

砂石行业废水处理技术与应用

魏芳^{1,2}

1. 中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000

2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山 243000

[摘要] 砂石骨料广泛应用于建筑施工、道路交通、水利工程等各类重大建设项目, 目前省内砂石生产大多采用传统湿法制砂、矿石水洗工艺, 但是, 产生大量高浑浊度、高悬浮杂质的生产废水, 造成河道水体泥沙淤积、水质变差, 还会导致周边土壤板结退化。文章分析了砂石生产废水的产生源头、水质特征, 阐述了絮凝沉降、压滤脱水等当前主流废水处理技术的工作原理, 以及各类技术的适用场景和应用条件。研究通过对比不同区域的矿山实际应用案例, 全方位对比各类废水处理工艺的治理效果、日常运行成本以及水资源、固废资源化利用水平。研究成果既能为砂石行业生产废水精细化、规范化治理提供可落地、可实操的技术参考, 也能为国内同类型地区的砂石行业绿色低碳发展提供借鉴思路。

[关键词] 砂石行业; 废水处理; 絮凝沉降; 固废资源化; 零排放; 智能化管控

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20212

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Wastewater Treatment Technology and Application in the Sand and Gravel Industry

WEI Fang^{1,2}

1. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan, Anhui, 243000, China

2. State Key Laboratory of Safety and Health in Metal Mines, Maanshan, Anhui, 243000, China

Abstract: Sand and gravel aggregates are widely used in various major construction projects such as building construction, road traffic, and water conservancy engineering. Currently, most of the sand and gravel production in the province adopts traditional wet sand making and ore washing processes. However, a large amount of high turbidity and high suspended impurities in the production wastewater are generated, causing sedimentation and deterioration of water quality in river water bodies, as well as leading to soil compaction and degradation in the surrounding areas. The article analyzes the sources and water quality characteristics of wastewater from sand and gravel production, and elaborates on the working principles of current mainstream wastewater treatment technologies such as flocculation settling and pressure filtration dewatering, as well as the applicable scenarios and conditions of various technologies. By comparing practical application cases of mines in different regions, this study comprehensively compares the treatment effects, daily operating costs, and water and solid waste resource utilization levels of various wastewater treatment processes. The research results can provide practical technical references for the fine and standardized treatment of production wastewater in the sand and gravel industry, as well as provide reference ideas for the green and low-carbon development of the sand and gravel industry in similar regions in China.

Keywords: sand and gravel industry; wastewater treatment; flocculation sedimentation; solid waste resource utilization; zero emissions; intelligent control

引言

当前, 我国持续推进新型城镇化建设, 交通、水利等重大基础设施现代化工程全面提速, 砂石骨料作为基建领域不可或缺的核心基础建材, 行业发展空间广阔^[1]。在安徽省砂石行业中, 湿法生产是当地企业普遍采用的主流制砂工艺, 但该工艺在生产过程中会产生大量矿山泥浆废水。

这类废水的突出特点是悬浮物含量高、微细固体颗粒多, 依靠自然沉降的方式很难实现净化处理, 如果随意排放, 极易造成河道淤积、水体污染, 破坏区域水生态环境, 进一步加重当地水土资源的生态压力^[2]。但大量中小民营砂石企业仍存在生产工艺落后、处理设备简陋、日常运维管理不到位等突出问题, 导致全省砂石行业环保治理水平参

差不齐、差距悬殊。因此，针对性地研发适配本地矿山工况的砂石废水处理技术，能够有效解决行业绿色生产的痛点难点，推动砂石产业绿色低碳转型升级。

1 砂石行业废水来源与特征

1.1 废水来源

砂石原矿的表面大多粘连着泥土、风化碎石等各类杂质，为保障矿石破碎质量，企业会在破碎工序前采用高压水清洗原矿，这一环节是砂石生产过程中废水的最主要来源，产水量占到厂区总废水量的45%~55%^[3]。不同区域矿山产生的废水特性差异明显，处理难度也各不相同。皖北地区的石灰岩矿山废水内部杂质颗粒偏大，沉降速度快、处理工艺简单；而皖南地区的花岗岩矿山废水细颗粒杂质占比极高，泥浆细腻难沉淀，整体废水处理难度更大。目前安徽省内超90%的砂石企业都采用湿法制砂工艺，矿石在设备内研磨、撞击破碎的过程中，会产生大量细微矿粉，混入水中会持续形成高浓度的泥浆废水。成品骨料的二次冲洗工序也会产生废水，除此之外，厂区道路、原料成品堆场的清扫冲洗作业，以及进出厂车辆的清洗工作，都会产生含泥废水，且废水中会夹杂少量油污。整体来看，砂石矿山不同生产工序、不同厂区内区域产生的废水，在水量、水质、杂质类型等方面的特征差异十分显著。

