

660 MW 超超临界燃煤机组脱硫废水雾化蒸发零排放系统运行对锅炉热效率的影响

王 龙¹, 夏永俊¹, 韩金克^{1,2}, 彭 博¹, 曾佳微¹, 吴建群^{1,2}, 郭修文¹, 黄赵鑫¹, 于敦喜²

(1.江西江投能源技术研究有限公司,江西 南昌 330096;2.华中科技大学 煤燃烧与低碳利用全国重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:脱硫废水是燃煤电厂在生产运行中产生的污染物,为了保护生态环境,需对其进行净化处理。热烟气蒸干技术因系统稳定、效率高被广泛用于脱硫废水处理,部分电厂采用旋转雾化蒸发技术实现脱硫废水零排放。为评估该蒸干系统对锅炉热效率以及空气预热器性能的影响,以660 MW 超超临界燃煤机组为研究对象开展现场实验,在400 MW 蒸干系统投运和退出工况、660 MW 蒸干系统投运工况下测量锅炉排烟温度以及烟气成分,对入炉煤、飞灰、炉渣、脱硫废水进行化验分析。通过反平衡热效率计算方法得到各工况的热效率,并根据冷端综合温度与空预器性能修正计算结果评价各工况下空预器性能。结果表明,400 MW 负荷下,退出蒸干系统时热效率为95.11%,投运蒸干系统时热效率为95.08%,系统投运降低了0.03%的锅炉热效率;400 MW 负荷下系统处理废水流量为4.72 m³/h,660 MW 负荷下系统处理废水流量为6.93 m³/h,高负荷下投运系统可以抽取更少的烟气来处理更多脱硫废水,投运系统更为有利;系统投运后灰渣的含碳量发生变化,这表明蒸干系统运行会对锅炉燃烧产生影响;系统投运期间空预器冷端综合温度较低,运行时需要注意空预器压差,避免发生空预器堵塞危害机组安全运行。

关键词:脱硫废水;雾化蒸发;热效率;空气预热器

中图分类号:TK114;TK09 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)S1-0399-07

Effects on the boiler's thermal efficiency of running a zero-discharge desulfurization wastewater atomization evaporation system for 660 MW ultra-supercritical coal-fired unit

WANG Long¹, XIA Yongjun¹, HAN Jinke^{1,2}, PENG Bo¹, ZENG Jiawei¹, WU Jianqun^{1,2},
GUO Xiuwen¹, HUANG Zhaoxin¹, YU Dunxi²

(1.Jxic Energy Tech. Research Institute Co.,Ltd., Nanchang 330096, China; 2.State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Desulfurization wastewater is a pollutant that coal-fired power plants produce during production and operation. To save the natural environment, this wastewater must be cleaned and treated. Because of its stable system and high efficiency, hot flue gas evaporation technology is extensively used for desulfurization wastewater treatment. Some power plants also utilize rotary atomization evaporation technology to achieve zero discharge of desulfurization wastewater. To assess how this evaporation system affects the boiler's thermal efficiency and the air preheater's performance, a 660 MW ultra-supercritical coal-fired unit was used in a field experiment, at 400 MW (system out and into operation) and 660 MW (system operation), boiler flue gas temperature and composition were monitored, and laboratory tests were used to assess the incoming coal, fly ash, slag, and desulfurization wastewater. The thermal efficiency of each working condition was

收稿日期:2024-04-16; **责任编辑:**常明然 **DOI:**10.13226/j.issn.1006-6772.24041603

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52006080)

作者简介:王 龙(1999—),男,江西萍乡人,助理研究员,硕士。E-mail:lokeywang@163.com

通讯作者:韩金克(1993—),男,河南平顶山人,高级工程师,博士。E-mail:jkhani5@163.com

引用格式:王龙,夏永俊,韩金克,等.660 MW 超超临界燃煤机组脱硫废水雾化蒸发零排放系统运行对锅炉热效率的影响[J].洁净煤技术,2024,30(S1):399-405.

