

# 燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线研究

郜瑞莹, 林建中

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 系统分析及介绍了脱硫废水的水质特点、目前应用及研发的主要工艺路线, 对三种成熟或有前景的工艺—反渗透浓缩及结晶工艺、旁路烟气余热蒸发结晶技术和旁路烟气余热蒸发浓缩技术进行了技术经济对比, 研究表明: 旁路烟气余热蒸发浓缩技术具有不需预处理、投资运行成本低, 设备占地小, 运行维护工作量小、产生污泥量少等优点, 综合环保效益好, 因此具有广泛的推广应用价值。

**关键词:** 脱硫废水; 零排放; 反渗透; 正渗透; 蒸发; 直接烟道蒸发; 旁路烟气余热蒸发结晶; 旁路烟气余热蒸发浓缩

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)01-0107-06

## Research on Zero Liquid Discharge FGD Wastewater Treatment Technology in Coal-fired Power Plant

GAO Ruiying, LIN Jianzhong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Flue gas desulfurization (FGD) with high content of salinity and heavy metals is the most critical pollutant of concern in power plant, this paper introduced its characteristics and the main technologies that used in nowadays. Among all of these technologies, reverse osmosis treatment, bypass flue gas evaporation technology with crystallizer and bypass flue gas evaporation technology with concentrator are the three promising technologies. By mean of comparing their technical performances and costs, bypass flue gas evaporation technology with concentrator is the most promising technology because of its lower investment and operating costs, smaller footprint and more environmental friendly.

**Key words:** desulfurization wastewater; zero liquid discharge; reverse osmosis; forward osmosis; distillation; directly flue gas evaporation; bypass flue gas evaporation with crystallizer; bypass flue gas evaporation with concentrator

我国的能源结构中, 煤炭约占 3/4 的份额, 燃煤火电占全年总发电量的 74.1%<sup>[1]</sup>。火电厂煤等化石燃料的大量燃烧造成了严重的环境问题, 为了缓解环境污染, 国家出台了严格的大气污染排放标准, 需要对烟气进行脱硫处理。

石灰石-石膏湿法烟气脱硫作为目前世界上技术最成熟、应用最广泛的一种脱硫技术, 可以脱除烟气中约 98%~99.5% 的二氧化硫, 从而缓解酸雨

等危害。

在湿法烟气脱硫过程中, 除了二氧化硫被吸收及去除之外, 烟气中多种痕量物质(比如  $Cl^-$ 、重金属等)也被吸收及转移到脱硫系统中, 经过脱硫系统的不断循环浓缩, 各种物质不断富集。为了防止高度浓缩的离子对系统设备、管道的腐蚀, 特别是氯离子的腐蚀, 同时还会影响系统的脱硫效率, 必须外排部分废水。此部分废水即为脱硫废水。

脱硫废水为湿法烟气脱硫过程中产生的废水, 其具有成分复杂、污染物含量高、腐蚀性强等特点。在燃煤电厂中的回用途径非常有限, 目前已成为制约燃煤电厂废水零排放的瓶颈。

为了挖掘出目前最具应用前景的脱硫废水零排放技术,本文系统分析了脱硫废水的水质特点、回用途径、目前应用及研发的主要工艺路线,并针对几种有应用前景的工艺进行了分析及技术经济对比。

## 1 脱硫废水水质特征

烟气脱硫过程中产生的脱硫废水,影响水质的因素众多,主要包括煤质、脱硫剂、工艺水水质、脱硫工艺、运行控制情况以及其他配套辅助系统比如是否设置电除尘器等<sup>[2]</sup>。

中国电力工程顾问集团公司调查了众多已投运电厂,并汇总了脱硫废水水质<sup>[3]</sup>,表1摘录了部分主要离子的含量。根据我院工程经验以及表中收集到的数据可以看出脱硫废水的典型特征包括:(1)水质波动范围非常大;(2)含盐量很高,特别是 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 离子含量;(3)悬浮物含量高;(4)重金属超标;(5)COD含量高。

