

褐煤预干燥协同烟气深度治理 一体化系统设计

李楠¹, 孟令海¹, 宦宣州¹, 王定帮¹, 聂家强², 余福胜¹, 牛拥军¹, 雷鸣¹,
王志超¹

1 西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710054;

2 华能武汉发电有限责任公司, 湖北 武汉 430000

System Design of FGD advanced treatment technologies Based on Lignite Pre-drying and Waste Heat Recovery from Dryer Exhaust

LI Nan¹, MENGLinghai¹, HUAN Xuanzhou¹, WANGDing-bang¹, YU Fusheng¹, NIU Yongjun¹, LEI Ming¹,
WANG Zhichao¹

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co.,Ltd., Xi'an710054, China) .

摘要: 本文提出了一套褐煤干燥协同湿法脱硫烟气深度治理的一体化系统,建立了褐煤干燥能量转换分析模型,并对湿法脱硫烟气深度治理进行理论分析。通过褐煤干燥系统方案和湿法脱硫烟气深度治理系统方案选取分析,明确了采用利用汽轮机低压抽汽干燥褐煤和利用褐煤干燥后的乏气进行脱硫后烟气再热的深度治理路线。通过系统评估分析,得出结论:采用汽轮机抽汽为热源,将褐煤的水分由37.6%分别干燥至25%、20%、15%时,某660MW褐煤发电机组发电系统供电煤耗相比直接燃烧可降低6.49g/(kW·h)、7.89g/(kW·h)和9.08g/(kW·h)。以褐煤水分干燥至15%时为例,机组净烟气温度由57℃降低50.5℃,采用干燥乏气进行烟气再升温至70℃时,乏气可满足湿法脱硫后烟气的加热需求,同时可回收冷凝水19.4t/h。

关键词: 褐煤干燥; 烟气; 深度治理; 干燥乏气

ABSTRACT: A integration system of FGD advanced treatment technologies based on lignite pre-drying and waste heat recovery was proposed in this paper. Thermodynamic models of lignite pre-drying was developed, as the advanced treatment technologies were theoretical analyzed. Through the selection and analysis of lignite drying system and wet desulfurization flue gas treatment system, the technical route of deep desulfurization flue gas treatment using steam turbine low-pressure steam extraction and drying lignite and condensation and reheating wet desulfurization is defined. Through the system evaluation, it is concluded that when the moisture of lignite is dried from 37.6% to 25%, 20% and 15% by steam extraction, the consumption of coal for a lignite generating set can be reduced by 6.49g/(kW·h), 7.89g/(kW·h) and 9.08g/(kW·h). As the lignite moisture drying up to 15%, the dried waste gas is used to heats up the flue gas to 70℃, the waste gas can meet the heating demand of the flue gas after wet desulfurization, and the 19.4t condensed water can be recovered at the same time.

KEY WORD: Lignite Pre-drying; flue gas; advanced treatment; dryer exhaust

1 前言

褐煤作为国内燃煤机组主要动力煤种,是煤化程度最低的矿产煤,具有水分高(30%-60%)、挥发分高、热值低等特点。我国已探明褐煤保有储量1300亿吨,占全国煤炭储量的13%。褐煤在我国电力行业主要用于直接燃烧发电,而直接燃用烟气含湿量大导致褐煤机组更易出现的“烟囱雨”、“烟羽严重”等现象,同时烟气携带的可溶性颗粒物对周边环境的影响也大于同等机组。因此,如何高效环

保利用褐煤进行发电,实现褐煤发电技术的节能环保,是当前和今后我国火力发电行业无法规避和必然面对的挑战。

针对火电机组高效燃用褐煤的诸多问题,国内外学者有研究通过对采用汽轮机抽汽^[1]和锅炉烟气为热源^[2-4]的褐煤预干燥发电系统节能潜力进行定量分析,发现褐煤预干燥可以显著提高褐煤发电效率,而燃煤发电系统中的大量低品位能源可以满足褐煤干燥过程的需要,如锅炉尾部高温烟气、汽轮