1.2 水质特征

通过对多个区域的典型砂石矿山开展实地取样、现场监测与实验室检测分析，从水质水量核心指标来看，这类矿山废水的固液质量浓度普遍处于3%~10%区间，且受生产作业状态和天气影响较大。从废水含有的泥沙颗粒粒度来看，矿山尾泥中粒径小于25 μm 的超细颗粒占比高达86.57%，常规简易沉淀池的处理能力完全达不到排放标准，无法实现废水达标外排^[4]。同时，不同区域矿山的矿石矿物组分差异较大，直接导致各地废水处理难度参差不齐。其中皖北以石灰岩矿山为主，产生的废水水质相对简单、处理难度最低；皖中部分矿区产出的废水呈弱酸性，还含有微量金属离子，处理工艺相对复杂；皖南多为花岗岩矿山，废水当中的细颗粒泥沙黏性更强、极难沉降，是全省砂石废水处理难度最高的区域^[5]。

2 砂石废水处理主流技术分析及对比

2.1 物理沉淀与化学絮凝技术

物理沉淀耦合化学絮凝工艺，是目前砂石行业应用最普遍、性价比极高的基础废水处理技术，适配石灰岩、花岗岩两类主流砂石生产产生的废水，利用高分子絮凝剂的电中和、吸附架桥双重作用，中和废水中悬浮微细颗粒表面的负电荷，彻底破坏胶体颗粒的稳定状态，让原本分散、

悬浮在水中的微小颗粒相互聚拢，形成体积更大、结构更密实的絮体颗粒，再通过沉淀池完成泥水分离^[6]。处理后的上层清水水质达标，可直接回用于砂石生产；底部沉淀的污泥尾泥，则送入压滤设备进行脱水固化处理。通过多组对比试验验证，阴离子聚丙烯酰胺（PAM）最适配本地砂石生产废水。相较于阳离子、非离子两种PAM药剂，阴离子PAM的颗粒架桥聚拢效果最优，尾泥沉降速度可提升30%以上，同时压滤后的滤饼含水率更低，污泥处理效果更好。而阳离子PAM适用性极窄，仅能处理少量酸性且含有微量有机物的矿区废水；非离子PAM因处理效率偏低，目前已基本不再使用。通过正交试验进一步确定，影响该工艺处理效果的三大核心因素，按影响权重从高到低依次为：絮凝剂分子量、尾泥进料浓度、药剂单耗。同时整套工艺的最优运行参数：尾泥进料浓度控制在4%，选用1600万分子量的阴离子PAM絮凝剂，药剂单耗设置为60g/t。在该参数工况下，废水SS悬浮物去除率可达98%以上，出水水质完全满足生产回用标准。

2.2 压滤脱水与固废资源化技术

絮凝沉淀工序产生的底泥泥浆，普遍存在含水率高、流动性大的问题，而压滤脱水能够有效实现泥浆减量化、固化稳定化处理，为尾泥固废资源化利用打下基础。采用板框压滤机和高效隔膜压滤机两种设备处理尾泥，隔膜压滤机的压榨压力更高、脱水效果更出色，处理优势十分明显。板框压滤机仅依靠滤布过滤实现固液分离，尾泥含水率偏高，泥饼整体偏稀，后续转运处置负担较大。而高效隔膜压滤机可通过隔膜二次挤压强化脱水，能有效降低尾泥泥饼含水率，泥饼成型紧实，既减少尾泥堆存占地，也便于后续运输与资源化利用，综合处理效益更优。未经处理的原始泥浆含水率普遍在90%以上，经过高效隔膜压滤机压榨脱水后，含水率能够直接降至20%以下，从根源上杜绝了泥浆渗漏、粉尘飘散等环保风险，具备极高的再生利用价值，可以加工制作新型墙体材料，也能广泛应用于矿山生态修复、边坡覆土、建筑工地回填、道路路基填料、土壤改良等多个场景，真正实现尾泥固废资源化利用。