表1 脱硫废水水质  
Tab. 1 FGD waste water quality

水质指标	单位	结果	水质指标	单位	结果
$\text{K}^+$	mg/L	73.6~199.9	$\text{NO}_3^-$	mg/L	0~38.2
$\text{Na}^+$	mg/L	29.6~658	全硅	mg/L	12.6~494.41
$\text{Ca}^{2+}$	mg/L	476.2~5 206.0	活性硅	mg/L	4.6~454.41
$\text{Mg}^{2+}$	mg/L	204.7~9 037.7	pH值	/	2.9~6.9
$\text{Sr}^{2+}$	mg/L	0.909~14.13	氨氮	mg/L	0.3~45.2
$\text{Cl}^-$	mg/L	1 127~14 524	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	mg/L	26.7~708
$\text{F}^-$	mg/L	150	$\text{BOD}_5$	mg/L	15.4~315
$\text{SO}_4^{2-}$	mg/L	1 142~25 380	溶固	mg/L	4 765~59 185
$\text{HCO}_3^-$	mmol/L	0~3.531	悬浮物	mg/L	172~79 892
$\text{CO}_3^{2-}$	mg/L	0	电导率	$\mu\text{S}/\text{cm}$	6 500~57 200
总汞	mg/L	0.000 3~0.36	总镍	mg/L	0.071~1.45
总镉	mg/L	0.005~1.83	硫化物	mg/L	0.020~2.89
总铬	mg/L	0.001~0.60	氟化物	mg/L	4.8~109
总砷	mg/L	0.001 8~0.15	总铜	mg/L	0.009~0.20
总铅	mg/L	0.005~0.35	总锌	mg/L	0.086~2.86

## 2 脱硫废水回用途径

脱硫废水复杂的水质特点,决定了其回用途径极其有限,可能的回用途径主要包括:

### 1) 冲灰系统

当电厂采用水力除灰工艺时,脱硫废水可以不经处理直接作为冲灰用水。但目前新建电厂基本都采用干除灰工艺,因此脱硫废水无法回用至电厂的冲灰系统。

### 2) 干灰调湿

干灰调湿后在其热值符合下游接收单位重复利用要求的前提下,可作为水泥和烧结砖、轻型建筑砌块等建筑材料的加工原料。

因此,采用脱硫废水将一部分干灰调湿可作为消纳脱硫废水的一种备选途径,但会损失部分干灰销售的经济效益。

### 3) 湿除渣系统

目前业界主要担心脱硫废水对捞渣机的腐蚀和含盐湿渣回收利用问题。虽然根据我们试验研究以及对几个正在运行的脱硫废水回用湿渣系统的电厂(包括广东华夏阳西电厂、河南新密二期、广州华润南沙热电厂)的调研结果,表明捞渣机并不会发生明显腐蚀。但此结果还需进一步实际检验。目前多数业主还对此有所担忧。

### 4) 煤场喷洒

由于煤场喷淋用水不稳定,另外可能会引起部分物质的富集,因此此途径也不是消耗脱硫废水的很好方法。

以上为电厂中脱硫废水的回用途径,可以看出这些途径不能保证脱硫废水的完全回用不外排。因此,为了实现电厂的零排放,脱硫废水目前一般考虑设置浓缩结晶或烟气余热利用系统,确保脱硫废水中的污染物以固态形式排出,实现废水真正意义的零排放。

## 3 脱硫废水零排放处理工艺概况

目前行业内对脱硫废水处理方案的探讨非常活跃,各种工艺路线百花齐放,但由于脱硫废水的复杂性以及各电厂各自特点的不同,目前为止还没有哪种工艺路线确定占主导地位。归结起来,脱硫废水零排放有两种处理思路—浓缩减量技术和烟道蒸发技术。

