

湿式冷却塔淋水填料防堵技术及实施研究探讨

熊行

大唐株洲发电有限责任公司, 中国·湖南 株洲 412000

摘要: 湿式冷却塔淋水填料堵塞是工业冷却系统的核心痛点, 易导致效率下降、能耗增加及设备寿命缩短。本文系统分析了四类堵塞物的机理与风险, 构建了包含材料防护、结构优化、智能水处理的主动防堵体系, 梳理了物理与化学清堵技术的选型逻辑, 建立了预测性维护与智能运维系统, 提出了新建与改造项目的实施路径。研究形成的全链条技术方案经工程验证, 可为行业防堵工作提供科学指导。

关键词: 湿式冷却塔; 淋水填料; 防堵技术

Research and Discussion on Anti-Blocking Technology and Implementation of Wet Cooling Tower Water Distribution Fillers

Xiong Xing

Datang Zhuzhou Power Generation Co., Ltd., China Hunan Zhuzhou 412000

Abstract: The clogging of water distribution fillers in wet cooling towers is a core pain point in industrial cooling systems, which can lead to reduced efficiency, increased energy consumption, and shortened equipment lifespan. This paper systematically analyzes the mechanisms and risks of four types of clogging substances, constructs an active anti-clogging system including material protection, structural optimization, and intelligent water treatment, sorts out the selection logic of physical and chemical clogging removal technologies, establishes a predictive maintenance and intelligent operation and maintenance system, and proposes implementation paths for new construction and renovation projects. The full-chain technical solution formed by the research has been verified by engineering and can provide scientific guidance for the anti-clogging work in the industry.

Keywords: Wet cooling tower; Water distribution filler; Anti-clogging technology

0 引言

湿式冷却塔广泛应用于工业生产, 淋水填料作为核心换热部件, 其堵塞问题严重影响系统稳定运行与能源效率, 现有技术存在针对性不足、碎片化等缺陷。本文从堵塞机理入手, 构建主动防堵、高效清堵、智能运维的全流程技术体系, 明确工程实施路径, 旨在为解决填料堵塞难题提供简洁可行的方案, 推动冷却塔系统高效稳定发展。

1 堵塞机理与风险分析

1.1 主要堵塞物类型与成分

湿式冷却塔淋水填料的堵塞问题源于四类核心堵塞物的累积, 其成分特性直接决定了堵塞的形成速率与清理难度。生物粘泥的主要成分是细菌代谢产生的胞外聚合物(EPS)与藻类群落, 这类物质具有强粘性, 易在填料表面形成致密薄膜; 水垢沉积以碳酸钙、硅酸镁等难溶性盐类为主, 多由循环水中钙、镁离子与碳酸根、硅酸根离子结合生成; 悬浮物淤积则来自循环水中携带的泥沙、尘埃,

以及系统管道腐蚀产生的氧化铁等固体颗粒; 化学药剂残留主要包括过量投加的絮凝剂(如PAM)和阻垢剂聚合物, 这类物质易吸附在填料表面形成粘性沉积物。

1.2 堵塞形成机制

堵塞的形成是温度、水质、流速等多因素协同作用的结果。温度方面, 25-40℃的环境既适宜微生物繁殖, 又能加速难溶性盐类的过饱和结晶, 是堵塞高发的温度区间; 水质特性直接影响堵塞类型, 高硬度、高碱度的水质易引发水垢沉积, 高浊度水质则会增加悬浮物淤积风险; 流速因素同样关键, 水流速度过低时, 颗粒物易在填料流道内沉降聚集, 而流速过高可能加剧管道腐蚀, 产生更多腐蚀产物, 间接促进堵塞形成。此外, 填料结构设计不合理导致的流道滞留区, 也会为各类堵塞物的附着与生长提供条件^[1]。

1.3 堵塞对系统性能的影响

堵塞对冷却塔系统性能的负面影响具有连锁性。首先

是冷却效率显著衰减, 填料孔隙被堵塞后, 气液接触面积大幅减少, 换热阻力增加, 导致冷却温差缩小, 无法满足工业生产的冷却需求; 其次是系统能耗上升, 填料堵塞引发的通风阻力增大, 迫使风机提升运行功率, 造成电能消耗的额外增加; 最后是设备寿命折减, 生物粘泥中的微生物会对填料产生生物腐蚀, 水垢和悬浮物则会加剧填料表面的磨损与化学腐蚀, 共同缩短填料及相关设备的使用寿命, 增加运维更换成本。

