

市政污水处理厂重金属冲击后活性污泥的重建方法与调控策略

邸强德*, 张名

(中铁水务集团有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:西南城市某一市政污水处理厂遭受高浓度重金属冲击后,通过增加曝气量和投加碳源等方式干预并未实现出水水质达标,活性污泥絮体完全解体,因此执行生化池活性污泥重建。对生化池清池、活性污泥接种和驯化过程进行了详细介绍,可为我国污水处理厂应对类似环境事件提供有效借鉴,快速实现污水厂活性污泥系统重建和出水稳定达标。

关键词:污水处理厂;活性污泥;重金属冲击;重建

中图分类号:TU992.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0355-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.062

Reconstruction methods and regulation strategies for activated sludge after impacting by heavy metals in municipal sewage treatment plant

DI Qiang-de*, ZHANG Ming

(China Railway Water Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: After suffered impact from high concentration of heavy metals, a municipal sewage treatment plant in a city of China adopted some rescue measures, such as increasing aeration rate and adding carbon sources, to deal with the impact but cannot achieve the goal of qualified effluent quality. The floc of activated sludge is disintegrated completely. Therefore, the plant decides to reconstruct the activated sludge for biochemical tank. The details in cleaning biochemical tank, inoculating sludge and sludge domesticating process are described. It can provide an efficient reference for sewage treatment plants to cope with similar incidents. Finally, the plant realizes rapidly the reconstruction of activated sludge system and stable effluent compliance.

Key words: sewage treatment plant; activated sludge; heavy metals impact; reconstruction

突发环境事件中典型重金属污染物毒性极强,不可被生物降解,在生物圈物质循环过程中只会改变分布位置或存在形态,并且重金属易在动植物体内蓄积,进而威胁人体健康^[1-3]。同时,典型重金属污染物因受污染水的移动性强,污染物可沿河道进行长距离迁移,影响范围大,对水生态系统影响显著。污水处理厂负责收纳处理一定区域范围内的污水,包含居民生活污水、工业生产废水等,实施一系列物理拦截分离、生物化学、化学药剂投加等工艺实现出水水质满足规定的污染物排放标准^[4-8]。其中,活性污泥系统在污水处理厂工艺单元中的作用极为显著和重要,通过微生物的生命代谢活动来吸收或转化污水中的污染物,大幅降低污水COD、氨氮、总氮浓度,因此维持和保证活性污泥性状稳定是污水处理厂运行调控的关键工艺段之一。突发性高浓度重金属泄漏排入市政污水处理厂,会导致活性污泥出现重金属中毒^[9-11]。目前,关于污水处理厂活性污泥重金属中毒策略只报道了通过增大曝气量

和投加葡萄糖等方式进行调控,但是重金属污染物具有显著的生物蓄积性,这些方式不能较快缓解或恢复微生物活性,无法满足污水处理稳定达标的的时间和任务紧迫性^[12]。本文中以南城市某一市政污水处理厂遭受突发高浓度重金属泄漏事件为例,详细介绍了活性污泥重金属中毒症状和水质变化特征,以及生化池清池、活性污泥接种和驯化全过程调控手段,可为污水处理厂处理同类型突发环境事件提供借鉴。

1 污水处理厂基本情况

1.1 污水处理厂基本信息

该污水处理厂位于西南某城市,设计处理规模1.5万t/d,采用改良型氧化沟处理工艺,内回流比100%~150%,外回流比45%~52%,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A排放限值,工艺流程如图1所示。改良型氧化沟采用氧化沟末端泥水混合物内回流和二沉池

收稿日期:2024-03-22;修回日期:2024-08-11

基金项目:四川省科技计划项目(2022YFG0129)

作者简介:邸强德(1984-),男,本科,工程师,主要从事污水处理厂运营管理,通讯联系人,1972484847@qq.com。

浓缩污泥外回流方式,强化生物脱氮降低出水总氮浓度,在好氧池出水末端投加聚铁沉淀降低出水总磷浓度。该污水处理厂为城镇污水处理厂,污水收纳包括居民生活污水和工业生产污水,实际进水 2022 年平均化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Cr})为(513±87) mg/L,5 日生化需氧量(biological oxygen demand, BOD_5)为(182±27) mg/L,污水进水可生化性良好;进水总磷(total phosphorus, TP)为

