

南水北调左排倒虹吸漂浮物垃圾清理技术研究

刘君晓

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450018

摘要：南水北调工程中，左排倒虹吸作为关键水工建筑物，其漂浮物垃圾清理技术直接关系到输水安全与水质保障。基于此，本文从漂浮物垃圾的特性入手，简要介绍了我国的南水北调工程，针对其左排倒虹吸漂浮物垃圾清理技术进行了分析，涉及拦截系统设计、清理作业平台、防淤堵与导流结构以及技术实施流程等方面，以保障倒虹吸长期稳定运行，为南水北调工程的水质安全与输水效率提供技术支撑。

关键词：南水北调；左排倒虹吸；漂浮物；垃圾清理

引言：南水北调工程作为我国水资源调配的重大战略性工程，其左排倒虹吸在跨越河流、沟渠时承担着关键输水任务。然而，受上游来水及周边人类活动影响，倒虹吸进口常面临大量漂浮物垃圾堆积问题，包括塑料、树枝、生活垃圾等，这些漂浮物不仅会堵塞栅条、降低过流能力影响工程安全，还可能携带污染物威胁水质安全。因此，研发高效的漂浮物垃圾清理技术，成为保障倒虹吸安全运行、提升工程综合效益的迫切需求。

1 漂浮物垃圾的特性

(1) 从物理特性看，漂浮物垃圾的形态多样且复杂。其尺寸跨度大，小至微塑料颗粒，大至整棵倒伏的树木或成堆的塑料泡沫。形态上，既有片状结构如塑料薄膜、包装纸，也有块状物体如废弃的塑料瓶、金属罐，还有纤维状物质如绳索、织物碎片。这些不同形态的漂浮物在水流作用下会呈现不同的运动状态，片状物易随风浪或水流快速扩散，块状物可能因重量较大在局部区域聚集，纤维状物则容易缠绕形成更大的团块，增加清理难度^[1]。漂浮物垃圾的密度差异显著，部分轻质材料如聚乙烯、聚丙烯制成的塑料制品密度远小于水，可长时间漂浮在水面，而一些被水浸泡的木材或含有金属部件的废弃物密度接近或大于水，可能部分悬浮或沉入水体中层，随水流缓慢移动。(2) 化学特性方面，漂浮物垃圾成分复杂且具有潜在危害性。许多漂浮物由合成高分子材料制成，如塑料袋、塑料瓶等，这些材料在自然环境中难以降解，会长期存在于水体中。部分塑料制品在生产过程中添加了增塑剂、稳定剂等化学助剂，这些物质可能在水环境中逐渐释放，对水生生物产生毒性影响。此外，漂浮物垃圾还可能吸附水中的其他污染物，如重金属离子、有机污染物等。(3) 生物特性

上，漂浮物垃圾为微生物和水生生物提供了特殊的生存环境。一些藻类和细菌能够在漂浮物表面附着生长，形成生物膜。这些生物膜不仅会改变漂浮物的物理性质，使其更容易聚集和缠绕，还可能通过代谢活动影响周围水体的化学环境。同时，漂浮物垃圾还可能对水生生物的生存空间造成挤压，干扰其正常的觅食、繁殖和迁徙行为，破坏水生态系统的平衡。

2 南水北调相关概念

南水北调工程是我国为缓解北方水资源短缺而实施的重大战略性基础设施，通过东、中、西三条调水线路与长江、黄河、淮河、海河四大流域构建“四横三纵”的总体布局，实现水资源的跨区域调配。(1) 东线工程以江苏扬州江都水利枢纽为起点，利用京杭大运河及平行河道逐级提水北送，连接洪泽湖、骆马湖等调蓄湖泊，最终向天津及胶东地区供水，解决黄淮海平原东部缺水问题。(2) 中线工程从汉江上游丹江口水库引水，沿唐白河流域西侧穿越方城垭口，经黄淮海平原西部边缘在郑州以西穿越黄河，依托京广铁路西侧自流至北京、天津，为华北平原核心区域提供稳定水源。(3) 西线工程规划在长江上游通天河、雅砻江、大渡河筑坝建库，通过输水隧洞穿越巴颜喀拉山调水入黄河上游，重点解决青甘宁蒙陕晋等六省区黄河上中游及渭河关中平原的缺水问题，并可相机向黄河下游补水。三条线路互为补充，形成南北调配、东西互济的水资源合理配置格局。南水北调工程不仅解决了北方地区长期缺水难题，还通过生态补水改善河流生态环境，推动受水区地下水压采与污染治理，对区域经济社会可持续发展具有深远影响^[2]。作为世界规模最大的调水工程，其规划与实施体现了我国在水资源调配领域的系统性思维与工程技