WANG Long, XIA Yongjun, HAN Jinke, et al. Effects on the boiler's thermal efficiency of running a zero-discharge desulfurization wastewater atomization evaporation system for 660 MW ultra-supercritical coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(S1): 399-405.

obtained by the counter balance calculation method, and the air preheater performance was evaluated under each working condition according to the results of the calculation of the combined cold end temperature and air preheater performance correction. The results show that under 400 MW, the thermal efficiency is 95.11% when the evaporation system is out of operation, 95.08% when the evaporation system is in operation, and the boiler thermal efficiency is reduced by 0.03% after system operation. The system could evaporate 4.72 m³/h wastewater of under 400 MW after operation, and 6.93 m³/h under 660 MW. The system can extract less flue gas to treat more desulfurization wastewater under the high load, it is more favorable to put the system into operation. The carbon content of the ash slag has changed after the system is put into operation, which indicates that the system operation will have an impact on boiler combustion. While the system is in operation, the combined temperature of the cold end of the air preheater is lower, and it is necessary to pay attention to the air preheater differential pressure during the operation, to avoid the occurrence of air preheater blockage that will jeopardize the safe operation of the unit.

Key words: desulfurization wastewater; atomization evaporation; thermal efficiency; air preheater

0 引言

石灰石-石膏湿法脱硫是我国大型燃煤机组最主要的脱硫技术^[1]。为保证系统稳定运行与石膏品质,需从系统中排出部分浆液,即脱硫废水,废水含盐量高、悬浮物多并且含有重金属,属于严格管控的污染物,必须进行净化处理,实现脱硫废水零排放对环境保护至关重要。目前,脱硫废水零排放工艺一般会对脱硫废水进行预处理^[2],即通过三联箱工艺实现 pH 调节,部分污染物的去除。预处理后再通过蒸发结晶技术或者热烟气蒸发技术实现零排放,蒸发结晶技术主要分为多效蒸发^[3]和机械式蒸汽再压缩蒸发^[4],这两种工艺占地面积较大,投资费用高。热烟气蒸发技术^[5]主要有主烟道蒸发技术、旁路烟道蒸发技术、旋转雾化蒸发技术。热烟气蒸发是通过烟道中的高温烟气作为热源对脱硫废水进行蒸发处理,其中旋转雾化蒸发技术^[6]通过建立独立的废水干燥塔,从空预器前主烟道引入烟气,同时在塔内通过雾化器对废水进行雾化,强化废水与烟气的传热,然后烟气返回空预器后主烟道进行后续处理。该方法避免了在主烟道蒸发造成腐蚀^[7],综合性强、成本低、系统稳定可靠,因此在燃煤电厂中有广泛应用。

国家发改委在《锅炉绿色低碳高质量发展行动方案》中指出,在锅炉污染物治理水平全面提升的同时,到 2025 年电站锅炉平均运行热效率较 2021 年提高 0.5 个百分点,这对电厂的节能提效提出了新的考验。由于蒸干系统从空预器前抽取了部分高温烟气,这使得空预器无法利用该部分烟气的热量,因此需要评估系统运行对锅炉热效率的影响。

目前关于热烟气蒸发技术的研究主要有数值模拟研究与实验研究^[8-9]。部分研究主要是关注烟气温度、烟气流速、废水物性等参数对蒸发特性的影响。研究^[10]表明提高引入烟气的温度有助于减少液滴蒸发时间,提高蒸发效率。烟气流速也会影响

废水液滴蒸发,但影响程度小于烟气温度^[11]。但是烟气的温度与流速不是越高越好,需要将烟气量的影响纳入考量^[12]。部分研究认为抽取的高温烟气造成热量损失,所以蒸干系统运行会导致的锅炉热效率降低。对于 330 MW 机组,旋转雾化蒸干系统从空预器入口抽取 2.27% 的烟气,蒸发了 2.16 t/h 的脱硫废水,但是锅炉效率也因此降低了 0.27%^[13]。这表明蒸干系统的投运会对锅炉热效率产生负面影响。并且有研究^[14]表明,随着机组负荷增加空预器入口烟气温度增大,烟气量也增多,此时处理相同废水需要抽取的烟气比例减少。

从一系列研究中可以看出,从烟道中抽取部分烟气来蒸干废水会对锅炉效率产生影响,并且随着负荷改变影响程度也会发生变化。但是目前多数研究主要是数值模拟计算以及搭建实验平台,研究对象多为 330 MW 左右的机组,煤电未来的发展方向为更大负荷的大中型机组,现有研究并未进一步分析不同机理对大中型机组锅炉热效率影响的贡献,且缺少对热效率影响的现场实验研究。

