



移动扫码阅读

段超. 新型浆液循环方式在双塔双循环脱硫系统中的应用[J]. 能源环境保护, 2021, 35(5): 55-60.

DUAN Chao. Application of new slurry circulation mode in double-tower double-cycle desulfurization systems [J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 55-60.

# 新型浆液循环方式在双塔双循环脱硫系统中的应用

段超

(上海电气电站环保工程有限公司, 上海 201612)

**摘要:**针对石灰石-石膏法脱硫工艺中双塔双循环技术内部浆液循环和塔间水平衡问题, 本文提出了一种较为简洁的双塔间浆液循环方式, 并应用于山西某2×350 MW 机组烟气脱硫系统。结果表明, 一级塔设计脱硫效率87%, 二级塔设计脱硫效率97%, 简化设计的同时提高了备件替换性; 通过设计液位差和强制循环泵建立双塔间浆液循环; 一级塔浆液通过浆液循环系统分流至二级塔, 二级塔过剩的浆液溢流回一级塔, 形成双塔间水平衡体系。187 MW 和 290 MW 两种工况下, 启动浆液循环系统后4层喷淋即可达到99.81%的脱硫效率; 相对于双塔系统中两塔独立运行, 新型双塔循环系统启动6台循环泵即可保证脱硫效率, 并减少系统阻力约500 Pa, 降低风机电耗400 kW。

**关键词:**燃煤机组; 烟气脱硫; 双塔双循环脱硫; 浆液循环方式; 水平衡

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)05-0055-06

## Application of new slurry circulation mode in double-tower double-cycle desulfurization systems

DUAN Chao

(Shanghai Electric Power Generation Environment Protection Engineering Co., Ltd., Shanghai 201612, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of internal slurry circulation and water balance of the double-tower double-cycle wet-FGD system in the limestone-gypsum desulfurization process, a simple slurry circulation mode between the two towers was proposed and applied in a flue gas desulfurization system of a 2×350 MW unit in Shanxi. The results showed that the design desulfurization efficiencies of the first-stage tower and the second-stage tower were 87% and 97%, respectively. The design was simplified while the replacement of spare parts was improved. The slurry circulation between two towers was established by liquid level difference design and forced circulation pump. The slurry of the first-stage tower was diverted to the second-stage tower through the slurry circulation system, and the excess slurry of the second-stage tower overflowed back to the first-stage tower to build a water balance system between the two towers. Under the working conditions of 187 MW or 290 MW, 4-layer spraying could reach 99.81% desulfurization efficiency after the slurry circulation system was started. Compared with independent operation mode of two towers in the double towers system, the new double-tower circulation mode could guarantee the desulfurization efficiency by starting 6 circulating pumps, and reduce the system resistance by about 500 Pa and the fan power consumption by 400 kW.

**Key Words:** Coal-fired power unit; Flue gas desulfurization; Double-tower double-cycle wet-FGD system; Slurry circulation mode; Water balance

收稿日期: 2021-06-11; 责任编辑: 金丽丽

基金项目: 上海电气电站集团关键核心技术开发基金支持(T-320020008)

作者简介: 段超(1987-), 男, 山西临汾人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为燃煤电厂烟气处理工艺。E-mail: deh137@163.com

## 0 引言

当前,随着经济发展及社会进步,民众对环境质量的要求越来越高,燃煤机组作为能耗和排放大户,一直受到社会的广泛关注,并且国家也不断加大控制燃煤电厂烟气排放污染物力度,提出一系列史上最严格的排放标准<sup>[1]</sup>。而不少燃煤电厂受燃料来源限制,需要燃烧诸如煤矸石、煤泥和洗中煤等高硫煤,显然,这对脱硫系统的路线选择、稳定运行及综合能耗提出了非常高的要求。

石灰石-石膏湿法脱硫工艺(Wet-FGD)由于其吸附剂来源广,运行稳定等显著优点,已成为烟气脱硫技术中最成熟、应用最广泛的脱硫技术,目前占全球脱硫装机总容量的 85%。但传统单塔脱硫技术在应对如今的高硫煤、低 SO<sub>2</sub> 排放指标工况时,已显得力不从心,故双塔双循环脱硫技术在大机组、高硫煤系统中的优势就显现出来<sup>[2-4]</sup>,而双塔双循环技术毕竟系统复杂,尤其双塔内部的浆液循环的重要性往往被忽视,并且塔间水平平衡较难维持,即如何能以低能耗、简单化的方式建立起系统内浆液循环并兼顾塔间水平平衡,成为双塔双循环技术设计中面临的主要难题<sup>[5]</sup>。本文提出一种较简洁的双塔间浆液循环方式,模拟双塔间水平平衡体系,并在山西某 2×350 MW 机组烟气脱硫系统中成功应用,为后续的双塔双循环脱硫技术应用提供了新的思路。