1.4 风险分级与高发场景识别

基于堵塞物的危害程度与发生概率, 可对其进行风险分级, 同时明确各类堵塞的高发场景。生物粘泥因繁殖速度快、清理难度大, 风险等级最高, 多见于开放式循环系统中水温稳定在 25-40℃ 的工况; 水垢沉积风险等级次之, 高发于高硬度、高碱度 ($\text{pH} > 8.5$) 的循环水系统, 如化工、电力行业的冷却系统; 悬浮物淤积风险等级中等, 主要出现在以河道水、地下水为水源的系统, 或管道老化严重的老旧设备中; 化学药剂残留风险等级相对较低, 多发生在药剂投加控制系统精度不足、存在过量投加情况的系统中。明确风险分级与高发场景, 可为后续针对性防堵技术的选择提供依据^[2]。

2 主动防堵技术体系

2.1 材料级防护技术

材料级防护技术通过改性填料表面特性与引入物理场作用, 从源头抑制堵塞物生成与附着。纳米光催化涂层以二氧化钛与石墨烯为核心复合材料, 借助紫外线激发产生的活性氧 (ROS), 能破坏细菌胞外聚合物 (EPS) 结构与藻类繁殖环境, 显著降低生物膜形成概率; 该涂层经相关标准测试, 生物膜抑制效果表现突出, 且具备良好的耐候性与附着稳定性。微电场抗垢模块则通过嵌入低电压 (5V)、高频 (10kHz) 脉冲电解装置, 改变循环水中钙、镁离子的结晶动力学过程, 使原本致密坚硬的方解石型水垢转化为松散易脱落的文石型结晶, 大幅降低水垢在填料表面的沉积速率, 为高硬度水质场景提供针对性解决方案。

2.2 结构防堵设计

结构防堵设计基于流体力学原理优化填料形态与孔隙分布, 减少流道内滞留区与颗粒物沉积概率。非对称波纹填料将传统 45° 流道倾角调整为 60°, 通过提升水流速度、优化流场分布, 减少低速区域的颗粒物滞留与生物粘泥附着; 自清洁导流筋通过在填料表面设置 0.5mm 凸起结构, 引发流道内微湍流效应, 增强水流对填料表面的冲刷作用, 降低飘移物与沉积物附着量。梯度孔隙设计采用

“上部高孔隙率 (20PPI) - 下部低孔隙率 (12PPI)” 的分层结构, 既能保证上部对细小颗粒物的拦截效率, 又能通过下部较大孔隙避免大粒径颗粒穿透造成深层堵塞, 实现不同粒径污染物的分级拦截^[3]。

2.3 智能水处理系统

智能水处理系统构建“监测 - 决策 - 执行”闭环, 实现水质的动态调控与精准防堵。在线水质传感器实时采集浊度、生物活性、氧化还原电位 (ORP) 等关键参数, 将数据传输至 AI 决策中枢进行分析判断; 当浊度超过设定阈值时, 自动启动超磁分离装置快速去除悬浮物; 当生物活性指标偏高时, 释放缓释杀菌球针对性抑制微生物繁殖; 在水质指标处于稳定区间时, 维持常规加药方案并动态调整药剂投加量。该系统以 $\text{ORP} \geq 650\text{mV}$ 、朗格利尔饱和指数 (LSI) < 0.5 为核心控制目标, 通过精准匹配水处理策略与水质变化, 避免化学药剂过量残留与无效投加, 实现防堵效果与运行经济性的平衡。