本研究在 660 MW 超超临界燃煤机组上开展实验,通过分别测量 400 MW 和 660 MW 运行负荷下脱硫废水雾化蒸发处理系统投运前后锅炉热效率,研究脱硫废水处理系统投运对锅炉热效率影响,分析高温烟气热量损失、空预器排烟温度变化等因素对锅炉热效率影响,并分别计算不同影响机理对锅炉热效率影响的贡献比例。在锅炉热效率分析中,为了更好的反映热损失真实情况,对旁路烟道的烟气成分比例进行修正。而且由于废水干燥塔烟气重新进入尾部烟道,现场测量的排烟温度并非主烟道排烟的真实温度,在分析过程中同时对排烟温度进行修正。

1 系统概况

某电厂 2×660 MW 机组设置脱硫废水旁路烟气蒸干系统,如图 1 所示,该系统由废水输送系统、烟

气系统、喷雾干燥系统、塔底输灰系统等组成。

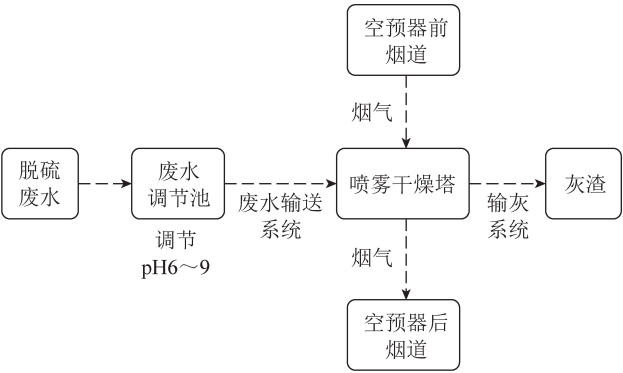


图 1 蒸干系统运行流程

脱硫废水进入调节池将 pH 调整在 6~9,再由废水输送泵送至干燥塔经离心雾化器雾化,同时与空预器前烟道引入的高温烟气充分接触,雾滴中水分蒸干,盐类干燥析出,部分混入烟气中回到主烟道,大部分流入蒸干塔底部由输灰系统运出。

旁路烟气蒸干系统现场如图 2 所示,蒸干塔由直筒段和锥体段组成,直筒段直径 9.2 m、高度 12.3 m,锥体段高度 7.8 m。烟气从空预器前两侧烟道引出,烟道中烟气汇合后进入蒸干塔,再由出口重新回到空预器后主烟道。该系统中废水输送泵出力 10 m³/h,系统最大处理废水量 7.2 t/h,处理后干渣含水率小于 2%。



图 2 雾化蒸干系统现场

2 实验条件与测量方法

本次实验的工况为 400 MW(投运蒸干系统)、400 MW(退蒸干系统)、660 MW(投运蒸干系统)。通过对入炉煤、飞灰、炉渣等进行样品采集并化学分析,及在工况条件下对烟气成分、烟气温度等进行现

场测量,得到锅炉热效率与有关计算所需的相关数据,具体测量方法:入炉煤在达到实验条件后在投入运行的各煤仓分别取样,根据投入运行的比例进行掺混。飞灰和炉渣均在负荷稳定半小时后进行收集。收集的样品进行化学分析,入炉煤进行元素分析与工业分析,飞灰与炉渣进行含碳量分析。

烟气数据测量位置在空气预热器出口尾部烟道,实验采用网格法进行取样测量。烟气成分由 Optima7 便携式手持烟气分析仪进行测量,获取烟气中 O₂ 与 CO 浓度,烟气温度由 K 型热电偶(WRNK-193)测量获得。其他计算所需数据由电厂 SIS 系统获取。

3 实验数据计算方法

为分析机组的运行情况,根据实验数据通过 GB/T 10184-2015《电站锅炉性能试验规程》进行热效率计算。

在系统投运的条件下,旁路从主烟道引出部分烟气,该部分烟气以排烟热损失的形式离开锅炉系统,此时热损失的计算中增加一项旁路排烟热损失。

旁路烟道热损失计算公式:

$$Q_{\text{loss}} = V_{\text{fg}} c_{\text{p,fg}} (t_{\text{en}} - t_{\text{re}}) + V_{\text{wv}} c_{\text{p,wv}} (t_{\text{en}} - t_{\text{re}}), \quad (1)$$

式中, Q_{loss} 为旁路烟道引入烟气带走的热量,kJ; V_{fg} 为干烟气的体积,m³; $c_{\text{p,fg}}$ 为干烟气从 t_{re} 至 t_{en} 的定压比热容,kJ/(m³·K); V_{wv} 为烟气中水蒸气体积,m³; $c_{\text{p,wv}}$ 为水蒸气从 t_{re} 至 t_{en} 的定压比热容,kJ/(m³·K); t_{en} 为旁路入口烟气温度,℃; t_{re} 为基准温度,℃。

