

海水冷却系统生物污损环保治理：从机理到技术

林师师 赵居奇

国家能源集团乐东电厂有限公司

DOI:10.12238/eep.v8i8.2779

[摘要] 海水冷却系统虽以高效换热、低廉运行等优势成为电力、化工、船舶等行业不可或缺的“蓝色冷却器”，却长期遭受微生物、藻类、贝类等生物污损的困扰——管道堵塞、换热失效、局部腐蚀，甚至非计划停机，已成为威胁系统安全、稳定与可持续运营的“隐形杀手”。鉴于此，本文从生物膜形成机理、关键环境驱动因子及群落演替规律三个维度系统解析污损“黑箱”，构建“机理—过程—调控”全链条认知框架，并在此基础上梳理绿色、低碳、高效的防控新技术，为行业实现“零毒排、低能耗、长寿命”的环保治理目标提供理论依据与技术方法。

[关键词] 海水冷却；生物污损；环保杀贝剂；季铵盐

中图分类号：P747 文献标识码：A

Environmental protection treatment of biological fouling in Seawater Cooling Systems: From Mechanism to Technology

Shishi Lin Juqi Zhao

National Energy Group Ledong Power Plant Co., LTD

[Abstract] Although seawater cooling systems have become indispensable "blue coolers" in industries such as power, chemical engineering, and shipping due to their advantages of efficient heat exchange and low operating costs, they have long been plagued by biological contamination from microorganisms, algae, and shellfish – pipe blockages, heat exchange failures, local corrosion, and even unplanned shutdowns, which have become "invisible killers" threatening the safety, stability, and sustainable operation of the systems. In view of this, this paper systematically analyzes the "black box" of fouling from three dimensions: the formation mechanism of biofilms, key environmental driving factors, and the succession patterns of communities, constructs a full-chain cognitive framework of "mechanism – process – regulation", and on this basis, sorts out new green, low-carbon and efficient prevention and control technologies. Provide theoretical basis and technical methods for the industry to achieve the environmental protection governance goal of "zero toxic emissions, low energy consumption and long service life".

[Key words] Seawater cooling; Biological contamination; Environmentally friendly shell-killing agent; Quaternary ammonium salt

海水冷却系统是工业热交换的核心装备，其运行效率直接关系到能耗与生产成本。传统防污手段虽能抑制生物附着，却各自陷入“绿色困境”：化学药剂带来环境毒性与耐药风险，物理方法受作用半径与能耗掣肘，机械清理则因高昂维护费用及系统适配性差而难以推广。在环保法规趋严、“双碳”战略深化的背景下，开发高效、低毒、可持续的防污技术已成为行业共识。基于此，本文聚焦南海莺歌海典型海水冷却系统，首次系统解析该海域高温、高盐、富营养化水体中贻贝—藤壶—海藻群落逐级附着的生物学机制，并据此评估电化学防污、光催化—超声耦合、天然产物控释涂层等绿色技术的适配性与经济性，为热带近岸

工业冷却水的高效、低碳运行提供范式。图1所示取水口格栅仅运行120天便被厚达3cm的混合生物层堵塞，流通面积锐减62%，直观印证了“生物污损”对系统性能的严峻挑战。





图1 取水口海生物附着情况

1 海水冷却水系统生物附着特性分析

海水冷却水系统中生物附着本身是多阶段和多因素相互协同产生作用的一个比较复杂的过程,其对系统整体运行具有非常重要的影响。

1.1 生物附着的形成机制与阶段特征。莺歌海海域因常年高温(年均25-28℃)、高盐(32-34‰)且浮游生物丰度极高,这“三高”环境为污损生物提供了“加速器”。其附着动力学可清晰分为三个阶段:①初始吸附期——有机大分子秒级贴壁,奠定“基床”;②生物膜形成期——细菌、硅藻胞外聚合物(EPS)快速交联,数小时内完成微层封装;③生物群落稳定期——藤壶、贻贝幼体优先定植,海藻孢子紧随其后,约7d即形成致密、稳定的“三维群落”。图2直观呈现了上述三阶段形貌演替,为后续靶向干预提供了关键时间窗口。初始吸附期在0-24h,这一海域高浓度小分子有机物在固体表面能够满足物理化学吸附要求,24h内即能够构成厚度达到15-55nm的一种“条件膜”,莺歌海海域亲水性表面因高温持续范德华力和氢键起到的作用,可提升附着速率;疏水性表面尽管初始吸附相对较慢,但一旦形成条件膜,则能够为日后微生物提供高密度“锚定位点”,这种方式可为生物膜爆发性的持续生长打下稳定基础^[1]。

