

# 膜浓缩+蒸发塘处理工艺在燃气电厂 废水零排放中的应用

韩倩倩\*, 游晓宏, 朱一鸣, 沙海伟

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**在对以煤化工尾气为燃料的燃气电厂脱硫废水进行分析的基础上,对燃气电厂高盐废水零排放提出了“膜浓缩+蒸发塘”的处理工艺路线,采用双碱法软化+陶瓷超滤膜预处理及反渗透膜浓缩减量工艺,浓缩减量后废水通过蒸发塘处理。提出采用带机械雾化蒸发装置的蒸发塘作为高盐废水零排放处理末端固化工艺,并给出了蒸发塘和机械雾化蒸发装置的设计计算过程。

**关键词:**零排放;脱硫废水;膜浓缩;蒸发塘;机械雾化蒸发

**中图分类号:**X703

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2022)08-0215-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.08.042

## Application of membrane concentration+evaporation pond process in zero discharge treatment of wastewater from gas-fired power plant

HAN Qian-qian\*, YOU Xiao-hong, ZHU Yi-ming, SHA Hai-wei

(China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:**Based on the analysis on the desulfurization wastewater from gas-fired power plants fueled by coal chemical exhaust gas, a treatment process of “membrane concentration+evaporation pond” is proposed for the zero-discharge treatment of high salinity wastewater from gas-fired power plants. In which, the double alkali softening+ceramic ultrafiltration membrane pretreatment process and the reverse osmosis membrane concentration for reduction of wastewater prior of evaporation pond are employed, and the concentrated wastewater is treated by evaporation pond. The evaporation pond with mechanical atomization evaporation device is used as the terminal solidification process for zero discharge treatment of high salinity wastewater, and the design calculation process for the evaporation pond and the mechanical atomization evaporation device are given.

**Key words:** zero discharge; desulfurization wastewater; membrane concentration; evaporation pond; mechanical atomization evaporation

随着中国经济与社会的不断发展,资源性缺水、水质性缺水和水环境污染已成为制约经济与社会可持续发展的重要因素<sup>[1]</sup>。为保护水资源、加强水环境管理、加大水污染防治力度,我国近年来相继出台了《水污染防治行动计划》、《火电厂污染防治技术政策》、《火电厂污染防治可行技术指南》等文件,其中“鼓励火电厂实现废水的循环使用不外排”、“鼓励采用蒸发干燥或蒸发结晶等处理工艺,实现脱硫废水不外排”等内容对火电厂废水“零排放”提出了明确的要求。

新疆某电厂建有 2 台 200 t/h 级燃气锅炉,以煤化工尾气为燃料。锅炉配套建设有烟气脱硫设施,采用石灰石-石膏湿法脱硫,产生脱硫废水 10 t/h;此外,经厂内梯级利用后,尚有少量无法回用的工业废水,主要为厂内水处理系统反渗透浓排水、膜装置清洗废水等。由于该工程为燃气电厂,缺乏燃煤电厂中煤场喷淋、灰场喷洒、干灰调湿等末端废水消纳

途径,需要对上述 2 类高盐废水进行“零排放”处理。

## 1 废水量及水质特点

### 1.1 脱硫废水量的确定

石灰石-石膏湿法脱硫系统废水的排放量由脱硫系统的 2 类物料平衡决定。第一类平衡是脱硫系统水量的平衡;第二类平衡是脱硫系统中各类离子、灰分、惰性物质的平衡<sup>[2]</sup>。对于燃煤电厂,脱硫废水排放量的决定因素通常是第二类中的氯离子平衡,即设定吸收塔浆液中氯离子浓度限值(一般为 15~20 g/L),再根据烟气、工艺水、石膏中的氯含量等确定废水排放量<sup>[3-4]</sup>。这主要有 2 方面原因:①燃煤电厂 FGD 入口为湿度较低的非饱和水蒸汽烟气,而 FGD 出口为湿度较高的饱和水蒸汽烟气,烟气蒸发可带走的水量较多,不需要通过加大废水外排量来实现脱硫系统的水量平衡;②燃煤机组烟气中含有的 HCl 是脱硫吸收塔浆液中氯离子的主要来

