

气动式深水清淤技术在水利工程安全运行中的应用

张每文¹ 李 晶²

1. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心 湖北 武汉 430000

2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430000

摘 要：水利工程是水资源管理与防洪减灾的核心基础设施，其安全运行直接关系到区域经济发展与生态安全。但长期淤积的泥沙会导致库容缩减、水流受阻，甚至威胁工程结构的稳定性。传统清淤技术因作业深度受限、效率低下或环境扰动大等问题，难以满足深水区域的治理需求。气动式深水清淤技术通过气动力驱动与设备创新，突破了传统方法的局限性，成为保障水利工程长效运行的重要技术手段。本文对该技术的应用价值与实践路径进行研究，希望为水利工程安全维护提供科学支撑。

关键词：气动式深水清淤技术；水利工程；安全运行；淤泥治理

水利工程作为保障水安全、调节生态平衡及支撑社会经济发展的核心载体，其长期稳定运行面临泥沙淤积的严峻挑战。深水区域的淤泥堆积不仅加速库容损失、削弱调蓄能力，还可能改变水流动力学条件，诱发闸坝基础掏空或结构应力异常等安全隐患。在深水清淤领域，常规机械或水力手段常因环境适应性差、作业扰动强或能耗高等问题，难以实现安全性与经济性的平衡。气动式深水清淤技术依托气体动力传递与精准控制机制，可在不破坏水体分层结构的前提下，完成高精度、低扰动的淤泥抽吸与输送，成为破解深水清淤难题的创新方案。

1 气动式深水清淤技术概述

气动式深水清淤技术是一种基于气体动力学原理的环保型清淤方法，其核心是通过压缩空气驱动设备，形成可控负压或动能，实现深水区域淤泥的高效抽吸与输送。该技术主要由气动泵、输泥管道、气源系统及智能控制模块构成，作业时通过气体动力将水下沉积物破碎、悬浮并定向转移至指定区域，避免传统机械挖掘对河床或坝体结构的直接冲击。相较于传统清淤手段，其优势在于可适应大水深、复杂地形及敏感生态区域，作业过程中水体扰动小，可有效减少对水生生物和工程结构的二次损害。此外，气动技术通过调节气压与流量，能够精准控制清淤范围与深度，为水利工程淤积治理提供灵活、安全的解决方案，是保障工程安全运行的关键技术支撑。

2 气动式深水清淤技术在水利工程中应用的重要性

2.1 保障水利工程结构安全

水利工程长期运行中，泥沙淤积会显著改变水工建筑物周边的受力状态，威胁结构稳定性。例如，坝前或

闸门底部淤积可能导致基础不均匀沉降，甚至引发裂缝或渗漏风险。气动式清淤技术通过非接触式作业模式，利用气体动力精准清除关键部位的淤积物，避免传统机械清淤对坝体、闸门或护坡的直接物理损伤。其低扰动特性可维持原有河床或库底形态，防止因清淤操作不当导致的二次掏空或结构失稳，从而降低工程安全隐患，延长设施服役寿命^[1]。

2.2 维持水利工程功能可持续性

水库、河道等水利设施的核心功能依赖于设计库容与水流畅通。淤积会削弱调洪蓄水能力，导致防洪标准下降或供水保障不足。气动式技术能够深入传统设备难以覆盖的深水区，高效清除高密度、大范围的淤积层，恢复有效库容与过流断面。此外，该技术可针对重点淤积区域实施定向清理，避免因局部堵塞引发水流紊乱或设备磨损，确保工程在防洪、灌溉、发电等综合功能上的长期稳定发挥。

2.3 实现生态与运行安全的协同

传统清淤手段常因高能耗、强扰动等问题，对水生生物栖息环境造成破坏，甚至因悬浮物扩散影响下游水质。气动式技术通过密闭输泥与精准气压调控，大幅减少作业过程中的泥沙扩散与水体混浊，降低对鱼类、底栖生物及水生生态链的干扰。在保障清淤效率的同时，该技术兼顾了水域生态平衡，避免因生态恶化间接加剧工程运行风险，为水利工程安全运行提供了环境友好型解决方案。

3 气动式深水清淤技术在水利工程安全运行中的应用

3.1 水库库区淤积治理与库容恢复

随着水库运行年限的增长，入库泥沙在库底持续沉积形成致密淤积层，尤其在坝前深水区与库尾回水变动

带,淤积物逐渐侵占有效库容,削弱水库调蓄能力,甚至改变库区水流流态,对坝体结构安全构成潜在威胁。气动式深水清淤技术通过系统性作业模式,为水库淤积治理提供了高效、低扰动的解决方案。在具体应用中,清淤设备通常依托可移动式作业平台或定制清淤船部署于目标水域。作业前,结合水下地形扫描与淤积层密度分析,确定清淤范围与抽吸深度。气动泵通过柔性管道深入库底,利用压缩空气产生的负压效应,将黏稠淤泥破碎为流态混合物,随后通过密闭输泥管道定向输送至岸上排泥场或资源化处理设施。这一过程避免了传统绞吸或抓斗作业对库底基岩或防渗结构的机械损伤,同时通过气压动态调控,可适应不同粒径泥沙的抽吸需求,确保清淤深度与库底地形的平滑过渡,防止局部过度开挖引发库岸失稳^[2]。

