

# 燃煤电厂脱硫废水零排放技术研究

席选刚 刘恩虎 慕富安 刘斌 张铮

**摘要:** 目前国内燃煤电厂脱硫废水处理因含盐量高和较强的腐蚀性,使其处理难度大、成本高及终极产物无法妥善处理等诸多问题。本文分析了3种主流技术路线的原理、适用性、经济性等方面,为燃煤电厂选择合适的脱硫废水处理技术提供参考。

**关键词:** 燃煤电厂; 脱硫废水; 技术路线; 旋转雾化技术

## 前言

在我国新能源突飞猛进的今天,但燃煤电厂在我国电厂调峰、保供中任然占据主导地位。石灰石—石膏湿法是国内应用最广、技术最成熟的烟气脱硫工艺,占我国脱硫技术的92%以上。此工艺中,脱硫浆液在湿法脱硫喷淋塔内不断循环,烟气粉尘中大量的Cl<sup>-</sup>及重金属离子等污染物会逐渐富集到产生的脱硫废水中,为使脱硫系统能够稳定运行,需定期排出一部分浆液以控制浆液中Cl<sup>-</sup>浓度。由于脱硫废水所含成分较为复杂,污染物种类多,处理难度很大。脱硫废水未经处理直接排放,会造成严重的环境污染,因此对来自燃煤电厂的脱硫废水实现零排放处理迫在眉睫。

## 一、蒸发结晶技术

脱硫废水经软化预处理减少浊度及结垢物质,利用膜法或热法对废水进行处理产生净水和浓水,浓水利用结晶器进一步处理产生蒸馏水和盐,其中净水和蒸馏水都可以直接回用,而结晶盐可以作为固废处置,从而实现废水零排放。

目前成熟应用的蒸发结晶技术主要有多效蒸发

(MED)、蒸汽机械再压缩(MVR)、低温常压蒸发(NED)。MED和MVR在国内电力行业均有应用实例,NED在国内电力行业无应用实例,但在石化行业有应用实例。

多级闪蒸发结晶工艺、多效蒸发结晶工艺和机械蒸汽再压缩蒸发结晶工艺为代表的机械式蒸发结晶处理技术均为独立的处理系统,其技术经济比较如表1所示。上述工艺的能耗较高,而且为了保证蒸发结晶系统不结垢,需对废水进行深度去除硬度处理,药品消耗较多,因此该工艺须结合其它的浓缩工艺设置处理方案,需要较高的投资运行成本。

表1 高盐废水蒸发结晶处理工艺比较

工艺技术	能源类型	投资成本	运行成本	占地面积	应用情况
多级闪蒸技术(MSF)+结晶器	蒸汽	最高	高	最大	无
多效蒸发结晶(MED)+结晶器	蒸汽	高	最高	较大	使用较少
机械蒸汽再压缩(MVR)+结晶器	电能	较高	较高	较大	使用较多一点

## 二、主烟道蒸发技术

主烟道蒸发是指将脱硫废水采用双流体雾化喷嘴雾化喷射于空预器和除尘器之间的烟道内,利用低温烟气余热将水分蒸发的技术,其产生的结晶盐和固体杂质随烟气进入后续除尘器被捕捉。由于空预器和除尘器之间烟气的温度一般仅有110~150℃,废水的蒸发速度较慢。同时,受除尘器入口烟道蒸发空间的限制,水分需要在1.0~1.5秒左右完成蒸发,因此往往需要对废水先进行浓缩减量,降低其蒸发的热量和空间需求。常规的浓缩减量方法有膜法和热浓缩法等,如反渗透RO膜、常温常压蒸发器等。

有研究表明,烟气速度和液滴初速度的改变对液滴蒸发速度的影响都较小。主要影响因素主要集中在烟道结构、烟气入口温度和喷雾粒径的喷雾液滴蒸发过程。该技术的优点是采用空预器后的低温烟气作为废水蒸发

## 作者简介:

1. 席选刚(1988.01——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事工业烟尘净化方面的研究工作。
2. 刘恩虎(1969.02——)男,汉族,本科学历,高级工程师,主要从事工业烟尘净化方面的研究工作。
3. 慕富安(1991.03——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事工业烟尘净化处理方面的研究工作。
4. 刘斌(1993.01——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事工业烟尘净化方面的研究工作。
5. 张铮(1989.06——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事工业烟尘净化方面的研究工作。

热源,不会影响到机组煤耗。但存在不少缺点,主要包括以下几个方面:

(1) 运行风险大:空预器和(电、布袋)除尘器之间烟气的温度较低,当烟气携带的热能不足以在既定时间内将废水蒸发时,容易引起烟道结垢、积灰、堵塞和腐蚀等问题,严重时会影响后续除尘器等设备的安全运行。此外,目前国内火电机组长期处于低负荷运行状态,其空预器和除尘器之间烟气的温度往往只能达到90~110℃左右,系统存在很大的运行风险。例如某350MW机组投运了低温烟道蒸发系统,但运行效果不良,烟道结垢、积灰和堵塞现象非常严重,后不得不改用空预器前的旁路高温烟气蒸发废水。烟道积灰主要是由于喷出的废水液滴与粉尘接触后,废水或粉尘蒸发不干,部分粉尘重量增大导致在烟道中沉积;锅炉负荷变化、喷嘴布置不当、喷嘴发生磨损堵塞等均有可能出现烟道积灰现象。