其中,干烟气比热容计算公式:

$$c_{\text{p,fg}} = \sum_i c_{\text{p,i}} \frac{\varphi_{\text{i,fg}}}{100}, \quad (2)$$

式中, $c_{\text{p,i}}$ 为单个烟气成分从 t_{re} 至 t_{en} 的定压比热容,kJ/(m³·K); $\varphi_{\text{i,fg}}$ 为烟气成分的体积分数,%。

根据《电站锅炉性能试验规程》中的计算公式得到的烟气中各成分的体积分数为空预器出口的烟气成分,考虑到空预器中一二次风向烟气侧漏入空气,因此对旁路入口烟气成分修正为空预器前烟气成分:

$$\varphi_{\text{p,i}} = \varphi_{\text{lv,i,fg}} (1 + \eta) - \varphi_{\text{air,i}} \eta, \quad (3)$$

式中, $\varphi_{\text{lv,i,fg}}$ 为空预器出口烟气成分的体积分数,%; $\varphi_{\text{air,i}}$ 为空气中各组分的体积分数,%; η 为空预器漏风率。

由于现场排烟温度测量位置在主烟道与旁路烟道混合之后,测量的温度为两路烟气混合后的温度,因此对主烟道的排烟温度进行修正,其计算公式:

$$V_{b.lv}c_{b.lv}T_{b.lv}+V_{p.lv}c_{p.lv}T_{p.lv}=(V_{b.lv}+V_{p.lv})c_{out}T_{out}\circ$$

(4)

其中, V 为烟气体积, m^3 ; c 为定压比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; 下标 $b.lv$ 为旁路出口位置; 下标 $p.lv$ 为混合前空预器出口位置; 下标 out 为主旁路烟气混合后测量点位置。由于比热与温度有关, 计算时通过假设混合前空预器出口烟气温度, 进行迭代计算。

考虑到在系统投运后烟气温度、烟气流量等参数的变化, 为分析实验期间空预器性能, 根据 DL/T 2051—2019《空气预热器性能试验规程》对烟气温度进行修正, 并根据温度修正结果进行热效率的修正计算。

4 结果分析

4.1 脱硫废水样品分析

2023 年 10 月—2023 年 12 月期间对脱硫废水进行了水质检测, 脱硫废水水质情况见表 1。

表 1 脱硫废水水质情况

项目	单位	含量
pH		8.40~8.87
悬浮物	mg/L	>750
COD	mg/L	957~4 908

从表 1 数据可以看出, 脱硫废水偏碱性, 悬浮物含量高, 化学需氧量 COD^[15] 超标, 这表明石灰浆液在吸收塔中经过对烟气多次循环吸收, 水质污染严重。

4.2 蒸干系统对热效率的影响

为探究实验测量探究蒸干系统运行对热效率的影响, 调取了各实验期间 60 min 的负荷变化。

如图 3 所示, 实验期间机组负荷波动较小, 系统退出实验期间机组负荷平均值为 399.6 MW, 系统投运实验期间机组负荷平均值分别为 399.6、659.7 MW, 实验期间机组负荷波动小于 1%, 对实验测量影响很小, 保证了实验测量的可靠性。

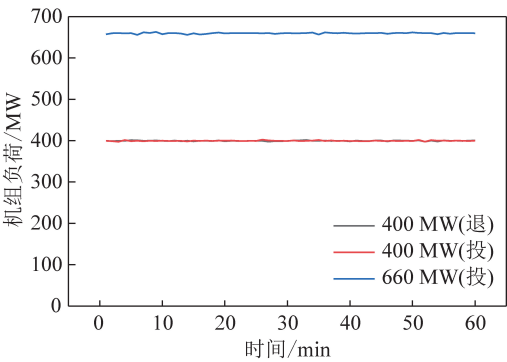


图 3 实验期间机组负荷变化曲线

入炉煤、飞灰、炉渣的分析结果见表 2。400 MW 下系统投运与系统退出的实验期间使用同一班组的人炉煤, 660 MW 实验下使用不同班组入炉煤, 但根据煤质分析结果来看, 入炉煤含碳量十分接近, 且低位发热量等各项指标均相近, 很大程度上减少因煤质不同给实验带来的影响。