术创新能力。

3 左排倒虹吸漂浮物垃圾清理技术

3.1 拦截系统设计

曲坝式拦污栅作为左排倒虹吸漂浮物拦截的核心结构,其设计融合了地形适应性、水流动力学与多级拦截理念,整体结构由缓坡、防淤堵墙及多级栅条组成,各部分功能分工明确且协同作用。(1)缓坡位于倒虹吸进口前侧,呈前高后低的倾斜形态,其作用在于降低水流速度,使漂浮物因惯性作用向进口区域聚集,同时为后续拦截设施提供稳定的安装基面。防淤堵墙沿缓坡顶部延伸,高度略高于常规水位,其核心功能是拦截泥沙、石块等重质杂物,防止其随水流进入拦截区造成底部沉积。该墙采用钢筋混凝土浇筑,表面光滑以减少杂物附着,底部与缓坡紧密连接形成封闭结构,确保重质杂物被有效阻隔在倒虹吸管道之外。(2)多级栅条是曲坝式拦污栅的拦截主体,由水平栅条与倾斜栅条组合构成。水平栅条位于最前端,呈平行排列且间距较小,主要拦截尺寸较大的漂浮物如树木枝干、塑料箱等。其水平布局可分散水流冲击力,避免因局部受力过大导致结构变形,同时为后续清理作业提供稳定的行走平台。倾斜栅条紧随水平栅条之后,呈一定角度向上延伸,形成“前低后高”的立体拦截网。这种设计利用水流动力学原理,使小型漂浮物如塑料袋、泡沫块等在随水流上升过程中被倾斜栅条捕获,同时通过角度优化减少对水流的阻力。倾斜栅条的倾斜角度经过流场模拟优化,既保证足够的拦截面积,又避免因角度过大导致水流湍流加剧,从而维持整体水流的平稳通过。(3)水平与倾斜栅条的组合实现了对不同尺寸漂浮物的分级拦截。大尺寸漂浮物被水平栅条直接阻挡,小尺寸漂浮物在随水流上升过程中被倾斜栅条捕获,形成“先粗后细”的拦截逻辑^[3]。这种分级设计显著提高了拦截效率,避免了单一栅条因间距过大导致小型漂浮物逃逸的问题。同时,栅条间距与布局经过水力计算优化,在保证拦截效果的前提下,最大限度减少了栅条对水流的阻挡面积。水流通过栅条时,部分动能转化为势能,形成局部缓流区,进一步降低了漂浮物的通过概率。

3.2 清理作业平台

(1)第一栅条作为人工清理作业平台的核心支撑结构,其稳定性设计直接关系到操作人员的安全与清理效率。该栅条采用加宽处理,宽度设计兼顾人体工程学与作业空间需求,确保操作人员在清理过程中有足够的站立与移动空间,避免因空间狭小导致的失衡风险。承重方面,栅条主体选用高强度钢材,通过结构力学优化

增强整体刚性,能够承受多名操作人员及清理工具的重量,并通过分布式承重设计避免局部应力集中,防止因长期使用或重物压迫导致变形。(2)防滑处理是保障安全的关键环节,栅条表面采用耐磨防滑材料覆盖,通过增加表面粗糙度提升摩擦力,即使在水流冲击或潮湿环境下仍能保持稳定抓地力,防止操作人员滑倒。此外,栅条边缘设置圆角过渡,避免尖锐边角对操作人员造成意外划伤,进一步提升了作业安全性。(3)模块化连接组件的设计旨在实现拦污架与防淤堵墙的快速拆装,降低维护复杂度。T型拉杆作为核心连接件,其一端通过螺纹与拦污架固定,另一端采用卡扣结构与防淤堵墙的预留孔位对接,通过旋转卡扣即可完成锁定或解锁,整个过程无需专业工具且操作简便。定位销则用于辅助定位,其头部为锥形设计,能够自动引导插入防淤堵墙的定位孔,确保拦污架安装时的精准对齐,避免因位置偏差导致连接松动或水流泄漏。(4)连接组件的材料选用耐腐蚀合金,表面经过防锈处理,可长期适应水体环境而不发生锈蚀,保证连接的可靠性。拆装时,操作人员只需松开T型拉杆的卡扣并拔出定位销,即可将拦污架整体移除,无需逐个拆卸螺栓或焊接点,显著缩短了维护时间。模块化设计还支持局部组件的单独更换,若某部件损坏,可直接替换对应模块而无需更换整个结构,进一步降低了维护成本。