### 3.1 浓缩减量技术

浓缩减量技术的思路在于通过某种浓缩工艺对脱硫废水进行浓缩,以减少脱硫废水的量,最后少量的浓缩水进入结晶系统进行结晶。其中浓缩工艺

主要包括反渗透、正渗透、纳滤、蒸馏等工艺;

浓缩减量、结晶工艺一般流程为:脱硫废水→预处理→浓缩工艺→浓水→结晶器,产水回用于脱硫工艺用水,污染物以固体盐形式结晶出来。

### 3.1.1 预处理工艺

通常,为了确保后续浓缩系统的正常运行,预处理工艺采用两级全软化工艺。预处理过程中通过投加石灰、碳酸钠、TMT15、混凝剂和助凝剂等来去除水中的悬浮物、重金属及钙镁。确保处理后出水硬度基本为0。全软化工艺的优点在于出水钙镁含量非常低,后续膜或者蒸馏系统的结垢倾向非常低;缺点是对于钙和镁含量高的脱硫废水来说,加药成本惊人,以钙为1.7 g/L,镁为5 g/L计,脱硫废水单纯加药的成本在65元/吨水,非常惊人。

### 3.1.2 浓缩处理、结晶工艺

浓缩处理的目的是通过分离工艺,将废水分离为浓水和淡水。淡水含盐量低,水质较好,对其进行回收。浓水水量减少,进入后续结晶系统进行进一步结晶处理。

目前浓缩处理方法常用的有蒸馏法和膜法工艺,蒸馏法工艺主要包括MVR、MED等工艺,膜法工艺主要包括反渗透法、纳滤法和正渗透法。

#### 1) 蒸馏法

蒸馏法是利用厂内蒸汽,加上蒸汽压缩机产生的二次蒸汽,在蒸馏装置内与脱硫废水进行热交换,使水分蒸发冷凝后回收,从而提高废水含盐量,达到浓缩的目的。目前,蒸馏装置有多效蒸发器、卧式喷淋蒸发器、立式降膜蒸发器等多种型式。

蒸馏法的回收率较高,能回收80%~85%的废水,预浓缩后TDS浓度可以达到20%。<sup>[4]</sup>投资大、能耗高,还需特别注意高温下的结垢和腐蚀问题。此外,蒸馏法对设备的材质要求很高,普遍采用钛材。

#### 2) 反渗透法

反渗透法是利用半透膜的原理,对废水施加克服渗透压的压力,将废水中的水分子透过膜,到达产水侧,而绝大部分杂质离子截留在浓水侧,从而达到浓缩的目的。通常为了保证反渗透的进水要求,反渗透之前可以设置管式膜过滤装置或砂滤装置等过滤设施。

目前用于脱硫废水的反渗透膜类型主要有

DTRO(叠管式反渗透膜)和STRO(网管式反渗透膜)。通常经过一级膜处理后,浓缩液TDS可以达到60~70 g/L,经过二级膜处理后,浓缩液TDS可以达到130~140 g/L。反渗透法投资小、能耗低,但回收率相对稍低,能回收70%~75%的废水。

#### 3) 正渗透法

正渗透法与反渗透的原理相反,正渗透无需施加克服渗透的压力,通过配置浓度比脱硫废水更高的汲取液,使得废水中的水分子通过膜进入到汲取液中,从而将废水进行浓缩。而进入汲取液中的水分子通过加热装置使得原有汲取液中的溶质发生蒸发后分离出来并回收。

正渗透法的回收率与蒸馏法基本相当,投资和能耗介于蒸馏法和反渗透法之间。

正渗透法需采用进口正渗透膜元件,并应通过计算选择合适的汲取液及其分离方式。

正渗透膜法系统回收率为85%~90%,正渗透前需要设置反渗透进行预浓缩,达到4%~7% TDS后再进入正渗透工艺,正渗透工艺浓缩后TDS浓度可以达到20%~25%。