(2) 需预处理和浓缩,成本高:由于烟气温度较低,该技术往往需要在蒸发之前对废水进行预处理和浓缩减量,需要设置相应的系统和设备,不仅增加了工艺流程的复杂性,更增大了投资和运行成本。

(3) 蒸发空间受限:不少机组在空预器和除尘器之间已进行低温省煤器改造或MGGH改造,导致该废水烟道蒸发系统无足够布置及废水蒸发空间。

针对上述问题,可考虑采取措施可得到一定程度的解决,但由于电厂变负荷运行及低低温电除尘改造,已严重制约了主烟道蒸发技术的推广应用。

目前,主烟道雾化蒸发技术已在诸多电厂开展了工程应用。根据运行经验,由于烟道内烟气流速降低,可能会导致灰分沉降,造成雾化系统结垢堵塞等问题;同时锅炉在变负荷运行时会出现主烟道内废水无法完全蒸发,烟气中夹带部分未蒸干液滴,对后续除尘系统产生影响。

### 三、旁路烟道蒸发技术

#### 1. 旁路烟道蒸发技术

SCR脱硝与空预器间抽一股热烟气制造旁路,设置烟道为蒸发器主体。旁路烟道布置双流体雾化喷枪,与废水输送系统、压缩空气系统、管道控制仪表阀门共同组成雾化系统。旁路烟道蒸发是指设置与空预器并联的烟道旁路,在空预器入口处引部分高温烟气进入旁路中安装的废水蒸发器(即旁路烟道),采用双流体雾化喷嘴将脱硫废水雾化喷射于蒸发器内,利用高温烟气余热将水分蒸发,产生的结晶盐和固体杂质随旁路烟气回到空预器之后的主烟道,最终进入后续除尘器被捕提。

旁路烟道蒸发技术的优点主要有以下两个方面:

(1) 蒸发效果好,以高温烟气为蒸发热源,烟气温度高达300℃以上,可确保废水蒸发效果,可靠性高。

(2) 设置的旁路烟道作为蒸发器主体,其运行与主机系统相对独立,便于施工和维护。

该技术的缺点主要有以下三个方面:

(1) 增大煤耗:以空预器之前的高温烟气为热源,会降低锅炉炉膛进风温度,导致炉效下降,在一定程度上增大机组煤耗;以某300MW机组为例,废水处理能力为1~2 t/h,煤耗约增加0.3~0.6 g/kWh。

(2) 需预处理和浓缩,成本高:为了降低煤耗的增加值,该工艺需要对废水进行预处理和浓缩减量,降低其相变的热量消耗,增加了系统的工艺复杂性,也增大投资和运行成本。

(3) 雾化喷嘴易结垢:即便采用了废水预处理工艺,但由于喷嘴的孔径较小,仍容易结垢和堵塞,需定期清洗或更换。

目前,某电厂由电除尘入口烟道蒸发改为SCR脱硝与空预器间设置旁路烟道蒸发,采用“双碱法+双膜法+旁路烟道蒸发”技术工艺,喷嘴有堵塞现象。由于从主系统抽取烟气,因此锅炉效率会略有下降(0.3~0.5%左右)。双流体雾化喷嘴的选择是本技术的关键,喷嘴选择不当会导致喷嘴磨损堵塞引起雾化性能下降和存在旁路烟道积灰。

#### 2. 旁路蒸发塔技术

双流体喷雾蒸发塔采用双流体喷枪,通过压缩空气的作用对脱硫废水进行雾化处理。烟气引自SCR脱硝之后空预器之前的烟道,烟气温度为300~350℃,抽取烟气量约占总烟气量的3~5%。预处理之后的废水由高压泵引至喷雾蒸发塔,采用双流体喷枪将其雾化喷射到高温烟气中,废水中的水分快速蒸发,增湿降温后的烟气进入除尘器前主烟道。废水中的Cl<sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、重金属离子等各种污染物瞬间蒸发干燥结晶析出,随粉尘在除尘器中被捕集下来。

双流体喷雾蒸发塔技术具有以下特征:

(1) 投资成本低:双流体喷雾蒸发塔塔径小,建设费用低,布置更为方便

(2) 塔内流场不均:双流体喷枪在塔内一般按直线布置,每个喷嘴产生扇形雾区,每个扇形叠加覆盖,易造成与烟气混合的不均匀。

(3) 雾化喷嘴易结垢:双流体喷枪静止的布置在蒸发塔内,喷射口易结块而堵塞喷嘴,维护工作量较大。

目前,某电厂采用该技术从多效蒸发器浓缩后的废水进入溶液储罐中,利用泵组输送单元及管道将废水输送至旁路烟道蒸发器,采用双流体雾化喷嘴喷入烟气中进行雾化。2台炉共布置4个旁路烟道蒸发器,其公用一套输送系统,到各锅炉前再由支管送至各烟道蒸发器。废水喷射系统能长期、稳定、连续运行;废水蒸发过程