3.3 防淤堵与导流结构

一方面,防淤堵墙是左排倒虹吸进口区域的关键防护结构,其核心功能在于通过高度差构建物理屏障,拦截泥沙、石块等重质杂物,防止其随水流进入管道并在底部沉积。该墙沿倒虹吸进口前沿纵向延伸,顶部高度略高于正常水位,形成明显的挡水界面。当水流携带杂物靠近时,重质杂物因惯性作用及重力影响,优先在防淤堵墙前侧沉积,而水流则通过墙顶溢流或底部绕流继续向管道方向流动。这种设计利用了杂物与水流的动力学差异,通过高度差将大部分重质杂物阻隔在管道外,有效减少了底部沉积物对进口通水能力的威胁。同时,防淤堵墙底部与基础结构紧密连接,形成封闭空间,避免杂物从墙底缝隙进入管道,进一步增强了拦截效果。其表面采用光滑处理,减少杂物附着,降低人工清理频率,确保长期运行稳定性。另一方面,倾斜栅条的导流作用则侧重于优化水流形态,提升漂浮物拦截效率并降低结构受力^[4]。倾斜栅条以一定角度向上延伸,与水平面形成锐角,当水流经过时,栅条的倾斜布局会改变水流方向,诱导其产生螺旋状涡旋。这种涡旋效应能够增强水流对漂浮物的裹挟能力,使原本分散的漂浮物在离

心作用下向拦截区中心聚集,形成高密度聚集区,便于后续清理。并且,倾斜栅条通过分散水流冲击力,将原本集中作用于栅条前端的动能转化为沿栅条表面的切向力,显著降低了水流对栅条的直接冲击强度,延长了结构使用寿命。此外,涡旋的形成还能够在栅条后方形成局部缓流区,进一步减缓水流速度,为漂浮物沉降提供条件,减少其随水流进入管道的概率。倾斜角度的设计经过流体力学优化,既保证足够的导流效果,又避免因角度过大导致水流阻力增加或涡旋稳定性下降。

3.4 技术实施流程

技术实施流程围绕汛期监测、清理作业与后期维护三个核心环节展开,形成闭环管理体系以保障左排倒虹吸漂浮物拦截系统的长效运行。(1)汛期监测与预警是流程的起点,通过在倒虹吸进口及上游河道布设高清摄像头与水位监测设备,实时捕捉漂浮物堆积动态,结合气象部门提供的降雨强度、风速风向等数据,分析水流挟沙能力与漂浮物迁移趋势^[5]。当监测到漂浮物覆盖面积超过预设阈值或水位快速上涨时,系统自动触发预警信号,通知运维人员启动清理预案,并根据实时数据动态调整清理优先级与资源调配方案,确保清理作业与水文条件变化同步。(2)分级清理作业遵循“先机械后人工”的原则,首先启用自动化打捞船或悬挂式抓斗等机械装置,利用其高效覆盖能力快速清除河道表面大面积漂浮物,减少人工作业强度与安全风险;待机械作业完成后,由专业人员穿戴防护装备进入栅条区域,使用长柄工具清理机械难以触及的细小杂物及缠绕在栅条上的纤维类物质,确保拦截面无残留;最后对拦污栅、防淤堵墙等结构进行全面检查,重点加固松动连接件、修复局部变形,恢复系统整体稳定性。(3)后期维护管理以预防性维护为主导,制定周期性巡检计划,定期检查拦污栅钢材表面锈蚀情况、混凝土结构裂缝发展及模块化

连接组件的磨损程度,通过无损检测技术评估结构健康状况;针对防淤堵墙底部易沉积区域,采用高压水枪冲洗与人工清掏相结合的方式,清除泥沙、腐殖质等沉积物,防止其硬化后影响墙体排水功能;对老化或损坏的T型拉杆、定位销等连接组件及时更换,选用耐腐蚀材料提升部件耐久性,同时建立备件库存管理制度,确保维护响应时效。通过全流程的精细化管控,技术实施流程实现了从风险预警到问题处置再到系统优化的完整闭环,为倒虹吸工程的安全运行提供了持续保障。

结语

综上所述,南水北调左排倒虹吸漂浮物垃圾清理技术的研究与实践表明,通过物理拦截系统优化、分级清理作业标准化,可显著提升漂浮物清除效率与运维管理水平。未来,随着物联网、人工智能等技术的深化应用,漂浮物垃圾清理技术将向自动化、智能化方向进一步发展,为南水北调工程的高质量运行提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 王伟,李强.南水北调中线工程穿越河流段地质风险评估[J].水利学报,2023,54(3):298-307.
- [2] 段朝杰,陈荣国,石艳柯,等.基于优选地震强度参数的地下倒虹吸结构易损性分析[J].水力发电,2024,50(08):28-37.
- [3] 高京伟,安丽丽,李莎,等.倒虹吸和泵站在跨河污水管中的应用[J].给水排水,2022,58(S2):25-28.
- [4] 温正策,张友录.浅谈水利隧洞倒虹吸衔接段开挖方法[J].中国水能及电气化,2022,(08):34-40.
- [5] 周殊凡,傅宗甫,张茹玉,等.侧向进水倒虹吸进水池消涡措施试验研究[J].中国农村水利水电,2022,(06):54-59.