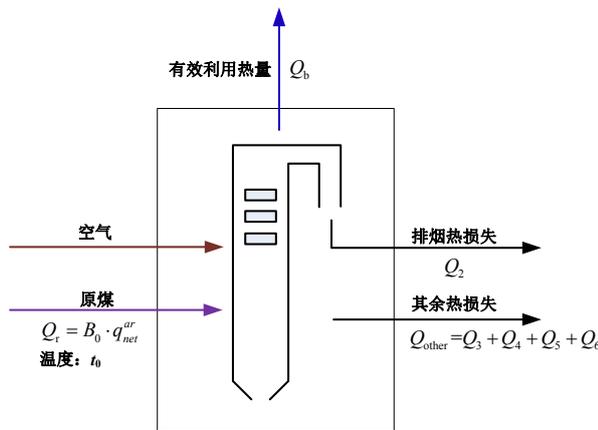
2.1.2 锅炉本体模型

燃预干燥褐煤锅炉本体效率以褐煤直接燃烧发电系统效率为基础计算得到。直接燃褐煤锅炉本体示意图如图 2 (a) 所示, 锅炉本体存在以下热平衡关系:

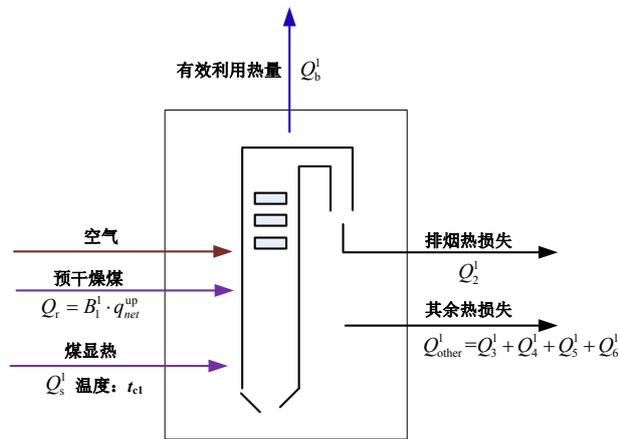
$$Q_b = B_0 \cdot q_{net}^{ar} \cdot \eta_b \quad (1-2)$$

锅炉热效率可以表示为:

$$\eta_b = 1 - q_2 - q_{other} \quad (1-3)$$



(a)直接燃褐煤发电系统



(b)蒸汽干燥褐煤发电一体化系统

图 2 锅炉热平衡示意图

Fig. 2 heat balance diagram of boiler

褐煤预干燥后, 锅炉烟气量下降、排烟温度降低, 计算蒸汽干燥褐煤发电一体化系统锅炉本体效率, 假定除排烟热损失外, 其他损失保持不变。蒸汽干燥褐煤发电一体化系统锅炉热平衡图如图 2 (b) 所示。

假定蒸汽干燥褐煤发电一体化系统的锅炉本体中除排烟热损失外与直接燃褐煤发电系统相同。通过对比可以得到, 蒸汽干燥褐煤发电一体化系统锅炉本体效率为:

$$\eta_b^1 = 1 - q_2^1 - q_{other}^1 + q_s \quad (1-4)$$

锅炉排烟热损失为末级热交换器后排出烟气带走的物理显热占输入热量的百分率, 计算公式如下:

$$q_2^1 = \frac{Q_2^1}{Q_{net}^{up}} \times 100 = Q_2^{gy} + Q_2^{H_2O} \quad (1-5)$$

式中: Q_2^{gy} 为干烟气带走的热量, kJ/kg; $Q_2^{H_2O}$ 为烟气所含水蒸气的显热, kJ/kg。

干烟气带走的热量为:

$$Q_2^{gy} = m_{gy} C_{p,gy} (\theta_{py} - t_k) \quad (1-6)$$

式中: Q_2^{gy} 为干烟气带走的热量, kJ/kg; θ_{py} 为排烟温度, $^{\circ}\text{C}$; $C_{p,gy}$ 为干烟气从 t_k 至 θ_{py} 的平均定压比热, kJ/(kg·K);

