

火电厂湿法烟气脱硫废水零排放技术分析

杜金辉

江西赣能股份有限公司丰城发电厂 江西 丰城 331100

摘要：火电厂湿法烟气脱硫废水成分复杂，含悬浮物、重金属离子等，实现零排放意义重大。本文分析废水特性，阐述零排放技术核心原理，包括预处理、浓缩减量、固化处理。探讨系统构成，涵盖各处理环节设备选型与流程设计。剖析膜污染、设备腐蚀、系统运行稳定性等关键问题，提出对应解决方案。为火电厂湿法烟气脱硫废水零排放技术应用提供理论支持与实践参考。

关键词：火电厂；湿法烟气脱硫废水；零排放技术；膜污染；设备腐蚀

引言：随着环保要求日益严格，火电厂烟气排放控制愈发严格，湿法烟气脱硫技术广泛应用。但该技术产生大量废水，成分复杂，含多种污染物，若直接排放会对环境造成严重危害。实现脱硫废水零排放，既能减少水污染，又能实现水资源循环利用与盐类资源回收，符合可持续发展理念。在此背景下，深入分析火电厂湿法烟气脱硫废水零排放技术，探讨其原理、系统构成及关键问题解决方案，具有重要的现实意义。

1 湿法烟气脱硫废水特性分析

1.1 废水来源与产生机理

湿法烟气脱硫废水主要源于脱硫工艺中多个环节的排水，其产生与脱硫系统的运行过程紧密相关。在吸收塔内，烟气中的二氧化硫与石灰石浆液发生化学反应，生成亚硫酸钙与硫酸钙，这一反应是脱硫的核心过程^[1]。随着反应持续进行，浆液中固体颗粒浓度逐渐升高，需定期排出部分浆液以维持系统稳定运行，这部分排浆经脱水处理后产生的溢流水即为废水主要来源之一。此外，为控制浆液品质，需补充新鲜水并排出多余水分，进一步增加了废水产生量。化学反应过程中，浆液中的氯离子、重金属离子等杂质不断富集，当浓度超过溶解度极限时，会以沉淀或离子形式进入废水。例如，亚硫酸钙氧化为硫酸钙的过程中，若氧化不完全，部分亚硫酸根离子会随废水排出；烟气中的飞灰颗粒被浆液捕集后，部分未被完全去除的悬浮物也会进入废水体系。这些环节共同作用，形成了成分复杂的脱硫废水。

1.2 废水主要成分及性质

(1) 悬浮物特性。脱硫废水中悬浮物主要由未完全反应的石灰石颗粒、石膏晶体、烟气携带的飞灰及反应生成的亚硫酸钙沉淀组成。颗粒尺寸分布广泛，从微米级胶体到毫米级粗颗粒均有存在，形态多为不规则形状。悬浮物浓度直接影响废水浊度，高浓度悬浮物易在管道中沉积，

造成流道堵塞，同时增加后续处理难度，需通过高效沉淀或过滤技术去除。(2) 溶解性物质特性。废水中溶解性物质涵盖重金属离子与阴离子两大类。重金属离子包括汞、铅、镉等，这些离子具有生物累积性与毒性，需严格控制排放浓度。阴离子以氯离子与硫酸根离子为主，氯离子来源包括工艺水与烟气中的氯化氢，其高浓度会加剧设备腐蚀；硫酸根离子则源于二氧化硫氧化产物，过量存在易与钙离子结合生成硫酸钙垢。溶解性盐类总含量直接影响废水电导率，高盐环境对微生物活性产生抑制，增加生物处理难度。(3) 酸碱度及腐蚀性。脱硫废水通常呈弱酸性，pH值范围在4至6之间，主要受亚硫酸根离子水解与二氧化碳溶解影响。酸性环境会加速金属设备表面氧化膜破坏，导致碳钢材质管道与换热器发生均匀腐蚀或局部坑蚀。氯离子存在进一步加剧腐蚀进程，其穿透氧化膜的能力使腐蚀速率显著提升，需通过材质升级或防腐涂层延长设备使用寿命。

