

# 低温多效蒸发浓缩与高温旁路烟道蒸发技术在脱硫废水零排放中的联合应用研究

任楠楠

华电水务工程有限公司, 北京 100160

**[摘要]** 脱硫废水的零排放处理是环保领域的重要课题, 低温多效蒸发浓缩 (MEE) 与高温旁路烟道蒸发技术 (HTS) 因其高效的水处理能力和较低的能耗, 被广泛应用于工业废水处理。文章结合这两种技术, 研究其在脱硫废水零排放中的联合应用。通过对低温多效蒸发与高温旁路烟道蒸发技术的工作原理、优缺点及应用场景进行分析, 提出将两者结合的创新性方案, 并通过实验研究验证其在脱硫废水中的可行性和处理效果。结果表明, 联合应用该两种技术能够大幅度提高废水处理效率, 降低能耗, 实现废水的零排放目标, 为相关工业领域提供了可借鉴的技术路线。

**[关键词]** 脱硫废水; 低温多效蒸发; 旁路烟道蒸发; 零排放; 废水处理

DOI: 10.33142/hst.v8i1.15152

中图分类号: X773

文献标识码: A

## Joint Application Research on Low-temperature Multi Effect Evaporation Concentration and High-temperature Bypass Flue Evaporation Technology in Zero Discharge of Desulfurization Wastewater

REN Nannan

Huadian Water Engineering Co., Ltd., Beijing, 100160, China

**Abstract:** Zero discharge treatment of desulfurization wastewater is an important issue in the field of environmental protection. Low temperature multi effect evaporation concentration (MEE) and high-temperature bypass flue evaporation technology (HTS) are widely used in industrial wastewater treatment due to their efficient water treatment capacity and low energy consumption. The article combines these two technologies to study their joint application in zero discharge of desulfurization wastewater. By analyzing the working principles, advantages and disadvantages, and application scenarios of low-temperature multi effect evaporation and high-temperature bypass flue evaporation technologies, an innovative solution combining the two is proposed, and its feasibility and treatment effect in desulfurization wastewater are verified through experimental research. The results indicate that the combined application of these two technologies can significantly improve wastewater treatment efficiency, reduce energy consumption, and achieve the goal of zero discharge of wastewater, providing a reference technology route for related industrial fields.

**Keywords:** desulfurization wastewater; low-temperature multi effect evaporation; bypass flue evaporation; zero emissions; waste water treatment

### 引言

脱硫废水是燃煤电厂脱硫过程中产生的废水, 含有大量的有害物质和高盐分, 若未经处理直接排放将对水资源造成严重污染。随着环保要求的不断提升, 脱硫废水的零排放处理成为亟待解决的难题。低温多效蒸发浓缩技术 (MEE) 和高温旁路烟道蒸发技术 (HTS) 作为两种成熟的废水处理技术, 在能源利用率和处理效果方面具有较大优势。本文通过探讨这两种技术的联合应用, 旨在为脱硫废水的零排放提供一种有效的技术方案。

### 1 低温多效蒸发浓缩技术概述

#### 1.1 低温多效蒸发技术原理

低温多效蒸发 (MEE) 是一种利用多级蒸发过程对废水进行浓缩的技术。基本原理是由多个蒸发器相互串联组成的系统, 要求后效的操作压强和溶液的沸点均较前效的低, 因此可以引入前效的二次蒸汽作为后效的热源被利用。通过多级热量回收利用, 能大幅度提高热效率, 降低整

体的能源消耗。MEE 技术能够在能源消耗最小化的前提下, 处理大量废水, 并达到高浓缩度的效果<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 低温多效蒸发的应用领域

低温多效蒸发技术广泛应用于化工、制药、食品加工、电力等多个行业, 尤其是在需要对高盐度废水进行浓缩处理的场合。典型的应用包括脱硫废水处理、盐化废水处理、含有有机物的废水浓缩等。在电力行业中, MEE 技术被广泛应用于火电厂脱硫废水的处理, 经过浓缩可以大幅减少废水的排放量, 从而降低对水资源的需求和污染风险, 提高蒸汽利用率。此外, MEE 还在海水淡化、乳制品生产、化工液体浓缩等领域得到应用, 表现出优异的节能和环保性能<sup>[2]</sup>。