(6.8±0.6) mg/L,进水氨氮(ammonia nitrogen, NH_3-N)为(59±6.2) mg/L,进水总氮(total nitrogen, TN)为(66±5.3) mg/L;实际出水 2022 年平均 COD_{Cr} 为(18.6±2.1) mg/L,出水 BOD_5 为(7.7±0.6) mg/L,出水 TP 为(0.19±0.05) mg/L,出水 NH_3-N 为(0.31±0.27) mg/L,出水 TN 为(7.8±1.6) mg/L,出水稳定达标且部分指标优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 排放限值。

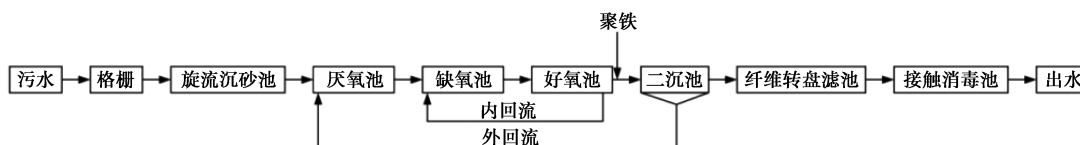


图 1 污水处理工艺流程

1.2 水质分析方法

氨氮、总氮、TP、 COD_{Cr} 均采用标准方法,溶解氧(dissolved oxygen, DO)采用手持式监测设备测定(WTW Multi 3410, 德国),污泥显微观察采用奥林巴斯株式会社 BX51 显微镜(日本)。

2 污泥中毒判断与出水指标

如图 2 所示,2022 年 11 月 22 日—11 月 30 日,污水处理厂连续出现出水水质 COD_{Cr} 、TN、 NH_3-N 、TP 不达标状况。11 月 21 日进水 COD_{Cr} 为 589.6 mg/L、TN 为 62.45 mg/L、 NH_3-N 为 49.57 mg/L、TP 为 5.72 mg/L,出水 COD_{Cr} 为 22.1 mg/L、TN 为 10.65 mg/L、 NH_3-N 为 0.35 mg/L、TP 为 0.16 mg/L,出水水质符合一级 A 排放标准。11 月 22 日进水 COD_{Cr} 为 383.4 mg/L、TN 为 53.42 mg/L、 NH_3-N 为 52.53 mg/L、TP 为 5.41 mg/L,出水 COD_{Cr} 为 62 mg/L、TN 为 36.94 mg/L、 NH_3-N 为 5.28 mg/L、TP 为

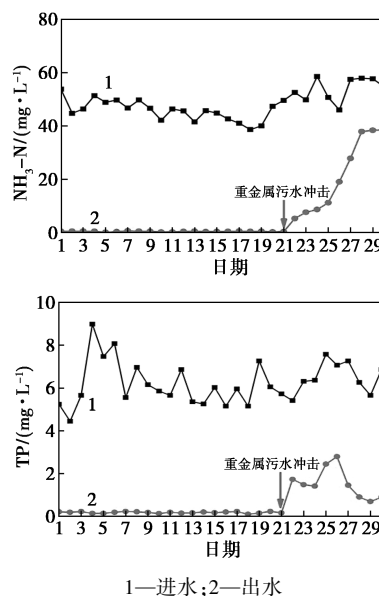
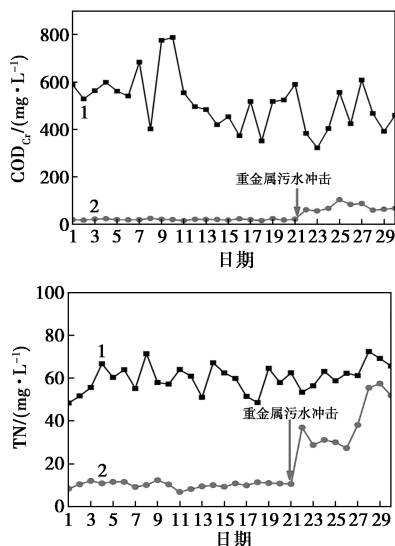