目前已投运或正在执行的项目中河源电厂采用的是“两级全软化+四效蒸发MED工艺”,三水恒益电厂采用的是“两级卧式MVC+两效MED工艺”,美国多数电厂采用的是“MVR工艺”,华能长兴电厂采用的是“两级全软化+正渗透+结晶工艺”,云南曲靖电厂、湖南岳阳电厂采用的是“两级全软化+反渗透+结晶工艺”。

以上三种工艺中,根据目前市场情况,由于蒸馏法和正渗透法设备投资及运行较高,因此在技术经济方面不占优势;而反渗透法由于技术可行、投资成本较低,设备集装化程度高、安装简单等优点,市场占有率逐渐加大。

## 3.2 烟道蒸发技术

烟道蒸发技术目前常见的有三种。

### 3.2.1 直接烟道蒸发工艺

直接烟道蒸发技术,系统流程为:脱硫废水→烟道蒸发。图2为其简单的工艺流程。

脱硫废水或其浓缩液排入烟道蒸发器系统,采用雾化喷嘴将其雾化,喷入电除尘器和空预器之间的烟道蒸发器,利用烟道内的高温余热烟气将雾化后的浓水蒸发为水蒸汽,蒸气随除尘后的烟气进入

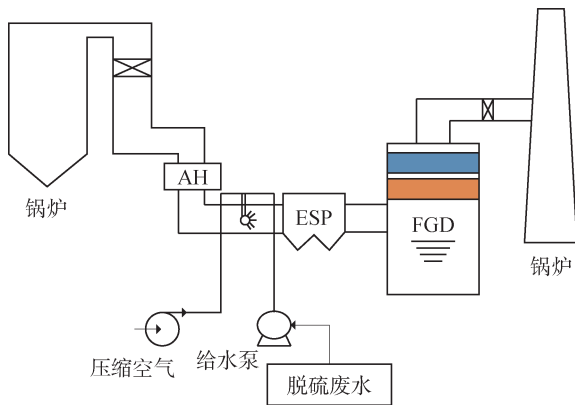


图2 直接烟道蒸发工艺流程

Fig. 2 Flow diagram of direct flue evaporation

脱硫塔，在脱硫塔的喷淋冷却作用下，水分凝结进入脱硫塔的浆液循环系统；蒸发结晶物随灰尘一起进入电除尘器随粉煤灰外排。锅炉烟气排烟温度的降低需控制在烟气酸露点以上。

该系统可以充分利用电厂外排烟气的余热热能，达到脱硫酸废水蒸发零排放的目的。

该系统的优点是：处理系统极大简化，废水处理流程短，添加药品少，设备投资少，占地面积少，操作检修简单。

缺点是：(1)为了防止对烟道及后续设备的腐蚀，锅炉烟气排烟温度需控制在烟气酸露点以上。系统不能设置低低温省煤器；(2)为保证废水的完全汽化，通常对烟道直管段长度有所要求，在目前超洁净排放配置的情况下，直管段长度通常满足不了要求；(3)直接增发的水量有限；(4)锅炉负荷波动大时，不利于直接烟道蒸发。

鉴于以上的技术特点，一般烟道直接蒸发技术较多的应用在旧机组的改造中，较少用于新建超洁净排放要求的机组。

### 3.2.2 旁路烟气余热蒸发结晶技术

旁路烟气余热蒸发结晶技术，系统流程：脱硫酸废水→预处理→旁路蒸发结晶器。图3为其简单的工艺流程。

该工艺在焦作万方电厂有应用业绩，目前运行良好<sup>[5]</sup>。

旁路烟气余热蒸发结晶技术采用旁路蒸发结晶器，直接将脱硫酸废水或其浓缩液在蒸发结晶器内利用双流体雾化喷嘴进行雾化，蒸发结晶器从空预器前端，SCR出口之间烟道引入少量烟气，利用烟气

