

# 燃煤机组脱硫废水零排放技术分析

杨文毅<sup>1\*</sup>, 由长福<sup>1,2,3</sup>, 王海名<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学山西清洁能源研究院, 山西 太原 030032;

2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

3. 怀柔实验室山西研究院, 山西 太原 030032)

**摘要:**基于 Aspen Plus 以 300 MW 亚临界机组为对象, 建立了厂级尺度的全流程模拟, 提出了 3 种不同热源的脱硫废水零排放技术: 高温烟气旁路+干燥塔结晶技术、低温烟气为热源的三效蒸发技术和低压蒸气为热源的三效蒸发技术。结果表明, 2 种三效蒸发干燥方式的单位耗热量最低, 为 0.017 kJ/t, 不到高温烟气旁路干燥方式的 1/2, 节能效果良好。其中, 三效烟气取热干燥方式利用的是烟气废热, 不损失发电量, 对主机的影响最小, 得到的锅炉效率和机组效率最高, 分别为 85.59% 和 32.25%, 在降低能源成本和减少环境污染方面具有更大的优势。相关研究可为燃煤机组脱硫废水零排放提供借鉴。

**关键词:**燃煤电厂; 脱硫废水; 零排放; 三效蒸发; 烟气废热; 能耗

中图分类号: TK223

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)08-0240-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.042

## Analysis on zero discharge technology for desulfurization wastewater from coal-fired power plants

YANG Wen-yi<sup>1\*</sup>, YOU Chang-fu<sup>1,2,3</sup>, WANG Hai-ming<sup>1,2</sup>

(1. Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University, Taiyuan 030032, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** Aspen Plus software is employed to establish a plant-scale full process simulation for a 300 MW sub-critical unit, and three kinds of desulfurization wastewater zero discharge technologies with different heat sources are proposed, including high temperature bypass flue gas+drying tower crystallization technology, low-temperature flue gas driven triple-effect evaporation technology and low pressure steam driven triple-effect evaporation technology. Results show that the per unit heat consumption of two triple-effect evaporation technologies is lower, which is 0.017 kJ/t, less than 1/2 of the high temperature bypass flue gas+drying tower crystallization technology. Among them, the low-temperature flue gas driven triple-effect evaporation technology utilizes residual heat from flue gas, which has no impact on power generation and less impact on main generator, and obtains the highest boiler efficiency and unit efficiency, respectively 85.59% and 32.25%, so it has greater advantages in reducing energy cost and environmental pollution. The relevant research can provide reference for zero discharge of desulfurization wastewater from coal-fired plants.

**Key words:** coal-fired power plant; desulfurization wastewater; zero discharge; triple-effect evaporation; residual heat in flue gas; energy consumption

石灰石-石膏湿法脱硫技术是目前世界上最成熟、应用最广泛的烟气脱硫技术, 我国约有 92% 的燃煤机组配备该脱硫技术<sup>[1]</sup>, 但该系统会排放大量脱硫废水。废水中含有的杂质主要包括悬浮物、氯化物、过饱和的亚硫酸盐、硫酸盐以及重金属等, 处理难度极大<sup>[2-3]</sup>。传统的脱硫废水处理技术为三联箱化学沉淀法<sup>[4]</sup>, 即将脱硫废水依次通过沉淀、中和和氧化 3 个处理单元, 去除其中杂质。部分电厂利用回水进行干灰调湿和灰场喷洒<sup>[5]</sup>, 但使用量远不及产生量, 脱硫废水难以完全消化利用。

2015 年国家出台《水污染防治行动计划》<sup>[6]</sup>, 2017 年出台《火电厂污染防治可行性技术指南》<sup>[7]</sup> 都要求火电厂实现废水零排放。想要实现脱硫废水零排放, 需要在原有的三联箱技术基础上, 进一步进行废水的浓缩减量和结晶固化<sup>[8-11]</sup>, 浓缩固化需要大量热源, 这使得脱硫废水的零排放技术成为高能耗单元。

火电厂中干燥热源可以来自烟气或蒸气, 这需要综合考量整个电厂间各个子模块系统, 实现水-能耦合是废水零排放和深度节能、节水的前提基础。目前, 关于脱硫废水零排放的研究主要集中于试验

