

# 燃机电厂循环水处理方案的选择与应用

于小康<sup>1</sup> 李营珍<sup>2</sup>

1. 珠海深能洪湾电力有限公司 广东 珠海 519030

2. 安柯舜驰(广东)工业技术有限公司 广东 东莞 523106

**摘要:** 珠海某燃机电厂循环水处理需综合考虑海水倒灌时高盐度与高氯离子、高硬度与高碱度、硫酸根离子( $\text{SO}_4^{2-}$ )、丰富的微生物和藻类等水质特点与运行需求,选择经济高效的技术方案。物理处理(如旁流过滤、电磁防垢)适用于轻污染场景,化学加药(阻垢剂、缓蚀剂、杀菌剂)可精准控制结垢与腐蚀,生物酶/噬菌体技术则契合环保要求。复合方案(物理+化学+智能调控)可提升系统稳定性,结合浓缩倍数优化与废水回用,实现节水节能与成本控制的双重目标。

**关键词:** 燃机电厂; 循环水处理方案; 高盐度与高氯离子; 高碱度与高硬度; 应用

引言: 燃机电厂是高效能源转换的核心,其循环水系统稳定运行关乎机组效率与设备寿命。但开式循环水系统在海水倒灌时,因高盐度、高氯离子、高碱度与高硬度,蒸发浓缩后易结垢、堵塞管路,增加能耗与维护成本。当下环保政策趋严、水资源约束加剧,科学选择循环水处理方案,平衡技术、经济与环境影响,是保障电厂安全经济运行的关键,本文将结合实践探讨相关策略。

## 1 燃机电厂循环水处理技术基础

### 1.1 循环水系统组成与水质特点

(1) 开式系统需通过冷却塔与空气接触散热,水分蒸发量大,易引入空气中的尘埃、杂质,水质波动大,需频繁补充新水;(2) 循环水系统主要污染物来源有三类。悬浮物多来自补充水携带的泥沙、空气中的尘埃及系统管道剥落的腐蚀产物;溶解盐源于补充水本身含有的盐分,随水分蒸发不断浓缩;微生物则包括空气中、补充水中的藻类孢子、细菌等,在适宜的温度、光照条件下大量繁殖。

### 1.2 常见水质问题及危害

(1) 结垢: 海水中含有大量的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ (硬度)和 $\text{HCO}_3^-$ (碱度)、 $\text{SO}_4^{2-}$ ,在换热器高温表面,极易生成碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )、硫酸钙( $\text{CaSO}_4$ )等硬垢,这些盐类在水温升高、浓度超过溶解度时析出,高硬度可能导致某些有机膦酸类和聚合物类阻垢剂沉淀失效。附着在换热器管壁、管道内壁,降低传热效率,增加能耗,严重时堵塞管道,影响系统正常运行。(2) 腐蚀: 由于海水倒灌可能导致循环水中的 $\text{Cl}^-$ 浓度急剧升高,可能从几十 $\text{mg/L}$ 上升到数千 $\text{mg/L}$ 。 $\text{Cl}^-$ 是导致碳钢、不锈钢点蚀和应力腐蚀开裂的主要元凶。对铜及铜合金也有一定的腐蚀作用。腐蚀会对设备造成损害,碳钢设备易发生吸氧

腐蚀,形成铁锈,导致管道壁厚减薄、强度下降;铜合金设备则易出现脱锌腐蚀、点蚀等,破坏设备结构,缩短使用寿命,还可能因腐蚀产物污染水质。(3) 微生物危害,藻类大量繁殖会堵塞冷却塔填料、管道,影响散热和水流;细菌(如铁细菌、硫酸盐还原菌)会加速设备腐蚀,形成生物黏泥,降低传热效率,还可能导致水质恶化,增加水处理难度<sup>[1]</sup>。

