

水工金属结构表面淡水壳菜清理技术研究进展

应立锋¹ 王 炜¹ 尉华军¹ 杨韶成¹ 张 凌²

1. 浙江奔惠建设有限公司 浙江 绍兴 312000

2. 杭州国电大坝安全工程有限公司 浙江 杭州 310014

摘要:淡水壳菜(学名*Limnoperna fortunei*),又称福寿螺或斑马贻贝近亲,是一种极具破坏性的外来入侵性水生生物。20世纪末传入我国南方水域后,凭借强大繁殖与附着能力,大量附着于水库、水电站等水利工程的金属结构表面,威胁工程安全、降低设备效率并造成经济损失。高效、环保、经济地清除已附着的淡水壳菜,是水工领域亟待解决的关键难题。本文综述了国内外水工金属结构表面淡水壳菜清理技术的研究进展:阐述其生物学特性、危害机理及清理挑战;从物理、化学、生物及综合防治四方面评述主流及新兴技术;分析当前清理技术在效率、成本等方面面临的核心瓶颈;最后展望未来,提出发展“智能感知-精准决策-绿色执行”一体化的智能清理机器人系统,加强长效防污涂层与生态友好型药剂研发,是高效、可持续运维管理的必然趋势。

关键词:淡水壳菜;水工金属结构;生物污损;清理技术;防污涂层

引言

水利工程关乎国计民生与能源安全,但外来水生生物入侵问题愈发严峻。淡水壳菜原产于中国南部及东南亚,环境适应和繁殖扩散能力强,是全球性生态与工程灾害源。1990年代在广州首次被发现后,它迅速沿我国主要水系扩散,已广泛分布于多地大型水利枢纽工程。其幼体浮游后会永久附着于硬质基底,水工金属结构是其理想栖息地,附着后分泌强力足丝蛋白,形成牢固粘附。大量聚集会形成生物污损层,增加水流阻力、降低设备效率、加速金属腐蚀,削弱结构承载能力与服役寿命,某大型水电站每年损失高达数千万元。传统应对策略有预防和被动清理,但预防难杜绝入侵,被动清理面临技术落后、成本高、易污染等困境。因此,系统梳理评估现有清理技术、探索先进方案意义重大,本文将全面回顾相关研究,为科研、工程人员及管理者提供参考并指明创新方向。

1 淡水壳菜的危害特性与清理挑战

1.1 生物学特性与附着机理

淡水壳菜属于双壳纲、壳菜科,其生命周期包括受精卵、担轮幼虫、面盘幼虫和成体四个阶段。其中,面盘幼虫期(约5-30天)是其扩散和附着的关键窗口。在此期间,幼虫通过纤毛摆动在水中游动,利用化学感受器和触觉感受器感知水流、光照、基底材质等环境信号,最终选择适宜的硬质表面定居。一旦选定位置,幼虫会分泌一种由蛋白质和多糖构成的复合粘液,即足丝。足丝的一端锚定在基底上,另一端连接在壳菜的足部,形成一个柔韧而强韧的“锚链”。这种附着方式使得成年

壳菜能够抵抗强大的水流冲刷,牢牢固定在金属表面。

1.2 对水工金属结构的危害

淡水壳菜对水工金属结构的危害是多方面的:(1)水力性能劣化:在拦污栅、滤网、冷却水管等过流部件上大量附着,会显著减小有效过流面积,增加局部水头损失,导致水泵能耗剧增、水轮机出力下降^[1]。(2)结构安全威胁:密集的壳菜群落增加了结构的附加荷载,尤其在闸门启闭过程中,可能因重量突变引发操作故障。更严重的是,壳菜死亡后留下的空壳和有机残骸会形成缝隙,为厌氧腐蚀菌(如硫酸盐还原菌)创造微环境,诱发严重的点蚀和缝隙腐蚀,极大缩短金属结构的使用寿命。(3)维护成本激增:定期停机、排水、人工下潜或搭设脚手架进行清理,不仅耗费大量人力物力,而且作业周期长、风险高(如潜水员安全、高空作业风险),严重影响工程的正常调度和经济效益。

1.3 清理工作的核心挑战

针对上述危害,清理工作面临三大核心挑战:(1)附着强度极高:足丝蛋白的粘附力远超普通污垢,常规冲洗或简单刮擦难以奏效。(2)作业环境复杂:清理对象通常位于深水、浑浊、空间受限的水下环境中,能见度低,人工操作困难且危险。(3)多重约束条件:清理过程必须兼顾高效性(快速恢复设备功能)、安全性(不损伤金属基体)、环保性(避免引入新的污染物)和经济性(控制全生命周期成本)。这四者之间往往存在矛盾,使得单一技术路线难以满足所有要求。