表 2 煤灰渣化验分析结果

项目	单位	400 MW (退)	400 MW (投)	660 MW (投)
碳	%	57.92	57.92	57.96
氢	%	3.50	3.50	3.62
氧	%	7.81	7.81	8.45
氮	%	1.07	1.07	1.32
硫	%	1.45	1.45	0.82
全水分	%	10	10	11
水分	%	1.82	1.82	1.78
灰分	%	18.35	18.35	16.84
低位发热量	kJ/kg	22 399	22 399	22 320
飞灰可燃物含量	%	0.71	0.57	0.86
炉渣可燃物含量	%	2.39	1.41	4.06

实验期间在空预器后尾部烟道测量的烟气数据见表 3, 在系统投运下测量的烟气温度为主烟道烟气与旁路烟道烟气混合后的烟气温度, 系统退出时旁路烟道关闭, 此时的主烟道烟气温度为实际的排烟温度。

表 3 烟气测量结果与空预器漏风率数据

项目	单位	400 MW (退)	400 MW (投)	660 MW (投)
O ₂ 含量	%	5.07	5.34	3.33
CO 含量	10 ⁻⁶	110	40	1 110
CO ₂ 含量	%	14.23	13.99	15.85
烟气温度	℃	111.3	107.2	108.6
空预器漏风率	%	4.60	4.60	4.32

图 4 展示了系统投运时 400 与 660 MW 工况下蒸干塔旁路入口与出口烟气温度。可知蒸干塔入口从空预器前主烟道引入烟气, 400 MW 工况下旁路入口烟温在 320 $^{\circ}\text{C}$ 左右。随着负荷增大, 660 MW 工况旁路入口烟温在 333 $^{\circ}\text{C}$ 左右。蒸干塔出口烟温可以根据雾化废水流量来进行调节, 在两个负荷条件下, 蒸干塔出口烟气温度均控制在 160 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 该部分烟气重新回到主烟道进行后续处理。

系统投运期间的运行参数见表 4, 可以看出, 660 MW 负荷下, 蒸干塔入口抽取烟气平均温度比 400 MW 负荷下入口平均烟温高 14.14 $^{\circ}\text{C}$, 两个工况

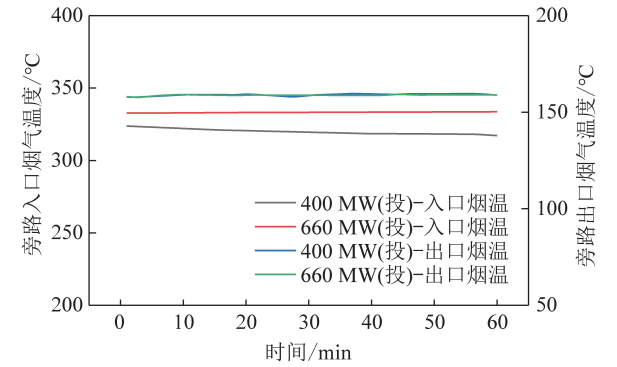


图 4 蒸干塔出入口的烟温变化曲线

下出口平均烟温差异小于 1℃。并且从抽气比例与处理废水流量数据来看,660 MW 负荷相比于 400 MW 负荷下,蒸干系统从主烟道中烟气抽取比例更小,但烟气总量更大,处理的废水量也更多。这是由于高负荷下,入口烟气温度高,进出口温差大,烟气流量多,向雾化废水传递的热量多,因此处理废水流量更大。

表 4 系统投运期间运行参数

项目	单位	400 MW(投)	660 MW(投)
给煤量	t/h	144.09	231.58
入口平均烟温	℃	319.08	333.22
出口平均烟温	℃	160.47	159.85
入口抽气比例	%	2.91	2.80
蒸干塔出口烟气量	m ³ /h	44 153.37	61 696.94
出口烟气压力	kPa	-1.53	-2.3
雾化废水流量	m ³ /h	4.72	6.93