收稿日期:2021-09-28;修回日期:2022-06-13

作者简介:韩倩倩(1987-),女,硕士,高级工程师,研究方向为电厂水处理,通讯联系人,025-85081178,hanqianqian@jspd.com.cn。

源,对系统氯的平衡和脱硫废水排放起决定性作用<sup>[5]</sup>。

对于以煤化工尾气为燃料的电厂来说,脱硫系统废水排放量的决定因素往往并非氯离子的平衡,而是第一类水量平衡。以上述新疆电厂为例,燃用的煤化工尾气、FGD 进口烟气、FGD 出口烟气湿度数据见表 1。

表 1 某燃气电厂烟气湿度数据表

项目	燃气	FGD 进口烟气	FGD 出口烟气
温度/℃	65	90	50
H <sub>2</sub> O 体积分数/%	饱和	26.00	12.85

由表 1 可知,该电厂燃用的煤化工尾气为饱和水蒸汽煤气,经燃烧后进入 FGD 入口的烟气中含水量为 26%,而以燃用烟煤的电厂为例,FGD 进口烟气湿度一般仅有 8%左右<sup>[6]</sup>。可见,对于该类烟气中含水量较高的电厂来说,脱硫系统烟气蒸发带走的水量大大减少,势必要通过脱硫废水外排来实现系统的水量平衡。因此水平衡代替氯平衡成为了脱硫废水排放量的决定因素。该电厂的脱硫系统水平衡数据见表 2。

表 2 某燃气电厂脱硫系统水量平衡表 kg/h

项目	1#炉脱硫系统	2#炉脱硫系统
输入水量		
原烟气携带水	74587.50	96169.80
氧化风携带水	3.65	4.74
各设备及管道冲洗水	8435.22	11072.07
石膏冲洗水	302.30	428.00
反应生成水	5.40	7.41
合计	83334.07	107682.00
输出水量		
净烟气携带水	78935.00	102573.20
雾滴含水	4.68	6.42
石膏含结晶水	55.87	79.03
石膏含游离水	108.13	48.87
废水	4230.39	4974.48
合计	83334.07	107682.00

由表 2 可知,由于燃气水分高,原烟气湿度大,导致脱硫废水外排量与同等容量燃煤锅炉相比显著增加,2 台炉脱硫废水外排量共计 9.204 t/h。

## 1.2 工业废水减排

除脱硫废水外,电厂水处理系统正常运行还会产生一部分工业废水,包括离子交换废水、超滤反冲洗排水、反渗透浓水、循环水排污水等。为实现水的梯级利用、减轻废水零排放处理系统的压力,许多电

厂将上述废水优先回用作脱硫系统补充水,少量回用不掉的再作为废水排放,取得了良好的减排效果<sup>[7-8]</sup>。

该新疆某电厂原水采用深井水,水处理系统采用电除盐全膜法,日常运行产生的工业废水主要为超滤反冲洗排水、反渗透浓排水以及辅机冷却塔排污水,可回用于脱硫系统除雾器等设备管道冲洗用水。该电厂 2 台燃气锅炉的除雾器等设备管道冲洗水用量约 19 m<sup>3</sup>/h。在夏季时,厂内超滤反洗排水、反渗透浓水、循环水排污水可以全部回用;冬季时,由于厂内尚有 1 台小型启动锅炉投运用于供热,水处理系统出力加大,废水量增多,废水回用于脱硫工艺补水后尚余约 2 m<sup>3</sup>/h 反渗透浓排水,与脱硫废水一并送入高盐废水零排放处理系统。脱硫废水零排放系统设计出力为 15 m<sup>3</sup>/h。

## 1.3 脱硫废水水质

脱硫废水一般具有呈弱酸性、悬浮物含量高、含盐量高、COD 等污染物超标的特点,且水质受燃料成分、除尘效果、脱硫工艺补水水质、石灰石成分、废水旋流设备运行控制、废水排放方式、废水排放量等影响,波动较大。

