

凝结水精处理系统失效对水汽化验指标的响应特征分析

冯晓利

国能锦界能源有限责任公司 陕西 榆林 719319

摘要: 凝结水精处理系统是保障超(超)临界火力发电机组及核电机组水汽品质的核心屏障,其运行状态直接关系到热力系统的安全与经济性。一旦该系统发生失效,将导致杂质离子穿透,引发下游设备的腐蚀、结垢与积盐,严重威胁机组安全。本文旨在系统性地剖析凝结水精处理系统各类典型失效模式(包括树脂失效、旁路阀误开、设备泄漏等),并深入研究其对关键水汽化验指标(如氢电导率、钠、二氧化硅、铁、氯离子等)的动态响应特征。研究表明,氢电导率和钠离子浓度是系统失效最灵敏、最具诊断价值的先行指标;而铁、铜等金属离子的变化则更多反映失效后果的次生影响。基于此,本文提出了针对性的在线监测优化策略、故障诊断逻辑及应急处置预案,为提升电厂化学监督智能化水平、实现水汽品质的精准控制与风险预警提供理论依据与实践指导。

关键词: 凝结水精处理; 系统失效; 水汽品质; 化验指标; 响应特征

引言

能源结构转型与环保要求趋严,超(超)临界火力发电机组成我国电力供应主力。其热效率高、煤耗低、排放少,但运行工况苛刻,主蒸汽压力超25MPa、温度超600℃,对水汽品质要求极高,杂质易浓缩沉积,引发腐蚀、结垢等问题,甚至导致灾难性事故。凝结水精处理系统(CPS)是关键净化单元,核心由前置过滤器和高速混床组成,能高效产出高纯度除盐水。但长期运行中,CPS自身可能失效,若不能及时识别处理,将成为水汽循环系统薄弱环节,让前期水处理努力白费。传统化学监督依赖定期人工取样化验或在线仪表监测,对CPS失效这种突发性、隐蔽性强的事件,难以快速捕捉失效信号并判断类型。因此,深入研究CPS失效与下游水汽化验指标的内在联系和响应规律意义重大。

1 凝结水精处理系统构成与工作原理

1.1 系统基本构成

典型的凝结水精处理系统主要包括前置过滤器、高速混床、再生系统以及旁路系统几个关键部分。前置过滤器,通常采用覆盖过滤器或管式微孔过滤器,其主要功能是截留凝结水中的悬浮固体、腐蚀产物及胶体物质,从而保护后续的高速混床免受物理堵塞和污染。高速混床则是整个系统的核心,其内部装填有经过充分混合的强酸性阳离子交换树脂和强碱性阴离子交换树脂。当凝结水流经混床时,水中的阳离子和阴离子分别与树脂上的 H^+ 和 OH^- 发生交换反应,生成的 H^+ 与 OH^- 随即结合成水,这一过程使得出水水质极高,氢电导率通常可稳定在 $0.10\ \mu S/cm$ 以下。为了保证混床能够持续运行,系统还配备了完整的再生系统,包括分离塔、阴/阳再生塔、酸碱储存与

计量系统等,用于在树脂失效后对其进行分层、再生、清洗和重新混合^[1]。此外,为确保在混床检修或再生期间凝结水仍能流通,系统设有旁路管线,并配备自动或手动旁路阀,正常运行时该阀门必须处于严密关闭状态,以防止未经处理的凝结水污染整个系统。

1.2 运行与监控要点

凝结水精处理系统的正常运行依赖于对多个关键参数的严格监控。首先,需要密切关注入口水质,特别是通过监测入口的钠、氯离子和硬度等指标来判断凝汽器是否存在泄漏。其次,出口水质是核心监控点,必须实时跟踪氢电导率、钠、二氧化硅等关键指标的变化,它们直接反映了系统的净化效能。同时,系统压差是判断前置过滤器和混床是否发生堵塞的重要依据,异常的压差升高往往预示着物理性污染或树脂破碎。此外,凝结水的流量与温度也需维持在设计工况范围内,以确保离子交换反应的动力学条件最优,从而保障出水品质的稳定性。

2 凝结水精处理系统典型失效模式分析

凝结水精处理系统的失效并非单一事件,而是多种潜在故障的集合,根据其失效机理和表现形式,可将其归纳为树脂相关失效、设备与阀门失效以及再生系统故障三大类。

2.1 树脂相关失效

树脂相关失效是最为常见的类型,涵盖了树脂自然耗尽、污染、破碎与流失以及分层不良等多种情况。树脂在长期运行过程中,其活性交换基团会逐渐被进水中的杂质离子所饱和,最终导致自然耗尽,失去交换能力,这是一个渐进的过程。与此同时,进水中的有机物、油类、