根据系统投运期间运行参数与实验测量数据,对主烟道排烟温度进行修正,并对锅炉热效率进行计算,结果如图 5 所示。

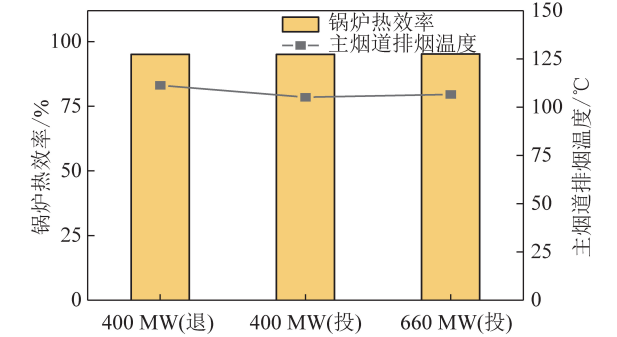


图 5 锅炉热效率与修正排烟温度

从图 5 可以看出,400 MW(退)、400 MW(投)、660 MW(投)工况下的锅炉热效率分别为 95.11%、95.08%、95.24%。400 MW(投)、660 MW(投)工况下修正排烟温度为 105.15、106.62℃,相较于现场测量温度分别降低了 2.05、1.98℃。热效率的计算结果表明,系统的投运直接从空预器前引出部分高温

烟气,该部分烟气以排烟热损失的形式离开了锅炉系统。在 400 MW,系统的投运增加了 0.03% 的热损失,锅炉热效率略微降低。在 660 MW,系统投运虽然也带来了热损失,但锅炉热效率为 95.24%,高于 400 MW 时的热效率。

图 6(a)展示了 3 种实验条件下的各项热损失值,图 6(b)为各项热损失的占比情况,可以看出,锅炉的热损失中排烟热损失占比是最大的,3 种实验条件下总排烟热损失占比均大于 85%,是锅炉热损失的主要原因。从图 6(a)可以看出,系统投运后,主烟道的排烟热损失明显降低,这是因为蒸干塔从空预器前主烟道抽取了部分烟气,使得主烟道烟气量降低,且从修正后的排烟温度来看,相较于系统不投运,系统投运后主烟道排烟温度更低,这使得系统投运后主烟道排烟热损失明显降低。但从旁路排烟热损失来看,该部分高温烟气携带大量热量离开锅炉系统,这反而使得系统投运后总排烟热损失高于系统退出时的总排烟热损失。从 400 和 660 MW 系统投运下的结果来看,虽然 660 MW 负荷下旁路入口烟温高于 400 MW 下的烟温,但由于抽气比例更低,因此旁路排烟热损失更小。

从图 6 中不完全燃烧损失所占比例与表 2 中灰渣的含碳量分析结果来看,在 400 MW 负荷下,相比于系统退出下,系统投运时灰渣含碳量更低,不完全燃烧热损失更小。这可能是因为系统的投运影响了空预器对一二次风的换热,进而影响炉膛内煤粉的燃烧。同样在系统投运的情况下,660 MW 负荷下的灰渣含碳量比 400 MW 下更高,这表明此时煤粉燃烧效果更差,但是因为热损失影响程度最大的排烟热损失更小,反而该工况下热效率更高。

从以上分析结果来看,系统的投运会影响炉膛内煤粉的燃烧,在不同的负荷下影响程度也存在差异。并且系统的投运会增大总体的排烟热损失,降低锅炉热效率,增加的热损失主要是来自高温烟气热量损失。在高负荷下投运系统,因为主烟道烟温更高,烟气量更大,因此可以用更小的抽气比例实现更多脱硫废水的蒸发干燥,这也意味着以更小的热损失代价换取更高的废水蒸干效率,更有利于锅炉的安全高效运行。

4.3 蒸干系统对空预器性能的影响

系统的投运不仅会增大热损失降低锅炉热效率,还可能会影响空预器的运行。因此为了评价系统投运下的空预器性能,本文根据测量结果计算空预器冷端综合温度,再根据空预器进口空气温度变化、进口烟气温度变化、进口烟气流量变化等因素,