2 主流清理技术研究进展

目前,针对水工金属结构表面的淡水壳菜清理,主要

技术路径可分为物理法、化学法、生物法及综合防治法。

2.1 物理清理技术

2.1.1 高压水射流技术

高压水射流 (High-Pressure Water Jetting, HPWJ) 通过将水加压至数十甚至数百兆帕, 经喷嘴形成高速射流冲击污损表面。其清理机理包括水楔作用、剪切力和微射流冲击。该技术具有无污染、不损伤基体 (在合理参数下)、可远程操作等优点。研究表明, 对于较薄的污损层, 采用100-200 MPa的压力即可有效清除。然而, 对于已钙化、形成致密层的老化壳菜群落, 所需压力更高, 可能导致能耗剧增, 且高速水流产生的反冲力对操作平台稳定性要求高^[2]。近年来, 研究者致力于开发脉冲式、空化式等新型射流模式, 以提高能量利用效率和清理效果。

2.1.2 机械刮除与打磨技术

该方法使用安装在水下机器人 (ROV) 或专用清污机上的刮刀、钢丝刷、铣削头等工具, 通过直接接触摩擦来剥离壳菜。其优势在于清理彻底、对顽固污损有效。但缺点同样明显: 极易划伤金属表面, 破坏原有的防腐涂层, 为后续腐蚀埋下隐患; 同时, 产生的碎屑若未及时回收, 会成为新的污染源或堵塞下游设备。因此, 该技术常需配合吸污回收系统使用, 增加了系统复杂性。

2.1.3 超声波技术

超声波清理利用高频声波在液体中产生空化效应, 即在声波负压相形成微小气泡, 随后在正压相瞬间崩溃, 释放出巨大的局部能量, 从而震松并剥离附着物。该技术被认为是一种非接触、低损伤的潜在方案。实验室研究表明, 特定频率 (通常在20-100 kHz范围) 的超声波对幼体和新生附着体有较好的抑制和清除效果。但对于已牢固附着的成年壳菜, 穿透深度有限, 清理效率较低, 且大功率超声波设备能耗高、成本昂贵, 目前尚未在大型水利工程中规模化应用。

2.1.4 电解与电脉冲技术

电解法通过在金属结构 (作为阳极) 和辅助电极之间施加直流电, 使水发生电解反应, 在阳极附近产生氯气、次氯酸等强氧化性物质, 杀死并分解壳菜。电脉冲法则利用高压短脉冲在壳菜体内产生不可逆的电穿孔效应, 导致其死亡脱落。这两种方法均可在不停机状态下进行, 具有在线处理的潜力。但其主要问题是可能加速金属阳极的腐蚀, 且电解产物对水体生态有一定影响, 需严格控制剂量和排放。

2.2 化学清理技术

2.2.1 氧化性杀菌剂

氯 (液氯、次氯酸钠)、臭氧、二氧化氯等是常用的氧化性杀菌剂。它们能有效穿透壳菜的软组织, 破坏其生理机能。该方法在循环冷却水系统中应用较多, 技术成熟。但其弊端在于: 药剂消耗量大, 运行成本高; 对非目标水生生物 (如鱼类、浮游生物) 毒性大, 生态风险高; 且长期使用可能导致壳菜产生抗药性。此外, 氯与水中有机物反应可能生成致癌的三卤甲烷等副产物。

2.2.2 非氧化性杀生剂

如季铵盐、异噻唑啉酮等, 其作用机理多为干扰细胞膜功能或抑制关键酶活性。相比氧化剂, 它们通常更具选择性, 残留时间短。但在开放水域的大规模应用中, 仍存在生态毒性、成本以及法规限制等问题。

2.2.3 防污涂料 (Fouling-Release Coatings, FRCs)

虽然严格意义上属于预防而非清理, 但高性能防污涂料是从源头上减少清理需求的根本途径。传统含锡 (TBT) 涂料因剧毒已被全球禁用。当前研究热点集中于低表面能硅橡胶/氟碳涂料、仿生微纳结构涂层以及具有缓释功能的环境友好型防污剂 (如天然产物提取物、酶制剂) 复合涂层。这些新型涂层旨在通过降低附着界面的结合力, 使壳菜在水流作用下易于脱落^[3]。然而, 其在动态、高磨损的水工环境中长期有效性、机械强度及成本仍是制约其广泛应用的关键因素。

2.3 生物与生态防治技术

2.3.1 天敌引入

某些鱼类 (如青鱼)、甲壳类动物或微生物被认为可以捕食壳菜幼体。但人为引入外来天敌存在巨大的生态风险, 可能引发新的入侵问题, 故此方法在实践中极为谨慎, 应进行充分论证。

2.3.2 生物抑制剂

从植物或微生物中提取的天然化合物 (如单宁酸、生物碱) 可作为壳菜幼虫的附着抑制剂。这类物质通常降解快、毒性低, 被视为绿色替代品。但其大规模生产成本、在复杂水体环境中的稳定性及长效性仍需深入研究。