## 1 双塔双循环原理及塔间浆液循环的意义

### 1.1 双塔双循环原理

双塔双循环技术主要是通过通过在烟气通道上建设 2 座吸收塔,通过串联运行而增加烟气与浆液的反应时间。前塔(即一级塔)作为预洗塔,用于吸收绝大部分 SO<sub>2</sub> 和进行石膏结晶;后塔(即二级塔)作为补充,吸收一级塔中逃逸的 SO<sub>2</sub>。一级塔浆液集中用于石膏结晶,pH 运行在 5.2 左右;二级

塔本身不排出石膏,而通过两个塔间的浆液循环系统,逐步将反应产物转移至一级塔,进行充分氧化,继而由一级塔的石膏排出泵一起输送至脱水系统,故二级塔可通过提高 pH 值至 6.2,提高浆池中 CaCO<sub>3</sub> 含量,获得更高的脱硫效率<sup>[6-8]</sup>。

### 1.2 塔间浆液循环系统的意义及应用现状

理想情况下,应建立一级塔和二级塔之间的浆液循环系统,使两座吸收塔中浆液浓度均匀一致,才能充分调动两座塔的全部脱硫能力。而实际运行中,因一级、二级吸收塔脱硫量相差较大,同时一级塔除雾器冲洗水量小蒸发水量大,二级塔除雾器冲洗水量大蒸发水量小,会造成两座塔浓度及液位不一致<sup>[7]</sup>,因此,一级、二级吸收塔浆液间浆液循环系统不仅起到调节系统内水平衡的作用,同时可以将二级塔中多余的 CaCO<sub>3</sub> 转入一级塔以提高 CaCO<sub>3</sub> 利用率<sup>[8-10]</sup>。

当前行业内应用较多的浆液循环系统需要在两级塔之间设置浆液循环旋流器及旋流器给料泵以均衡两塔密度,同时配置强制循环泵来控制两塔液位,此种方式运行较复杂,且能耗较高。另一方面由于双塔系统本身具有较大的脱硫容量,故有些项目在设计时,不考虑塔间浆液循环系统,即两塔完全分开,独立运行,显然这种运行方式无法最大限度地发挥双塔双循环体系的脱硫能力<sup>[11]</sup>。因此,寻求简单、高效、低能耗的浆液循环方式,解决好两塔内浆液浓度及液位的平衡问题,对于双塔双循环技术的发展及应用有着重要的实际意义。

## 2 新型塔间浆液循环方式的原理

### 2.1 脱硫装置主要设计参数

该燃煤机组为 2×350 MW 超临界燃煤空冷 CFB 锅炉,最大连续蒸发量为 1 200 t/h,锅炉实际耗煤量为 293 t/h,所燃用煤质数据见下表 1。

表 1 煤质主要参数

Table 1 Main parameters of coal quality

检测项目	符号	单位	设计煤(NC-14-741)
全水分	Mt	%	8.0
空气干燥基水分	Mad	%	4.66
收到基灰分	Aar	%	48.62
收到基碳	Car	%	30.60
收到基氢	Har	%	2.39
收到基氮	Nar	%	0.62

续表

检测项目	符号	单位	设计煤(NC-14-741)
收到基氧	Oar	%	7.12
全硫	St,ar	%	2.65
收到基高位发热量	Q <sub>gr,v,ar</sub>	MJ/kg	12.34
收到基低位发热量	Q <sub>net,v,ar</sub>	MJ/kg	11.66
煤灰中三氧化硫	SO <sub>3</sub>	%	3.18