2.3 膜分离与深度处理技术

现如今，高端建材、精密石英砂产业持续升级发展，传统的絮凝沉淀水处理工艺，已经达不到高端砂石生产过程中的精密清洗用水标准。针对石英砂生产废水含泥量高、水质偏酸性、含有微量有机物的特点，行业研发出“预处理+超滤+树脂吸附+反渗透”组合水处理工艺，在预处理环节，主要对生产废水进行分类沉淀、除油除杂，重点把水体中体积较大的泥沙、悬浮杂质、油污等直观污染物物

底去除，完成废水的初步净化。超滤环节，精准截留水体中常规沉淀工艺处理不掉的超细悬浮颗粒和胶体物质，进一步细化净化水质。然后通过树脂吸附工艺，专门脱除废水中的铁、铜等重金属离子，同时调节水体酸碱值。最后依靠反渗透工艺完成深度脱盐处理，最终出水水质远超普通废水回用标准，水质干净、指标稳定。针对部分水质含盐量极高的矿区，还会配套增设蒸发结晶设备。废水经过蒸发结晶处理后，分离出的结晶盐可按照环保规范合规处置，彻底解决生产过程中盐分不断累积、造成土壤和水体污染的问题。

2.4 智能化自动控制技术

智能化升级趋势下，砂石企业普及智能化管控系统，实现废水处理全流程自动化、数字化、无人值守运行。依靠 PLC 控制器搭建智能加药装置，实时抓取进水浓度、进水流量、出水浊度等实际工况数据，药剂使用效率能提高 20%以上。同时搭配各类水质在线监测仪器，不间断检测 pH 值、悬浮物 SS、化学需氧量 COD、浊度关键指标，监测数据一方面传给环保监管平台，一方面同步存到企业自己的云端。一旦水质指标异常或者设备出现故障，系统会第一时间发出告警提示，减少现场运维的隐患。

对比各类废水处理技术的适配性、经济性与应用优势，见表 1。

由上表可知，絮凝沉淀+压滤脱水工艺综合性价比最优，深度处理工艺水质优势显著，但运维成本偏高，仅适配高端细分领域；简易沉淀工艺成本极低，但处理效果不达标。

3 典型应用案例分析

(1) 案例一：皖南某大型骨料标准化废水处理项目

项目背景：皖南某建筑石料综合利用项目为区域规模化砂石生产项目，设计年产建筑砂石骨料 115 万吨，采用全湿法生产，废水产生量大、生产连续性强，对水处理系

统稳定性与标准化要求高，严格落实雨污、清污分流环保设计。

处理工艺：采用“絮凝沉淀池+高效隔膜压滤系统”工艺，构建完整废水收集-调节-处理-回用体系。生产废水经调节池匀质匀量后投加阴离子 PAM 絮凝，沉淀池固液分离，上清液入清水池全部回用于矿石及骨料冲洗；底泥经隔膜压滤机高压脱水生成泥饼，存入一般固废暂存库，外运用于矿山生态修复与路基回填。

实施成效：SS 去除率 99%以上，生产废水 100%闭环回用零外排，年减排废水超 15 万吨，泥饼资源化利用率 100%。初期雨水单独处置，消除溢流隐患。

(2) 案例二：皖北某建材技改精细化废水管控项目

项目背景：皖北某新型建材企业实施年处理 8 万吨水洗机制砂中小型砂石技改项目，企业原有水处理设施简陋，存在洗车废水油污污染、处理效率低下、运维成本偏高等问题。

处理工艺：推行分质分类、分级处理模式，对不同废水设置独立单元：车辆冲洗含油废水经隔油池+三级沉淀池预处理，消除油污、浮杂，防止设备堵塞与絮凝剂失效；洗砂高浓度泥浆废水依托絮凝沉淀罐、高效压滤机、清水池系统，经药剂精准投加、分级沉降、高压压滤完成泥水分离。

实施成效：分级处理模式杜绝絮凝剂中毒、出水浑浊现象，废水全部回用，药剂消耗下降 15%，运维成本降低，压滤泥饼外售资源化利用。

(3) 案例三：皖东某石英砂高难度废水深度处理项目

项目背景：在生产加工过程中产生的废水，水中泥沙含量高、水体呈弱酸性，同时还带有少量微量金属离子。由于高端石英砂精密生产对回用水水质要求极高，行业回用标准十分严苛，传统的絮凝沉淀处理工艺处理能力有限，无法彻底净化废水，出水水质达不到高端生产用水标准，因此必须对原有废水处理工艺进行深度升级改造。

