

# 天然砂石料筛洗用水循环利用技术及应用

苏刚峡

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

**【摘要】**：天然砂石料在筛洗过程中对水资源的消耗量大，产生的废水含有高浓度悬浮物及多种污染物，直接排放不仅会浪费水资源，还会引发环境污染。文章立足于天然砂石料筛洗用水的环节特性、污染机理及循环利用要求，系统阐述泥沙分级分离、细颗粒与胶体去除、水质稳定等关键技术，详细介绍循环利用系统的构成、工艺参数优化及智能化控制方法，并结合实际案例，从实施操作层面说明技术应用方式，旨在为天然砂石料行业实现筛洗用水高效循环利用提供全面技术参考，推动行业节水减排与可持续发展。

**【关键词】**：天然砂石料；筛洗用水；循环利用；废水处理技术；系统优化

DOI:10.12417/2811-0528.25.20.069

## 引言

天然砂石料作为基础设施建设、建筑工程中不可或缺的基础材料，其生产过程中的筛洗是保证砂石料级配和洁净度的关键工序，该环节需消耗大量水资源。随着我国水资源供需矛盾日益突出，以及环保法规对工业废水排放要求的不断严格，传统筛洗过程中“一次用水、直接排放”的模式已难以适应绿色发展需求，实现筛洗用水的循环利用成为行业可持续发展的必然选择。目前，天然砂石料筛洗废水因含砂量高、颗粒组成复杂，处理难度较大，现有技术在处理效率、运行稳定性及成本控制等方面仍存在不足。基于此，文章围绕天然砂石料筛洗用水循环利用展开探讨，为提升天然砂石料行业水资源利用效率、降低环境污染提供了切实可行的解决方案。

## 1 天然砂石料筛洗用水特性及循环利用基础

### 1.1 筛洗用水环节与水质特征

天然砂石料筛洗包括粗筛、冲洗、细筛、脱水四个环节，各环节用水特性差异显著，详情如表1所示：

表1 天然砂石料筛洗各环节用水及废水特性

筛洗环节	用水量占比	SS浓度 (mg/L)	主要污染物	颗粒粒径范围
粗筛	30%	2000-5000	石屑、粗砂	0.5-5mm
冲洗	40%	15000-20000	黏土、细砂	0.001-2mm
细筛	15%	8000-12000	细砂、石粉	0.075-1mm
脱水	15%	5000-8000	石粉、胶体	<0.1mm

回用水质需满足《建筑与工业给水处理设计规范》(GB50015)，核心指标包括SS≤100mg/L，浊度≤5NTU，总硬度(以CaCO<sub>3</sub>计)≤450mg/L，pH值6.5-8.5，水循环利用率需根据当地水资源禀赋设定，缺水地区应≥90%，丰水地区应≥70%。

### 1.2 废水污染机理

泥沙颗粒作为筛洗废水中的核心污染物，其污染机理主要体现在物理、化学和生物三个方面。物理污染表现为高浓度SS使水体浑浊，回用过程中会加剧水泵叶轮、筛网等设备的磨损，缩短设备使用寿命；化学污染源于黏土颗粒释放的钙离子、镁离子，这些离子与水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>结合，易形成碳酸钙、氢氧化镁沉淀，造成管道和设备结垢，影响系统正常运行<sup>[1]</sup>；生物污染则是因为循环水中含有源于植被腐殖质的有机物，为微生物滋生提供了营养源，夏季高温时易滋生藻类，导致水质恶化、管道堵塞，增加系统维护成本。

### 1.3 循环利用基本要求

回用水质需严格满足《建筑与工业给水处理设计规范》(GB50015)，要求悬浮物(SS)≤100mg/L，浊度≤5NTU，总硬度(以CaCO<sub>3</sub>计)≤450mg/L，pH值6.5-8.5，以确保回用后不影响砂石料筛洗质量和设备正常运行。水循环利用率需结合当地水资源禀赋确定，缺水地区水循环利用率应≥90%，丰水地区应≥70%，通过合理设定利用率目标，确保生产作业有序推进，实现节约水资源和废水减排的目的。

## 2 筛洗用水循环利用关键技术

### 2.1 预处理技术：泥沙分级分离

预处理技术的有效应用，可实现泥沙分级分离，为后续深度处理奠定基础，主要包括格栅与沉砂池处理及水力旋流器分

离。格栅与沉砂池处理中，格栅用于拦截粒径>10mm 的石屑，栅距设为 5-10mm，可有效防止大块杂质进入后续处理单元损坏设备；沉砂池采用平流式，通过控制停留时间 1-2min，能去除 60%以上粒径>0.5mm 的粗砂，显著降低后续处理负荷。水力旋流器则针对 0.075-0.5mm 的细砂进行分离，采用直径 300-500mm 的设备，其分离效率公式为：