烟气中水蒸气带走的显热为:

$$Q_2^{H_2O} = m_{H_2O} C_{p,H_2O} (\theta_{py} - t_k) \quad (1-7)$$

式中: $Q_2^{H_2O}$ 为烟气中所含水蒸气热量, kJ/kg; C_{p,H_2O} 为水蒸气从 t_k 到 θ_{py} 温度间的平均定压比热, kJ/(kg·K)。

褐煤经干燥机后本身温度升高, 其显热增加量表示为:

$$\Delta Q_s = B_1 \cdot (1 - \lambda) \cdot c_{cup} \cdot (t_{c1} - t_0) \quad (1-8)$$

式中: c_{cup} 表示预干燥褐煤比热, kJ/(kg· $^{\circ}\text{C}$);

t_{c1} 、 t_0 分别表示预干燥褐煤温度和环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

因此, 有:

$$q_s = \frac{Q_s}{Q_{net}^{up}} \times 100 \quad (1-9)$$

2.1.3 汽轮机系统模型

在褐煤预干燥协同湿法脱硫烟气深度治理一体化系统中, 汽轮机回热抽汽经干燥机后凝结, 凝结水返回汽轮机回热系统(除氧器或凝汽器)中。其中, 凝结水返回除氧器时需增加疏水泵, 项目计算了疏水泵的影响情况, 计算结果表明疏水泵耗功引起的作功能力变化量约占褐煤抽汽干燥系统新蒸汽作功能力的 0.15%, 因此这部分影响忽略不计。

忽略干燥抽汽在蒸汽干燥机中的工质损失, 干燥抽汽完全凝结后返回汽轮机回热系统。因此, 干燥凝结水量及所占新蒸汽的份额同样分别为 D_{sd} 。

汽轮机回热抽汽进入蒸汽干燥机释放热量后冷凝为饱和水, 干燥凝结水返回汽轮机回热系统。若干燥凝结水返回除氧器, 相当于带热量的工质进入系统, 会使单位新蒸汽的作功能力增加。利用回热加热器热平衡关系可以得到加热器抽汽量的变化量 ΔD_j 。进而得到这些抽汽量变化引起的作功变化量 ΔW_j :

$$\Delta W_j = \Delta D_j \cdot (h_j - h_n) \quad (1-10)$$

由此, 得到凝结水返回除氧器时引起的汽轮机内功率的变化量:

$$\Delta W_2 = D_{sd} \cdot (h_f - h_n) - \sum_{j=1}^k \Delta W_j \quad (1-11)$$

此时, 汽轮机组发电功率的变化量可以表示为:

$$\Delta Pe_2 = \Delta W_2 \cdot \eta_m \cdot \eta_e \quad (1-12)$$

利用以上模型得到汽轮发电机组效率为:

$$\eta_{zz}^1 = \frac{Pe - \Delta Pe}{Q_0} \quad (1-13)$$

汽轮机装置绝对内效率为:

$$\eta_i^1 = \frac{\eta_{zz}^1}{\eta_m^1 \cdot \eta_g^1} \quad (1-14)$$

2.2 湿法脱硫烟气深度治理理论分析

随着燃煤电厂超低排放的完成, 燃煤电厂湿法脱硫排放的烟气中仍携带部分尚未得到有效监测的溶解性盐及细微颗粒, 会对湿烟羽排放机组周边环境带来一定影响。由于褐煤机组湿法脱硫后烟气常采用湿烟囱排放, 烟气具有蒸发量大、排烟温度及含湿量高的特点, 褐煤机组出现的“烟囱雨”以及“烟羽”造成的视觉污染现象尤其严重, 同时由于, 导致烟气抬升高度较低, 烟气不能快速扩散^[11]。故对于湿法脱硫后烟气深度治理的意义在于:

1) 降低可凝结颗粒物排放;