## 2 燃机电厂循环水处理方案的选择

### 2.1 物理处理方案

(1) 旁流过滤是常用物理处理技术,砂滤通过石英砂滤料截留水中悬浮物,过滤精度可达 $10\text{-}20\mu\text{m}$ ,适用于去除粒径较大的泥沙、腐蚀产物;纤维球过滤采用纤维球滤料,比表面积大、吸附能力强,可去除 $5\mu\text{m}$ 以下的微小颗粒,且反冲洗耗水少、再生效率高,能有效降低循环水浊度,减少后续处理负担。(2) 电磁水处理利用电磁场作用改变水分子结构,使钙、镁离子难以形成晶核,从而抑制结垢;同时,电磁场可破坏细菌细胞膜,影响微生物代谢,实现杀菌效果。该技术无需添加药剂,操作简便,可避免药剂残留对环境的影响,但处理效果受水质硬度、流速影响较大,对高硬度水质的防垢效果有限。(3) 物理处理方案适用于水质污染较轻、对药剂使用有限制的场景,如周边环保要求高、避免药剂对设备材质产生不良影响的电厂;其局限性在于单独使用时难以彻底解决结垢、腐蚀问题,对高浓度污染物的处理效果不佳,需配合其他处理方案使用。

### 2.2 化学处理方案

(1) 阻垢分散剂。控制碳酸钙、硫酸钙、磷酸钙垢以及悬浮物是关键,高性能多元共聚物&绿色聚合物可有效抑制结垢,有机膦酸盐能与钙、镁离子形成稳定络合

物,阻止其析出;聚羧酸类阻垢剂则通过分散作用,使微小晶核难以聚集长大,适用于高硬度、高碱度水质,阻垢效率可达95%以上。(2)缓蚀剂。因为高氯离子腐蚀风险最高,这也是控制的关键的部分。需选择能在设备表面形成保护膜,锌盐通过阴极极化作用抑制碳钢腐蚀,钼酸盐则形成钝化膜,适用于铜合金、碳钢等多种材质,因此需选择多种缓蚀剂复配而成,可将腐蚀速率控制在标准范围内,还需考虑与其他药剂的兼容性。

(3)杀菌剂。氧化性杀菌剂(如次氯酸钠)通过氧化微生物细胞成分发挥作用,杀菌速度快,但易受水中氨氮、有机物影响;非氧化性杀菌剂(如异噻唑啉酮)杀菌谱广,不受氨氮干扰,适合间歇性投加,因此二者交替使用可避免微生物产生抗药性。(4)药剂投加多采用连续投加与间歇投加结合的方式,如阻垢缓蚀剂连续投加以维持稳定浓度,杀菌剂间歇投加;不同药剂间存在协同效应,如锌盐与有机磷酸盐复配可增强缓蚀效果,合理搭配能降低药剂用量,提升处理效率<sup>[2]</sup>。

### 2.3 复合处理方案

(1)物理+化学联合方案应用广泛,如旁流过滤先去除悬浮物,减少药剂消耗,再投加阻垢缓蚀剂和杀菌剂,可提升处理效果,降低运行成本,适合水质复杂、污染物浓度较高的循环水系统。(2)零排放技术通过膜处理(如反渗透)截留水中盐分,浓缩液经蒸发结晶固化,实现水资源和盐分的循环利用,无废液排放,但投资成本高、运行能耗大,适用于水资源匮乏、环保要求严格的地区。(3)智能加药系统结合在线监测设备(如在线药剂浓度检测、浊度计、腐蚀速率监测仪、ORP检测、电导率监测)实时采集水质数据,通过控制系统自动调整药剂投加量,避免药剂浪费或不足,提升处理稳定性,减少人工操作量,适合燃机电厂的精细化管理<sup>[3]</sup>。

补充水	电导率(μs/cm)	总硬度(mg/L)	氯离子(mg/L)	备注
枯水季	3000-15000	400-1800	600-6000	海水倒灌
丰水季	300-3000	400-800	150-600	淡水