3 高效清堵与维护技术

3.1 物理清堵技术

物理清堵技术凭借针对性强、操作灵活的特点, 成为不同堵塞场景的核心解决方案。脉冲气水爆破技术通过高压气体与水流的协同冲击, 能快速破除厚度大于 5mm 的重度生物粘泥, 清通效率突出, 适用于堵塞情况较严重的工况; 超声波空化技术利用高频振动产生的微小气泡破裂能量, 可精准清除填料微孔内小于 1mm 的水垢, 且能降低系统能耗, 但其作用深度存在一定限制。干冰喷射技术以固态二氧化碳为介质, 清理过程中无废水产生, 对化学药剂残留类堵塞尤为适用, 兼具环保性与清洁性; 机器人爬行清刷技术则适配处理量大于 5000m³/h 的大型塔体, 能实现填料表面的全方位覆盖清刷, 确保清堵无死角, 不过初始设备投资相对较高。

3.2 化学清洗创新

化学清洗创新技术聚焦环保性与安全性, 突破传统化学清洗的腐蚀与污染瓶颈。生物酶解技术采用脂肪酶与蛋白酶复合制剂, 在适宜温度下能特异性分解生物粘泥中的有机物成分, 实现生物膜的高效剥离, 且对填料及设备无腐蚀作用, 解决了传统化学清洗剂对金属构件的损伤问题。可降解螯合剂以 GLDA 四钠盐为代表, 替代传统难降解的 EDTA, 其对钙离子的螯合能力优异, 能有效溶解水垢沉积物, 同时具备良好的生物降解性, 在自然环境中可快速分解, 降低了化学清洗后的二次污染风险, 符合绿色环保的工业发展趋势^[4]。

3.3 清堵技术对比与选型建议

清堵技术的合理选型需结合堵塞类型、塔体规模、环保要求及经济成本综合判断。从适用场景来看,重度生物粘泥堵塞优先选择脉冲气水爆破,微孔水垢堵塞适配超声波空化,化学药剂残留清理优选干冰喷射,大型塔体则推荐机器人爬行清刷;化学清洗方面,生物粘泥主导的堵塞适合生物酶解技术,水垢类堵塞可选用 GLDA 螯合剂。从操作与成本维度,短期应急清堵可选择物理清堵中的脉冲气水爆破或干冰喷射,长期运维且环保要求高的场景,建议搭配生物酶解技术与可降解螯合剂;大型工业项目若追求长期稳定与全面覆盖,可投入机器人清刷设备,小型系统则可根据堵塞频次选择低成本的物理清堵方案。科学的技术选型需实现清堵效果、运行成本与环保要求的平衡,避免盲目选用导致的效率低下或资源浪费。

4 预测性维护与智能运维系统

4.1 多参数监测网络构建

多参数监测网络的构建是实现预测性维护的核心基础,通过科学部署各类传感器实现堵塞相关指标的全面感知。该网络以 MEMS 压差变送器、光纤温度阵列、电化学 ATP 探头为核心监测设备,分别针对填料段通风阻力、水温分布均匀性、生物膜活性三大关键维度开展实时监测。其中, MEMS 压差变送器安装于填料上下端,精准捕捉阻力变化,当数值超过设定阈值时提示通道堵塞风险;光纤温度阵列沿填料层深度方向布设,通过监测水温分布不均度,间接反映局部堵塞导致的换热效率下降;电化学探头直接接触填料表面,实时检测生物膜活性(ATP值),提前预警生物粘泥滋生趋势。各传感器数据通过工业总线实时传输,形成覆盖“阻力-温度-生物活性”的三维监测体系,为后续分析与决策提供全面、准确的原始数据支撑。

4.2 数字孪生与 CFD 模拟

数字孪生与 CFD 模拟技术的融合应用,实现了堵塞风险的可视化预判与精准预警。基于冷却塔实际结构参数、运行数据及监测网络采集的实时信息,构建全尺寸数字孪生模型,同步还原塔内流场、水质及填料工作状态。结合计算流体力学(CFD)模拟,将水质指标、运行负荷等参数作为输入条件,通过数值计算模拟不同工况下堵塞物的生成、迁移与沉积过程,生成精度较高的堵塞风险热力图,直观呈现塔内不同区域的堵塞概率与发展趋势。基于热力图设定分级预警阈值,当某区域风险值达到预警标准时,系统自动触发声光报警,并推送风险位置、堵塞类型及发展速率等关键信息,使运维人员提前掌握堵塞隐患,打破