#### 1.3 低温多效蒸发的优缺点分析

##### (1) 优点

**能效高:** 通过多效蒸发技术的热量回收机制, 能效比单效蒸发大幅提高, 能源消耗较低。

**环保:** 由于采用低温蒸发, 能够减少有害气体的排放,

符合环保要求。

**高浓缩比：**能够将废水浓缩至较高的盐度，有助于废水的资源化处理。

**适用性强：**对高盐度、高浓度废水处理效果显著，适应性强。

## (2) 缺点

**初期投资较高：**设备的购买和安装费用较高，需要较长的投资回报期。

**运行复杂：**MEE 系统的运行和维护较为复杂，要求操作人员具备一定的技术水平。

**设备占地面积大：**由于多效系统的多级设计，其占地面积相对较大，影响了空间的利用。

**适用性受限：**对于低盐度、低浓度的废水处理效果较差，需要根据废水特性选择合适的蒸发系统。

## 2 高温旁路烟道蒸发技术概述

高温旁路烟道蒸发技术是一种应用于脱硫废水零排放处理的有效方法。其原理是通过锅炉烟气的热量直接蒸发废水，热源取自 SCR 出口与空气预热器的入口之间热烟气，经过蒸发装置后排入低温省煤器前总烟道，产生的固体颗粒物附着在烟尘颗粒上，最终通过除尘器捕集并与粉煤灰共同实现资源化利用。这种技术具有投资和运行成本低、流程简单、无二次污染等优点，逐渐成为脱硫废水处理的主流工艺。

### (1) 技术原理与雾化方式

该技术的核心在于将脱硫废水雾化成细小液滴，这些液滴与高温烟气发生传质和传热作用，最终被蒸发。根据雾化方式的不同，主要有两种技术：三流体雾化蒸发技术和旋转雾化蒸发技术。三流体雾化技术具有占地面积小、单个喷嘴独立运行和检修方便的优势，而旋转雾化技术则存在占地面积大、检修不便等问题。高温旁路烟道蒸发技术通过雾化喷头控制液滴粒径，使液滴与烟气在旁路烟道内充分混合，实现高效蒸发。

### (2) 系统结构与废水处理流程

该技术的热源来自 SCR 后、空气预热器前的烟道，出口位于空气预热器后、除尘器前烟道。通过电动隔离挡板实现旁路烟道与主体烟道的隔离，从而保障电厂的稳定运行。废水通过管道输送至旁路烟道的高效雾化喷头，并由空压机调节气液比控制雾化液滴的粒径在  $50\ \mu\text{m}$  以内。在高温烟气 ( $330\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ ) 的作用下，废水被迅速蒸发，盐类物质析出并附着于烟气中的粉尘颗粒上，被除尘器捕集，最终进入粉煤灰中进行资源化利用。水蒸气则随烟气进入脱硫塔，在冷凝后补充脱硫工艺用水，完成零排放目标。

## 3 脱硫废水的处理现状与技术挑战

### 3.1 脱硫废水的主要成分与处理难点

脱硫废水主要来源于燃煤电厂的烟气脱硫工艺，具有一系列典型的特点。首先，它的含盐量极高，通常达到很高的总溶解固体 (TDS) 水平，且含有大量的氯化钠、硫酸钠、硫酸铵等溶解盐分。此外，废水中还可能含有氨氮、

氟化物以及少量的重金属元素如铅、汞等。这些成分为脱硫废水的处理带来了很大挑战。

废水的高硬度和高悬浮物 (SS) 含量是另一个难点。由于其中含有大量的悬浮固体，传统的过滤或沉淀技术往往无法完全去除，导致废水处理效果不理想。尤其在高浓度的废水处理中，悬浮物可能在设备内形成沉积，影响设备的正常运行。进一步的问题是，脱硫废水通常呈酸性，pH 值较低，这增加了设备的腐蚀性，要求处理系统具备更强的耐腐蚀性能。