在高效节能烟道蒸发器内完成，蒸发过程中不出现积灰、堵塞现象，且蒸发系统需能长期、稳定、连续运行。

### 3. 旋转喷雾干燥技术

该工艺将喷雾干燥技术应用于脱硫废水处理，脱硫废水经过旋转雾化器雾化成粒径约几十微米的细雾滴喷入干燥塔内，利用空预器前的锅炉热烟气作为热源，在喷雾干燥塔内将废水蒸发，水分进入烟气中，蒸发析出的粗盐分颗粒落入干燥塔底端被收集转运，细小盐分颗粒随烟气进入除尘器处理，达到脱硫废水零排放的目的。

旋转喷雾干燥工艺技术的核心是旋转雾化器，每个干燥塔配置一个旋转雾化器，烟气通过烟气分布器后进入干燥塔，保证烟气与雾滴充分混合，实现传热、传质反应。由于喷雾干燥系统的工作温度总是在露点温度以上，所以塔体及烟道等与烟气介质接触的材料无需进行防腐处理，采用普通碳钢即可。因脱硫废水Cl<sup>-</sup>含量高，与脱硫废水接触的雾化盘采用哈氏合金材质。

旋转喷雾干燥技术相较其他零排放工艺具有以下

优势：

(1) 能够实现脱硫废水零排放，解决高盐脱硫废水处理难度大的问题；

(2) 脱硫废水的处理能力主要取决于干燥塔塔型设计以及引入烟气温度及烟气量；

(3) 旋流雾化器离心力强度大，不易堵塞，可用于处理高含固量的废水；

(4) 脱硫废水水质适应性强，流程简单，操作方便，投资小、运行维护费用低；

(5) 占地面积小（300MW机组需要的布置场地大小约为300 m<sup>2</sup>；600MW机组需要的布置场地为500 m<sup>2</sup>）；

(6) 废水蒸发在单独设置的干燥塔中进行，不影响主系统，可靠性高。

### 四、脱硫废水零排放技术比较论证

目前常见的脱硫废水零排放工艺主要包括蒸发结晶技术、主烟道蒸发技术以及旁路热烟气蒸发技术等，对几种脱硫废水零排放工艺分析如表2所示。

表2 脱硫废水零排放技术对比（以300MW为例）

技术	蒸发结晶	主烟道蒸发	旁路烟道蒸发	旁路塔蒸发	
				双流体雾化喷嘴	旋转雾化器
水质适应性	好	一般	较好	较好	好
处理能力	好	一般	一般	较好	较好
运行成本（元/t）	60~100	20~30	20~30	20~30	15~25
投资费用（万元）	3000~5000	500~800	约1000	约800	约800
经济性	较差	好	较好	较好	较好
占地面积	大	小	中	中	中
技术缺陷	能耗高、结晶盐无法利用	变负荷难蒸干、空间不足	炉效降低、烟道积灰	锅炉效率降低	锅炉效率降低
成熟度	成熟	一般	一般	一般	一般
适用条件及应用电厂	适用所有电厂，有应用厂	适用于负荷稳定且较高，废水量小的电厂；有应用	有应用	有应用	新机组应用较多
运行情况	对进水水质要求较高，需预处理、需要解决蒸发过程结垢问题，以及需解决蒸发器结垢问题，需解决结晶盐的处理问题；	烟道积灰，雾化系统结垢堵塞等问题，脱硫废水需要预先软化浓缩预处理；同时，受锅炉负荷影响明显，容易蒸发不彻底，易结垢，会影响机组安全	炉效略有下降、喷嘴堵塞磨损问题，脱硫废水需要预先软化浓缩预处理	炉效略有下降，脱硫废水需要预先软化浓缩预处理，运行成本较高	炉效略有下降，进水无特殊要求，无需预处理，但旋转雾化喷嘴维修相对复杂

综合工程造价、运行费用、运行风险、占地等因素，旁路热烟气蒸发技术是目前燃煤电厂脱硫废水零排放处理一个极具应用前景的选择，在将来一段时间内将成为脱硫废水处理领域的关注重点，进一步考虑到旋转喷雾干燥工艺无需对脱硫废水进行软化、浓缩预处理，优选旋转喷雾干燥技术。

### 参考文献

[1] 陈少林, 程喜梁, 张强, 等. 铜冶炼烟气脱硫技术应用现状[J]. 有色冶金节能, 2021, 3(5): 60-64.  
 [2] 连坤宙, 吴火强, 李瑞鹏, 等. 旋转喷雾蒸发技术在火电厂脱硫废水零排放项目中的应用[J]. 水处理技术, 2023, 19(3): 152-156.  
 [3] 李宏远. 燃煤电厂脱硫废水零排放治理技术路线分析与选择[J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 80-85.