对于以氯平衡控制脱硫废水排放量的燃煤电厂,废水中含盐量极高,氯离子含量一般在 15 000~20 000 mg/L,硫酸根离子含量一般在 3 000~5 000 mg/L,总溶解固体含量可达 30~50 g/L。对于以水平衡控制脱硫废水排放量的燃煤尾气电厂,由于原烟气本身含氯量低,加上废水外排量较大,废水中含盐量较燃煤电厂显著降低,表 3 为计算得出的上述新疆某电厂脱硫废水盐分含量数据。

表 3 某燃气电厂脱硫废水盐成分表 mg/L

成分	含量	成分	含量
K <sup>+</sup>	44	Cl <sup>-</sup>	3741
Na <sup>+</sup>	219	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1748
Ca <sup>2+</sup>	1643	TDS	约 8000
Mg <sup>2+</sup>	599		

## 2 高盐废水零排放技术路线选择

高盐废水零排放处理过程可分为预处理、浓缩减量 and 末端蒸发干燥 3 段<sup>[9]</sup>。

预处理段的主要目的是去除废水中悬浮物、硬度、重金属等。常用的预处理手段有常规三联箱处理、石灰-碳酸钠双碱软化、超滤、微滤处理等。浓缩减量段的工艺路线可分为膜法浓缩和热法浓缩 2 大类。其中膜法浓缩主要有反渗透(RO)、正渗透

(FO)、电渗析(ED)、膜蒸馏(MD)等<sup>[10]</sup>;热法浓缩主要包括机械蒸汽再压缩蒸发法(MVR)、多效蒸发法(MED)、低温烟气浓缩法、低温余热闪蒸蒸发法<sup>[11]</sup>等。末端浓盐水干燥工艺主要有蒸发塘、蒸发结晶、高温旁路烟气干燥、高温热二次风惰性流化床干燥、低温烟道直喷干燥等。

目前高盐废水零排放处理工艺路线众多,实际上是三段处理过程不同工艺之间的相互组合。制定工艺路线时必须一厂一策,统筹考虑机组类型、燃料种类、锅炉尾部及炉后的系统和布置情况、投资和运行成本等因素。

对本文中分析的新疆某电厂,由于锅炉燃用煤化工尾气,未设置烟气除尘设备,因而末端干燥蒸发无法采用高温旁路烟气干燥、高温热二次风惰性流化床干燥、低温烟道直喷干燥等工艺;此外,结晶蒸发法工艺复杂、投资和运行成本较高,也不适用于该电厂。考虑到项目所在地平均年蒸发量远大于平均年降水量,高盐废水末端干燥工艺可采用蒸发塘技术;为减少蒸发塘处理水量,节约蒸发塘占地,在前端设置膜浓缩减量环节;即“膜浓缩+蒸发塘”工艺路线。

### 3 膜浓缩+蒸发塘处理工艺

#### 3.1 双碱法软化及超滤处理

零排放系统设有软化预处理,采用石灰-碳酸钠双碱软化法。系统内设1台处理能力为50 m<sup>3</sup>/h的高效凝聚澄清池,通过投加石灰、碳酸钠、絮凝剂、助凝剂使废水中镁、钙离子依次沉淀,同时去除废水中悬浮物等。石灰加药控制pH为10,碳酸钠加药控制pH为10.5,高效澄清池出水残留硬度控制在≤1.0 mmol/L。

经软化澄清处理后的出水进入后续超滤处理装置。超滤膜采用机械强度高、耐腐蚀能力强、耐悬浮物和有机物污染能力强<sup>[12-13]</sup>的内压式无机陶瓷超滤膜。陶瓷超滤装置设计参数:单支膜面积24.3 m<sup>2</sup>,膜标称过滤孔径30 nm;单套超滤装置产水量17 m<sup>3</sup>/h,配5支陶瓷超滤膜,膜运行通量为140 L/(m<sup>2</sup>·h),回收率90%。