生物膜形成期(1-7d)属于核心爆发阶段,海域20-30℃的常年水温与5-8mg/L的高溶解氧,恰好适配革兰氏阴性菌的繁殖需求,使其定植速率较温带海域提升50%,且EPS形成的保护屏障更稳定,后续清除难度显著增加^[2]。

生物群落稳定期(7d后),该海域丰富的藻类与贝类快速参与,使污损层厚度在15d内突破200 μm,远超普通海域的100-150 μm。这种复合群落不仅耐药性强,其代谢活动还会使局部微环境pH值波动幅度扩大至0.8-1.2,加速冷却水系统设备腐蚀,较普通海域设备腐蚀速率提升25%-35%。

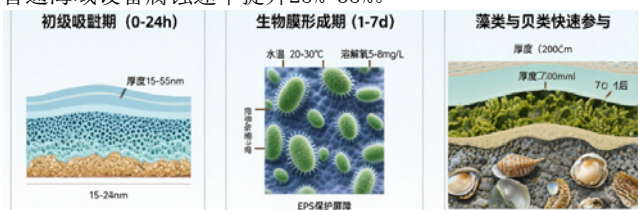


图2 附着特性

1.2 影响生物附着的关键环境与系统参数特性。生物附着受水温、盐度、水流速度及系统材质影响显著。水温低于10℃时,生物膜形成周期增至15-20d;高于30℃时,5d内生物膜厚度达

150 μm,贝类幼虫附着率40%-60%,水温波动会导致生物膜局部脱落并形成新附着点。盐度25-35‰时,广适盐生物占优;低于15‰时,附着强度降30%-50%,且加剧管道电化学腐蚀;盐度骤变会致附着生物死亡,其残体可为后续附着提供基础。流速低于0.5m/s时,生物附着集中于管道底部;1.0-2.0m/s时生物膜均匀分布;超过3.0m/s时生物膜脱落循环,易堵塞换热管。碳钢表面粗糙度 $R_a > 5 \mu\text{m}$ 时,生物附着量为不锈钢的2-3倍;钛合金等惰性金属附着强度降低40%-60%^[3]。

1.3 生物附着的群落演变规律与生态互作特性。生物附着群落演变依照的是“物种替代-生态位竞争-群落稳定”的发展规律。

初始阶段(1-3d),优势物种属于异养细菌,采用对EPS进行分泌的方式占据生态位,附着速率整体指数呈现出逐步提升的趋势。

中期阶段(3-14d),逐步构成“细菌-藻类”共生的体系。藻类能够为细菌提供生长所需营养,细菌可以辅助藻类快速生长,使生物量能够在7d内快速提升5倍至10倍。光照充足的情况下藻类占优,而光照不足的情况下细菌占优。

稳定阶段(14d后),这一阶段呈现出多营养级复合群落。贝类会使得微生物出现捕食压力,多毛类导致生物膜结构被严重破坏。群落其中包含互利共生和竞争,以及捕食和寄生等多重联系,可使化学杀菌剂自身的耐药性提升到2-3倍,会导致管道产生严重腐蚀,这种情况下系统的换热效率会逐月降低5%-10%。

2 海水冷却水系统传统防污技术的局限性

2.1 化学防污技术的环境风险与耐药性问题。化学防污技术通过投放氧化性杀菌剂(如次氯酸钠、二氧化氯)和非氧化性杀菌剂(如季铵盐、异噻唑啉酮)抑制生物附着,但存在明显环境风险与生物耐药性问题。