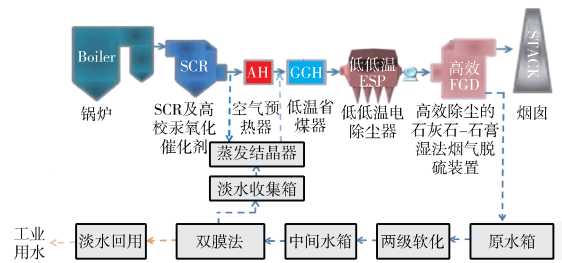


图3 旁路烟气余热蒸发结晶工艺系统流程图

Fig. 3 Flow diagram of bypass flue evaporation and crystallization

的高温使雾化后的脱硫酸废水迅速的蒸发，废水蒸发产生的水蒸气和结晶盐随烟气一起并入空预器与低低温省煤器之间烟道，结晶盐随粉煤灰一起在除尘器内被捕捕捉去除，水蒸气则进入脱硫酸系统冷凝成水，间接补充脱硫酸系统用水。

该工艺主要特点：

1)该工艺可实现脱硫酸废水的完全蒸发结晶。即使电厂处在低烟温、低负荷的运行状态下，或是烟道采用低低温省煤器工艺的情况下，整个系统也能够实现经济的、稳定的进行废水零排放。

2)蒸发结晶器虽然与电厂烟道相连接，但属于一个独立的运行机制，锅炉即使处在运行状态下，结晶器也能单独进行维护和检修；且废水在结晶器内达到完全蒸发结晶，杜绝了所有对电厂产生不良影响的可能性（包括对低低温省煤器及烟道）。

3)蒸发结晶物随着粉煤灰一起在除尘器内被捕捕捉外排。

4)水蒸气随着烟气一起进入脱硫酸系统的脱硫岛中，在喷淋冷却作用下，凝结到脱硫酸系统的循环浆液中，节约相同数量的脱硫酸工业补充水。

另外，对于该系统的两个关键问题：

1)关于喷淋水量

根据厂家的经验，2台1GW机组能消耗20m<sup>3</sup>/h的量。对于现阶段，脱硫酸废水可不经浓缩全部处理完。

2)关于预处理工艺

根据厂家的运行经验，喷淋入口一般控制在Mg<sup>2+</sup> < 3~4 g/L, Ca<sup>2+</sup> < 1 g/L, 由于钙镁等二价离子的存在，此工况下系统不会有明显腐蚀。对于脱硫酸废水来说，因为水质波动较大，为保证系统的正常运行，一般需要设置半软化预处理系统，以确保钙镁含量满足要求。

### 3.2.3 旁路烟气余热蒸发浓缩技术

旁路烟气余热蒸发浓缩技术, 系统流程: 烟气→增压风机→外置浓缩塔。简单的工艺流程如图4所示。

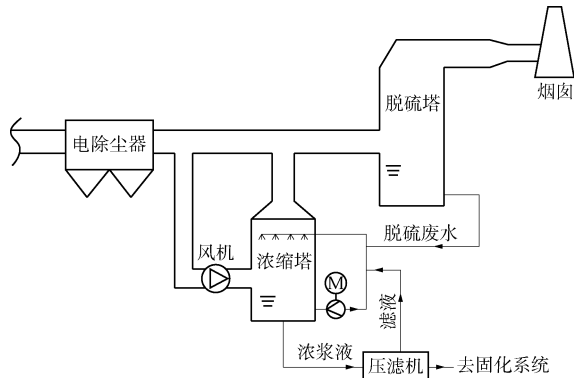


图4 旁路烟气余热蒸发浓缩工艺流程图

Fig. 4 Flow diagram of bypass flue evaporation and concentration

旁路烟气余热蒸发浓缩技术是将脱硫废水通过喷嘴喷入外置浓缩塔内, 然后跟烟气混合, 蒸汽和烟气混合气送入脱硫塔之前, 底部的渣水通过大流量循环泵不断循环浓缩, 当密度达到设定值时, 渣水排出用压滤机脱水后, 清液仍然回到系统继续循环, 泥拉到灰场堆放。