#### 3.2 反渗透膜浓缩减量

为减小蒸发塘占地面积,尽可能提高水资源回用率,对进入蒸发塘前的废水采取浓缩减量处理。

反渗透膜浓缩是应用最为广泛的废水浓缩减量技术。对于燃煤机组脱硫废水的浓缩处理,由于废水含盐量极高,常用的反渗透膜类型多为碟管式高压反渗透膜(DTRO)和网管式(STRO)高压反渗

透<sup>[14]</sup>等,在压力达到8 MPa、处理含盐量8%~10%的废水时的回收率为40%~60%<sup>[15]</sup>。对于进水含盐量在10 000 mg/L以下的废水的浓缩处理,可采用前段苦咸水反渗透膜+后段海水反渗透膜处理,回收率可提高至80%以上。

反渗透装置设计参数:进水15 m<sup>3</sup>/h,产水13.2 m<sup>3</sup>/h,浓水1.8 m<sup>3</sup>/h,回收率88%;膜元件配置为一级三段12:12:6,各段间设置增压泵,一段反渗透膜采用DOW BW30FR-400/34型宽流道抗污染低压复合膜,二段、三段反渗透膜采用DOW SW30 HR LE-400型海水反渗透膜。反渗透装置回收的淡水作为电厂循环水补水,浓水进入蒸发塘处理。

### 3.3 蒸发塘处理

#### 3.3.1 蒸发塘建设条件

蒸发塘技术充分利用自然条件和场地优势,具有系统简单、能耗低、投资和运行成本低、运行维护量小、运行稳定等显著优势,广泛应用于煤化工废水处理等领域<sup>[16-17]</sup>。但蒸发塘的建设受环境因素限制较大,只有在日照充足、气候寒冷干燥、年蒸发量远大于年降水量、风速大且地势开阔、非农耕地资源充足的条件下才适合建设蒸发塘<sup>[18]</sup>。

本电厂所在的新疆哈密地区属于典型的温带大陆性干旱气候,主要特点是降水量少、气候早燥、冬季寒冷夏季干热、蒸发量大、日照时间长。该地区累年、逐月平均、最大、最小降水量及蒸发量统计如表4所示。

表4 所在地气象站累年降水量数据表 mm

月份	降水量			蒸发量		
	平均	最大	最小	平均	最大	最小
1	0.4	2.4	0.0	31.9	50.8	7.7
2	0.4	3.3	0.0	74.0	108.7	31.4
3	1.4	16.2	0.0	234.5	288.6	172.1
4	0.5	5.6	0.0	467.1	601.7	378.5
5	1.4	22.0	0.0	669.2	847.7	490.3
6	3.7	27.8	0.0	694.5	830.8	465.7
7	3.4	11.3	0.0	693.0	855.8	405.5
8	3.3	24.6	0.0	614.2	801.6	399.0
9	1.3	9.6	0.0	432.3	541.7	304.3
10	1.1	14.7	0.0	246.4	318.0	173.5
11	0.9	18.4	0.0	94.7	143.9	55.6
12	0.9	8.0	0.0	35.4	66.9	11.8
全年	18.7	61.3	1.6	4287.2	5098.8	3048.0

#### 3.3.2 蒸发塘设计计算

蒸发塘设计计算的重点在于蒸发面积、深度及

库容设计。

蒸发塘净蒸发面积计算如下:

$$S = 1\,000Q / (\eta \times z - y) \quad (1)$$

式中,  $S$  为蒸发塘净蒸发面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q$  为蒸发塘的年进水总量,  $\text{m}^3$ ;  $\eta$  为浓盐水蒸发折减系数,  $\eta = 0.6 \sim 0.8$ , 通常取  $\eta = 0.6$ <sup>[19]</sup>;  $z$  为当地年平均蒸发量,  $\text{mm}$ , 取值时应根据当地气象情况, 扣除冰冻期月份的蒸发量;  $y$  为当地年平均降水量,  $\text{mm}$ 。