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{d^2 \rho_s v_0}{18\mu D}\right)$$

其中， $\eta$ 为分离效率， $d$ 为颗粒直径（m）， $\rho_s$ 为颗粒密度（ $\text{kg/m}^3$ ）， $v_0$ 为进口流速（m/s）， $\mu$ 为水的动力黏度（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）， $D$ 为旋流器直径（m）；通过优化进口流速（3-5m/s）与锥角（ $10^\circ$ - $15^\circ$ ），细砂去除率可达 85%以上，分离出的细砂可作为建筑用砂副产品回收。

### 2.2 深度净化技术：细颗粒与胶体去除

深度净化技术的应用，涉及混凝沉淀和过滤处理这两个环节，主要用来去除<0.075mm 的细颗粒及胶体。混凝沉淀环节采用“聚合氯化铝（PAC）+聚丙烯酰胺（PAM）”复合混凝剂，PAC 投加量 50-100mg/L，通过压缩双电层作用使胶体颗粒脱稳，PAM 投加量 1-3mg/L，借助架桥作用使脱稳颗粒凝聚形成大絮体，便于后续沉淀分离；沉淀池采用斜管沉淀池，控制表面负荷  $3\text{-}5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、停留时间 2-3h，可使 SS 去除率稳定在 95%以上，出水  $\text{SS}\leq 100\text{mg/L}$ 。过滤处理在混凝沉淀之后进行，沉淀后水进入石英砂滤池，滤料粒径 0.8-1.2mm，滤速 8-10m/h，进一步去除水中残留的细小颗粒，使浊度降至 5NTU 以下；对于细筛等对水质要求较高的环节，可增设活性炭吸附柱，通过活性炭的吸附作用去除水中有机物（COD 去除率 30%-40%），避免微生物滋生影响回用效果<sup>[2]</sup>。

### 2.3 水质稳定技术：防结垢与防腐

水质稳定技术包括阻垢处理、防腐处理和杀菌灭藻，是保障循环系统长期稳定运行的关键。在阻垢处理方面，当循环水中钙镁离子浓度较高时，可投加有机膦酸盐（如 ATMP），剂量 2-5mg/L，通过螯合钙离子阻止碳酸钙结晶形成；也可采用电磁除垢仪，利用高频电磁场使钙镁离子形成松散絮体，随排泥排出系统，避免管道结垢。防腐处理中，对金属管道与设备，投加 2-4mg/L 锌盐形成钝化膜，隔绝水体与金属表面接触，防止腐蚀；对混凝土结构，控制循环水 pH 值在 7.5-8.5，避免酸性水体对混凝土的侵蚀<sup>[3]</sup>。杀菌灭藻采用次氯酸钠（投加量 0.5-1mg/L）或紫外线（剂量 20-30mJ/cm<sup>2</sup>），每周处理 1-2 次，有效杀灭水中微生物，防止生物黏泥堵塞管道和设备。

## 3 循环利用系统集成与优化

### 3.1 系统构成

天然砂石料筛洗用水循环系统由废水收集系统、处理系统、回用系统和污泥处置系统四部分构成，遵循“分质收集、分级处理、按需回用”的设计思路。废水收集系统采用明渠与集水池结合的方式，按粗筛、冲洗、细筛环节分别设置收集管道，确保各环节废水分质收集、避免交叉污染，集水池内安装液位传感器，与水泵联动实现自动启停，保证收集过程稳定高效。处理系统采用分级处理模式，依次为预处理单元（格栅+沉砂池+旋流器）、深度处理单元（混凝沉淀池+滤池）、水质稳定单元（药剂投加装置+杀菌设备），各单元协同作用，逐步提升水质。回用系统将处理达标的水储存于清水池，通过变频水泵根据不同环节用水需求分别回用至粗筛（水压 0.2MPa）、冲洗（水压 0.4MPa）、细筛（水压 0.3MPa）环节，管道采用 PE 材质，具备良好的耐腐耐磨性<sup>[4]</sup>。污泥处置系统对沉淀池与滤池产生的污泥进行处理，经板框压滤机脱水使污泥含水率降至 60%以下，脱水后的泥饼可用于制砖或路基填料，实现固废资源化利用。

### 3.2 工艺参数优化

工艺参数优化主要包括水量平衡、药剂投加优化和反冲洗控制，是提升系统处理效率、降低运行成本的重要手段。水量平衡方面，根据各环节用水量比例（粗筛 30%、冲洗 40%、细筛 15%、脱水 15%），设计处理系统规模为筛洗总用水量的 1.2 倍（预留 20%余量），确保在水量波动时仍能满足处理需求，避免因处理能力不足影响回用。药剂投加优化通过正交试验确定最佳配比，当 PAC 与 PAM 质量比为 30:1 时，絮体形成速度最快（5-10min），沉淀效率最高，可在保证处理效果的同时减少药剂消耗。反冲洗控制中，滤池采用气水联合反冲洗方式，控制气冲强度  $15\text{-}20\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、水冲强度  $5\text{-}8\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，反冲洗周期 12-24h，既能有效清除滤料表面截留的杂质，又避免过度冲洗造成的水资源和能耗浪费，确保滤料再生效果<sup>[5]</sup>。