氧化性杀菌剂会破坏细胞结构,还会与海水有机物反应生成三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)等消毒副产物(DBPs)。研究显示,次氯酸钠投加量1-3mg/L时,排水中THMs浓度达50-100 μg/L,远超《海水水质标准》限值。这些DBPs具有致癌性,会抑制浮游植物光合作用,使海域初级生产力降低15%-20%^[4]。

非氧化性杀菌剂虽DBPs生成量少,但长期使用易引发耐药性。如持续投放季铵盐6个月,细菌耐药性提升3-5倍,有效浓度需从0.5mg/L升至1.5-2.0mg/L,既增加运行成本,又导致生物富集——其在贝类中富集系数达100-200倍,神经毒性可通过食物链传播。此外,该类药剂降解周期长(如异噻唑啉酮半衰期7-10d),易在近岸海域累积,影响生态平衡。

2.2 物理防污技术的应用局限与效能瓶颈。物理防污技术其中包含超声波和紫外线以及电解等多种方式,但是这种方式在具体应用的场景下仍然存在一定的局限并且效能上也存在瓶颈。超声波防污技术主要是采用20-40kHz声波振动的方式让生物膜受到损坏,但其传播整体产生的衰减系数可达到0.5-1.0dB/m,管道整体的长度在超出50m的情况下末端强度要低于50%。另外,超声波会导致水垢快速脱落,极易导致换热管出现堵塞问题,这种情况下系统压力产生的损失占比会提升到10%-15%。

紫外线(UV)防污技术主要是通过254nm紫外线让DNA结构受到损坏,但效能受到水质透明度产生的影响较为明显。海水产生的浊度一旦超出5NTU,杀菌率则会从99%减少到60%-70%。UV技术当前只能对浮游微生物产生抑制,对当前已经构成的生物膜(厚度 $>10\mu\text{m}$)产生的效果并不理想,膜内细菌整体的存活率占比可提升到80%。此外,UV灯管使用的寿命会减少(8000-10000h),不仅进行更换的频率较高同时后续所需要的维护工作量相对较大。

电解防污技术主要是采用电解海水制成次氯酸等多种活性物质,但其自身仍然会产生能耗高和电极腐蚀等多种问题。保持有效杀菌浓度需要让电流的密度提升至 $10\sim 20\text{A}/\text{m}^2$,吨水电耗需要达到 $0.3\sim 0.5\text{kWh}$,其可达到化学防污效果的2-3倍。阳极涂层整体的脱落速率可达到 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}/\text{月}$,电极寿命则仅能够维持1-2年。另外,活性物质在管道中的分布并不是十分均匀,末端的浓度仅仅能够达到前端浓度的30%-40%,容易出现“防污盲区”。

2.3机械防污技术的维护成本与系统适配性问题。机械防污技术主要是采用物理的方式完成附着生物体的清理,其存在的缺点是维护所需要的成本相对较高和系统适配性不理想等问题。在线机械清洗技术则对于管道有着较为严格的要求,因此只适合使用在管径 $20\sim 50\text{mm}$ 和弯曲半径大于3倍的直管段。小管径以及弯管位置经常会出现卡堵问题,这种情况容易导致管道出现破裂风险。海绵球磨损快,年更换成本占到系统整体运行成本的20%到25%,并且极有可能让系统流量产生10%至15%的波动。

高压水枪等离线机械清洗技术则要求系统停机操作,维护所需时间为2-3天,这种清洗方式会对生产的连续性产生严重影响。清洗压力要求保持在 $5\sim 10\text{MPa}$,压力较高则可能导致管道内壁产生损伤,压力过低则无法实现厚生物膜($>100\mu\text{m}$)的清理。

3 海水冷却水系统新型环保防污技术研发

3.1物理防污技术的创新研发与效能优化。新型物理防污技术通过创新原理与结构设计突破传统局限,核心包括高频脉冲电场、仿生表面改性、磁场协同三类技术。

高频脉冲电场技术采用 $50\sim 100\text{kHz}$ 电场,以电穿孔效应在细胞膜形成 $5\sim 10\text{nm}$ 瞬时微孔致细胞内容物泄漏。其“低电压-高频率”模式($5\sim 10\text{kV}$, 80kHz)吨水电耗仅 $0.1\sim 0.2\text{kWh}$,无消毒副产物,还能抑制碳酸钙水垢,实现防污防垢一体化。