属于中、高硬水质,存在一定结垢风险,且氯离子含量较高,对碳钢和铜合金设备有潜在腐蚀威胁。

(3)选型依据主要基于两方面:技术要求上,需满足GB/T50050标准,确保碳钢设备腐蚀速率 $\leq 0.075\text{mm/a}$ 、铜合金设备 $\leq 0.005\text{mm/a}$ ,同时控制循环水浊度 $\leq 5\text{NTU}$ ;环保约束上,当地环保部门要求电厂废水排放量较国标减少30%,且禁止使用含磷量超标的化学药剂,避免水体富营养化。

### 3.2 方案实施与优化

(1)处理工艺流程设计采用“物理+化学+智能

### 2.4 方案比选方法

(1)技术可行性分析需通过评估处理效果是否满足国标要求,如浓缩倍数、腐蚀速率等指标是否达标,同时考虑操作复杂度,如是否需要专业人员维护、设备故障处理难度等,优先选择处理效果稳定、操作简便的方案。(2)经济性分析需对比投资成本(设备购置、安装费用)和运行费用(药剂、能耗、人工成本),如物理处理方案初期投资低但处理范围有限,零排放技术初期投资高但长期可节省水资源费用,需结合电厂运营周期综合测算。(3)环境影响方面,需考虑废液中污染物含量、碳排放情况,如化学处理方案可能产生含药剂废液,生物处理和零排放技术更符合低碳环保要求,优先选择对周边环境影响小的方案<sup>[4]</sup>。

## 3 燃机电厂循环水处理方案应用实践

### 3.1 某燃机电厂案例分析

(1)该燃机电厂一期为2×180MW联合循环机组,每台燃机装机120MW,每台汽机装机60MW,配套单个循环水泵的流量为7000m<sup>3</sup>/h,旁滤设计水量720m<sup>3</sup>/h,共配备6座4784m<sup>3</sup>/h的机力通风冷却塔,采用开式循环冷却方式,主要为燃气轮机、蒸汽轮机及凝汽器提供冷却用水。系统管道材质以碳钢为主,凝汽器换热管采用铜合金材质,设计浓缩倍数控制目标为3.0-5.0倍。二期建设有2套400MW(F)级燃气-蒸汽联合循环热电联产机组,每套机组配备5座机械通风高位收水冷却塔,循环单个循环泵的流量为14277.6/10800m<sup>3</sup>/h。

(2)原水取自厂区附近江水,补充水为经过絮凝、沉淀、过滤处理后的洪湾涌水,城市自来水作为备用水源。由于海水倒灌等原因,补充水电导率从300-30000μs/cm不等,枯水期相对较高,丰水期相对较低。水质特征如下:

“调控”复合方案:原水先经纤维球旁流过滤(处理量1200m<sup>3</sup>/h)去除悬浮物,降低浊度至5NTU以下;过滤后水进入循环水系统,同时通过智能加药装置投加示踪型阻垢缓蚀剂(投加量根据丰水期和枯水期进行调整)、复合缓蚀剂根据现场水质变化调整补加,并交替投加次氯酸钠(氧化性)和AK393(非氧化性);最后通过在线监测系统实时调控,确保水质稳定。

(2)关键设备选型注重可靠性与精准性:加药装置选用全自动计量泵组,配备自动在线监测药剂浓度(每3秒反馈一次),精度误差 $\leq \pm 2\%$ ;监测仪表还包括在线

浊度计（测量范围0-50NTU，精度 $\pm 0.5$ NTU）、腐蚀率在挂片监测（每月计算一次）、pH计（测量范围6-9，精度 $\pm 0.01$ pH）及氯离子在线分析仪，数据实时传输至中控系统。药剂浓度一直控制在一定区间内，当药剂浓度高时，泵自动停止打药，药剂浓度低于下限时，泵自动启动加药。

（3）运行参数根据实际情况动态调整：pH值控制在8.3-8.6，通过投加少量硫酸调节，避免酸性腐蚀和碱性结垢；浓缩倍数初期设定为3~5倍，运行3个月后，结合水质监测数据，在丰水期最高可提高到6-7倍运行，既减少补水用量，又未引发结垢问题。