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 山西省重点研发计划资助项目(202102090301023)

作者简介: 杨文毅(1993-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为热电系统模拟, 通讯联系人, yangwy@sice-Tsinghua.org。

测试<sup>[12-13]</sup>和单一废水处理系统的计算<sup>[14-17]</sup>,缺乏电厂范围内综合系统的理论研究。本文中针对3种不同热源的脱硫废水零排放技术进行厂级尺度的全流程模拟,在相同的干燥效果下,比较不同技术方式的工艺指标和能耗情况,为合理选择脱硫废水干燥技术提供依据。

## 1 Aspen 电厂建模

### 1.1 厂级综合系统

本项目以国产 HG 1021/18.2-540/540-WM10 亚临界中间再热自然循环汽包炉以及国产 N300-16.7/538/538 汽轮机机组为参考进行流程分析。全部流程可分为锅炉系统、汽轮机系统、脱硫系统以及脱硫废水处理系统。流程如图 1 所示,其中锅炉为自然循环汽包炉,汽轮机为凝汽式汽轮机,机组额定工况发电功率为 300 MW。烟气净化系统主要考虑了脱硝系统、静电除尘和湿法脱硫系统,由于本研究重点关注烟气热量的沿程变化,而不关注净化系统自身运行细节,因此脱硝和静电除尘系统采用分离器和换热模块,分别设置污染物分离效率与热损失。而脱硫部分为重点,脱硫方法采用石灰石烟气湿法脱硫,脱硫废水处理系统为本研究的中心。本

文中对比了高温烟气旁路+干燥结晶技术、低温烟气为热源的三效蒸发技术、低压蒸气为热源的三效蒸发技术,考察不同热源作为浓缩蒸发热源的能耗及工艺适应性。为了简易流程,模拟部分未考虑节流损失、管道损失、压降等损失部分,所以锅炉出口主蒸气温度、压力与汽轮机进口主蒸气温度、压力相同,均为 538℃,16.7 MPa。物性方法选用 Peng-Rob,收敛方法采用 Broyden 建立模型。模型假设整个系统在运行时不考虑热损失及物料损失,且处于完全稳态运行工况。