传统颗粒物采样结果仅为可过滤颗粒物浓度(FPM), 而并非烟气中实际颗粒物总浓度。根据美国环保署的 Method202 对可凝结颗粒物做出如下定义: 属于固定排放源的一次排放颗粒物, 在烟道状态下烟气中以气态形式存在, 经烟囱排放到大气环境中立即经冷凝或反应变为固态或液态颗粒物。可凝结颗粒物冷凝核通常在 $1 \mu m$, 属于 PM2.5。

2) 通过烟气冷凝液吸附少量如 SO_2 、粉尘等污染物, 进一步降低烟气中常规污染物如 SO_2 、粉尘等排放量;

3) 提升烟气抬升高度, 增强烟气扩散能力, 消除“烟囱雨”、“湿烟羽”等现象, 减缓甚至消除对于电厂周边环境的影响。

4) 降低燃煤机组工艺水耗量, 达到节水节能的目的。

烟气深度治理的常见路线有脱硫后净烟气再加热路线、脱硫后净烟气冷凝降温路线以及脱硫后净烟气冷凝再热路线。净烟气冷凝路线可通过烟气降温冷凝, 冷凝液溶解部分 SO_2 及可凝结性颗粒物, 实现烟气中污染物的协同脱除及降低系统蒸发量, 减少工艺水的补入; 而烟气加热可通过提升烟气抬升高度, 增强烟气扩散能力。

与常规的烟气深度治理路线相比, 褐煤预干燥的技术路线可通过降低入炉煤的水分的方式达到降低烟气含湿量的目的, 同时由于入炉煤水分的降低, 烟气温度降低, 有利于浆液中 SO_2 的吸收, 因此湿法脱硫装置的脱硫效率可得到有效提升^[10]。因此褐煤机组在烟气深度治理方面存在巨大潜力。

综上, 褐煤预干燥协同烟气深度治理系统既能实现了锅炉效率与脱硫效率的双提升也实现了烟气深度治理的目的。该技术路线对于火力发电节能高效环保的推广理念具有巨大的帮助。

3 方案选取

3.1 褐煤干燥系统方案选取

褐煤干燥程度的提高可大幅提高机组经济性，但从粉化的角度考虑，干燥程度的加深会导致细粉比例上升，进而对运输及存储产生诸多不利影响。德国褐煤通常将褐煤干燥至水分含量为10%作为极限值，而根据西安热工研究院试验研究发现，干燥水分低于20%后，干燥机的处理能力明显下降^[6]。因此，基于上述原因将褐煤水分分别干燥至25%、20%以及15%进行理论对比分析，分别代表了中低发热量、中等发热量及中等偏高的发热量水平。选取国内某厂660MW 燃用褐煤超临界直接空冷机组作为研究对象，机组参数如表1所示。

表1 某660MW 机组主要参数
Table 1 main parameters of a 660MW Unit

项目	单位	数值
发电功率	MW	660
汽轮机装置热耗率	kJ/(kW·h)	7706
新蒸汽量 D_0	t/h	1663.76
再热蒸汽量 D_{r2}	t/h	1422.81
汽轮机排汽焓	kJ/kg	2318.6
锅炉效率 η_{gl}	%	92.1
管道效率 η_{gd}	%	99
机械效率 η_{fx}	%	99
发电机效率 η_d	%	99.5
过量空气系数 α		1.2
锅炉排烟温度	°C	148

机组燃用褐煤为伊敏褐煤，在后续分析研究中，伊敏褐煤的全水分由原煤中的37.6%分别干燥到25%、20%和15%，煤质参数如表2所示。

表2 试验煤质数据
Table 2 test coal quality data

M_t	M_{ad}	A_{ar}	V_{dai}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	$S_{t,ar}$	$Q_{net,ar}$
%	%	%	%	%	%	%	%	%	MJ/kg
37.6	15.0	8.9	45.9	39.7	2.0	0.5	11.1	0.2	13.03