2 零排放技术核心原理

2.1 预处理原理

物理预处理通过物理作用分离废水中的悬浮物与部分溶解性物质。重力沉淀依赖颗粒密度差异实现固液分离，大颗粒在重力作用下快速沉降，小颗粒则需延长停留时间或添加助沉剂加速沉降^[2]。化学沉淀通过投加药剂改变污染物溶解性，例如添加石灰提升pH值，促使重金属离子生成氢氧化物沉淀；投加硫化钠使重金属转化为硫化物沉淀，实现针对性去除。过滤过程利用不同孔径介质拦截颗粒物，石英砂过滤截留毫米级悬浮物，纤维滤料可捕获微米级胶体，活性炭吸附层还能去除部分有机物。离心分离借助离心力强化固液分离效率，高速旋转产生的离心力使密度较大的颗粒快速沉降于设备底部，适用于处理含油废水或高浓度悬浮液。化学预处理通过化学反应调整废水性质。中和反应投加酸或碱调节

pH值至中性范围,为后续处理创造适宜条件,例如酸性废水投加石灰乳中和,碱性废水通入二氧化碳降低pH值。氧化还原反应利用强氧化剂或还原剂破坏污染物结构,臭氧氧化可分解难降解有机物,铁屑还原能将六价铬转化为低毒的三价铬。混凝沉淀通过添加混凝剂改变颗粒表面电荷性质,铝盐或铁盐水解生成胶体吸附悬浮物,形成较大絮体后沉降分离。

2.2 浓缩减量原理

膜分离技术依赖半透膜实现选择性分离。反渗透膜孔径小于0.001微米,水分子在压力驱动下透过膜层,溶质被截留形成浓水,适用于高盐度废水浓缩。纳滤膜孔径在0.001至0.01微米之间,可截留二价离子与有机物,对一价离子透过率较高,常用于分质浓缩。超滤膜孔径0.01至0.1微米,主要分离大分子物质与悬浮物,保护后续反渗透膜免受污染。热法浓缩通过热量传递实现水分蒸发。蒸发过程利用蒸汽或热媒加热废水,水分汽化后冷凝回收,溶质浓度逐步提升。多效蒸发采用多级蒸发器串联,前一效产生的二次蒸汽作为后一效热源,显著提高能源利用效率。结晶过程通过控制温度或浓度使溶质过饱和,晶体从溶液中析出并长大,形成可回收的固体盐类。

2.3 固化处理原理

蒸发结晶固化通过蒸发与结晶联合实现固液分离。多效蒸发系统通过多级蒸发器梯度升温,逐步浓缩废水至过饱和状态,晶体在结晶器中生长并分离。机械蒸汽再压缩蒸发利用压缩机提升二次蒸汽压力与温度,重新作为热源返回蒸发器,大幅降低蒸汽消耗。烟道蒸发固化将废水雾化后喷入高温烟道,液滴在热烟气中迅速蒸发,溶质转化为固态颗粒随烟气排出,经除尘器收集后实现资源化利用。雾化过程通过高压喷嘴或旋转雾化器将废水分散为微米级液滴,增大蒸发面积,缩短蒸发时间,确保完全固化。液滴在烟道中经历加热、蒸发、干燥三个阶段,最终形成干燥颗粒,避免液态水对烟道设备的腐蚀。

3 零排放技术系统构成

3.1 预处理系统

预处理设备选型需紧密结合废水水质特性。针对高悬浮物废水,优先选用处理效率高的沉淀设备,如斜板沉淀池通过增加沉淀面积缩短颗粒沉降时间,提高单位体积处理能力;对于含细小胶体的废水,纤维转盘过滤器凭借精密滤布可实现高效截留^[1]。设备处理能力需与废水产生量匹配,同时兼顾运行稳定性,例如选用耐腐蚀材质制造的过滤设备以延长使用寿命,降低故障率。