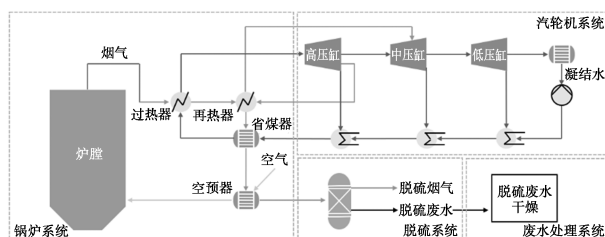


图 1 燃煤机组厂级尺度综合系统模型

### 1.2 子系统模型

基于 Aspen Plus 建立了燃煤电厂全流程模型,如图 2 所示。该模型主要包含锅炉子系统、汽轮机子系统以及脱硫子系统 3 个模块。

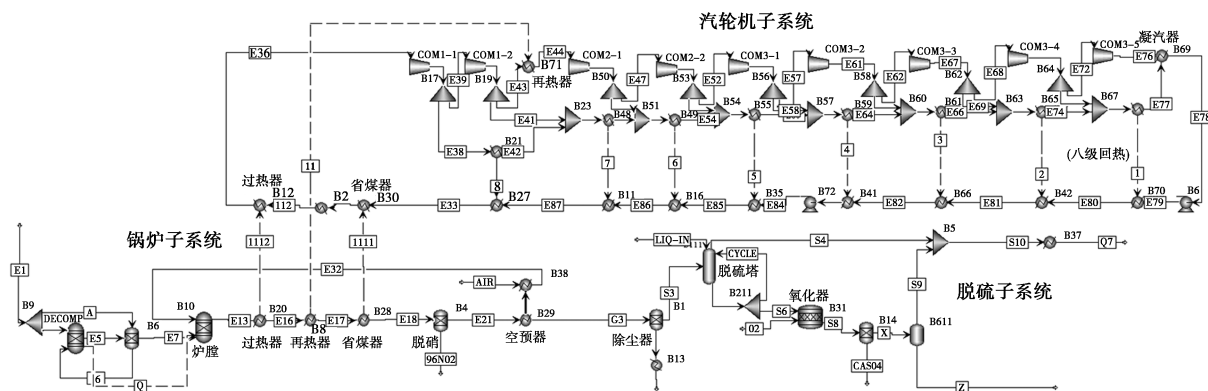


图 2 燃煤电厂全过程模拟流程

#### 1.2.1 锅炉系统

本文将锅炉系统分为蒸气及烟气 2 部分:蒸气部分包括省煤器、水冷壁、过热器、再热器;烟气部分包括燃烧器、炉膛、空气预热器。为了简化流程,本模型未涉及煤粉的干燥以及破碎过程。流程中,定义了 2 种非常规组分煤和灰分,并且需要对其选择合适的物性模型,进入 NC-props,焓模型选择 HCOALGEN,密度模型选择 DCOALIGT。由于 Aspen Plus 不允许非常规的流股直接参与化学反应,所以非常规的煤粉流股首先进入 RYield 模块,裂解分离

为碳、氢、氧、氮、硫等单质,随后这些单质和该模块产生的裂解热  $Q$  一起传递至炉膛 R Gibbs 模块,与空气预热器加热后的空气燃烧,产生的烟气依次经过过热器、再热器、省煤器、空气预热器与给水、冷空气换热后,进入烟气除尘器 Sep 模块,分离粉尘。锅炉煤粉燃烧所需的空气经过空气预热器加热后进入炉膛与煤粉燃烧。

#### 1.2.2 汽轮机系统

本模型的汽轮机是采用双缸双排汽的单轴汽轮机。为了提高机组的热效率,汽轮机采用了回热的

方法,即高压缸的排汽不直接进入中压缸继续膨胀工作,而是将蒸气送入再热器进行加热,使温度再次达到主蒸气的温度,然后返回中压缸做功。本模型汽轮机共有 2 台高压缸,2 台中压缸,5 台低压缸;回热系统共有 4 台高压加热器,4 台低压加热器。用 Compr 模块模拟气缸,Heater 模块模拟加热器。

主蒸气首先进入高压缸做功,然后利用 Fsplit 模块实现蒸气的分流,做功后的蒸气一部分进入下一级膨胀机做功,余下部分被送入加热器,加热凝汽器冷凝后的给水,即抽汽回热,以提升循环热效率。每一级加热器的疏水逐级自流至下一级加热器。最后一级加热器做功后的乏汽进入凝汽器 Heater 模块进行冷凝,随后依次进入 4 个低压加热器和 4 个高压加热器与抽汽换热,随后进入锅炉系统。模型不考虑整个汽轮机系统的压降。

### 1.2.3 脱硫系统

本模型采用的脱硫方法为石灰石-石膏烟气湿法脱硫,即在脱硫塔 RadFrac 模块中,利用石灰石  $\text{CaCO}_3$  吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ ,反应产生的  $\text{CaSO}_3$  随即进入氧化室 RStioc 模块进行氧化生成石膏  $\text{CaSO}_4$ ,随后被 Sep 模块分离收集。被净化的烟气则从吸收塔顶部离开脱硫系统。脱硫系统的总反应如式(1)所示。



### 1.3 模型验证

为验证模型的可靠性,将参考的锅炉及汽轮机的参数输入系统后,将汽轮机的功率与机组功率(300 MW)进行对比。各级气缸做功如表 1 所示。模拟结果显示,汽轮机系统总做功量为 298.51 MW,相对误差仅为 0.49%,表明模型具有一定的可靠性。

表 1 模拟系统汽轮机输出功率结果

汽轮机系统 对应反应器	功率/MW	汽轮机系统 对应反应器	功率/MW
高压缸		低压缸	
COMP1-1	63.32	COMP3-1	8.77
COMP1-2	26.49	COMP3-2	10.58
中压缸		COMP3-3	22.70
COMP2-1	59.67	COMP3-4	17.65
COMP2-2	29.48	COMP3-5	59.83
		合计	298.51

