技术开发、技术研究等方面,部分文章涉及工业园区排水管控。工业园区排水管网研究多针对规划管理与防洪,实验园

区废水处理研究及管网防腐蚀安机制设计存在空白。

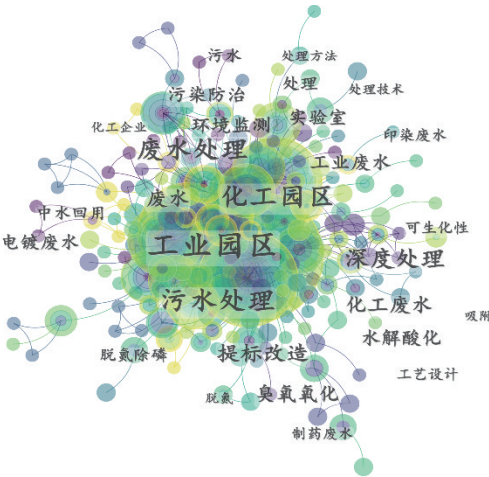


图 2 实验园区废水研究关键词分布图



图 3 实验园区排水管控研究关键词分布图

2 实验园区废水四级处理模式设计

实验园区废水处理技术及排水管控研究的文献计量表明实验室废水处理研究热点从末端处理转向源头控制和防范变迁,其核心是如何优化实验室废水分质预处理;处理技术正朝着“精准识别一定向降解—资源回收”三位一体方向发展。基于这一思想,本文研究设计了实验园区废水四级处理模式(二级回收叠加二级处理工艺,EHEC),具体如表 1 所列。

由表中可见,区别现有实验室废水处理,EHEC 模式通过增加实验操作中的水力预洗环节,并将其产生的高浓度水力清洗废液分类收集并直接进入危废处理处置,同时增加对中低浓度清洗废液的原位预处理消纳,以期大幅减少园区排水管网和后续园区废水处理站的酸、碱、溶剂和有机物收集量及水质水量波动,从而提高园区排水管网的安全性。

表 1 实验园区废水四级处理模式

废水产生	废水类别	废液废水处理阶段			
实验过程	实验废液	分类收集(一级)			
化学清洗	酸、碱、溶剂清洗废液	分类收集(二级)			
水力预洗	高浓度水力清洗废液				
浸泡清洗	中低浓度清洗废液	原位预处理(三级)	化学污泥		
水力冲洗	低浓度清洗废液	排水管网	园区废水处理(四级)	处理出水	市政管道

3 EHEC 模式核心工艺要素可行性论证

EHEC 模式是否经济可行且能提高园区排水管网的安全性取决于水力预洗后的酸、碱、溶剂和有机物削减程度和水力预洗过程产生的高浓度水力清洗废液量两个要素。针对两个要素设计模拟实验,研究水力预洗过程不同次数和不同清洗比下清洗废水污染物浓度衰减规律。将 100 mL 模拟酸性水样分别加入 250 mL 锥形瓶中,振荡后回收,加入 10、20、40、70、100、150、200 mL 纯净水振荡清洗 1 min,采集处理后水样测定记录其紫外扫描图谱。分析污染物浓度随清洗水量变化的曲线图,分析不同清洗用水量下的清洗废水污染程度的衰减速率如图 4 所示;配备化学清洗(碱性清洗剂、酸性清洗剂)或生物降解(有机溶剂模清洗)形成的模拟废水。将 100 mL 模拟水样分别加入 250 mL 锥形瓶中,振荡后回收,加入 20 mL 纯净水振荡清洗 1 min,采集处理后水样;重复上述清洗 5~7 次,测定记录每次采样的紫外扫描图谱。绘制污染物浓度随清洗次数变化的曲线图,分析多次连续清洗过程水样污染程度衰减速率图如图 4 所示。