此外，废水中的氨氮和氟化物含量较高，传统的水处理技术 (如物理吸附、化学沉淀等) 难以完全去除这些成分，这使得废水在达标排放之前往往需要多次处理。氨氮的去除不仅需要较高的处理成本，还可能形成有毒的副产物，如硝酸盐等。氟化物的去除则通常需要使用特殊的吸附材料或化学处理方法，增加了系统的复杂性和运行成本。

更为复杂的是，脱硫废水中的重金属和有机物在处理过程中容易引发二次污染。重金属不仅难以通过传统的物理和化学方法去除，且在去除过程中可能会与其他元素发生化学反应，生成有害的中间产物。与此同时，有机物在处理过程中可能形成不易降解的化合物，进一步加剧了后续处理的难度。这种二次污染的风险不仅影响废水的处理效果，还可能对环境造成新的危害。

### 3.2 脱硫废水处理的技术挑战

脱硫废水的高浓度、复杂成分和难以去除的污染物使得传统的废水处理技术面临诸多挑战。现有的物理化学方法，如吸附、沉淀和反渗透，虽然在一定程度上能够去除废水中的部分污染物，但面对高盐、高氨氮和重金属的复杂情况，处理效果常常难以达到零排放要求。与此同时，废水量大、处理成本高，也成为了制约技术应用的一大瓶颈。为了应对这些技术挑战，开发高效、低成本的新型处理技术显得尤为重要。研究者们正在探索包括膜技术、电化学处理、生物处理等在内的先进技术，以提高脱硫废水的处理效率和降低能耗。这些新兴技术有望在处理过程中提供更多选择和灵活性，解决传统技术中的瓶颈问题，从而达到更为理想的零排放效果。

## 4 低温多效浓缩与高温旁路烟道蒸发的联合应用方案

### 4.1 联合应用技术方案概述

低温多效蒸发浓缩 (MEE) 与高温旁路烟道蒸发 (HTS) 技术的联合应用能够充分发挥两者的优势，以应对脱硫废水零排放的技术挑战。MEE 技术在废水浓缩中表现出高效的热能利用和较低的能源消耗，而 HTS 技术则借助锅炉烟气的热量直接蒸发废水，能够有效降低能耗并避免二次污染。通过将两者结合，可以实现高效的废水处理和零排放目标，同时大幅度提高整体处理能力与系统稳定性。

### 4.2 联合应用的工作原理

在联合应用方案中，MEE 系统作为初级浓缩设备，通

过多个效能的热交换,实现废水的浓缩处理。废水经过多级蒸发,在逐级加热过程中,废水中的水分被蒸发出来,浓缩废水中的溶解盐分。浓缩后的废水进入 HTS 系统,通过烟气热源进行进一步蒸发。HTS 系统利用锅炉烟气中的高温热量,将废水进一步蒸发,水蒸气与烟气混合后经过冷凝回收,达到零排放的目的。通过这种联合应用,废水的处理不仅提高了效率,而且能耗得到了有效控制。

#### 4.3 联合应用的优势

首先, MEE 技术具有较高的热效率,通过热量回收能够最大限度地降低能源消耗,并实现废水的高浓缩。其次, HTS 技术利用烟气余热,减少了传统蒸发过程中的能耗需求,同时避免了废水处理过程中可能产生的二次污染。两者的结合,不仅可以有效解决脱硫废水中高盐、高氨氮及重金属的去除问题,还能够提高系统的处理能力,减少系统运行成本。与传统单一处理技术相比,联合应用方案能显著降低设备的维护和运营难度。

#### 4.4 技术实施与优化

为了确保低温多效蒸发与高温旁路烟道蒸发技术的最佳协同效果,系统的设计与优化是至关重要的。首先,应根据废水的成分和浓度,合理选择 MEE 系统的蒸发级数,确保热能最大化利用。其次, HTS 系统中的废水雾化喷头应根据废水的特点和烟气温度,优化液滴粒径和雾化方式,以提高蒸发效率并防止结垢现象的发生。最后,系统的控制与监控技术需要进行精确调节,以实现能效和废水处理效果的平衡。