铁、铝、硅等杂质会附着在树脂表面或渗入其内部结构,造成树脂污染,这会堵塞树脂微孔,阻碍离子扩散,从而显著降低其交换容量和动力学性能^[2]。在高速水流冲刷、频繁的再生操作或机械应力作用下,树脂颗粒还可能发生破碎,产生的细小碎屑不仅会造成树脂损失,还可能随水流进入下游系统,成为腐蚀产物的载体。此外,再生后的树脂若未能充分混合均匀,在运行中会形成局部的阳床或阴床区域,这种树脂分层不良的现象会导致出水pH值波动,并产生“漏钠”或“漏硅”等异常情况。

2.2 设备与阀门失效

设备与阀门的失效往往具有突发性和高危险性。其中,旁路阀的误开或内漏是最具威胁性的故障之一。一旦旁路阀因控制失灵、执行机构故障或密封不严而开启或内漏,未经任何处理的凝结水将直接混入精处理后的出水中,导致水质在极短时间内急剧恶化。设备本体的泄漏同样不容忽视,混床罐体、管道、法兰等处若发生泄漏,可能导致未处理的凝结水渗入出水侧,或者更严重的是,使再生用的酸碱液意外进入出水系统,造成灾难性的水质污染。前置过滤器的失效,如滤芯破损或覆盖层失效,则会导致悬浮物和胶体穿透,直接污染下游混床,加速其整体失效进程。

2.3 再生系统故障

再生系统是保障高速混床能够循环使用的关键。如果再生过程出现问题,例如再生不彻底、酸碱浓度或流量控制不当、树脂在分离塔中未能有效分层等,都会导致再生后的树脂无法恢复到应有的交换容量。这种情况下,混床在下一个运行周期中会表现出“早衰”现象,即运行时间远短于设计周期,出水水质提前恶化,这本质上也是一种系统性的功能失效。

3 失效模式对水汽化验指标的响应特征分析

不同的失效模式会在水质化验指标上留下独特的“印记”,准确解读这些响应特征是进行故障诊断的关键所在。

3.1 氢电导率

氢电导率作为衡量水汽系统中所有阴离子杂质总量的综合指标,对离子型污染物极为敏感,是凝结水精处理系统失效最核心、最灵敏的指示器。当系统因树脂自然耗尽或污染而失效时,氢电导率会呈现出一种缓慢、持续的上升趋势,初期可能仅从 $0.08\text{ }\mu\text{S/cm}$ 升至 $0.15\text{ }\mu\text{S/cm}$,但随着失效的加剧,其数值可迅速突破 $0.30\text{ }\mu\text{S/cm}$ 甚至更高,变化曲线平滑且具有明显的累积效应。与此形成鲜明对比的是,当旁路阀发生误开或内漏这类突发性故障时,氢电导率会在极短的时间内,通常是几分钟到几十分钟,发生阶跃式的飙升,例如从正常的 $0.10\text{ }\mu\text{S/cm}$

瞬间跳升至 $1.0\text{ }\mu\text{S/cm}$ 以上,这种突变是区别于其他渐进式失效模式的最显著特征。而在树脂分层不良的情况下,氢电导率则可能出现周期性或间歇性的小幅波动,但通常不会引起持续性的大幅升高。因此,氢电导率不仅是系统健康状况的“晴雨表”,其变化的速率和形态更是区分不同失效类型的“指纹”。

3.2 钠离子(Na^+)浓度

钠离子是凝汽器泄漏和凝结水精处理系统失效的标志性阳离子,由于其在热力系统中既不挥发也不沉淀,能够真实地反映外来杂质的侵入量。在树脂耗尽或污染的过程中,钠离子浓度会与氢电导率同步缓慢上升,尤其是在混床接近失效终点时,会出现明显的“漏钠”现象,即钠浓度开始显著增加。得益于现代仪表极低的检出限(可至 $0.1\text{ }\mu\text{g/L}$),钠离子成为了早期预警的良好指标。当发生旁路阀误开或内漏时,钠离子浓度会与氢电导率一同发生剧烈的、同步的阶跃式增长,其增长倍数往往非常惊人,是确认凝汽器泄漏和旁路失效的直接证据^[3]。而在树脂分层的情况下,出水钠含量可能会变得不稳定。钠离子与氢电导率的比值分析还能进一步帮助判断污染物的来源:若两者同步大幅升高,强烈指向凝汽器泄漏;若氢电导率升高而钠变化不大,则可能源于有机酸等非钠盐类污染物。

3.3 二氧化硅(SiO_2)

二氧化硅主要来源于补给水残留、凝汽器泄漏以及系统内部硅酸盐材料的溶出,阴树脂对其有较强的亲和力。在混床运行过程中,阴树脂通常比阳树脂更晚失效。因此,在混床运行的后期阶段,当阴树脂接近饱和时,会出现“漏硅”现象,即二氧化硅浓度开始上升,而此时氢电导率和钠离子浓度可能尚未明显恶化,这使其成为一个重要的晚期失效信号。当旁路阀误开或内漏时,二氧化硅浓度也会随旁路凝结水的引入而同步升高,但由于冷却水中硅的含量相对较低,其响应速度和幅度可能略逊于钠和氯离子。因此,二氧化硅的单独升高,尤其是在氢电导率尚可接受的情况下,往往是阴树脂已深度失效或受到有机物污染的强烈提示。