## 2 脱硫废水技术方案及结果分析

本文中对比了 3 种不同方式的脱硫废水干燥方

法,3 种技术路线见图 3。

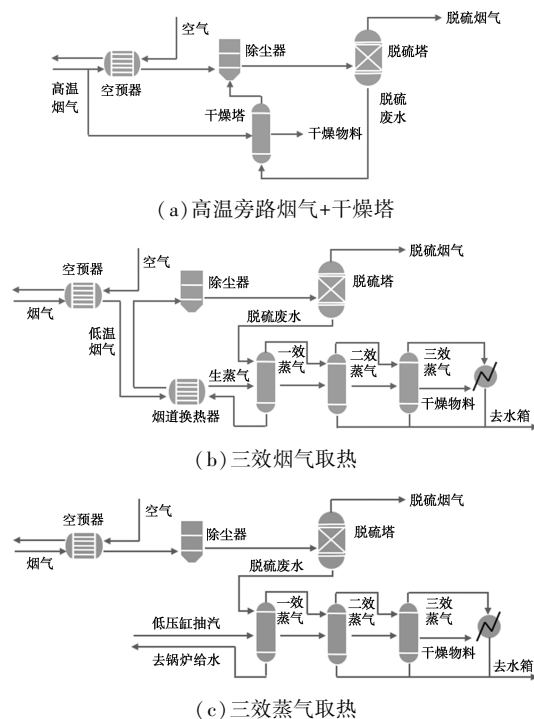


图 3 3 种脱硫废水干燥技术路线

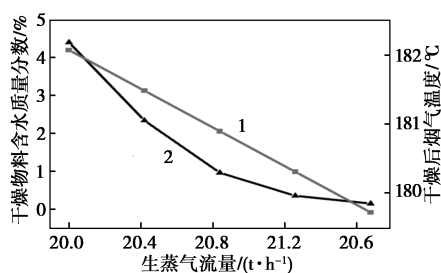
### 2.1 高温烟气旁路+干燥塔结晶技术

高温烟气旁路干燥方法是在空预器前旁路取出高温烟气,通入干燥塔,高温烟气与喷淋的脱硫废水接触换热,将废水蒸发干燥。干燥后的烟气携带着蒸发的水分,进入除尘和脱硫塔。脱硫废水的干燥效果由旁路出的高温烟气体量决定。本文中,当旁路取出 28.5% 的高温烟气时,干燥塔出口的干燥物料含水率可达质量分数 2%,同时这部分高温烟气的温度由 370℃ 降到 130℃。

### 2.2 低温烟气为热源的三效蒸发技术

三效蒸发中,每效由换热室和分离室构成,外供生蒸气由首效加入,在加热室内脱硫废水与生蒸气换热,分离室则实现废水闪蒸过程。前效的二次蒸气作为后效的热源,末效产生的二次蒸气则被冷凝器冷凝,形成洁净的凝结水。本研究采用闪蒸罐 Flash 模块完成换热和分离。在尾部利用真空泵在闪蒸罐内形成逐级降低的负压,二次蒸气就可以自动进入下一效换热室。三效蒸发系统回收的负压冷凝水,经低温烟气加热后,可获得 90~97℃ 的饱和蒸气,即生蒸气,为首效蒸发器供热。生蒸气的用量决定了三效蒸发器的干燥效果,干燥后物料的含水率和烟气温度随生蒸气的变化情况如图 4。

随着生蒸气用量的增加,从低温烟气中取出的热量也增加,导致从干燥系统出来的烟气温度不断



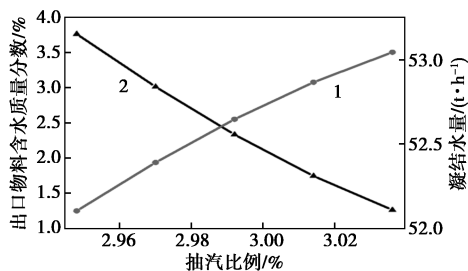
1—干燥后烟气温度;2—干燥物料含水质量分数

图4 生蒸气用量对出口物料含水质量分数和干燥烟温的影响

下降。同时,干燥物料的含水率不断降低,物料干燥得越彻底。当干燥物料含水率为质量分数2%时,回收凝结水量52.64 t/h,生蒸气用量为20.42 t/h,单位蒸气消耗量(蒸发1 kg水所需的生蒸气)为0.39,与文献[18]记载值0.4相近,说明计算结果合理。此时出口烟温为181℃,较干燥前下降29℃。