针对库区淤积物分布不均的特点,气动式技术可结合实时监测数据,实施分区、分层清淤策略。例如,在坝前淤积严重区域,采用高频低气压模式逐层剥离表层松散泥沙;对于库尾板结性淤积层,则通过间歇性高压脉冲气动冲击,实现硬质泥沙的松动与抽吸。作业过程中,同步监测库区水位、流速及浊度变化,动态调整清淤强度与输泥速率,最大限度减少悬浮物扩散对水质及下游生态的影响。清淤后,通过定期回测库容曲线与水下地形数据,评估库容恢复效果,为后续调度运行提供依据。此外,气动式清淤技术在水库维护中还注重淤积物的资源化利用。抽吸上岸的泥沙经脱水固化处理后,可用于堤防加固、土地复垦或建筑材料生产,既降低了清淤弃渣的环境压力,又实现了淤积物的经济转化,形成“清淤—治理—利用”的闭环管理模式。

3.2 河道深槽疏通与行洪安全保障

随着河道运行时间的推移,主槽深泓区泥沙淤积问题逐渐凸显,导致过流断面缩窄、糙率增大,不仅降低行洪效率,还可能因局部水位壅高加剧堤防漫溢风险,威胁沿岸居民与基础设施安全。气动式深水清淤技术通过针对性疏通作业,为恢复河道设计行洪能力、维护护岸结构稳定提供了科学手段。在具体实施中,清淤团队需结合水文监测与地形勘测数据,优先锁定淤积严重的深槽段及弯道冲刷平衡区。作业时,采用搭载气动清淤模块的水下机器人或可移动式作业船,沿河道轴线或设计疏浚线布设设备^[3]。气动泵通过柔性导管深入河床底部,利用压缩空气驱动产生的可控负压,将板结泥沙逐层剥离并吸入密闭输泥系统。相较于传统疏浚船械,该技术无需大规模开挖或扰动河床基质,可通过调节气压与抽吸频率,精准控制清淤厚度与范围,避免对护岸基

础、丁坝等水工结构的隐性掏空,保障河道形态与水力条件的自然衔接。

水利工程安全运行中,河道深槽淤积物的特征较为复杂,因此清淤作业需动态调整工艺参数。例如,对于表层松散细沙,采用连续低气压抽吸模式,快速清除覆盖层;对于底层胶结性泥沙或夹杂砾石的淤积体,则通过间歇性高压气动冲击,实现硬质沉积物的破碎与分离。作业过程中,同步监测河床高程变化与水流流态,利用实时反馈数据优化清淤路径,确保疏浚后深槽纵坡平顺、横断面符合设计过流要求。此外,气动式技术通过全封闭输泥管道,将抽取的泥沙直接输送至岸上脱水站或运输船舶,有效避免传统疏浚产生的悬浮物扩散问题,减少对下游水质及水生生态的干扰。清淤完成后,需结合多波束测深与水力模型模拟,验证深槽疏通效果。重点评估关键断面水位—流量关系曲线的恢复情况,以及护岸结构周边流速场的稳定性,确保行洪能力提升的同时,不因局部流态改变诱发新的冲刷隐患。通过周期性维护疏浚,河道深槽可长期维持设计过流能力,降低汛期高水位对堤防的渗透压力与滑塌风险。此外,清除的淤积物经筛分处理后,可用于堤防填筑或生态护岸建设,实现资源循环利用,进一步强化河道综合安全保障能力。

3.3 闸坝前池与消能设施淤积防控

在水利工程安全运行中,闸坝前池及消能设施的淤积问题直接影响闸门启闭灵活性、消能效率及结构稳定性。前池区域因水流减速易沉积泥沙,长期淤积可能堵塞闸门底槛轨道,导致启闭阻力增大或密封失效;消力池内淤积物则改变水流流态,削弱消能效果,甚至引发池底混凝土空蚀或结构应力异常。气动式深水清淤技术通过低扰动、高精度的作业模式,为这类敏感区域的淤积防控提供了可靠手段。实际作业中,清淤团队需结合水下三维声呐扫描与淤积物力学特性分析,精准定位前池底部及消力池死水区的淤积层。针对闸前狭窄作业空间,气动式设备采用模块化设计,通过浮筒平台或轨道式移动支架灵活部署。作业时,气动泵通过伸缩臂深入闸底淤积层,利用压缩空气产生的脉冲式负压,将板结淤泥破碎为可流动浆体,经密闭输泥管道输送至岸上处理站,避免传统机械清淤对闸门底槛、止水设施的碰撞风险,同时通过气压动态调控,确保清淤厚度与基底保护层的保留,防止因过度开挖导致前池底板掏空或渗漏隐患^[4]。