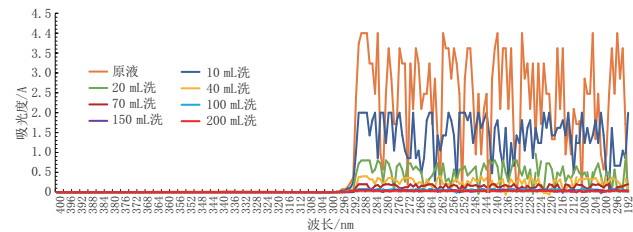


图 4 不同清洗用水量下的水样污染程度衰减速率

如图 4 所示,单次清洗水量越大,清洗废水浓度衰减度越大,20 mL 和 40 mL 对应的 1/8~1/12.5 的容器清洗比是在多次洗涤下的累计衰减最快效应区间。如图 5 所示,清洗 3 次以后清洗废水污染物浓度值已经大幅度下降,清洗 3~4 次即可达到 80% 以上的污染物回收率。该结果表明采用 EHEC 模式进行实验园区废水处理,增加采用 1/8~1/12.5 的容器清洗比、进行 3~4 次水力预洗流程,可使后续浸泡清洗废水的酸碱度弱化 90%~95%、重金属、有机污染物削减

65%~80%、同时增加 30%~50% 高浓度水力清洗废液量形成的危废。采用催化过滤、微界面电化学氧化等工艺进行浸泡清洗废水的原位预处理,处理出水酸碱度变为中性、重金属、有机污染物等末端污染物继续削减 60%~75%。从而使得进入实验园区污水处理站的综合污水同比其它工艺进水酸碱度范围波动大幅缩小、污染物总量减少 75%~85%,可降低 70%~80% 加药量、减少 70%~80% 化学污泥、减少 65%~80% 生物污泥、废水处理站综合固废处理成本降低 50% 并提高处理出水水质的稳定性。

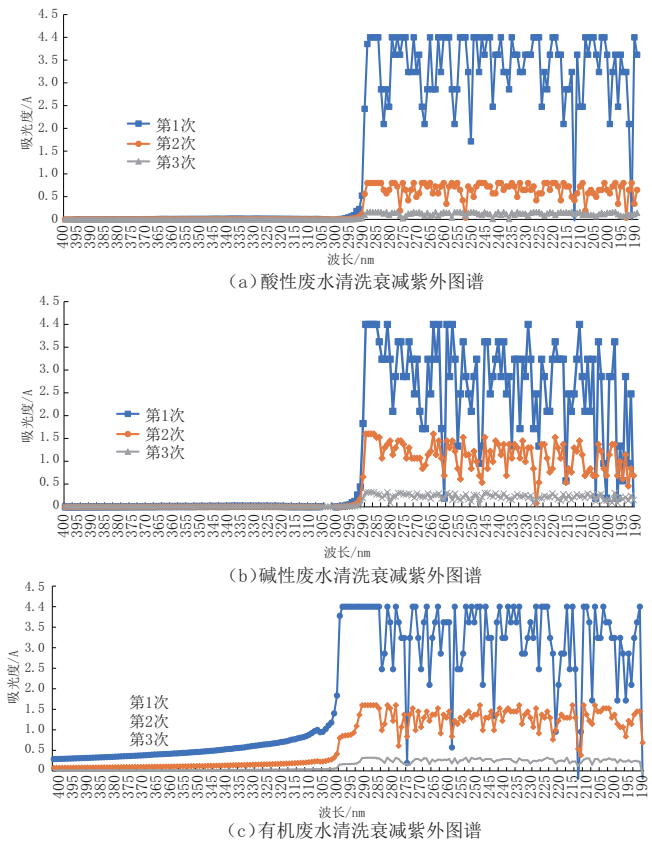


图 5 连续清洗多源水样污染程度的衰减速率

4 EHEC 模式对实验园区排水管网安全增益机制分析

EHEC 模式形成的预清洗回收和原位高级氧化预处理对管网安全增益机制包括有机物降解抑制管道微生物腐蚀、重金属高效分离降低管道电化学腐蚀并减少重金属-有机物协同作用,盐分提升高级氧

化效率的同时自身也部分脱除可防止有机管道的结晶膨胀、从而延长管网寿命,结合国内外文献调研分析^[8],预计可使降低管网腐蚀速率 80%~85%。直接效益体现为管网更换费用降低 85%、维护检修费用降低 80%;社会效益则体现在降低了实验园区由于管网损坏形成的环境风险。结合文献研究本文将实验园区废水技术演进路径及对管网安全保护指标能力分析对比如表 2 所列。