### 2.3 低压蒸气为热源的三效蒸发技术

三效蒸气取热干燥方式利用电厂最后一级低压缸抽汽(温度179℃,压力80 kPa)作为生蒸气给首效供热,换热后的蒸气变成液态水回到锅炉给水泵,作为锅炉给水被再次加热。同样,低压缸抽气量决定了三效蒸发器的干燥效果,干燥后物料的含水率和烟气温度随抽气比例的变化情况如图5。



1—凝结水量;2—物料含水质量分数

图5 抽汽比例对出口物料含水质量分数和凝结水量的影响

当低压蒸气抽汽比例增加,取热量增加,干燥物料的含水率降低,凝结水量增加。当抽汽比例为摩尔分数2.99%时,物料含水率达到质量分数2%,此时抽汽量为19.23 t/h,凝结水量为52.65 t/h,单位蒸气消耗量为0.37。

### 2.4 评价指标与模拟结果对比

#### 2.4.1 能耗

3种方式分别采用了3种不同的热源,高温烟气旁路干燥方式利用空预器前的高温烟气(370℃),干燥后的尾气返回静电除尘;三效烟气取

热干燥方式利用空预器后的低温烟气(210℃)作为驱动热源加热负压冷凝水,生成95℃的负压蒸气作为首效热源;三效蒸气取热干燥方式利用电厂最后一级低压缸抽汽(179℃)作为生蒸气给首效供热。能耗方面对比了3种干燥方式的热量消耗、干燥单位热耗和电量消耗,具体结果见表2。其中,干燥单位热耗为每干燥1 t水需要的热量,电量消耗主要为干燥系统中的水泵及真空泵等设备用电。

表2 3种方案能耗对比

干燥方式	热源	消耗热量/ kW	干燥单位热耗/ (kJ·t <sup>-1</sup> )	电耗/ kW
高温烟气旁路	高温烟气	32471	0.16	2.72
三效烟气取热	低温烟气	13351	0.07	4.69
三效蒸气取热	低压抽汽	13353	0.07	4.69

三效干燥可以利用更少的热量达到相同的干燥效果,采用多次加热和冷凝的方式,充分利用热能,取热量不到高温烟气旁路干燥方式的一半,因此节能效果显著。高温烟气旁路干燥方式会用到抽水泵,三效蒸发方式会额外用到尾气真空泵,耗电量较少,对系统能耗的影响基本可以忽略。

#### 2.4.2 效率

本文中通过 Aspen 模型来计算锅炉的反效率<sup>[19-20]</sup>以及机组效率。锅炉的反效率计算公式见式(2)。

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \% \quad (2)$$

其中, $\eta$ 为锅炉反效率; $q_2$ 为排烟热损失,通过一个 HEATER 模块计算烟气由排烟温度到环境温度(12℃)的焓变; $q_3$ 为可燃气体未完全燃烧热损失,指尾部烟气中的 CO 和少量 H<sub>2</sub> 的热值; $q_4$ 为固体未完全燃烧热损失,Aspen 模型自身假设煤是完全燃烧的,故最末端的空气预热器换热之后的排烟温度将大于实际排烟温度,可认为这部分排烟的剩余热量即为煤的未完全燃烧热,一般燃煤电厂内进入吸收塔前的烟气温度为120~140℃<sup>[21]</sup>。