### 3.3 智能化控制

系统配置 PLC 控制系统实现智能化运行管理，实时监测进水（流量、SS 浓度、pH 值）、处理单元（沉淀池液位、滤池压差、药剂余量）、出水（SS 浓度、浊度、硬度）等关键参数；当监测参数超出设定范围时，系统自动发出报警信号，并根据预设逻辑调整运行状态，如增加混凝剂投加量、提前进行滤池反冲洗等，减少人工干预，提升系统运行稳定性<sup>[6]</sup>。同时，系统具备数据记录与分析功能，可对运行数据进行存储和趋势分析，为工艺优化、设备维护提供数据支持，进一步提高循环利用系统的运行效率和经济性。

## 4 应用案例分析

### 4.1 案例概况

选取产能分别为 500t/h、1000t/h、2000t/h 的三个天然砂石料厂应用本文所述循环利用技术,实施过程中首先根据各厂产能和用水特性进行系统设计。对于 500t/h 产能的砂石厂,按各环节用水量比例设计废水收集管道管径和布局,确保分质收集顺畅;预处理单元选用栅距 8mm 的机械格栅,平流式沉砂池尺寸根据废水量确定,水力旋流器选用直径 300mm 设备;深度处理单元的斜管沉淀池表面负荷设为  $3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,石英砂滤池滤速  $8\text{m}/\text{h}$ ;水质稳定单元按比例配置药剂投加装置和紫外线杀菌设备,并安装 PLC 控制系统实现智能化运行。1000t/h 和 2000t/h 产能的砂石厂在设备选型和参数设置上,根据实际废水量和水质情况进行相应放大和调整,如增大沉淀池尺寸、增加处理单元数量等,确保处理效果满足回用要求。

### 4.2 技术效益

环境效益方面,通过上述技术的应用,三个案例均实现了显著的节水减排效果,年节水总量达 150-650 万  $\text{m}^3$ ,减少 SS 排放 2000-8000t, COD 排放削减 50-200t,有效缓解了区域水

资源压力,降低了对周边水体的污染。经济效益方面,系统处理成本主要包括药剂费(0.3-0.5 元/ $\text{m}^3$ )、电费(0.2-0.3 元/ $\text{m}^3$ )、人工费(0.1-0.2 元/ $\text{m}^3$ ),总运行成本 0.6-1.0 元/ $\text{m}^3$ ;按工业水价 3 元/ $\text{m}^3$ 计算,500t/h 产能的砂石厂年节约水费约 300 万元,系统投资回收期 1.5-2 年,具有良好的经济可行性<sup>[4]</sup>。社会效益方面,循环系统运行稳定,未发生因水质问题导致的设备故障,砂石料产品合格率提升 5%-8%,企业环保信用评级由“一般”升至“优良”,增强了企业市场竞争力,为行业树立了绿色生产典范。

## 5 结语

总之,天然砂石料筛洗用水循环利用技术通过精准分析用水特性,结合泥沙分级分离、细颗粒与胶体去除、水质稳定等关键技术,实现了筛洗废水的高效处理与回用,有效解决了传统用水模式下的水资源浪费和环境污染问题。循环系统的集成优化与智能化控制,进一步提升了技术的实用性和经济性。应用案例表明,该技术在环境、经济和社会效益方面均具有显著优势。未来,应持续优化处理工艺,推动该技术在天然砂石料行业的广泛应用,为行业绿色可持续发展提供有力支撑。

## 参考文献:

- [1] 周丽.天然砂石料筛洗用水循环利用技术及应用[J].中国水能及电气化,2023,(09):39-43.
- [2] 周军奎.天然砂砾石河滩料用于土石坝反滤料技术.云南省,中国水利水电第十四工程局有限公司,2023-05-18.
- [3] 张建民,吕江明,彭勃荐,张涛,彭习川.不同试验方法检测人工砂石粉含量的差异分析[J].工程建设与设计,2022,(18):167-169.
- [4] 金广明,申继军,申明远,耿贵军,李鑫.搅拌站废混凝土污水零排放系统及效能匹配性研究[J].建筑机械,2021,(07):55-57.
- [5] 刘占妮,牛智峰,周欢欢.搅拌站砂石分离污水零排放技术研发与应用[J].建设机械技术与管理,2021,34(02):49-52.
- [6] 周闻言,李良成,徐菁芝,王璐.新型标准化砂石厂设计要点分析[J].绿色环保建材,2020,(09):11-12.