蒸发塘的设计深度包括蒸发塘的有效深度、顶部超高高度和底部生产调节预留深度。蒸发塘有效深度  $H(\text{m})$  计算如下:

$$H = Q/S \quad (2)$$

蒸发塘超高高度由最大风浪高度、暴雨调洪高度和设计安全预留高度组成, 一般不低于  $0.5 \text{ m}$ 。蒸发塘生产调节预留深度据项目建设地点的水文气象参数和蒸发塘盐浓度确定, 一般不低于  $0.5 \text{ m}$ 。一般来说, 在蒸发量较大的地区建设的蒸发塘有效水深一般可以达到  $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ , 顶部超高和底部预留复核后, 蒸发塘设计深度在  $2 \sim 4 \text{ m}$  之间较为适宜<sup>[20]</sup>。

蒸发塘的最小库容需容纳全年蒸发不利阶段的废水排入量和自然降水的总量。计算如下:

$$V_{\min} = \sum_i (Q_i + Y_i - Z_i) \quad (3)$$

式中,  $V_{\min}$  为蒸发塘最小库容,  $\text{m}^3$ ;  $Q_i$  为  $i$  月份当月排入蒸发塘的废水量,  $\text{m}^3$ ;  $Y_i$  为  $i$  月份当月进入蒸发塘的自然降水量,  $\text{m}^3$ ;  $Z_i$  为  $i$  月份当月蒸发塘的蒸发量,  $\text{m}^3$ ;  $i$  的取值为全年中蒸发塘进水量 ( $Q_i + Y_i$ ) 大于蒸发量  $Z_i$  的月份。

$Y_i$ 、 $Z_i$  计算如下:

$$Y_i = S \times y_i / 1\,000 \quad (4)$$

$$Z_i = S \times z_i / 1\,000 \quad (5)$$

式中,  $y_i$ 、 $z_i$  分别为  $i$  月份当月降水量、蒸发量,  $\text{mm}$ 。

根据式(1)~(5)和表 4 数据, 计算新疆某电厂蒸发塘设计参数: 蒸发面积设计值取  $6\,340 \text{ m}^2$ ; 11 月至次年 3 月为  $(Q_i + Y_i) > Z_i$  之时段, 蒸发塘最小库容为  $6\,505.3 \text{ m}^3$ 。

### 3.3.3 机械雾化蒸发装置

自然蒸发塘因占地面积通常较大, 建设往往受土地资源的制约。采用蒸发塘+机械雾化蒸发处理技术可将蒸发塘面积大幅减少, 有效节约占地和投资。

机械雾化蒸发装置通过将浓盐水雾化成细小的液滴、增加液体蒸发的表面积, 从而提高液体蒸发速度。机械雾化蒸发装置主要有风送式雾化蒸发装

置、离心式雾化蒸发装置和破碎式雾化蒸发装置等几种型式<sup>[21]</sup>。其中破碎式机械雾化蒸发装置是使用高速旋转的叶片将水泵抽出的液体打碎成细小的液滴, 液滴同时在叶轮的高速转动下抛向高空, 下落过程完成强化蒸发。与另外 2 种雾化型式相比, 破碎式机械雾化具有无喷嘴污堵结垢风险、设备运行压力低、水雾喷射或扩散范围小、对周边环境影响小等优点。

机械雾化蒸发装置的有效蒸发量可按下式计算:

$$Q_p = [Q - (\eta \times z - y) \times S' / 1\,000] / T_p \quad (6)$$

式中,  $Q_p$  为机械雾化装置平均有效蒸发量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $S'$  为蒸发塘设计蒸发面积,  $\text{m}^2$ ;  $T_p$  为机械雾化装置年运行小时数,  $\text{h/a}$ 。

以该新疆某电厂为例, 由于场地条件制约, 蒸发塘的设计蒸发面积取为  $3\,000 \text{ m}^2$ , 考虑气温影响, 机械雾化蒸发装置每年运行时间为 4 月—10 月, 按  $5\,040 \text{ h}$  计。由式(6)可计算得, 机械雾化蒸发装置的平均有效蒸发量为  $1.51 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

机械雾化蒸发装置设计参数: 设计 1 台漂浮式机械雾化装置, 水通量  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ , 4 月—10 月蒸发期内平均有效蒸发量保证值  $\geq 2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ; 雾化液滴直径  $\leq 100 \mu\text{m}$ , 雾滴漂移距离  $\leq 20 \text{ m}$ , 最大喷射高度  $6 \text{ m}$ ; 叶轮等废水通流部件材质均为 2205 双相不锈钢。