本文中将空预器后的除尘器设置基础温度为130℃,充当此处计算固体不完全燃烧损失的换热器<sup>[22]</sup>; $q_5$ 为散热损失,标准式<sup>[23]</sup>用蒸发量来确定散热量,见式(3)。

$$q_5 = 5.82(D_{ed})^{-0.38} \quad (3)$$

其中  $D_{ed}$  为额定蒸发量, t/h; 本文中蒸发量为 1 021 t/h, 计算得到  $q_5$  为 0.42%;  $q_6$  为灰渣物理热损失, 用另一个 HEATER 模块来计算灰分从排渣温度降

至环境温度 (12℃) 过程的焓变。不同干燥方法的锅炉效率计算结果见表 3。

机组效率的计算见式(4):

$$\eta_{cp} = 3600P/BQ_{net} \quad (4)$$

式中,  $\eta_{cp}$  为机组效率, %;  $P$  为发电功率, MW;  $B$  为锅炉煤耗量, t/h;  $Q_{net}$  为煤的热值, 以标煤计, 取 29 307.6 kJ/kg。

表 3 3 种干燥方案效率对比

项目	不干燥	高温烟气 旁路	三效 烟气	三效 蒸气
排烟热 $q_2$ /%	11.35	11.16	11.35	11.35
可燃气体未完全燃烧热 $q_3$ /%	0.002	0.006	0.008	0.008
固体不完全燃烧热 $q_4$ /%	4.02	2.88	2.58	4.02
散热 $q_5$ /%	0.42	0.42	0.42	0.42
灰渣热 $q_6$ /%	0.051	0.051	0.051	0.051
锅炉效率 $\eta$ /%	84.15	85.48	85.59	84.15
机组效率 $\eta_{cp}$ /%	32.25	30.56	32.25	32.18
发电功率/MW	298.51	282.83	298.51	297.82
物料含水质量分数/%	2	2	2	2
烟气 SO <sub>2</sub> 含量/(mg·m <sup>-3</sup> )	1.48	1.52	1.48	1.48

为了对比不同方案在效率和发电量方面的表现, 制定了统一的干燥标准, 即干燥物料出口含水率质量分数 2%, 并和 2.3 节中不做干燥处理的案例做对比。高温烟气旁路干燥消耗的热量最多, 由于高温热源的消耗, 使得进入空预器的烟气减少, 预热空气温度降低, 影响蒸气品质和最终发电量, 其机组效率、发电功率最低。锅炉效率方面, 高温烟气旁路干燥从烟气中取出的热量最高, 导致排烟热损失  $q_2$  最低, 而固体不完全燃烧热损失  $q_4$  本质上是计算除尘器出口烟气损失的热量, 烟气被取热利用后, 这部分热损失较蒸气取热方式更低, 综合来看, 高温烟气旁路干燥的锅炉效率稍低于三效烟气干燥, 大于三效蒸气干燥。

三效烟气取热利用烟气的低温废热干燥物料, 不损失机组的发电功率, 机组效率不受影响, 而锅炉效率方面, 由于提高了烟气利用率, 锅炉效率还高于无干燥的案例。三效蒸气取热会损失一定的发电功率, 锅炉效率和机组效率较烟气取热稍有下降。

根据国家火电厂大气污染排放标准<sup>[24]</sup>, SO<sub>2</sub> 排放限值为 35 mg/m<sup>3</sup>, 上述案例均满足排放标准。

#### 2.4.3 凝结水量

三效蒸发器冷凝水可采用连续出水的方式, 回

收至回用水池, 凝结水主要指标达到循环冷却水水质指标, 可作为脱硫工艺补充水以及生蒸气饱和水使用。旁路干燥方法中, 水分进入烟气, 随喷雾干燥塔干燥后的尾气返回静电除尘, 最终富集在脱硫浆液中, 增加脱硫塔的补充水, 提高脱硫效率, 但可能导致脱硫废水量不断增大。3 种干燥方式的凝结水量见表 4。

表 4 3 种方案凝结水对比

干燥方式	回收水量/ (t·h <sup>-1</sup> )	利用方式	废水含水量/ (t·h <sup>-1</sup> )	回收率/ %
高温烟气旁路	54.79	被动富集	55.67	98.4
三效烟气取热	52.64	水池回收	53.52	98.4
三效蒸气取热	52.65	水池回收	53.52	98.4