2.4 综合防治与智能技术

鉴于单一技术的局限性, “预防为主、防治结合、综合治理”的理念日益受到重视。例如, 将长效防污涂层与定期的低强度物理清理 (如温和的高压水射流) 相结合, 可在保证效果的同时大幅降低总体成本和环境影响。更前沿的方向是发展水下智能清理机器人系统。该系统集成了多种传感器 (如声呐、摄像头、激光扫描仪) 用于污损状态的实时感知与三维建图; 通过AI算法进行污损程度评估与清理路径规划; 并搭载模块化的执

行器（如可变参数的高压水射流头、精密刮刀）进行自主或半自主作业。此类系统能显著提升清理作业的精准性、安全性和效率，代表了未来技术发展的主流方向。目前，国内外已有多个研究团队和企业在此领域取得初步成果，但距离大规模工程应用尚有距离，主要受限于水下通信、能源供给、复杂环境下的鲁棒性等技术瓶颈。

3 当前技术面临的瓶颈与挑战

尽管各类清理技术取得了一定进展，但在实际工程应用中仍面临诸多共性难题：（1）效率与成本的平衡：高效清理往往意味着高能耗、高设备投入或高药剂消耗，导致成本居高不下。如何在保证清理效果的前提下，优化工艺参数，实现成本最小化，是工程应用的核心诉求。（2）基体保护与二次损伤：许多强力清理方法（如高能机械刮除、超高压射流）在清除污损的同时，不可避免地会对金属基体及其防腐层造成损伤，反而加速了后续的腐蚀进程，形成“清理-损伤-更快腐蚀-更频繁清理”的恶性循环^[4]。（3）环境友好性不足：化学法带来的生态毒性问题始终是悬在头顶的“达摩克利斯之剑”。即使是物理法，产生的大量生物碎屑若处理不当，也会造成局部水体富营养化或堵塞问题。（4）自动化与智能化水平低：目前大部分清理工作仍依赖人工作业或半自动设备，效率低下、风险高。缺乏能够自主感知、决策和执行的智能系统，难以适应大型、复杂水利工程的精细化运维需求。（5）长效防护技术缺失：现有的防污涂层在严苛的水工环境中（如高流速、泥沙磨损、生物侵蚀）的服役寿命有限，无法从根本上解决反复清理的问题。

4 未来研究展望

为应对上述挑战，未来的淡水壳菜清理技术研究应聚焦于以下几个方向：（1）发展“感知-决策-执行”一体化的智能清理机器人：深度融合水下SLAM（即时定位与地图构建）、机器视觉、AI路径规划等技术，打造能够自主完成从检测评估到精准清理全过程的智能装备。重点突破水下高精度感知、复杂曲面自适应作业、高效能源管理等关键技术。（2）研发新一代环境友好型防污体系：基于仿生学原理，设计兼具超疏水/水下超疏油、微纳复合结构、可控释放天然防污剂等多重功能的智能

涂层。同时，探索利用电化学、光催化等物理场调控界面性质，实现“主动防污”。（3）推动物理-化学-生物多技术协同：建立基于污损状态动态监测的智能决策模型，根据污损类型、厚度、位置等信息，自动匹配最优的组合清理策略。例如，对新生附着区采用低强度超声波或生物抑制剂进行预防性处理，对顽固污损区则启动精准高压水射流。（4）构建全生命周期成本（LCC）评估模型：超越单一的清理成本考量，建立涵盖预防、监测、清理、修复、环境影响等在内的综合LCC模型，为不同技术方案的选择提供科学、量化的决策依据。（5）加强基础生物学与界面科学交叉研究：深入探究淡水壳菜足丝蛋白的分子结构、粘附机理及环境响应特性，从源头上寻找破解其超强附着力的新思路，为颠覆性清理技术的诞生提供理论支撑。

5 结语

淡水壳菜对水工金属结构的生物污损已成为制约我国乃至全球水利工程安全高效运行的重大隐患。经过多年的探索，物理、化学、生物等各类清理技术均取得了一定成效，但各自在效率、成本、环保、基体保护等方面存在难以克服的短板。当前，技术发展正处在一个关键的转型期，从依赖高能耗、高风险的传统人工作业，向以智能机器人为核心的自动化、精准化、绿色化方向演进。未来的研究与实践，必须打破学科壁垒，融合材料科学、机器人学、人工智能、环境工程和基础生物学等多学科知识，着力攻克智能感知、长效防护、多技术协同等核心难题。

参考文献

- [1]高菲,梅朝,陈思宝,等.输水工程淡水壳菜污损风险及减缓措施[J].人民长江,2024,55(S1):1-5+20.
- [2]王玉波,张亚红.不同流态下淡水壳菜附着能力的影响研究——以南水北调中线沙河渡槽为例[J].城镇供水,2023,(S1):119-124.
- [3]郑航桅,潘志权,杨永民,等.输水建筑物淡水壳菜防治中试设计及效果分析[J].广东水利水电,2021,(04):1-5.
- [4]刘时明.淡水壳菜对环北广西工程的影响及综合防治措施研究[J].广西水利水电,2025,(06):127-130.