表 2 实验园区技术演进路径及对管网安全保护指标能力分析

代际	处理理念	管网保护指标	代表技术
一代	末端混合处理	腐蚀速率≤0.5 mm/a	化学中和+絮凝沉淀
二代	分类预处理	SS≤100 mg/L	膜分离+活性炭吸附
三代	分质预处理	Cl ⁻ ≤300 mg/L	预清洗回收+原位电化学预处理

5 结 语

针对实验室废水组分复杂、腐蚀性强导致的实验园区管网安全问题,本文设计了实验废水“浓液专业回收+预清洗废水回收+后清洗废原位预处理+综合废水处理”二级回收叠加二级处理的 EHEC 四级处理模式,结合文献计量法和模拟废水实验法进行了工艺的可行性论证,结果表明实验园区废水 EHEC 四级处理体系可降低实验园区污水处理站综合污水进水酸碱度波动、减少 75%~85% 污染物总量,从而

削减 80% 加药量、65%~80% 污泥量和 50% 综合固废处理成本。预计可使管网腐蚀速率降低 83.6%,维护成本减少 76%。EHEC 四级处理模式构建了新一代的实验园区废水处理技术创新与排水管网安全协同优化方案。未来可在原位预处理工艺参数优化开展深化研究。

参考文献:

[1] 傅利,郝家福,安莹,等.工业园区废水深度处理技术研究现状[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 149-155.

[2] Zhang Y, et al. Microwave-assisted catalytic oxidation of laboratory wastewater[J]. Water Research, 2024(221): 118732.

[3] EPA. Guide for Laboratory Waste Management[R]. EPA/600/R-22/218, 2022.

[4] Zhang et al. Single-atom catalysts for advanced oxidation processes. Nature Catalysis, 2023, 6(5): 422-431.

[5] Wang et al. MXene-based nanocomposites for wastewater treatment. Advanced Materials, 2024, 36(12): 2208356.

[6] GB/T 40378—2021, 化学实验室废水处理装置技术规范[S].

[7] 王海棠. 预处理+生化+Fenton 氧化+活性炭吸附工艺处理化工园区混合废水[J]. 辽宁化工, 2021, 50(3): 310-312; 339.

[8] GB 50014—2021, 室外排水设计标准[S].

[9] 陈惟潇,袁怡,卜志威,等. 分质预处理-混凝-水解酸化-生物接触氧化处理涂装废水[J]. 水处理技术, 2022, 48(9): 153-156.

[10] GB/T 40378—2021, 化学实验室废水处理装置技术规范[S].

[11] Chaemiso Tamirat-Dula. Removal Methods of Heavy Metals from Laboratory Wastewater[J]. Journal of Natural Sciences Research, 2019.

[12] HG/T 5821—2020, 化工园区混合废水处理技术规范[S].

(上接第 139 页)

规程[S].

[17] 农村生活污水治理设计管理和文件编制导则[S].

[18] DB31 SW/Z 012—2021, 上海市农村生活污水治理技术指南(试行)[S].

[19] 江苏省生态环境厅, 江苏省农村生活污水治理技术导则(试行)[S].

[20] DB36/T 1445—2021, 农村生活污水收集设施建设技术指南(试行)[S].

[21] 贺艺,刘华林,江海鑫,等. 基于污水源分离的分散式处理系统应用探讨[J]. 水处理技术, 2019, 45(2): 1-6.

[22] 周敬宣,李旻. 真空排水系统的原理与设计[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2013.

[23] 范翔,杜超,孙国志,等. 真空排水系统在综合管廊工程中的应用

探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 37-40.

[24] 易莹,周艳伟,孔伟,等. 广州市某工业园生活区真空排水系统设计计算[J]. 真空, 2013, 50(2): 64-68.

[25] 段金明. 真空排污系统输送机理及系统优化研究[D]. 武汉华中科技大学, 2006.

[26] CECS316: 2012, 室外真空排水系统工程技术规程[S].

[27] 谢元华,韩进,张志军,等. 真空输送的现状与发展趋势探讨(四)[J]. 真空, 2018, 55(5): 34-37.

[28] 霍静静,霍耀东. 真空排水技术在铁路及民建上的应用[J]. 低碳世界, 2023, 13(6): 124-126.

[29] CECS 316—2012, 室外真空排水系统工程技术规程[S].

[30] 孔令为,邵卫伟,叶红玉,等. 农村生活污水治理技术应用的浙江经验及发展方向[J]. 中国给水排水, 2021, 37(2): 12-17.