结构及安装型式: 机械雾化蒸发装置由浮筒、浮台支架、电机、叶轮、潜水电泵等组成; 装置利用 4 只 PE 浮筒浮于蒸发塘水面上, 电动机通过支撑柱安装于浮台支架上, 电动机轴顶连接叶轮; 潜水电泵固定在浮台支架上方, 出水管连接至电动机外壁的环形喷孔; 机械雾化蒸发装置放置于塘内, 偏向最大风向上风侧位置<sup>[22]</sup>, 装置两侧固定钢丝绳, 钢丝绳另一端固定在蒸发塘堤岸。机械雾化蒸发装置结构形式见图 1。

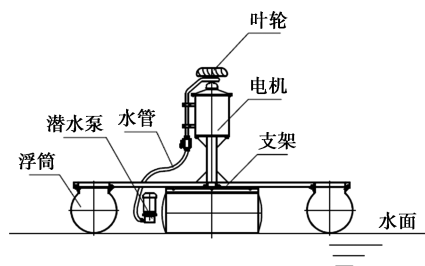


图 1 机械雾化蒸发装置主视图

## 4 结语

(1) 对于以湿度较高的煤化工尾气为燃料的电

厂,由于原烟气含水分高,石灰石-石膏湿法烟气脱硫的废水排放量将高于同等参数的燃煤机组排放量,核算时应以脱硫系统的水平衡为控制条件来确定。

(2)蒸发塘作为高盐废水末端干化技术,具有投资和运行成本低、运行维护便利、抗冲击负荷强等优点,适宜用在西北、华北等具有良好光照、蒸发等自然条件且土地资源丰富的地区。

(3)膜处理可作为蒸发塘处理的前置减量浓缩手段。对于排放量大、含盐量低于 10 000 mg/L 的废水,可采用前段苦咸水膜+后段海水反渗透膜处理,适当提高回收率,尽量降低进入蒸发塘的浓水量。