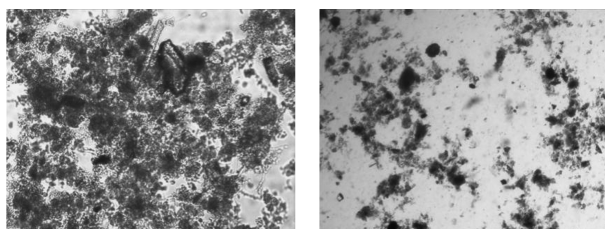
图 2 污水处理厂受重金属冲击前后进水、出水水质变化



1.73 mg/L,出水水质出现不达标状况。

当污水处理厂连续 2 d 出水不达标后,运营班组开始增加干预措施,包括向生化池投加碳源葡萄糖和增加除磷药剂加量,但是出水水质依然不达标。至 11 月 30 日,出水水质不达标时间已达 10 d,且生化池对 TN 和 NH_3-N 处理效果几乎丧失。取生化池好氧段水样送检,水样检出较高浓度的镍(Ni)、钴(Co)重金属,分别为 5.49、6.95 mg/L,判定污水处理厂受到重金属废水冲击。同时,取生化池好氧段污泥进行光学显微镜镜检,并与稳定运行时活性污泥镜检进行对比,如图 3 所示。在污泥中毒前,污泥絮体团聚大,边缘清晰,结构紧密;重金属废水冲击后,污泥明显出现解体,结构明显松散,絮粒变小,

观察未发现轮虫、钟虫、累枝虫等原生动动物。汇总氧化沟中段溶解氧在线监测数据,如图4所示。在11月21日前,氧化沟中段溶解氧稳定在2 mg/L左右;21日后,溶解氧出现陡然上升,表明微生物对溶解氧的利用率降低^[13]。



(a) 中毒前

(b) 中毒后

图3 生化池活性污泥在重金属废水冲击前后镜检图片

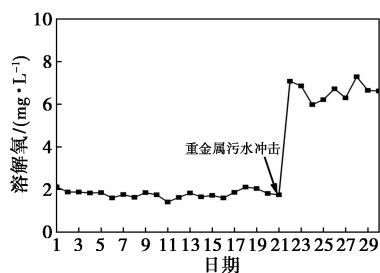


图4 污水处理厂受重金属冲击前后氧化沟中段溶解氧变化

综合水质波动、溶解氧利用变差和活性污泥结构变化现象,重金属废水对活性污泥产生了严重的毒害作用,影响活性污泥的生化活性,导致污水污染物降解效果降低。

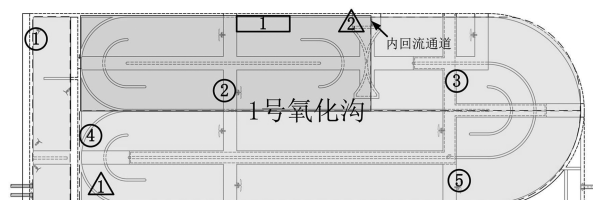
3 污泥中毒后工艺控制策略和过程

3.1 控制策略和前置准备

污水处理厂连续3 d监测到厂区出水水质多项指标出现明显不正常后,厂区运营班组立即给予干预,开始按照污水处理厂不正常运行状况处置,开始增加补充碳源葡萄糖,但是出水水质依然没有好转迹象,出水水质连续9 d未达到排放标准,结合生化池活性污泥出现显著解体现象,通过技术咨询和研判,表明污水处理厂生化系统已出现严重重金属废水冲击,污泥已受到重金属毒害并失去活性^[14-15]。因此开展实施生化池清池和生化系统活性污泥重置处置方案。

12月1日开始生化池清池,关闭配水井闸门,提前协调其他污水处理厂分担污水处理容量;打开1号生化池和1号二沉池放空阀进行清池,满负荷

运行污泥脱水间2台带式压滤机,进行生化池和二沉池污泥脱水。生化系统活性污泥重置,参照污水处理厂生化池启动实施方案,通过外运污泥进行污泥接种和驯化微生物。生化池平面布置、外运污泥投加点、药剂投加点、水质化验取样点如图5所示,1号生化池池容积7 500 m³,有效池深6.5 m。



图示:□ 外运污泥投加点。

药剂投加:△ 碳酸钠投加点;△ 葡萄糖投加点。

水质化验取样点:①厌氧池末段;②缺氧池中段;③好氧池前段;④好氧池中段;⑤好氧池末段。

图5 生化池平面布置、外运污泥投加点、药剂投加点、水质化验取样点分布图

污水处理厂生化系统重置具体措施包括:①联系地区其他市政污水处理厂转运脱水污泥至本厂;②当1号生化池完成清池后,在生化池上部覆盖薄膜进行水体保温;③关闭1号氧化沟出水闸门,打开1号氧化沟生化池进水闸门和内回流通道闸门,开始进水;④待水位到达3 m后开启水下推流器和鼓风机曝气,利用铲车在1号外运污泥投加点投加污泥400 t,通过水流推动作用开始污泥分散循环,连续闷曝;⑤水位达到6.5 m后,关闭进水,闷曝。