3.1.1 能耗分析

以抽汽回除氧器为例，采用第5级抽汽时，燃用25%、20%和15%水分干燥褐煤的系统能耗分析如下表所示：

干燥程度对系统经济性影响显著，干燥程度越

深，提质系数越高、锅炉效率越大、汽轮机效率越低、系统整体发电效率越高、经济性越好，节煤量越大。采用第5级抽汽时（抽汽回除氧器），燃用25%、20%和15%水分干燥褐煤的系统能耗分析如表3所示：系统发电煤耗较参考机组分别降低6.92g/(kW·h)、8.42g/(kW·h)和9.69g/(kW·h)。

表3 不同干燥程度下系统能耗对比分析
Table 3 Comparative Analysis of system energy consumption under different drying degrees

项目	单位	褐煤	25%	20%	15%
		原煤 基准	水分 干燥	水分 干燥	水分 干燥
提质系数		\	1.046	1.038	1.029
锅炉效率	%	92.1	93.8	93.7	93.6
管道效率	%	99	99	99	99
汽轮机效率	%	47.43	46.02	46.22	46.45
机械效率	%	99	99	99	99
电机效率	%	99.5	99.5	99.5	99.5
发电效率	%	42.6	44.08	43.87	43.64
新蒸汽量	t/h	1942	2001	1993	1983
抽汽量	t/h	\	150.7	128.6	103.5
排汽量	t/h	1241.9	1152	1165.2	1180.2
凝结水量	t/h	1457.8	1352.6	1367.9	1385.5
燃煤量	t/h	419.4	405.3	407.2	409.4
发电量	MW	660	660	660	660
发电煤耗	g/(kW·h)	288.76	279.07	280.34	281.84
节煤量	g/(kW·h)	\	9.69	8.42	6.92

3.1.2 褐煤干燥投资费用预算

经过估算，对于已建成机组，燃用25%、20%和15%水分干燥褐煤设备初投资分别增加14359万元、15242万元、16609万元，节约燃煤费用分别为1113.08万元、1269.59万元、1425.06万元，投资回收期为12.9年、12年、11.6年。

表4 不同干燥程度下系统经济性对比分析(单位:万元)
Table 4 comparative analysis of system economy under different drying degree (unit: 10000 yuan)

燃煤煤种	单位	褐煤	25%	20%	15%
		原煤 基准	水分 干燥 褐煤	水分 干燥 褐煤	水分 干燥 褐煤
Mt	%	37.6	23.3	19.5	14
锅炉效率	%	92.1	93.6	93.7	93.9
锅炉发电煤耗	g/kwh	288.8	281.8	280.3	279.1
厂用电率	%	5	4.26	4.33	4.33
供电煤耗	g/kwh	304	294.4	293.0	291.7
供电煤耗变化	g/kwh	基准	-9.6	-10.9	-12.3
年节煤量	万吨	基准	-3.48	-3.97	-4.45
年燃煤费用 变化	万元	基准	-1113.1	-1269.6	-1425.1
系统投资	万元		14359	15242	1660

综上所述,从长期经济行考虑,褐煤干燥15%具有更高的经济效益。

3.2 湿法脱硫烟气深度治理系统方案选取

以上述660MW机组烟气参数为例。机组全年烟囱出口烟气平均温度57℃,全年大气环境平均温度17℃,环境湿度60%。通过将入炉褐煤全水分由原煤中的37.6%分别干燥至15%燃用后,机组净烟气温度可降低至50.5℃,烟气湿度由13.58%降低至8.28%,烟气量由2584015m³/h(标干,6%O₂)降低至2312216 m³/h(标干,6%O₂),烟气中总含水量降低约167t/h。

同时,褐煤干燥机排出的乏气经细粉收集器过滤后进入湿法脱硫烟气深度治理系统对烟气进行升温实现深度回收利用。乏气加热烟气装置利用的是乏气冷凝释放的气化潜热使得净烟气升温至70℃的欠饱和状态,烟气抬升高度提升,与空气混合后不会迅速在厂区周边凝结形成烟囱雨。