预处理系统流程设计遵循“先粗后细”原则。首先通过重力沉淀去除大颗粒悬浮物,减轻后续处理单元负荷;随后采用过滤设备进一步截留微小颗粒,确保出水浊度达标;若废水含重金属或有机物,需在过滤前投加混凝剂与氧化剂,通过混凝沉淀与氧化分解实现深度净化。药剂添加点设置在快速搅拌区,确保药剂与废水充分混合,添加量根据在线监测数据动态调整,避免过量投加造成二次污染或处理成本上升。

3.2 浓缩减量系统

膜分离系统设计需综合考虑膜组件性能与排列方式。反渗透膜组件选择抗污染型,以应对高浓度废水中的有机物与胶体,采用一级多段排列提升回收率;纳滤膜组件则根据分离目标选择特定孔径型号,实现二价离子与一价离子的分质浓缩。膜清洗策略分为物理清洗与化学清洗,物理清洗通过定期反冲洗去除膜表面附着物,化学清洗针对顽固污垢投加专用清洗剂,恢复膜通量。热法浓缩系统设计围绕蒸发器选型与蒸汽控制展开。管式蒸发器适用于高粘度废水,蒸汽在管内冷凝释放热量,废水在管外循环蒸发;板式蒸发器则凭借传热系数高的优势,用于处理低粘度废水。加热蒸汽来源可选用厂内余热蒸汽或新建锅炉产生,温度压力通过减压阀与温控装置精确控制,确保蒸发过程稳定运行,避免因蒸汽参数波动影响浓缩效率。

3.3 固化处理系统

蒸发结晶系统设计聚焦结晶器类型与工艺参数调控。强制循环结晶器通过外循环泵强制溶液流动,避免局部过浓导致结垢,适用于高盐度废水;奥斯陆结晶器利用重力实现晶体与母液分离,可生产粒度均匀的高纯度盐晶。结晶温度通过冷却水流量调节,搅拌速度根据晶体生长阶段动态调整,初期高速搅拌防止晶体聚结,后期低速搅拌减少晶体破碎。烟道蒸发系统设计需优化雾化喷嘴选型与烟道气流组织。双流体雾化喷嘴凭借压缩空气将废水雾化成微米级液滴,增大蒸发面积;旋流雾化喷嘴则通过离心力实现液滴细化,适应不同粘度废水。烟道内气流组织采用导流板调整流场分布,确保液滴在高温区充分蒸发,温度场监测装置实时反馈数据,避免局部温度过低导致液滴未完全固化而腐蚀设备。

4 零排放技术应用关键问题与解决方案

4.1 膜污染问题

膜污染成因复杂多样。悬浮物会在膜表面沉积,形成滤饼层,增大水流阻力,降低膜通量;微生物在膜表面繁殖生成生物膜,不仅堵塞膜孔,其分泌的代谢产物还会加剧污染;有机物分子通过吸附或络合作用附着于

膜表面,部分小分子有机物甚至会渗入膜孔内部,造成不可逆污染^[4]。化学物质与膜材料的相互作用也不容小觑。其中,高价金属离子,像铁离子、钙离子等,会与膜表面官能团结合,导致膜孔收缩或变形。某些有机溶剂,例如丙酮、二甲基亚砜等,具备特定的化学特性,能够与膜材料发生相互作用,逐渐溶解膜材料,直接破坏膜结构的完整性,影响膜系统正常运行。防治膜污染需多管齐下。优化预处理工艺是首要举措,通过强化沉淀、过滤与混凝处理,能最大限度去除悬浮物、胶体及部分有机物,降低膜系统进水污染物浓度。定期膜清洗是维持膜性能的关键,物理清洗采用反冲洗或气擦洗方式,利用水流或气流冲刷膜表面附着物;化学清洗则根据污染类型选择针对性清洗剂,酸性清洗剂可溶解金属氢氧化物污垢,碱性清洗剂能分解有机物污垢。此外,选用抗污染性能优异的膜材料也至关重要,如聚偏氟乙烯(PVDF)膜,凭借良好的化学稳定性与抗污染性,广泛应用于高污染废水处理。