机组采用引增合一,引风机布置在脱硫前,采用静叶可调式轴流风机,T.B点风量对应为715.27 m<sup>3</sup>/s,全压升13 088 Pa,配套电机功率10 500 kW。炉后脱硫采用石灰石-石膏双塔双循环脱硫技术,并在二级塔顶部设置湿式电除尘器,整套系统按照煤种含硫量为2.65%及表2~4所列烟气参数进行设计,保证整体脱硫效率不低于99.6%。

表2 锅炉BMCR工况烟气成分

Table 2 Flue gas composition under BMCR condition

项目	单位	干基	湿基
CO <sub>2</sub>	Vol%	13.60	12.30
O <sub>2</sub>	Vol%	5.340	4.84
N <sub>2</sub>	Vol%	80.60	73.10
SO <sub>2</sub>	Vol%	0.066	0.060
H <sub>2</sub> O	Vol%	/	9.36

表3 不同负荷时风机出口烟气量和温度

Table 3 Flue gas volume and temperature at the fan outlet under different loads

项目	单位	100%THA	75%THA	50%THA
FGD入口干烟气量	Nm <sup>3</sup> /h	1 151 884	944 074	797 091
FGD入口湿烟气量	Nm <sup>3</sup> /h	1 204 900	987 526	833 778
FGD入口烟气温度	℃	130	/	/

表4 锅炉BMCR工况烟气中污染物成份

Table 4 Pollutant composition in flue gas under BMCR condition

项目	数据
SO <sub>2</sub>	8 618
SO <sub>3</sub>	100
Cl(HCl)	50
F(HF)	25
烟尘(引风机出口)	20

表5 两级吸收塔主要技术参数

Table 5 Main technical parameters of double-stage adsorption towers

参数	一级吸收塔	二级吸收塔
吸收塔直径/m	14.0	14.0
脱硫效率/%	87	97
喷淋层数/层	3	3
浆液循环泵流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	6 800	6 800
循环泵扬程/m	17.1/19.3/21.5	17.1/19.3/21.5
托盘	无	无
除雾器级数/级	1	2
浆液池直径/m	14.0	14.0
浆液池液位/m	8.6	8.6
吸收塔高度/m	31.6	29.9(不含湿电)
喷嘴型式	螺旋型	螺旋型
喷嘴数量/个	336	336
喷嘴压头/m	3.0	3.0
喷嘴 D <sub>32</sub> /μm	867.44	867.44
吸收塔基础高度/m	0.0	0.4

本双塔脱硫系统在设计时,按照“低能耗、简洁化”的思路开展,根据总的需求液气比,平均分配到两座吸收塔,拟合出一级塔脱硫效率87%,二级塔脱硫效率97%。按此方式,两座塔的相关的设计参数、设备选型可以高度保持一致,在简化设计的同时,提高备件的替换性,利于降低后期运行维护成本。本次设计两塔的主要技术参数如下表5所示。

## 2.2 新型浆液循环方式的流程

为了使两个吸收塔内浆液能够循环起来,并且节省电耗,提出如下图1所示的循环流程。在一级塔三台大流量的浆液循环泵出口分流少部分较浓浆液至二级塔(红色),同时通过将二级塔基

础抬高400 mm,使两塔液位形成液位差,二级塔过剩的低浓度浆液便可通过两塔间的联络回流管(洋红)回流至一级塔,从而实现浆液之间循环;此外,设置一级塔石膏排出泵打至二级塔管路,以及