利用干燥乏气进行烟气再加热,假设进入烟气再热器的乏气温度为99.6℃,乏气露点为86℃。本文选取“褐煤深度干燥+净烟气再热法”实现湿法脱硫烟气深度治理的技术路线进行可行性分析。

3.2.1 烟气深度治理投资费用预算

与传统烟气深度治理方案对比:

该方案仅增加烟气再热部分的设备投资,与烟

气冷凝后再热及直接再热的方案对比如下:

表5 不同烟气深度治理系统投资费用对比分析
Table 5 comparative analysis of investment cost of different flue gas depth treatment systems

	烟气降温 ℃	烟气升温 ℃	投资估算 万元
褐煤预干燥发 电一体化系统	57℃—50.5℃	50.5℃—70℃	≈1500
烟气冷凝再热	57℃—50℃	50℃—70℃	≈4000
烟气直接再热	无	57℃—85℃	≈2500

该方案可实现烟气冷凝再热后的同等效果,且投资较少。

3.3 湿法脱硫烟气深度治理系统分析

3.3.1 褐煤干燥

褐煤在干燥机中蒸发出的乏气温度通常在100℃以上,为保证干燥机换热效果,应具有一定的换热温差,温差越大对干燥机换热越有利。从这个角度来讲,抽汽参数越高(抽汽品位越高)越有利。通常,干燥机用蒸汽饱和和水温设计在140℃以上。褐煤预干燥后,脱硫系统前后温度及含湿量变化如下:

表6 褐煤干燥后烟气参数变化
Table 6 Variation of flue gas parameters after lignite drying

项目	褐煤 原煤 基准	25%	20%	15%	
		水分 干燥	水分 干燥	水分 干燥	
Mt	%	37.6	23.3	19.5	14
烟气量 (标干6%O ₂)	m ³ /h	2584015	2387620	2359926	2312216
锅炉排烟温度	℃	148	139	135	131
原烟气湿度	%	13.58	10.23	9.26	8.28
FGD后 净烟气温度	℃	57.69	53.57	52.22	50.53
净烟气湿度	%	15.93	13.17	12.3	11.37
含湿量	g/kg	112.775	90.26	83.7	70.36

由理论计算可看出,660MW机组直接燃用37.6%水分的褐煤,排烟温度为148℃,脱硫后饱和净烟气温度为57.69℃;随着褐煤干燥程度的加深,烟气量、原烟气温度、净烟气温度不断降低。褐煤水分干燥至15%左右时,锅炉排烟温度降低至131℃,

脱硫后的饱和净烟气温度降低为 50.53℃, 烟气含湿量降低约 42g/kg 干空气。由于烟气中的冷凝水携带部分烟尘及硫酸盐, 较低的烟气含湿量可降低净烟气中的污染物含量, 达到净烟气可溶盐降低的目的。

3.3.2 烟气再热装置

为使得烟气处于欠饱和状态, 传统的烟气再热装置如 GGH、MGGH、蒸汽加热器具有显著的烟气再热效果, 但均会以牺牲一定的机组经济性为代价。对于在褐煤预干燥发电及湿法脱硫烟气深度治理一体化系统, 干燥是一个耗能过程, 其消耗的绝大部分能量被干燥乏气带走, 通过增加换热装置将干燥乏气余热回收用于加热机组净烟气, 在不牺牲机组能耗的前提下实现排放净烟气的再热; 同时, 伴随回收干燥乏气余热, 干燥乏气中的水分得以凝结, 可以同时回收乏气中的水分, 起到显著的节能、节水效果。

通过对采用 15%水分的干燥褐煤进行烟气再热的可行性分析, 如表 7 所示, 烟气换热装置热流量约为 20MW, 乏气出口温度为 74℃, 回收冷凝水 19.4t。由此可以得出如下结论:

1) 该湿法脱硫烟气深度治理系统可回收乏气中冷凝水约为 19.4t, 回收率 30%, 具有巨大的节水节能效益;