(4)采用机械雾化蒸发装置可有效提高蒸发速度,从而减小蒸发塘的建设面积,解决因土地资源制约对蒸发塘技术应用的限制。

### 参考文献

- [1] 尤良洲,韩倩倩,晋银佳,等.火电企业水资源综合利用及污染防治技术路线探讨[J].中国电力,2018,51(10):134-137.
- [2] 吴冲,陶爱平.火电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水排放量的计算[J].华电技术,2010,32(9):5-9.
- [3] 吴怡卫.石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理的研究[J].中国电力,2006,39(4):75-77.
- [4] 晋银佳,李壮,唐国瑞,等.废水“零排放”下燃煤电厂脱硫废水水量的确定[J].华电技术,2019,41(2):73-75.
- [5] 谷小兵,宁翔,倪黎,等.燃煤电厂脱硫废水的排放优化[J].环境科技,2021,34(1):41-45.
- [6] 贾西部.石灰石-石膏湿法脱硫废水排放量深度解析[J].中国电力,2020,53(8):139-143.
- [7] 陈海杰,李飞,孙莹,等.燃煤机组全厂废水零排放技术方案分析[J].华电技术,2020,42(9):88-92.
- [8] 刘春红,秦刚华,邹正伟,等.燃煤发电厂的深度节水与废水零排放[J].水处理技术,2020,46(10):128-132.
- [9] 张山山,王仁雷,晋银佳,等.燃煤电厂脱硫废水零排放处理技术研究应用及进展[J].华电技术,2019,41(12):25-30.
- [10] 谢志文,冯永新,赵宁,等.电厂脱硫废水零排放技术对比分析[J].科技创新与应用,2021,(9):177-179.
- [11] 王晋权,赵周明,张志华.低温余热闪蒸脱硫废水处理系统设计及应用[J].中国电力,2020,53(8):151-157.
- [12] 张诗洋,单历元,廖松义,等.陶瓷膜在废水处理领域中的研究进展[J].工业水处理,2021,41(4):31-36.
- [13] 李新望,谷晓娟,左大海,等.陶瓷超滤膜在电厂化学水处理系统改造中的应用[J].工业水处理,2019,39(8):107-110.
- [14] 史小丽.反渗透膜在火电行业脱硫废水处理中的应用分析[J].山东化工,2020,37(8):222-224.
- [15] 王冬梅,程家庆,孔繁军.脱硫废水零排放技术与工艺路线[J].工业水处理,2017,39(8):109-112.
- [16] 刘展,郭瑞亚,李娜,等.高含盐废水资源化利用技术的研究进展[J].应用化工,2020,49(10):2657-2661.
- [17] 姜兴涛,姜成旭.利用蒸发塘处置煤化工浓盐水技术[J].化工进展,2012,31(S1):276-278.
- [18] 郭云彤,邵景力,崔亚莉,等.半干旱区煤化工高含盐废水自然蒸发规律研究[J].干旱区地理,2021,44(4):971-982.
- [19] 黄志亮,甄胜利,王正中,等.蒸发塘处理煤化工浓盐水设计探讨[J].工业用水与废水,2015,46(2):22-25.
- [20] 崔广宁.蒸发塘处理煤化工浓盐水设计探讨[J].工业用水与废水,2014,45(3):33-35.
- [21] 李建法,赵利鑫,盖媛媛,等.喷雾蒸发技术在化工浓盐水处理中的应用[J].当代化工,2017,46(16):1161-1164.
- [22] 王涛,邢浩若,刘道宽,等.机械雾化蒸发脱硫废水的理论研究与实践[J].华电技术,2020,42(9):82-87.■
- [10] 杨建成,徐成,王如松.产品生命周期评价方法及应用[M].北京:气象出版社,2002.
- [11] Lee D,Elgowainy A,Dai Q.Life cycle greenhouse gas emissions of hydrogen fuel production from chlor-alkali processes in the United States[J].Applied Energy,2018,217:467-479.
- [12] Climate Change:The physical science basis[R].Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change,2013.
- [13] Xiang D,Yang S,Li X,et al.Life cycle assessment of energy consumption and GHG emissions of olefins production from alternative resources in China[J].Energy Conversion and Management,2015,90:12-20.
- [14] Ou X,Xiaoyu Y,Zhang X.Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China[J].Applied Energy,2011,88(1):289-297.
- [15] Fang R.Life cycle cost assessment of wind power-hydrogen coupled integrated energy system[J].International Journal of Hydrogen Energy,2019,44(56):29399-29408.
- [16] 中国煤炭协会.煤炭工业发展年度报告[R].北京:2020.
- [17] 国家统计局.中国能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [18] Yu S,Wei Y,Guo H,et al.Carbon emission coefficient measurement of the coal-to-power energy chain in China[J].Applied Energy,2014,114:290-300.
- [19] 国家发改委.省级温室气体排放指南[R].北京:2012.
- [20] 王庆一.2020 能源数据[R].北京:2021.
- [21] 中国交通运输协会.中国交通年鉴[M].北京:中国交通出版社,2020.
- [22] Grubert E A,Brandt A R.Three considerations for modeling natural gas system methane emissions in life cycle assessment[J].Journal of Cleaner Production,2019,222:760-767.
- [23] 张庆.煤制乙二醇技术进展及产业分析[D].西安:西北大学,2012.
- [24] 杨庆,许思敏,张大伟,等.石油与煤路线制乙二醇过程的技术经济分析[J].化工学报,2020,71(5):2164-2172.
- [25] 姚珏.煤制乙二醇生产技术现状及技术经济分析[J].山东化工,2020,49(16):112-113.
- [26] Yang Q,Zhu S,Yang Q,et al.Comparative techno-economic analysis of oil-based and coal-based ethylene glycol processes[J].Energy Conversion and Management,2019,198:111814.
- [27] Simeone M,Ian B H,Christian J R,et al.A methodology for performing global uncertainty and sensitivity analysis in systems biology[J].Journal of Theoretical Biology,2008,254(1):178-196.■

(上接第 214 页)