在处理消力池内因水流回旋形成的漩涡状淤积时,可以利用气动式技术多向气动喷嘴与自适应抽吸头进行

协同作业,调整喷嘴角度与气压强度,对池底不同区域的淤积物进行分层剥离,优先清除靠近消力坎与导墙根部的沉积物,恢复池底设计坡度与水流扩散条件。作业过程中,实时监测池内水位波动与结构振动数据,动态优化清淤强度,避免因局部负压过大诱发池底混凝土剥落或结构变形。此外,全封闭输泥系统可有效控制悬浮物扩散,减少对下游河道的二次污染,保障消能设施清淤与生态保护的协同推进。清淤完成后,需通过水工模型试验与现场流态观测,验证消能效果的恢复情况。重点评估闸门全开工况下,消力池内水跃形态、流速分布及池底动水压力的稳定性,确保消能设施在设计洪水条件下安全运行。同时,清除的淤积物经脱水固结后,可用于堤防填筑或生态修复工程,实现资源化利用。通过周期性清淤维护与智能化监测预警,闸坝前池与消能设施得以长期维持设计功能,规避因淤积导致的闸门卡阻、消能失效等连锁性运行风险,为水利工程整体安全提供精细化保障。

3.4 生态敏感区清淤与风险协同管控

生态敏感区作为水域生态链的核心节点,其清淤作业需在保障工程安全与维系生物多样性间实现精准平衡。传统清淤手段因扰动性强、污染物扩散风险高,易破坏底栖生物栖息环境或引发水体二次污染,而气动式深水清淤技术通过低干扰作业与全过程管控,为这类区域提供了工程安全与生态保护的双重解决方案。具体而言,清淤团队需划定生态保护红线,结合底栖生物分布、底泥污染物迁移规律及水文条件,制定分区清淤策略。针对饮用水源地取水口、鱼类产卵场或湿地核心区,采用轻量化气动清淤装置,通过浮筒平台或无人船搭载作业。气动泵配备自适应抽吸头,以低扬程、小流量模式贴近河床作业,利用气体负压精准剥离目标淤积层,同时保留表层富含有机质的生态基质,避免破坏水生植物根系或底栖动物巢穴。作业全程采用全封闭输泥管道,将抽取的泥沙直接输送至岸上封闭式处理站,阻断污染物向水体的扩散路径,确保清淤区与周边水质的物理隔离^[5]。

在实践中,若发现底泥中有重金属或有机污染物富集的区域,可运用气动式技术调整气压与抽吸速率,实

现污染层与清洁层的选择性分离。例如,在污染层较薄的区域,采用浅层抽吸模式,仅移除表层高风险淤积物;对于深层混合污染底泥,则通过气动冲击与筛分装置的协同作用,分离粗颗粒杂质与细颗粒污染物,减少后续处理难度。清淤过程中,同步监测水体溶解氧、浊度及生物活动指标,利用实时数据动态调整作业参数,确保悬浮物浓度始终低于生态阈值,最大限度降低对浮游生物及鱼类的生存干扰。清淤后的生态修复环节,应清除的污染底泥经脱水固结与稳定化处理后,可作为生态护坡填料或人工湿地基质,实现废弃物的资源化利用;而保留的清洁基质层则为底栖生物群落的自然恢复提供基础。同时,通过布设生态浮岛或沉水植物种植区,加速清淤区域的水体自净能力与生物多样性重建。

“清淤—修复—再生”的闭环模式,不仅消除了淤积引发的行洪安全隐患,还通过生态功能的主动修复,降低了因生物群落退化导致的岸坡侵蚀或水体富营养化等次生风险。

结束语

气动式深水清淤技术通过低扰动、高精度及生态友好等特性,为水利工程淤积治理提供了创新性解决方案。其在保障结构安全、恢复工程功能、维系生态平衡等方面的综合优势,凸显了现代清淤技术向多目标协同发展的趋势。未来,随着技术优化与智能化应用的深化,气动式清淤将在水利工程安全运行中发挥更核心的作用,助力实现“除淤不伤基、清淤不毁绿”的可持续发展目标,为构建韧性水利体系提供坚实支撑。

参考文献

- [1]邓远远,陈晨.浅谈如何抓好水利工程运行安全生产监督管理工作[J].湖南水利水电,2024,(04):106-107.
- [2]任实,胡兴娥,邢龙,等.三峡水库坝前深水清淤疏浚技术研究[J].长江科学院院报,2023,40(01):24-28.
- [3]乐鹏程.水利工程安全运行与管理探讨[J].水利科学与寒区工程,2022,5(03):119-121.
- [4]气动式深水清淤技术助力水利工程安全运行[J].中国水利,2020,(19):86.
- [5]施观宇.水利工程安全运行与现代化管理研究[J].工程建设与设计,2019,(14):228-229.