强制循环泵从二级塔打至一级塔管路(蓝色),以作为浆液循环的备用手段,系统正常运行时,完全按照新型浆液循环模式来循环浆液,而只有当系

统脱水进入末期,一级塔液位较低时,可视情况启动强制循环泵,将二级塔浆液打至一级塔,以补充一级塔液位。

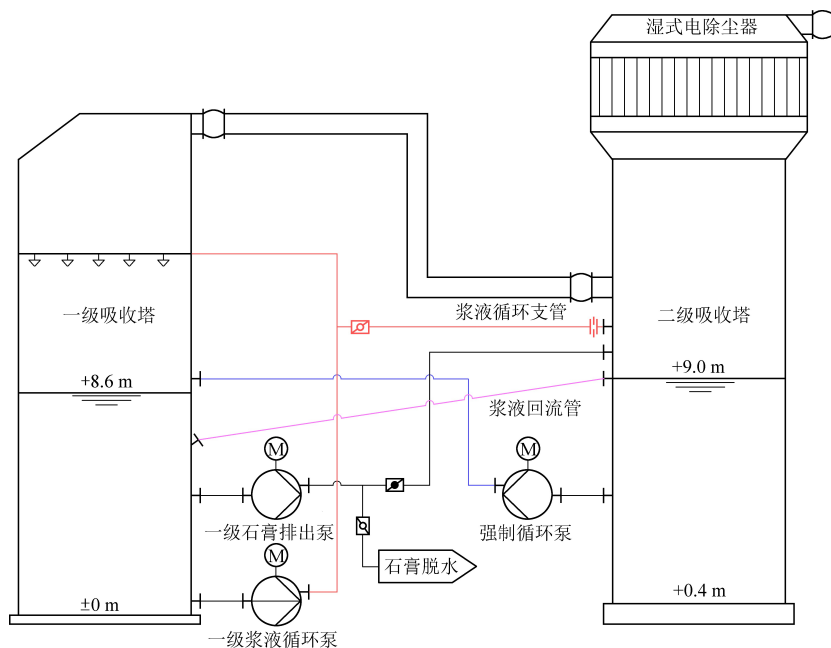


图 1 双塔间浆液循环方式

Fig.1 Slurry circulation mode between two towers

### 2.3 两塔水平衡的建立

由于两级吸收塔在整个流程中承担的脱硫任务不同,两座塔内的蒸发水、冲洗水、石灰石补浆量等存在较大差异,故两座塔的水平衡维持是一个较复杂的问题<sup>[11-14]</sup>。

对于一级塔而言,在设计工况下,塔内主要水耗由以下三部分组成:即当高温烟气在通过一级塔时,塔内发生近似绝热增湿过程,烟温冷却到 51.8 ℃,产生大量蒸发水 77.3 t/h;塔内吸收反应耗水 6.1 t/h;按照塔内浆液质量浓度为 20%<sup>[6-8]</sup>,需要排出石膏浆液为 167.8 t/h。

而对于一级塔的补水,主要由以下几部分组成:一级塔顶部一级除雾器冲洗水 28.4 t/h;一级塔由于承担绝大部分 SO<sub>2</sub> 的去除,故石灰石浆液主要补充在一级塔,补浆量为 91.2 t/h;滤液返回水 55.5 t/h;其余冷却、密封水(包含少量氧化空气增湿水)16.5 t/h。

对于二级塔而言,经过一级塔冷却饱和后的烟气在进入二级塔后,不再引起水份的大量蒸发,并且反应水也可忽略不计,因而可以认为二级塔耗水接近为 0。对于二级塔的补水,主要由以下基本组成:二级塔顶部两级除雾器冲洗水 39.5 t/h;石灰石浆液补充量 13.7 t/h;少量冷却水 1.5 t/h 以及顶部湿电冲洗水 5 t/h,而脱硫后净烟道进行

保温,烟气排放过程中温降较小,冷凝水可忽略不计。

根据上述水平衡数据,可以看出,一级塔内部补水 191.6 t/h,耗水 250 t/h,故液位持续下降,对应浆液密度会上升;而二级塔内部持续补水 59.6 t/h,对应浆液密度上升较慢。因此,需要借助浆液循环系统,在一级塔每台浆液循环泵出口分出支路,输送 3×60 t/h 浆液至二级塔,二级塔过剩的 59.6 t/h +180 t/h 浆液通过两塔间的溢流管回流至一级塔,形成如下图 2 中的水平衡体系。

## 3 新型塔间浆液循环方式的应用情况

### 3.1 脱硫性能与能耗分析

该浆液循环模式在本项目投运后,两座吸收塔的浆液连续进行浆液互倒,最短 7 个小时内浆液可以置换一次,并可以通过一级塔循环泵排出支管上阀门开度来控制循环周期。通过浆液的互倒,充分调动了两座塔的脱硫能力。

通过表 6 对比可以发现,对于机组负荷为 187 MW 与 290 MW 两种工况,SO<sub>2</sub> 浓度相近,当二级塔液位较低,浆液循环未建立时,会导致两塔浆液浓度偏差较大,二级塔 pH 较高,塔内 CaCO<sub>3</sub> 过剩,需启动 5 层喷淋,拖累了整体的脱硫效率,增加了系统电耗;而当浆液正常开始循环时,两塔浆液浓