### 3.3 应用效果评估

（1）水质改善效果显著：方案实施后，循环水浊度稳定在2-8NTU，结垢倾向（以朗格利尔指数计）控制在-0.2至0.3之间，无明显结垢现象；碳钢设备腐蚀速率控制在0.075mm/a内，铜合金设备降至0.005mm/a，在国标控制范围内，设备内壁无明显腐蚀痕迹。

（2）经济性指标提升明显：丰水期浓缩倍数提升至6-7倍后，补水量较原方案减少35%，年节水约120万 $m^3$ ，节水率达32%；药剂消耗方面，因旁流过滤降低了污染物负荷，阻垢缓蚀剂用量减少15%，年节省药剂费用约8万元，整体运行成本降低20%。

（3）环保效益突出：通过优化处理工艺，循环水系统排水经简单处理后可回用于厂区绿化，废水排放量较之前减少45%，年减少废水排放约80万 $m^3$ ；且选用无磷药剂，排水中磷含量 $\leq 0.5$ mg/L，符合当地环保要求，无环保投诉问题。

### 3.4 问题与改进措施

（1）应对季节性水质波动（冬季枯水季原水硬度升高至1800mg/L，氯离子含量增至6000mg/L），采取适应性调整：海水倒灌时，提高阻垢缓蚀剂和缓蚀剂的保有药剂浓度含量，同时降低浓缩倍数，避免结垢，并增强设备抗氯离子腐蚀能力，调整后水质指标始终符合要求。

（2）药剂筛选实验通过模拟实际循环水系统的运行条件，通过一系列静态和动态实验，评价不同药剂配方对的化学稳定性、兼容性以及腐蚀控制、阻垢分散、微

生物抑制的综合效果，为现场应用提供科学依据。

### （3）加强水质数据的监测与控制

1）浓缩倍数的控制：由于水质恶劣，浓缩倍数不宜过高，建议控制在3.0-5.0之间，以平衡节水和运行风险。

2）pH值控制和碱度：建议控制在偏若碱性范围（PH8.3-8.6，碱度：250~300mg/l），通过投加硫酸进行调整PH和碱度。pH过低会加剧腐蚀，过高则易结垢。

3）关键监测指标：腐蚀速率：必须安装在线腐蚀探针和/或定期挂片监测，确保碳钢腐蚀速率 $< 0.075$ mm/a，铜 $< 0.005$ mm/a；粘附速率：定期检查监测换热管，确保粘附速率达标；生物活性：定期检测异养菌、铁细菌、硫酸盐还原菌（SRB）的数量；余氯监测：保证氧化性杀菌剂的效果。

（4）推进智能化管理系统集成，新增AI预测功能：通过分析历史水质数据参数，提前24小时预测水质变化趋势，自动调整药剂投加量和运行参数；同时接入电厂MES系统，实现水处理系统与机组运行的联动调控，减少人工干预，故障响应时间缩短至1小时内，进一步提升系统稳定性。

### 结束语

燃机电厂循环水处理方案的选择，要依据水质特点与运行要求，综合运用物理、化学及复合技术，达成控垢、防腐、灭菌的综合目标。当下，智能监测与零排放技术不断创新，未来处理方案会更趋高效、低碳。燃机电厂需结合自身实际，动态调整工艺参数，做好全生命周期成本管理，在保障系统稳定运行的基础上，推进水资源循环利用，助力燃机产业绿色发展。

### 参考文献

- [1]杨志国,戚江平.热电厂循环水系统水处理技术分析[J].大众标准化,2024,(04):41-43.
- [2]刘伟,黄文平,齐冰,等.火电厂循环水排污减量新技术研究[J].中国资源综合利用,2022,(02):25-29.
- [3]刘德仙.电厂循环水排水深度处理浅析[J].电站辅机,2021,(05):42-45.
- [4]崔仲卿,俞磊,冯杰.发电厂节水减排探析[J].电工技术,2021,(11):134-135.