4.2 设备腐蚀问题

设备腐蚀现象与废水成分及运行条件有着紧密联系。废水中存在的酸性物质会直接对金属设备表面产生侵蚀作用,而碱性条件则会促使金属氢氧化物快速生成,进而引发设备厚度减薄。氯离子具有穿透金属表面氧化膜的能力,会在金属表面形成点蚀坑,造成局部腐蚀直至穿孔。溶解氧与金属接触后会发生电化学腐蚀反应,在金属表面形成微电池结构,加快金属溶解速度。废水中的微生物在新陈代谢时会生成酸性代谢产物,这进一步加重了设备腐蚀程度。高温环境会加快腐蚀进程,化学反应速率随温度升高而大幅提升,腐蚀介质扩散速度也加快,导致设备损坏速度加快。防腐工作需从材料选用与表面处理两方面着手。制造关键设备时选用耐腐蚀材料,例如用钛材或双相不锈钢制作换热器管束,以此提升设备抗腐蚀性能。对碳钢设备进行防腐涂层处理,环氧树脂涂层能隔绝腐蚀介质与金属的直接接触,陶瓷涂层凭借自身高硬度与耐磨损特性延长设备使用寿命。将废水pH值控制在合理区间,通过投加酸碱调节剂防止设备长期处于强酸或强碱环境,降低腐蚀发生的可能性。

4.3 系统运行稳定性问题

系统运行稳定性受多种因素影响。废水水质出现波动时,处理效果难以保持稳定,悬浮物浓度突然升高可能堵塞预处理设备,有机物含量改变会影响膜系统运行参数。设备出现故障会引发系统停运,膜组件损坏、泵机故障等突发状况会中断处理流程,导致生产活动无法正常进行。系统运行期间,各处理单元之间的协同配合也可能出现状况,预处理效果不理想会使后续浓缩减量系统承受过大负荷,影响整体运行效率。外部突发情况如停电、停水等也会对系统运行稳定性造成冲击。保障系统运行稳定性需构建系统化管理体系。搭建水质在线监测与预警系统,实时监测关键指标变化,当悬浮物、COD等参数超出设定值时自动发出警报,为调整处理工艺提供参考。制定设备维护保养计划,定期检查膜组件、泵机等核心设备运行状况,及时更换磨损部件,确保设备始终处于良好运行状态。配备备用设备并制定应急处理方案,主设备出现故障时迅速切换备用设备,维持系统连续运行,同时启动应急处理流程,防止废水超标排放。

结束语

火电厂湿法烟气脱硫废水零排放技术是解决脱硫废水污染问题的有效途径。通过对其特性分析、技术原理研究、系统构成设计以及关键问题解决,可实现废水高效处理与资源回收。实际应用中,需根据废水水质特点与处理要求,合理选择技术组合,优化系统运行参数,加强设备维护管理,以保障系统稳定运行,提高处理效果,推动火电厂环保水平提升,实现经济效益与环境效益双赢。

参考文献

- [1]姜正雄.火电厂湿法烟气脱硫废水零排放技术分析[J].电气技术与经济,2025(3):59-61.
- [2]王静.关于火电厂脱硫废水零排放技术应用[J].工程技术研究,2023,5(8):62-64.
- [3]武育鹏.火电厂脱硫废水零排放技术研究[J].百科论坛电子杂志,2021(18):2353-2354.
- [4]贾鑫.浅谈燃煤电厂脱硫废水零排放工艺[J].百科论坛电子杂志,2021(4):1991.