3.2 生化池重置控制方案

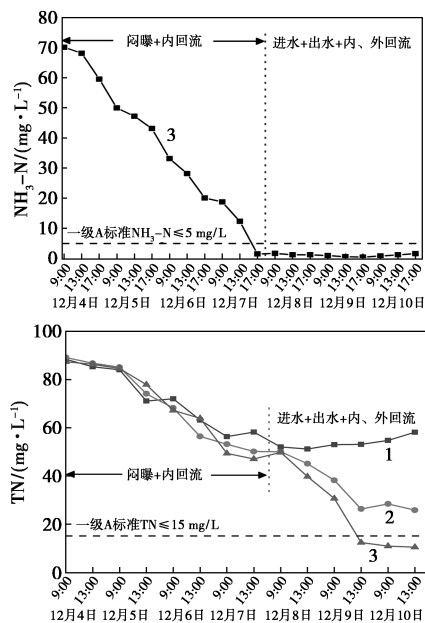
1号氧化沟生化系统重置策略,先通过内回流驯化恢复活性污泥硝化功能,再通过污泥外回流驯化恢复活性污泥反硝化功能,最终先期实现1号氧化沟COD、TN、NH₃-N等出水水质指标达到一级A排放标准;2号氧化沟生化系统重置,通过分流1号氧化沟污泥和1号二沉池污泥到2号氧化沟,最终实现厂区生化系统全部恢复,所以先期目标对象是1号氧化沟。

1号氧化沟开始闷曝后,每4 h检测生化池缺氧段、好氧段的溶解氧,及时将溶解氧数据反馈到中控室,控制缺氧段溶解氧<0.5 mg/L,好氧段溶解氧在2.0 mg/L左右。药剂投加包括碳源葡萄糖和碳酸钠,在药剂投加2号点每2 h投加50 kg固体碳源葡萄糖;活性污泥硝化过程中要消耗碱度,使好氧段水体pH出现降低,因此为保证硝化效果,在药剂投加1号点投加补充碱度的碳酸钠,控制水体pH在7.5

左右。

3.3 生化池水质化验

12月2日10时完成放空1号氧化沟,关闭1号氧化沟出水,开始向1号氧化沟进水,待水位到4m后,向1号氧化沟投加外运污泥,在水下推流器水流推动和底曝装置曝气扰动下,开始进行1号氧化沟内部循环。12月3日14:00点水深到达6.3m,停止进水。为了准确跟踪和了解外运脱水污泥在生化池的驯化活化过程,指导现场工况调节和方案调整,对1号生化池厌氧段、缺氧段、好氧段水体水质进行化验,实验结果如图6所示。根据生化池重置控制方案,首先恢复活性污泥硝化功能,持续取样化验水样氨氮和总氮浓度。每4h现场监测1号氧化沟沿程pH,反馈现场投加碳酸钠维持生化池pH在7.5左右。



1—1号取样点(厌氧末段);2—2号取样点(缺氧末段);
3—5号取样点(好氧末段)

图6 1号氧化沟生化系统重置过程水质氨氮、总氮浓度变化

12月4日9:00点好氧末段氨氮浓度是70.13 mg/L,总氮浓度是87.39 mg/L。在持续闷曝、全部内回流且不进水、不出水条件下,1号氧化沟氨氮浓度逐渐降低,说明1号氧化沟外运污泥微生物在进行生化代谢活动,好氧硝化速率保持稳定;12月7日17:00点好氧末段氨氮浓度是1.54 mg/L,说明体系硝化反应已几乎结束。反馈数据到运行生产部,与技术专家咨询研讨,提出开启1号氧化沟进水出水和进行污泥外回流。

12月7日19:00点,开始1号氧化沟连续进水

出水和开启污泥外回流。通过持续进水出水和硝化液回流,1号氧化沟末端总氮实现快速降低,12月10日13:00点好氧末端总氮浓度是12.43 mg/L,氨氮浓度是1.24 mg/L,初期达到1号生化池降氨氮和总氮目标。2号氧化沟生化系统恢复过程,待水位至3m后,将1号氧化沟泥水混合物部分分流至2号氧化沟,同步投加葡萄糖,使活性污泥快速增长繁殖。通过持续对厂区出水和生化池水质化验、镜检和沉降性能测试,出水氨氮、总氮和COD等指标均满足排放标准,镜检发现钟虫、盖纤虫、累枝虫等微生物。