该工艺目前在国电金堂发电厂已运行1 a多, 运行状况良好。另外华电安康  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  示范项目也正在进行。

该工艺除了具有旁路烟气余热蒸发结晶技术相同的优点之外, 还有一个典型的优点, 即脱硫废水不需经任何预处理。

由于脱硫废水水质复杂, 如进行预处理, 特别是软化预处理, 需要消耗大量化学药剂, 并产生大量化学污泥, 因此运行成本及社会环保效益较差。因此, 此工艺不需预处理, 具有非常好的环保效益。

另外, 对于该系统的两个关键问题:

#### 1) 关于喷淋水量

根据厂家的经验, 理论上, 所有烟气均可用于蒸发, 脱硫废水可以全部喷完。

#### 2) 关于污泥性质

脱水污泥是否被定义为危险废物, 直接决定电厂的运行成本的高低。经厂家试验研究, 经过调质后, 根据最新的危废判定方法检测, 该系统产生的污泥不属于危险废物, 可以作为普通污泥堆放

灰场。

## 4 脱硫废水零排放处理工艺技术经济对比

根据以上分析, 针对目前超清洁排放要求的新建燃煤火力发电厂, 对于目前浓缩减量结晶工艺技术经济较优的反渗透法浓缩减量结晶工艺和可行的旁路烟气余热蒸发结晶技术和旁路烟气余热蒸发浓缩技术三种零排放工艺进行技术对比, 如表5所示。按脱硫废水量为  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , 三种零排放工艺的经济成本估算如表6所示。

表5 三种零排放工艺技术性能对比表

Tab. 5 Technical performances compare of three ZLD waste water treatment process options

对比项目	反渗透浓缩结晶	旁路烟气余热蒸发结晶技术	旁路烟气余热蒸发浓缩技术
主要设备材质及设备投资	主体设备为玻璃钢、UPVC、316L, 投资低。结晶器本体材质一般为合金或钛材。	外置结晶器材质为铸铁+耐高温涂层, 烟管材质为碳钢+耐高温涂层	外置浓缩塔材质为玻璃钢+耐高温涂层, 烟管材质为碳钢。
对配套设备的要求	预处理要求全软化, 系统复杂, 运行成本高	预处理要求半软化, 系统复杂, 运行成本中等	无需预处理
设备占地	占地面积大, 土建成本高	占地面积大, 土建成本高	占地面积小, 土建成本低。
安装工作量	模块化组装, 现场管道连接, 安装费用低	主体设备现场焊接, 烟管、蒸发器安装费用高	烟管、浓缩塔现场安装, 无预处理设备, 整体安装费用低。
维护成本	加药配药工作量巨大; 膜需定期更换; 维护成本高	加药配药工作量大; 运行控制参数调节对操作人员要求较高; 结晶器需定期清洗; 维护工作量一般	无加药配药工作量; 运行控制参数调节对操作人员要求较高; 浓缩塔需定期清洗; 维护工作量相对较小。

从表5和表6可以看出, 旁路烟气余热蒸发浓缩技术相比其他两种工艺具有不需预处理, 投资及年总运行成本、年最小运行成本低, 设备占地小, 运行维护工作量小、产生污泥量少等优点, 综合环保效益好, 是最具应用前景的一种脱硫废水零排放技术。

表6 三种零排放工艺的经济成本估算表

Tab. 6 Costs compare of three ZLD waste water treatment process options

项目	反渗透 浓缩结晶	旁路烟气余热 蒸发结晶技术	旁路烟气余热 蒸发浓缩技术
成套设备投资成本/ (万元, 含预处理)	~3 000	3 500	~3 000
运行 化学药剂消耗	65	38	0
成本/ 电耗	13.6	5.04	18
(元/m <sup>3</sup> ) 热耗	~0	75.4	75.4
维护及材料更换 成本/(元/m <sup>3</sup> )	14.3	2	1.8
单位总使用成本/ (元/m <sup>3</sup> )	92.9	120.44	95.2
年运行费用/ (万元/年)	1 021.9	1 324.84	1 047.2
污泥量/t 及 处置费/ (万元/年)	污泥量约 11 576 (65% 含水率), ~810.32	污泥量约 8 512 (65% 含水率), ~595.84	污泥量约 8 800 (50% 含水率), ~616
年运行总费用/ (万元/年)	1 832.22	1 920.68	1 663.2
年最小运行费用/ (万元/年)	1 021.9	498.44	217.8