仿生表面改性技术模仿海洋生物表面特性,通过物理、化学方式调控材料表面性能。物理改性用激光刻蚀制备“微凸体-凹槽”结构,减少30%-40%有机物吸附;化学改性通过等离子体聚合接枝低表面能物质,使水接触角超 110° 形成超疏水表面,改性层寿命达3-5年。

磁场协同技术通过 $0.1\sim 0.5\text{T}$ 外加磁场改变海水物化性质,干扰细胞代谢与离子结晶,促成松散霞石生成,具备无能耗、无二次污染优势,适用于高盐度浊水环境。

3.2生物竞争抑制防污技术的突破。生物竞争抑制防污技术主要应用生态位竞争原理,并采用有益微生物以及生物活性物质完成对有害生物附着的抑制,其中包含EM菌剂以及植物源活

性物质等技术路线。

有益微生物菌剂技术投加芽孢杆菌属等是一种有益微生物,并采用营养竞争和空间竞争以及代谢产物可实现有害生物定植的抑制。其核心突破在于选择三株具备协同优势的芽孢杆菌组合,繁殖速率和有害细菌相比要高出2-3倍。并在具体应用过程中换热效率降低的速率从每月5%-10%可有效减少到1%-2%,并且不会产生任何环境负面影响。

植物源生物活性物质技术主要是在红树林和海藻中进行天然防污成分的提取,产生的作用机制是采用和细菌膜蛋白相互融合的方式完成通透性的破坏,并且可完成贝类足丝腺黏液分泌的有效抑制。这种物质的生物降解性理想,半衰期低于48h,产生的毒性低并且不具有任何耐药性。在其中加入 $5\text{mg}/\text{L}$ 能够让生物污损层厚度从最初每月 $20\sim 30\mu\text{m}$ 逐步减少到 $3\sim 5\mu\text{m}$,系统的压力可保持稳定状态,6个月内并未产生耐药种群。

3.3环境友好型化学防污技术的升级。环境友好型化学防污技术通过分子设计和剂型优化抑制环境风险,核心包括可降解季铵盐衍生物、纳米缓释型防污剂。

可降解季铵盐衍生物在传统结构中引入酯键和酰胺键,28天生物降解率达90%。通过调整分子链长度和酯基位置,其对有益微生物毒性降低50%-60%,可与EM菌剂联用。针对南海莺歌海海域海水冷却水系统防污需求,环保型季铵盐杀贝剂以“高效杀贝+低环境风险”成为核心选择。该杀贝剂优化分子结构,引入酯键和酰胺键,兼具高生物降解性(28天降解率90%,避免药剂累积)与低毒性(优化为 $\text{C}_{12}\sim\text{C}_{14}$ 分子链,降低对浮游植物、鱼类毒性50%-60%),可联用EM菌剂,维持海域微生态平衡,有效解决贝类密集附着及常规药剂生态风险问题。

4 结语

综上所述,通过采用多学科之间的交叉融合,在保障防污效果的基础上可以有效减少环境负荷,展现出“绿色防污、智能控制”的发展观念。日后所需进行的研究需要持续关注多种技术之间产生的协同效应优化和全生命周期成本评估以及标准化体系建设上,以此推进防污技术朝着高效节能和环境友好以及智能化的方向稳定发展,以此为工业冷却系统的安全高效运行以及海洋生态环境保护提供切实可行的技术保障。

【参考文献】

- [1]佟帅.超声波防垢除垢机理及提高效率的方法研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [2]金硕.基于超声导波的载流管道在线除垢技术研究[D].天津:天津科技大学,2020.
- [3]李超,黄军林,王露,等.十八胺在碳钢表面吸附和成膜的分子动力学研究[J].核动力工程,2023,44(2):203-209.
- [4]卢光明.水产养殖用高效环保防污涂料的制备及其防污机理研究[D].宁波:宁波大学,2021.

作者简介:

林师师(1988--),男,汉族,海南省万宁市人,大学本科,中级工程师,环化专业主管,研究方向:电厂化学。