表 1 砂石废水处理技术对比分析

处理工艺	SS 去除率	出水水质	运维成本（元/m ³ ）	适用场景	资源化利用率	智能化适配度
简易自然沉淀	60%~75%	浊度高、细颗粒残留多，无法回用	0.2~0.3	小型零散砂石作坊、临时生产项目	30%以下	低，纯人工运维
絮凝沉淀+常规沉淀	95%~98%	水质清澈，满足常规生产回用	0.5~0.8	中小型石灰岩、花岗岩砂石常规生产项目	90%以上	中等，可加装半自动控制
絮凝沉淀+压滤脱水	98%~99.5%	水质稳定，完全闭环回用	0.9~1.2	大中型标准化砂石骨料生产线	100%	较高，适配全自动加药监控
超滤+反渗透深度处理	99.8%以上	高纯度净水，替代自来水	2.5~3.5	高端石英砂、特种砂石生产项目	100%	极高，全智能自动化运维
膜分离+蒸发结晶	100%	零废水外排，水质无杂质无盐分	4.0~5.0	高污染、高管控标准特种矿山项目	100%	极高，远程智能管控

处理工艺：采用多单元组合式废水深度处理工艺，预处理单元，主要负责对生产废水进行分类收集和初步沉降处理，把废水中的大颗粒泥沙、水面漂浮杂质等体积较大的污染物拦截去除；核心净化单元，整合搭配超滤、树脂吸附、反渗透三种成熟工艺协同作业，分级分步净化水质，依次去除废水中的超细悬浮颗粒、胶体杂质、金属离子以及酸性物质。固化单元，通过振动膜设备搭配蒸发结晶设备对浓水进行专项处置，彻底消化处理生产废水。

实施成效：产出的回用水，水质指标远超行业常规回用标准，完全可以直接替代自来水，用于高端石英砂的精密清洗工序。不仅彻底攻克了酸性、难降解石英砂生产废水的治理难题，还能大幅减少企业自来水采购用量，有效降低生产用水成本。

4 结论

经过梳理砂石行业废水的产生源头、水质特点、现有常用处理手段以及实际工程项目案例可以看出，砂石废水处理的突出难题，是微细悬浮泥沙难以实现彻底分离。这类细泥颗粒质量轻，仅依靠自然沉淀无法完成有效沉降。行业若要实现绿色可持续发展，应当将废水循环利用、固体废渣资源化处置作为核心发展思路。现阶段絮凝沉淀搭配压滤脱水工艺，性价比高、运行稳定、操作简便，废渣资源化利用程度也比较可观，很适合大部分砂石企业使用，

也是当地落地应用比较多的主流处理方案。膜分离结合蒸发结晶这类深度处理技术，更适合环保要求极高的特种砂石生产线，是行业往精细化方向升级的重要技术方向。另外，通过借助智能化的自动管控手段，能够进一步帮助企业提升处理效率，对整个砂石行业环保能力的整体提高起到重要助推作用。

【参考文献】

- [1]张家峰,邓兵.JX 水电站智慧砂石自动监测及预警系统设计及应用[J].四川水利,2025,46(6):142-146.
- [2]肖欢,杨雪.水利水电工程施工期废污水处理方法研究[J].水上安全,2025(22):97-99.
- [3]张冉,邢子琪,刘昊哲,等.工地施工废水水质水量特性及处理工艺[J].广东化工,2025,52(6):112-116.
- [4]栢孝金.JX 水电站人工砂石加工废水处理设计及处理效果[J].四川水利,2025,46(5):147-151.
- [5]朱仁龙,贾玉涛,刘涛.矿山骨料生产线废水处理系统设计与实现[J].矿业装备,2025(7):156-158.
- [6]夏志华,陶玮.基于絮凝沉降结合技术的水利水电工程砂石废水处理研究[J].粘接,2025,52(7):49-52.

作者简介：魏芳（1986—），女，河南林州市人，汉族，硕士研究生，高级市政工程师，就职于中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司，从事给水排水设计工作。