2) 换热器可满足湿法脱硫烟气深度治理换热需求, 且该系统在保证较高的换热效率前提下留有一定换热裕量, 可满足烟气在极端条件下的继续升温。

此外, 较常规 MGGH 再热烟气系统, 该湿法脱硫烟气深度治理系统具有如下优势: 常规 MGGH 加热系统由于烟气冷却器设计出口烟气温度通常仅高于烟气酸露点 5℃-10℃, 因此当机组负荷较低时烟气温度低于设计值时无法满足热源需要, 需增加辅助蒸汽提供热源以实现烟气升温目的。该方法会对机组经济性造成一定影响。由此看出利用乏气对烟气进行再热较为稳定且不影响机组经济性。

表 7 乏气再热系统参数

Table 7 parameters of exhaust gas reheating system

项目	单位	15%水分
		干燥褐煤
干燥褐煤全水	%	15
烟气流量	t/h	2309.2

净烟气入口温度	℃	50.5
净烟气出口温度	℃	70
乏气流量	t/h	61.3
乏气入口温度	℃	99.6
乏气露点	℃	86
乏气出口温度	℃	74
水回收量	t/h	19.4
水回收率	%	30

4 系统设计

褐煤预干燥协同湿法脱硫烟气深度治理一体化系统示意图如图 1 所示。该系统分为褐煤预干燥发电系统和烟气深度治理系统两个部分。进入褐煤干燥机的褐煤来自汽轮机低压缸抽汽间接换热达到干燥效果, 换热后的冷凝蒸汽经过疏水泵回到除氧器继续循环加热。褐煤干燥机产生大量低品位乏气, 干燥乏气由水蒸汽以及 3%-8%的细粉组成, 干燥乏气经过细粉收集器过滤回收细粉后进入烟气升温装置加热脱硫后的低温饱和烟气。

从湿法脱硫装置出来的净烟气处于饱和状态, 经褐煤干燥提质后产生的烟温降低 3℃-7℃。干燥提质后产生的低温烟气含湿量降低, 烟气中携带的可溶盐含量相对降低; 而后利用干燥乏气使烟气升温至 70℃排入大气, 70℃的欠饱和烟气具有较好的烟气温性, 可有效避免烟囱内壁痂线凝结露导致的烟囱腐蚀, 烟气抬升高度增加 30-80m^[12], 在与环境空气混合过程中, 有效减缓水汽冷凝析出, 有效缓解周边环境的“烟囱雨”及“烟羽”现象, 可达到烟气深度治理的目的。

大量的干燥乏气可保证低温烟气的升温效果, 同时干燥乏气侧设置冷凝水回收装置, 干燥乏气中大量的高品质冷凝水得以回收, 具有较高的节能节水效益。

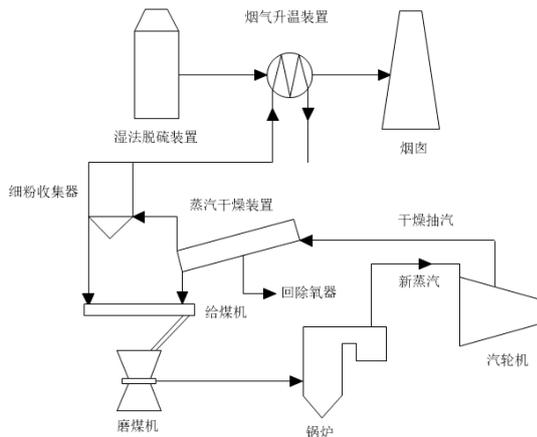


图3 褐煤预干燥发电及湿法脱硫烟气深度治理一体化系统

Fig.3 integrated system of lignite pre drying power generation and wet desulfurization flue gas advanced treatment