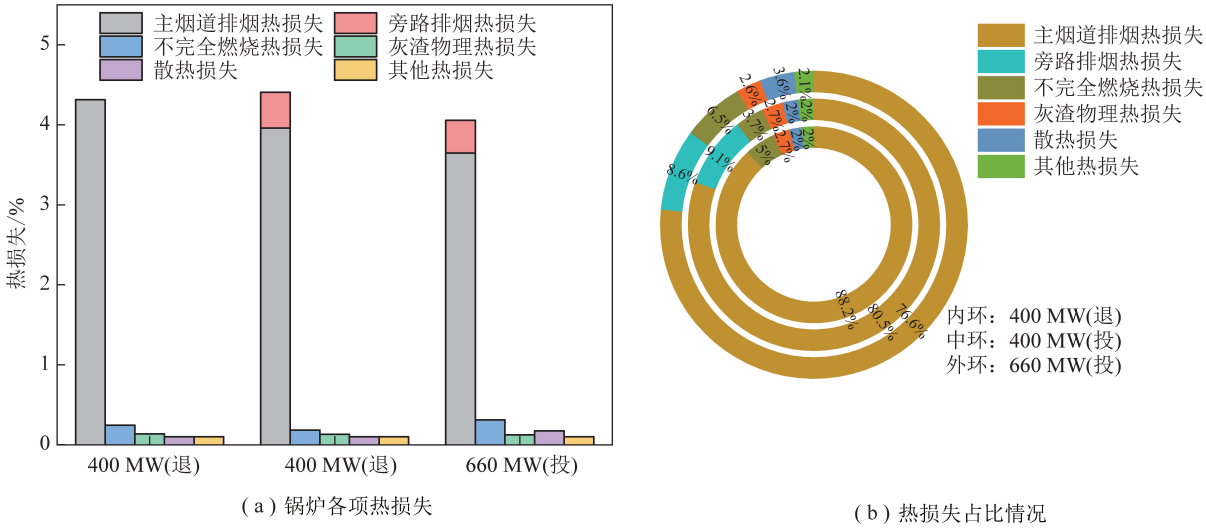


图 6 锅炉各项热损失和热损失占比情况

对空预器出口烟气温度进行修正。

空预器冷端综合温度与烟气温度修正数据见表 5,该空预器冷端综合温度为空预器出口排烟温度与二次风入口温度之和。可以看出,在 400 MW 负荷,系统是否投运,冷端综合温度均在 130 ℃ 以上,660 MW 系统投运工况下,冷端综合温度为 124.8 ℃,小于 130 ℃,这可能会导致空预器堵塞,不利于长期运行。这是因为 SCR 脱硝系统的运行会产生黏性大、腐蚀性强的硫酸氢铵 (NH_4HSO_4)^[16-17],会黏附烟气中的飞灰,引起空预器的堵塞与腐蚀。硫酸氢铵的露点在 147 ℃,一般以液滴形式分散在烟气中。通常来讲,硫酸氢铵的露点与所处的工况有关,硫酸氢铵导致的空预器堵塞与锅炉运行参数有关^[18]。入炉煤的硫含量与水分高会导致硫酸氢铵在空预器冷端的露点增大,此时容易导致积灰堵塞和低温腐蚀^[19-20]。本实验所用入炉煤硫含量在 0.5%~1.5%,空预器说明书推荐冷端综合温度为 145~150 ℃。显然实验期间该运行参数明显低于推荐值,特别是在 660 MW 工况下的冷端综合温度,比 400 MW (投)工况下冷端综合温度低了大约 10 ℃。这是因为在 660 MW 负荷下二次风入口温度低于 400 MW 负荷下的二次风温。若长期在低冷端综合温度下运行,必然会导致空预器的运行阻力增大,危害机组安全运行。

表 5 空预器冷端综合温度与空预器性能修正				
项目	单位	400 MW(退)	400 MW(投)	660 MW(投)
冷端综合温度	℃	137.4	134.3	124.8
烟气温度修正	℃	133.0	133.9	145.5
热效率修正	%	94.01	93.64	93.47

表 5 中空预器烟气温度修正是指运行工况参数偏离设计工况时,为了更好的比较空预器性能,需根 404

据实验工况进行温度修正。特别是在本实验中,系统从主烟道中抽气,导致主烟道烟气流量改变,可以给一二次风传递的热量也发生改变,很大程度上影响空预器性能。从修正结果来看,各实验工况下烟气温度相比于修正前均有不同程度的增加。在偏离设计工况的因素中,进口烟气流量的变化对烟气温度修正的影响最大。其中 660 MW 负荷下,考虑进口烟气流量变化的修正值达到了 26.8 ℃。在 400 MW 负荷,系统投运与系统退出的情况下排烟温度差别不大。从根据修正后的烟气温度进行热效率的计算结果来看,在同负荷下,系统投运时热效率要比系统退出时的热效率低 0.37%,因为修正到设计工况的排烟温度相差很小,所以该部分热损失主要是系统抽取的烟气造成的排烟热损失。而在系统投运情况下,660 MW 负荷的修正热效率比 400 MW 负荷的修正热效率低 0.17%,这主要是因为 660 MW 下的修正排烟温度明显更高,主烟道的排烟热损失更大。

可以看出,废水蒸干系统运行会对空预器的性能造成影响,使空预器偏离设计工况运行的因素增加,对排烟温度影响程度较大。特别是高负荷下投运系统,虽然造成的热损失更小,但积灰与腐蚀的风险也在增大,需注意空预器的运行参数,保证长期的安全稳定运行。