传统“事后维修”的被动模式^[9]。

4.3 维护决策支持系统

维护决策支持系统通过整合监测数据与模拟结果,为运维工作提供科学、可操作的精准指导。系统内置多场景决策算法,结合堵塞风险等级、塔体运行负荷、环保要求及经济成本等多维度因素,自动生成最优维护方案。例如,当某区域生物膜活性预警时,系统推荐匹配的生物酶解清洗方案及最佳施工时间窗口;当填料段阻力异常且热力图显示局部水垢沉积时,优先推送超声波空化清堵建议。同时,系统具备历史数据追溯与趋势分析功能,通过对比不同维护方案的实施效果,持续优化决策算法,逐步提升维护策略的针对性与经济性。此外,系统还支持运维任务的可视化管理,包括维护计划制定、进度跟踪、效果评估等全流程管控,有效降低人为决策失误,提升冷却塔运维的智能化与规范化水平。

5 行业实施路径

5.1 新建项目防堵设计规范

新建项目的防堵设计需遵循“源头控制-过程优化-后续保障”的全流程规范,构建从前期规划到长期运维的防堵基础。水质预处理环节优先采用“砂滤+超磁分离”组合工艺,针对性去除原水中的悬浮物、大颗粒杂质及部分溶解性污染物,从源头降低堵塞诱因;填料选型需结合水源水质特性,优先选用非对称波纹填料、梯度孔隙结构等具备防堵特性的产品,提升流道抗沉积能力。监测预埋环节应在填料上下端、深度方向等关键位置预留光纤测温孔、传感器安装接口,为后续智能监测系统部署奠定硬件基础;清洗通道预留则需规划机器人爬行轨道、脉冲清洗接口等,确保后期清堵作业高效开展,避免因结构限制导致清堵不彻底。整套设计规范将防堵理念贯穿项目全生命周期,从根源减少堵塞风险。

5.2 改造项目优先级与投资回报分析

改造项目的技术选型需以投资回报率(ROI)和实施难度为核心,明确优先级排序与资源配置策略。AI加药系统因实施周期短(约2周)、投资回报快(1.2年左右),成为改造项目的高优先级选择,通过精准调控药剂投加量,既提升防堵效果又降低药剂损耗;超声波清堵技术实施周期短(单塔3天左右),能快速解决微孔水垢堵塞问题,投资回报周期约2.5年,属于中优先级改造项,适配已出现轻度至中度堵塞的系统;预测性维护部署虽初始投入较大、实施周期较长(约6个月),但长期运维效益显著,可实现堵塞风险的提前预警与精准管控,投资回报周期约

3.8 年，适合追求长期稳定运行的大型工业项目。优先级划分需结合企业实际运维需求、资金状况及系统堵塞现状，实现资源最优配置。

6 结语

综上所述，湿式冷却塔淋水填料防堵需构建“源头防控 - 过程管控 - 精准治理”的全链条体系。通过剖析堵塞机理明确技术选型依据，主动防堵技术从源头降低风险，科学清堵方案高效治理堵塞，智能运维实现风险预警，新建与改造项目的实施策略保障落地效益。本文提出的一体化解决方案符合工业节能稳定需求，可为相关行业提供参考，未来将随新技术发展向更智能环保的方向升级。

参考文献：

[1] 邱雄赞，白滨，陈文超等. 火电机组湿式冷却塔节

能提效研究[J]. 电工技术, 2025,(18):247-249+253.

[2] 薛永锋，金俊先，杨继冲等. 三区协同增效模式对湿式冷却塔热力阻力性能影响的变工况研究[J]. 动力工程学报, 2025,45(08):1194-1201.

[3] 赵承东，李鹏飞，刘永华等. 火电机组湿式冷却塔节能提效研究[J]. 电力设备管理, 2025,(03):239-241.

[4] 赵辰阳，卢啸风，王济平等. 基于 M 循环的火电厂湿式冷却塔冷却性能研究[J]. 电力学报, 2024,39(06):501-511.

[5] 刘江涛，段继文，张波等. 机械通风开放式冷却塔降噪方案研究[J]. 制冷与空调, 2024,24(06):23-27.

作者简介：熊行（1984.01-），男，汉族，湖南长沙，本科，汽机专工，工程师。