### 3 结论

针对典型的 300 MW 燃煤机组, 基于成熟的 Aspen Plus 流程模拟软件开展建模工作, 构建了包括电厂锅炉系统、汽机系统、脱硫系统和脱硫废水处理系统在内的厂级尺度流程模型。基于此虚拟电厂, 建立了脱硫废水系统和机组给热系统综合的水-热耦合模型, 对高温烟气旁路+干燥塔结晶技术、低温烟气为热源的三效蒸发技术和低压蒸气为热源的三效蒸发技术 3 种干燥技术进行了相关评价。

在相同的干燥效果下, 三效蒸发干燥方式的单位耗热量低, 不到高温烟气旁路干燥方式的一半, 节能效果良好。高温烟气旁路干燥方式和三效蒸气取热干燥方式分别损失 5.3% 和 0.23% 的发电量, 而三效烟气取热干燥方式利用的是烟气的废热, 不影响发电量。用反平衡法计算的锅炉效率中, 三效烟气取热干燥方式的效率最高, 由于高温烟气旁路干燥方式利用了烟气热量, 其锅炉效率较三效蒸气取热干燥方式更高。三效蒸发干燥方式可以回收到洁净的凝结水, 利用方式更加灵活。从能源品味、节能效果、循环水利用方式等方面综合来看, 三效烟气取热干燥方式充分利用烟气废热, 实现低品位热量的回收, 提高锅炉效率, 在降低能源成本和减少环境污染方面具有更大的优势。

#### 参考文献

- [1] Feng C, Gao X, Tang Y, et al. Comparative life cycle environmental assessment of flue gas desulphurization technologies in China[J].

- Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 81–92.
- [2] 韩飞超,汪旭,张荣,等.石灰石—石膏湿法烟气脱硫废水处理工艺的优化改造[J].中国给水排水, 2016, 32(14): 99–102.
- [3] Meng S C, Cao J, Chen G D, *et al.* Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1143–1151.
- [4] 霍飞羽.电厂脱硫废水回用及零排放技术研究进展[J].现代化工, 2024, 44(9): 64–68.
- [5] 韦飞,刘景龙,王特,等.燃煤电厂脱硫废水零排放技术探究[J].水处理技术, 2017, 43(6): 34–36.
- [6] 中华人民共和国国务院.水污染防治行动计划: 国发[2015]17号[A]. 2015.
- [7] 中华人民共和国环境保护部. HJ 2301—2017 火电厂污染防治可行技术指南[S].北京: 中国环境出版社, 2017.
- [8] 安雪峰,刘广建,陈海平.燃煤电厂脱硫废水热法零排放系统设计及分析[J].洁净煤技术, 2022, 28(6): 175–183.
- [9] 陈程,陈鑫,徐凤,等.燃煤机组脱硫废水零排放物料—能—水耦合机制及优化[J].化工学报, 2021, 72(11): 5800–5809.
- [10] 段守保,韩平,刘彩霞.多效蒸发工艺处理火电厂脱硫废水的影响研究[J].东北电力技术, 2023, 44(3): 40–44.
- [11] 麻晓越,梁秀广.基于余热利用的脱硫废水浓缩减量技术研究[J].现代化工, 2023, 43(S1): 76–80.
- [12] 刘敏,刘平元,赵亮.燃煤机组脱硫废水多效蒸发浓缩工艺的模式建立及模拟[J].发电设备, 2020, 34(3): 179–183.
- [13] 刘锋瑞.脱硫废水低温高效蒸发浓缩技术研究[D].太原: 山西大学, 2023.
- [14] 王仁雷,王丰吉,戴瑜,等.300 MW 机组脱硫废水旁路蒸发干燥系统性能试验研究[J].工业用水与废水, 2021, 52(3): 23–26.
- [15] 吴伟.脱硫废水喷雾干燥在电厂的实际应用[J].上海节能, 2021, (9): 1033–1037.
- [16] 冉初萌.烟气余热蒸发浓缩干燥技术在电厂脱硫废水零排放中的应用[J].机电信息, 2020, (35): 75–77.
- [17] 侯致福,魏晓仪,邢树涛,等.300 MW 机组低温余热闪蒸脱硫废水零排放技术应用研究[J].华电技术, 2020, 42(3): 31–36.
- [18] 谭天恩,窦梅,等.化工原理(上册)[M]. 4版.北京: 化学工业出版社, 2013.
- [19] 陈宝明.660 MW 循环流化床燃煤电站热力系统优化及提效研究[D].南京: 东南大学, 2020.
- [20] 江成林.循环流化床锅炉建模及效率计算[D].天津: 天津大学, 2016.
- [21] 刘岗,黄玉妹,沈洪洪,等.低温省煤器联合暖风器在 630 MW 超临界机组锅炉烟气余热利用系统中的应用[J].上海电力学院学报, 2019, 35(4): 373–378.
- [22] 江成林,李士雨.基于 Aspen Plus 的循环流化床锅炉效率的计算[J].计算机与应用化学, 2015, 32(9): 1109–1112.
- [23] 樊泉贵,阎维平,闫顺林,等.锅炉原理[M]. 2版.北京: 中国电力出版社, 2013.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准[S].北京: 中国环境科学出版社, 2012. ■