5 结 论

1)在 400 MW 负荷下,系统从主烟道抽取了 3.3%的烟气,处理废水 4.72 m³/h。系统的投运使锅炉热效率从 95.11%降至 95.08%,降低了 0.03%的锅炉热效率。

2)600 MW 负荷下,系统抽取 2.8%烟气处理了

6.93 m³/h 的废水,以更低的热损失代价处理了更多的脱硫废水,高负荷时运行废水蒸干系统更为有利。

3)运行蒸干系统可能会影响锅炉内煤粉的燃烧,并且降低空预器出口排烟温度影响空预器性能,运行时需注意空预器堵塞与腐蚀的危害,保证锅炉的安全稳定运行。

参考文献:

[1] AN W, ZHAO J, LU J, et al. Zero-liquid discharge technologies for desulfurization wastewater: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115953.

[2] 闫卫军. 煤化工企业脱硫废水零排放工艺研究 [J]. *山西化工*, 2023, 43(12): 189-190,212.

[3] SHUANGCHEN M, JIN C, GONGDA C, et al. Research on desulfurization wastewater evaporation: Present and future perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 1143-1151.

[4] KARLSSON E, GOURDON M, OLAUSSON L, et al. Heat transfer for falling film evaporation of black liquor up to very high Prandtl numbers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 907-918.

[5] ZHOU H, SONG Y, WU Q. Application of magnified digital in-line holography (MDIH) to the measurement of the evaporation process of desulfurization wastewater droplets in a high-temperature gas flow [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120307.

[6] SUN Z, CHEN H, ZHAO N, et al. Experimental research and engineering application on the treatment of desulfurization wastewater from coal-fired power plants by spray evaporation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40: 101960.

[7] DENG J J, PAN L M, CHEN D Q, et al. Numerical simulation and field test study of desulfurization wastewater evaporation treatment through flue gas [J]. *Water Science and Technology*, 2014, 70(7): 1285-1291.

[8] HU X, JI Z, GU S, et al. Mapping the research on desulfurization wastewater: Insights from a bibliometric review (1991-2021) [J]. *Chemosphere*, 2023, 314: 137678.

[9] LI C, DENG T, WEN Z, et al. Evaporation experiment and numerical simulation study of desulfurization wastewater in high-temperature raw gas [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2019, 146: 117-129.

[10] LIU X, BU S, ZHANG L, et al. Experimental and numerical investigation on evaporation characteristics of high salinity wastewater by rotary spray [J]. *Desalination*, 2021, 517: 115263.

[11] 吴一帆, 赵爽, 崔一尘, 等. 脱硫废水烟道雾化蒸发的数值模拟研究 [J]. *山西电力*, 2023(5): 59-64.

[12] 凌卫平, 虞斌, 许蕾, 等. 脱硫废水高温旁路干燥塔蒸发系统仿真研究 [J]. *石油化工设备*, 2024, 53(1): 7-13.

[13] 余晓利, 潘卫国, 王程瑶, 等. 脱硫废水旁路塔雾化蒸发数值模拟 [J]. *中国电力*, 2019, 52(1): 129-136.

[14] 余晓利. 燃煤电厂脱硫废水旁路塔雾化蒸发技术研究[D]. 上海:上海电力大学,2019.

[15] JIN H, LIU C, CHEN S. Why is COD pollution from Chinese manufacturing declining? —The role of environmental regulation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 373: 133808.

[16] MENASHA J, DUNN-RANKIN D, MUZIO L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a bench-scale single-channel air preheater [J]. *Fuel*, 2011, 90(7): 2445-2453.

[17] BAO J J, MAO L, ZHANG Y H, et al. Effect of Selective Catalytic Reduction System on Fine Particle Emission Characteristics [J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(2): 1325-1334.

[18] ZHANG K, XUE F, WANG Z, et al. Research on prediction model of formation temperature of ammonium bisulfate in air preheater of coal-fired power plant [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 48: 202-210.

[19] QING M, ZHANG X, LEI S, et al. Insights into the deposition and transformation characteristics of ammonium bisulfate on the fly ash as the by-product of SCR in air preheater [J]. *Fuel*, 2022, 324: 124582.

[20] ZHENG C, WANG Y, LIU Y, et al. Formation, transformation, measurement, and control of SO₃ in coal-fired power plants [J]. *Fuel*, 2019, 241: 327-346.