注: (1)年运行费用指的是不算上污泥处置费用(污泥可堆至灰场),但算上热耗的费用;年运行总费用指的是算上污泥处置(污泥处置成本参考广东某电厂的700元/m<sup>3</sup>)和热耗的费用;最小年费用指的是污泥处置费用和热耗均不计的情况;(2)年运行小时数按5 500 h;(3)电费按发电单位总成本0.4元/度计算;(4)膜更换周期按3年;(5)蒸发设备维护费20万元/年;(6)烟气余热蒸发方案中热损失理论计算依据,按照热量消耗转换成耗煤量,煤价按659元/t,热量按2.1 MJ/kg,水的汽化潜热按2.402 3 MJ/kg;(7)以上数据表中,水质核算按照悬浮物10 g/L、钙1.7 g/L、镁5 g/L计;(8)运行成本与脱硫废水实际水质密切相关,上表数据作为参考;(9)由于污泥处置费用差异较大,另外,如果考虑堆放灰场则不产生费用,因此表中给出的污泥处置费用仅供参考。

## 5 结论

通过以上分析,得出如下结论:

1) 脱硫废水浓缩减量技术对比结果表明:“蒸馏法”、“正渗透法”和“反渗透法”技术上均可行,但蒸馏法和“正渗透法”在技术经济方面不占优势,“反渗透法”由于技术可行、投资成本较低,设备集装化程度高、安装简单等优点,市场占有率逐渐加大;

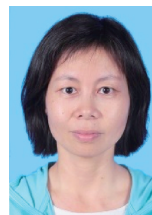
2) 综合分析现有的脱硫废水零排放处理工艺,

“反渗透浓缩结晶”、“旁路烟气余热蒸发结晶技术”和“旁路烟气余热蒸发浓缩技术”均是当前比较有应用前景的工艺,经济技术对比结果表明“旁路烟气余热蒸发浓缩技术”具有不需预处理、投资及年总运行成本、年最小运行成本低,设备占地小,运行维护工作量小、产生污泥量少等优点,综合环保效益好,是最具应用前景的一种脱硫废水零排放技术。

### 参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 2013年电力统计基本数据一览表[R]. 北京:中国电力企业联合会, 2014.
- [2] CHU P. Treatment technology summary for critical pollutants of concern in power plant wastewaters [R]. USA: EPRI, 2007.
- [3] 中国电力工程顾问集团公司. 石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理设计导则: Q/DG 1-H002—2008 [S]. 北京:中国电力工程顾问集团公司, 2008.
- [4] 乔日平, 左萌. 脱硫废水零排放处理技术在国华清远电厂项目中的应用探讨[J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 78-81.
- [5] 张净瑞. 燃煤电厂脱硫废水烟气余热蒸发零排放工程的设计与应用[J]. 电力科技与环保, 2016, 32(3): 16-20.

### 作者简介:



GAO R Y

邵瑞莹(通信作者)

1980-, 女, 河南新乡人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 清华大学环境科学与工程硕士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、海水淡化技术研究及设计工作(e-mail) gaoruiying@gedi.com.cn.



LIN J Z

林建中

1961-, 男, 广东梅州人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司院级资深专家, 教授级高工, 武汉大学电厂化学学士, 主要从事发电厂水化学控制、工业给水和污水处理、海水淡化技术研究及设计(e-mail) linjianzhong@gedi.com.cn.

(责任编辑 张春文)