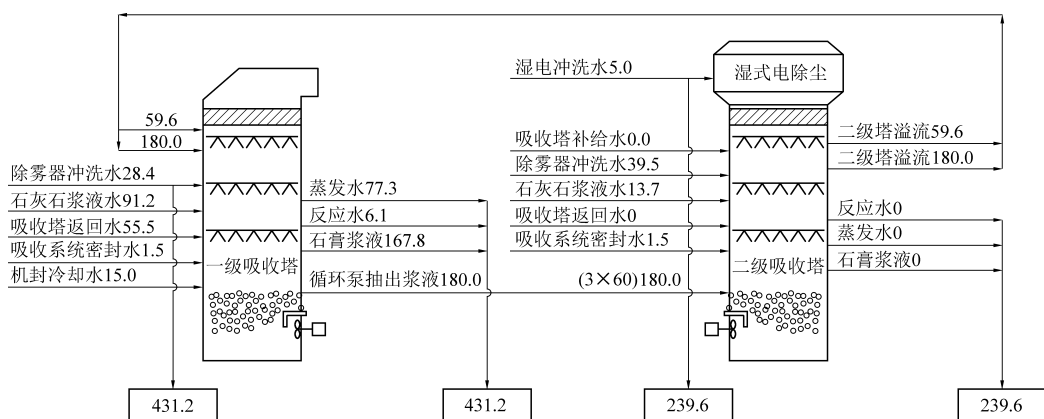


图2 双塔间水平衡情况(t/h)

Fig.2 Water balance between two towers (t/h)

度不会出现较大差异,系统有较高的脱硫能力,只要启动4层喷淋即可达到较高脱硫效率。

表6 两级吸收塔实际运行情况

Table 6 Operation status of double-stage adsorption towers

机组负荷 /MW	入口 SO <sub>2</sub> 浓度 /(mg · Nm <sup>-3</sup> )	吸收塔	塔内液 位/m	循环泵 投运数	pH	浆液密度 /(g · cm <sup>-3</sup> )	浆液循环 周期/h	出口 SO <sub>2</sub> 浓度 /(mg · Nm <sup>-3</sup> )	脱硫效 率/%	烟气阻力 /Pa
215	2 886	一级塔	8.62	2	5.1	1.13	10.5	26.00	99.10	1 030
		二级塔	8.80	1	5.3	1.10				
187	4 440	一级塔	8.71	3	5.1	1.18	未建立	25.00	99.44	1 230
		二级塔	7.80	2	6.2	1.13				
290	4 694	一级塔	8.30	2	5.3	1.12	10.5	8.96	99.81	1 500
		二级塔	9.10	2	5.9	1.12				
354	7 637	一级塔	8.20	3	5.3	1.21	10.5	27.00	99.65	2 050
		二级塔	8.90	3	6.0	1.21				

通过与该项目位置相近,且机组规模、燃用煤种都相似的同类型机组双塔脱硫系统对比,采用新型浆液循环方式后,双塔系统的脱硫能力充分调动,而对于两塔独立运行时,由于两塔浆液缺乏循环,导致系统处理处在较低水平。如表7所列,当两项目机组负荷均在满负荷时,脱硫入口 SO<sub>2</sub> 浓度较高时,采用浆液循环系统时,只要启动6台循环泵即可保证脱硫效率,而双塔脱开运行的项

目,需要启动7台循环泵,同时配合烟气均布装置,致使循环泵电耗增加1 060 kW以及引风机电耗增加400 kW<sup>[15]</sup>。

在水平衡的调控方面,现场运行时,可以通过控制浆液循环支管上阀门的开闭,调整浆液系统的循环周期,精确控制两塔液位,同时,在脱水系统投入,一级塔液位下降较快时,可以通过投入强制循环泵,来维持两塔液位。

表7 运行数据对比

Table 7 Comparison of operation data

项目	本项目 2×350 MW 机组(采用新型浆液循环方式)	相近 2×350 MW 机组(双塔独立运行)
机组负荷/MW	354	352
入口 SO <sub>2</sub> 浓度/(mg · Nm <sup>-3</sup> )	7 637	6 298
运行循环泵台数/台	3(一级塔)+3(二级塔)	4(一级塔)+3(二级塔)
循环泵流量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )	6 800	6 000(一级塔)+3 500(二级塔)
循环泵总电耗/kW	3 380	4 440
烟气均布装置	无	二级塔内设置一层多孔托盘
系统阻力/Pa	2 050	2 570
阻力折算引风机增加电耗/kW	0	约 400