4 结论

在污水处理厂遭遇重金属废水冲击导致生化池丧失生化功能后,及时干预和制定工艺控制策略和过程方案,通过清池、投加外运污泥和精细管控等方法,7d时间实现生化系统重置恢复,可总结出污泥受重金属冲击特征以及对应工艺调控措施方案。

4.1 污泥重金属中毒特征

(1)出水水质出现长时间不正常和不达标状况,尤其氨氮浓度呈现直线上升。

(2)生化池好氧段溶解氧异常上涨。

(3)生化池活性污泥镜检显示,污泥结构松散,絮粒变小,未观察到游动的微生物。

(4)生化池水质化验重金属含量高。

4.2 污泥重金属中毒后工艺控制策略

(1)关闭厂区进水,并协调地区其他污水处理厂分担处理污水。生化池和二沉池进行彻底放空清池,联系地区其他污水处理厂转运脱水污泥到厂。

(2)开启氧化沟进水,并关闭出水,待水位至正常水位1/2后,使用铲车在缺氧段内回流后段投加外运脱水污泥,开启底推器和曝气风机,持续闷曝。

(3)闷曝过程中,持续在缺氧池前端投加葡萄糖;持续取样化验生化池氨氮、总氮和pH,投加碳酸钠维持生化池pH在7.5左右。待好氧池末端氨氮降低到排放标准限值后,开启生化池外回流,持续进水出水,恢复生化池活性污泥硝化和反硝化功能。

参考文献

- [1] 陈志斌. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Fe^{3+} 对某污水处理厂活性污泥活性的影响[J]. 环境工程, 2017, 35(2): 14-17.
- [2] 王凯凯, 庞国瑞, 何世鼎, 等. 不同水质特征污水厂处理过程中的重金属归趋特性[J]. 净水技术, 2019, 38(1): 68-73.

(下转第365页)

3 总结

(1) 本文搭建了耦合热风作用的破碎机实验装置对气化渣进行预处理,并结合数值仿真研究不同因素对破碎和预干燥效果的影响。破碎机腔内流场分析表明,随转子转速增加,破碎机腔内峰值流场的最大速度从 9.61 m/s 增大到 13.50 m/s,低转子转速的流场速度受底部进气的影响较大;随进气速度增大,峰值流场的最大速度从 13.19 m/s 增大到 13.50 m/s,底部非旋转区的流场速度增加。

(2) 通过单向 CFD-DEM 仿真和实验确定仿真颗粒团尺寸,采用 2.0 mm 的仿真颗粒团尺寸可以降低仿真与实验的误差。破碎仿真结果表明,转子转速提高,破碎率从 86.2% 提升到 93.5%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 2.953 m/s 上升到 4.280 m/s,速度为 2 m/s 到 4 m/s 之间的颗粒数量增多;进气速度增大,破碎率从 89.5% 上升到 93.5%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 4.100 m/s 上升到 4.280 m/s,速度低于 2 m/s 的颗粒数量减少。进料量增加,破碎率从 93.5% 下降到 84.4%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 4.280 m/s 下降至 4.015 m/s 后趋于稳定,速度低于 2 m/s 的颗粒数量增加。

(3) 传热仿真结果表明,进气速度提高,出料温度从 302.06 K 上升到 334.83 K,低温颗粒的数量减少;进气温度升高,出料温度从 329.43 K 上升到 342.79 K,整体颗粒的升温效果有限。

参考文献

- [1] Wang W, Liu D, Tu Y, *et al.* Enrichment of residual carbon in entrained-flow gasification coal fine slag by ultrasonic flotation [J]. *Fuel*, 2020, 278: 118195.
- [2] 范宁, 张逸群, 樊盼盼, 等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(8): 145-154.
- [3] 杜杰, 戴高峰, 李帅帅, 等. 气化细渣基础燃烧特性试验研究

(上接第 358 页)

- [3] 霍培书, 管越强, 周可新, 等. 重金属离子对活性污泥处理污水的影响 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(10): 2173-2178.
- [4] 陈纯, 何占航. 重金属离子对活性污泥系统处理性能的影响 [J]. *河南化工*, 2005, 22(2): 17-20.
- [5] 裴安书, 刘文斌, 林逸宁. 城市污水中重金属的处理方法研究 [J]. *世界有色金属*, 2016, (7): 112-113.
- [6] 方宇媛, 韩光磊, 许旻, 等. 城镇污水处理厂污泥重金属污染及生态风险分析 [J]. *能源环境保护*, 2021, 35(3): 71-74.
- [7] 罗智力. 城镇污水处理厂应对工业废水冲击有效处理技术研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [8] 王方圆, 刘书谱, 曹磊, 等. 城镇小型污水处理厂对重金属的去除 [J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(4): 454-458.
- [9] 盛筱祺, 盛俊宝. 电镀园区重金属总镍污水达标排放——以无