3.4 氯离子(Cl^-)与硫酸根(SO_4^{2-})

氯离子与硫酸根是凝汽器泄漏,特别是使用海水或苦咸水作为冷却水源时的主要特征阴离子,它们对奥氏体不锈钢的应力腐蚀开裂具有极强的诱发作用,危害极大。在树脂耗尽或污染的情况下,这两种离子的浓度变化趋势与氢电导率高度一致,是构成氢电导率升高的主要贡献者。一旦发生旁路阀误开或内漏,会立即检测到氯离子和硫酸根的显著增加。鉴于氯离子对设备安全的

特殊威胁，它常被作为重点监控对象，其检出本身就是水汽系统安全的重大警报，必须立即采取措施予以应对。

3.5 铁（Fe）、铜（Cu）等金属腐蚀产物

铁、铜等金属腐蚀产物指标的变化，更多地反映了凝结水精处理系统失效后所引发的次生后果，而非失效本身的直接信号。当初置过滤器失效时，会导致出水中的铁、铜含量直接升高。当整个CPS因旁路开启等原因而失效时，未经处理的凝结水含有较高浓度的腐蚀产物，会直接导致精处理出口的铁、铜含量上升^[4]。更为深远的影响是，长期的水质恶化会加速下游低压加热器、除氧器等设备的腐蚀，从而导致铁、铜含量在后续测点（如给水）中逐渐累积升高。因此，铁、铜含量的升高是系统腐蚀加剧的体现，主要用于评估CPS失效事件已经造成的损害程度和影响范围，为制定后续的化学清洗或防护方案提供重要依据。

4 应对策略与优化建议

基于上述响应特征分析，可制定以下策略以提升对CPS失效的防控能力：

4.1 强化在线监测与智能诊断

应在CPS出口设置高精度、高可靠性的氢电导率和钠表，并确保其校准维护到位。在此基础上，应建立基于多参数融合的智能诊断模型，例如设定氢电导率变化率的阈值，当其超过某一临界值时，自动触发“疑似旁路失效”的高级报警，引导运行人员优先检查旁路系统。同时，利用大数据技术分析历史运行数据，建立正常工况下的水质指标基线，通过实时偏差分析实现对早期失效的精准预警。

4.2 优化运行与维护规程

应严格执行旁路阀的定期活动试验和严密性检查制度，防患于未然。运行人员应根据入口水质，特别是凝汽器的泄漏情况，动态调整CPS的运行周期和再生策略，避免树脂进入深度失效状态。对于存在有机物污染风险的机组，可以考虑在CPS前增设活性炭过滤器或采用抗有

机物污染的特种树脂，从源头上减轻污染负荷。

4.3 完善应急预案

电厂应制定详细的CPS失效应急预案，明确不同失效模式下的标准处置流程、系统隔离措施和后续水质跟踪要求。一旦确认CPS失效，应立即组织专业团队评估对下游关键设备（如锅炉、汽轮机）的风险，并根据水质恶化的速度和程度，果断决定是否采取降负荷运行乃至紧急停机等措施，以防止事态扩大，最大限度地保护昂贵的主设备。

5 结语

凝结水精处理系统（CPS）对高参数发电机组水汽循环至关重要。本文梳理其典型失效模式，剖析对下游水汽化验指标的响应特征，得出核心结论：氢电导率与钠离子浓度是诊断关键指标，氢电导率阶跃突变是旁路系统失效“指纹”，缓慢上升多指向树脂自然耗尽或污染。不同失效模式有差异化“水质签名”，综合分析多种指标可精准区分失效根源。铁、铜等腐蚀产物指标反映失效次生后果，为后续处理提供参考。基于此，电厂应构建以高精度在线监测、多参数智能诊断模型、标准化应急处置流程为核心的CPS健康管理体系，实现早期预警与快速响应，提升水汽品质控制水平，保障国家能源安全与电力系统稳定运行。

参考文献

- [1]李鹏飞,陈笑.机组凝结水精处理控制系统故障分析及可靠性改造[J].电工技术,2025,(02):4-6.
- [2]魏久程.凝结水精处理系统检修维护质量对机组运行的影响[C]//中国电力技术市场协会.2025年（第九届）发电行业水处理技术研讨会论文集.国能北电胜利能源有限公司胜利发电厂,;2025:185-186.
- [3]马旭,韩松,倪斌,等.火电厂凝结水精处理系统调试及树脂再生[J].工业用水与废水,2024,55(06):71-75.
- [4]王俊平.对发电厂凝结水精处理系统的应用分析[J].模具制造,2023,23(09):139-141.