### 3.2 运行中注意事项

由于是从浆液循环泵出口管道进行分支,在浆液进入二级塔管嘴处,需设置节流孔板,以免造成支管泄压而影响喷淋层流量;同时,分支管道上的阀门需要紧贴循环管分支处设置,避免分支管道上阀门关闭后管道积浆。本项目循环泵流量为  $6\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$ ,而支管流量只有  $60\ \text{m}^3/\text{h}$ ,占用循环流量的比例不足 0.9%,并且在支管设置孔板,故实际运行中,在启用浆液循环系统后,循环泵电流及泵出口压力表读数未见明显波动。

需定期检查、冲洗两塔之间的回流管,防止回流管结垢堵塞;二级吸收塔液位需连续控制在 8.8 m 以上。

## 4 结 论

在引入新型浆液循环方式后,充分调动了双塔系统的脱硫性能,相比于两座塔单独运行且脱硫效率相似的情况下,采用浆液循环系统时,循环泵的投运数量减少,对于 350 MW 机组,脱硫系统电耗可减少约 20%。同时,可以简化塔内烟均布装置,降低系统阻力约 500 Pa,降低风机电耗 400 kW 左右。此外,新型浆液循环方式为双塔间水平的建立提供了多种操作运行手段,使双塔双循环系统能够运行在最佳性能状态,为日后的高硫煤脱硫提供了重要的理论及实践依据。

## 参考文献

[1] 发展改革委,环境保护部,能源局. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020)》的通知 [EB/OL]. (2014-09-12) [2021-04-20]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content\\_2818468.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2015/content_2818468.htm).

- [2] 贾西部. 湿法脱硫超低排放工艺路线的探索 [J]. 工业锅炉, 2021 (1): 41-45.
- [3] 朱法华. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线的选择 [J]. 中国电力, 2017, 50 (3): 11-16.
- [4] 高沛荣, 何未雨, 王晓乾, 等. 脱硫浆液循环系统灵活性改造及其调节性能试验 [J]. 热力发电, 2019, 48 (12): 98-104.
- [5] 顾欣, 施刚夜, 侯新建, 等. 超超低排放技术工程设计方案研究 [J]. 电力科技与环保, 2020, 36 (1): 6-11.
- [6] 罗睿, 吴涛, 吴智群, 等. 火电厂脱硫系统智能优化管理研究 [J]. 热力发电, 2019, 48 (9): 71-76.
- [7] Muhammad Adli Hanif, Naimah Ibrahim, Aishah Abdul Jalil. Sulfur dioxide removal: An overview of regenerative flue gas desulfurization and factors affecting desulfurization capacity and sorbent regeneration [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (22): 27515-27540.
- [8] 李兴华, 何育东. 燃煤火电机组  $\text{SO}_2$  超低排放改造方案研究 [J]. 中国电力, 2015, 48 (10): 148-151.
- [9] 史晓宏, 李广滨, 魏书州, 等. 350 MW 燃煤机组降低烟尘排放技术的研究与实践 [J]. 中国电力, 2015, 48 (5): 93-96.
- [10] 杜振, 王玉敬, 魏宏鸽, 等. 适用于燃煤机组烟尘超低排放技术路线分析 [J]. 能源工程, 2017 (3): 61-65.
- [11] 杜振, 魏宏鸽, 张杨, 等. 高效脱硫协同除尘关键技术分析 [J]. 中国电力, 2018, 51 (6): 37-41.
- [12] 许雪松, 薛建明. 超低排放改造后脱硫水平衡问题的分析与对策 [J]. 电力科技与环保, 2019, 35 (1): 32-34.
- [13] 孙若晨. 某火电厂双塔双循环烟气脱硫系统优化运行研究 [J]. 电力科技与环保, 2020, 36 (3): 27-31.
- [14] 薛方明, 邵媛. 双塔双循环脱硫技术在执行污染物超低排放火电机组中的应用 [J]. 山东化工, 2015, 44 (20): 147-150.
- [15] 张丽珍. 火电厂石灰石-石膏湿法双塔双循环脱硫技术的探讨 [J]. 低碳世界, 2016 (29): 7-8.