- [J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(2): 83-88.
 - [4] Guo Y, Guo F, Zhou L, *et al.* Investigation on co-combustion of coal gasification fine slag residual carbon and sawdust char blends: Physiochemical properties, combustion characteristic and kinetic behavior [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120387.
 - [5] Ren L, Ding L, Guo Q, *et al.* Characterization, carbon-ash separation and resource utilization of coal gasification fine slag: A comprehensive review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 398: 136554.
 - [6] Zhu D, Xue B, Jiang Y, *et al.* Using chemical experiments and plant uptake to prove the feasibility and stability of coal gasification fine slag as silicon fertilizer [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5925-5933.
 - [7] Zhang J, Zuo J, Ai W, *et al.* Preparation of a new high-efficiency resin deodorant from coal gasification fine slag and its application in the removal of volatile organic compounds in polypropylene composites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121347.
 - [8] 刘开平, 赵红艳, 李祖仲, 等. 煤气化渣对水泥混凝土性能的影响 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(5): 190-195.
 - [9] 饶天曦, 马钊, 张庆龙, 等. 神宁炉细灰掺烧气流床锅炉可行性和经济性分析 [J]. *化工管理*, 2019, (21): 7-8.
 - [10] 曹真真, 王江涛, 孟雪. 水煤浆气化细渣脱水板框压滤机运行总结 [J]. *大氮肥*, 2019, 42(5): 292-294.
 - [11] Jeong I, Lee D, Lim J, *et al.* Study on flow pattern according to rotor design parameter of sewage sludge solid fuel crusher [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15(3): 1471-1479.
 - [12] 陈锐章, 陶从喜, 赵必胜, 等. 水泥窑协同处置城市干化污泥技术及其工程化应用 [J]. *水泥技术*, 2023, (3): 25-31.
 - [13] 张明远. 新型煤泥破碎机结构设计及试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2022, 54(S1): 215-219.
 - [14] 纪长顺, 戴昭斌, 任祥军. 矿用立式煤泥破碎机的研制与应用 [J]. *煤矿机械*, 2020, 41(9): 142-143.
 - [15] 扈树章, 陈继莹, 焦庆国, 等. 基于高水分煤泥饼的细颗粒不黏结破碎机 [J]. *煤炭技术*, 2021, 40(9): 198-199.
 - [16] 刘亮亮, 周伟, 李亮, 等. 高灰煤泥滤饼破碎及均匀配比混料装置的设计 [J]. *山西焦煤科技*, 2021, 45(12): 18-20.
 - [17] 赵权, 高爱华, 刘玥, 等. 粒径与干燥温度对污泥颗粒干燥特性的影响 [J]. *河南化工*, 2023, 40(1): 32-37.
 - [18] 高旭霞, 郭晓镭, 龚欣. 气流床煤气化渣的特征 [J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 35(5): 677-683.
 - [19] 宋瑞领, 李静, 付亮亮, 等. 多喷嘴对置式水煤浆气化炉渣渣特性研究 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(5): 43-49.
 - [20] 高海洋, 梁龙, 靳开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述 [J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 192-208.
 - [21] 王学斌, 于伟, 张韬, 等. 基于粒度分级的煤气化渣渣特性分析及利用研究 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(3): 61-69. ■
- 锡杨市金属表面处理工业园为例 [J]. *环境与发展*, 2017, 29(9): 41, 43.
 - [10] 高秋凤. 工业企业废水排放对城市污水处理厂运行影响的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
 - [11] 楚金喜, 吕丹, 贾清龙, 等. 活性污泥重金属中毒的工艺调控方法与对策 [J]. *净水技术*, 2022, 41(1): 166-172.
 - [12] 付丽亚, 宋玉栋, 王盼新, 等. 突发环境事件中典型水污染物应急去除技术及案例 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 322-328.
 - [13] 姜雅雯, 李申, 黄茜. 污水处理过程中重金属的归趋特性研究 [J]. *环境与发展*, 2019, 31(9): 124-125.
 - [14] 刘书谱. 中小型城镇污水处理厂重金属去除及排放水体的生态风险研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2019.
 - [15] 李龙宇, 毛宇翔, 李永, 等. 重金属在氧化沟式污水处理工艺中的迁移转化 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4): 217-223. ■