## (上接第 239 页)

- [6] Li G, Liu Z, Liu F, *et al.* Thermodynamic analysis and techno-economic assessment of synthetic natural gas production via ash agglomerating fluidized bed gasification using coal as fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(51): 27359–27368.
- [7] Zhang Z, Delcroix B, Rezazgui O, *et al.* Simulation and techno-economic assessment of bio-methanol production from pine biomass, biochar and pyrolysis oil[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 44: 101002.
- [8] 雷昕儒.煤气化合成气调制制备甲醇的过程模拟、技术经济分析和生命周期评价[D].合肥: 安徽大学, 2020.
- [9] Gao R, Zhang C, Lee Y J, *et al.* Sustainable production of methanol using landfill gas via carbon dioxide reforming and hydrogenation: Process development and techno-economic analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122552.
- [10] Hamelinck C N, Faaij A P C, den Uil H, *et al.* Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimisation, and development potential[J]. Energy, 2004, 29(11): 1743–1771.
- [11] 李贵贤,曹阿波,孟文亮,等.耦合 SOEC 的 CO<sub>2</sub> 制甲醇过程设计与评价研究[J/OL]. 化工学报, [2025–06–09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1946.TQ.20230718.1214.002.html>.
- [12] Ou X, Yan X, Zhang X. Using coal for transportation in China: Life cycle GHG of coal-based fuel and electric vehicle, and policy implications[J]. Int J Greenh Gas Con, 2010, 4: 878–887.
- [13] Wang S, Li C, Hu Y, *et al.* Assessing the prospect of bio-methanol fuel in China from a life cycle perspective[J]. Fuel, 2024, 358: 130255.
- [14] Ji J, Zhang H, Peng D, *et al.* Estimation of typical agricultural machinery emissions in China: Real-world emission factors and inventories[J]. Chemosphere, 2022, 307: 136052.
- [15] Huang X, Cheng L, Chien H, *et al.* Sustainability of returning wheat straw to field in Hebei, Shandong and Jiangsu provinces: A contingent valuation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 1290–1298.
- [16] Poluzzi A, Guandalini G, Guffanti S, *et al.* Flexible power & biomass-to-methanol plants: Design optimization and economic viability of the electrolysis integration[J]. Fuel, 2022, 310: 122113.
- [17] 汪志和,张明俊,杨平,等.离子液体在 CO<sub>2</sub> 捕集中的应用[J].能源化工, 2024, 45(1): 16–20.
- [18] Lacy R, Molina M, Vaca M, *et al.* Life-cycle GHG assessment of carbon capture, use and geological storage (CCUS) for linked primary energy and electricity production[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 42: 165–174.
- [19] 罗仁英.煤制氢气生命周期碳足迹研究[D].北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [20] 轩昂,刘骏,彭维珂,等.面向煤制氢电厂 CCUS 改造的规划方法及碳足迹评估[J/OL]. 中国电机工程学报, [2025–06–09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240492>. ■