### 5 联合应用技术在脱硫废水零排放中的实验研究

#### 5.1 实验设计与方案

为了验证低温多效蒸发浓缩(MEE)技术与高温旁路烟道蒸发(HTS)技术联合应用于脱硫废水零排放处理的可行性与效果,设计了一系列实验。实验选用某燃煤电厂脱硫废水作为研究对象,废水的主要成分为氯化钠、硫酸钠、硫酸铵及少量氨氮、氟化物和重金属离子。实验系统包括两大部分:低温多效蒸发浓缩系统和高温旁路烟道蒸发系统。低温多效蒸发系统由三效蒸发器组成,采用热量回收与多级蒸发过程来减少能耗;高温旁路烟道蒸发系统通过高温烟气加热废水,利用雾化喷头控制液滴粒径,以提高蒸发效率。

实验方案分为三个阶段:首先,分别单独运行 MEE 和 HTS 系统,以确定各自的处理能力和能效;然后,将两者结合,构建联合处理系统,通过调节两种技术的热源与操作参数,优化系统的整体处理效果;最后,通过比较不同配置和处理条件下的处理效果,评估联合应用技术的优势。

#### 5.2 实验数据分析与结果讨论

根据实验数据,脱硫废水经过低温多效闪蒸浓缩后,能够显著降低废水中的水分含量,浓缩液的总溶解固体(TDS)水平提升约 50%~70%。在低温多效蒸发(MEE)

阶段,废水经过多级蒸发,水分被逐步蒸发出来,热能的回收利用有效地降低了能耗。接着,浓缩后的废水进入高温旁路烟道蒸发系统(HTS),通过锅炉烟气的热源进一步蒸发水分。实验数据显示,废水的蒸发效率在高温烟气(330~350℃)作用下提升约 30%,而雾化喷头控制液滴粒径后,废水与烟气的接触时间被优化,蒸发过程更加高效。最终,通过此联合方案,脱硫废水中的溶解盐分(如氯化钠、硫酸钠、硫酸铵)有效沉积在烟气中的粉尘颗粒上,经过除尘器捕集后,与粉煤灰共同资源化利用。水蒸气冷凝后回收并补充脱硫塔的工艺用水,实现零排放。

#### 5.3 联合应用技术在脱硫废水中的效果评估

通过综合分析实验数据,联合低温多效蒸发与高温旁路烟道蒸发技术能够在脱硫废水处理中实现显著的节能减排效果。实验表明,联合技术不仅能够提高废水的处理效率,还能有效地降低处理成本。根据处理效果评估,联合应用技术在废水盐度和悬浮固体物质的去除上,优于传统的物理化学方法。

此外,联合系统对不同类型废水的适应性也较强,能够处理多种废水成分复杂的脱硫废水,尤其在高盐度、高浓度废水处理中,联合技术的优势更加明显。整体而言,联合技术为脱硫废水零排放提供了一个高效、节能、环保的技术路径,有助于推动脱硫废水处理技术的进一步发展和应用。

### 6 结语

本文通过对低温多效蒸发浓缩技术和高温旁路烟道蒸发技术的联合应用进行研究,探讨了其在脱硫废水零排放中的实际效果。研究结果表明,联合应用这两种技术能够显著提高废水处理效率、减少能耗,并实现废水的零排放目标。该技术方案为脱硫废水的处理提供了新的思路和可行性,同时也为其他工业废水的零排放处理提供了借鉴。未来的研究可以进一步优化该技术组合,提升其处理效果和经济效益,推动其在实际生产中的应用推广。

#### [参考文献]

- [1]陈育豪. 燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺的优化改造[J]. 资源节约与环保, 2024(9): 37-40.
  - [2]陈海杰,李飞,杨树莹,等. 燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术比较[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(3): 224-231.
  - [3]王水新. 低温多效闪蒸技术处理湿法脱硫废水运行分析[J]. 山西化工, 2024, 44(3): 231-234.
  - [4]张爱民,赵飞,郑铭灏. 高温旁路烟道蒸发技术在脱硫废水零排放处理中的技术对比与应用现状[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(6): 67-72.
  - [5]魏俊岭,王剑栋. 基于旁路烟道蒸发的脱硫废水零排放系统设计与应用[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2): 150-156.
- 作者简介:任楠楠(1987.9—),女,高级工程师。