5 结论

本文提出了一种褐煤预干燥发电及湿法脱硫烟气深度治理一体化系统。以国内某 660MW 燃用褐煤机组为例，对其进行系统设计并建立经济性及可行性分析模型。主要结论有：

1、结合汽轮机低压抽汽预干燥褐煤和冷凝再热法深度治理湿法脱硫烟气提出了褐煤预干燥协同湿法脱硫烟气深度治理一体化系统，为火力发电机组高效环保地燃用褐煤提供了理论基础及技术路线。

2、采用汽轮机第 5 级抽汽作为热源对褐煤进行干燥，当褐煤分别干燥至 25%、20%、25%水分时，发电标准煤耗率分别降低 6.92g/(kW·h)、8.42g/(kW·h)和 9.69g/(kW·h)。

3、该系统在高效回收乏气的同时，具有巨大的节水节能效益，以褐煤水分干燥至 15%时为例，机组净烟气温度由 57℃降低至 50.5℃，采用干燥乏气进行烟气再升温至 70℃时，乏气可满足湿法脱硫后烟气的加热需求，同时可回收冷凝水 19.4t/h。

参 考 文 献

[1] 严俊杰,刘明,种道彤,等. 预干燥燃褐煤发电系统理论研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 1-5.
[2] YAN Junjie, LIU Ming, CHONG Daotong, et al. Theoretical Study on Pre-Dried Lignite-Fired Power Generation System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 1-5.

[3] 郝正虎, 吴玉新, 吕俊复, 等. 单颗粒褐煤烟气干燥过程模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 47-53.
[4] HAO Zhenghu, WU Yuxin, LVJunfu, et al. Modeling of Single Lignite Particle Drying Process in FlueGas[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 47-53(in Chinese).
[5] 李勤道, 刘明, 严俊杰, 等. 锅炉烟气预干燥褐煤发电系统热经济性计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 14-19.
[6] Li Qindao, Liu Ming, Yan Junjie, et al. Thermal economic calculation and analysis for boiler flue gas pre-dried lignite-fired power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 14-19(in Chinese).
[7] 马有福, 郭晓克, 肖峰, 等. 基于炉烟干燥及水回收风磨仓储式制粉系统的高效褐煤发电技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 13-20.
[8] Ma Youfu, Guo Xiaoke, Xiao Feng, et al. Efficient lignite-fired power generation technology based on open pulverizing systems with flue gas drying fan mill and recovery of heat and water from pulverizing exhaust [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 13-20(in Chinese).
[9] 刘明, 杨雪莲, 韩小渠, 等. 褐煤烟气预干燥发电系统的节能潜力分析—煤种和机组冷端形式的影响 [J]. 中国科技论文, 9(8): 932-935.
[10] Liu Ming, Yang Xuelian, Han Xiaoq, et al. Energy saving potential analysis on boiler flue gas pre-dried lignite-fired power system: the effect of lignite kinds and unit cooling types[J]. China Science Paper, 2014, 9(8): 932-935(in Chinese).
[11] 姚伟, 王志超, 屠竞毅, 等. 褐煤预干燥-乏气回收热电联产系统设计及理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (13).
[12] YAO Wei, WANG Zhichao, TU Jingyi, et al. System Design and Theoretical Analysis of Lignite-fired CHP Based on Lignite Pre-drying and Waste Heat Recovery from Dryer Exhaust[J]. Thermal Power Generation, 2017, 37 (13).
[13] 舒喜, 杨爱勇, 叶毅科, 等. 冷凝再热复合技术应用于燃煤电厂湿烟羽治理的可行性分析[J]. 环境工程, 2017, 35 (12): 82-85.
[14] SHU Xi, YANG Ai-yong, YE Yi-ke, et al. Feasibility analysis of the condensation and reheating composite technology applied to the wet plume control in coal fired power plant[J]. Environmental Engineering, 2017, 35 (12): 82-85.
[15] 王一坤, 吴利平, 解冰, 等. 褐煤机组烟气冷凝取水污染物减排特性[J]. 热力发电, 2017, 46 (12).
[16] WANG Yikun, WU Liping, XIE Bing, et al. Pollutants reduction characteristics of brown coal-fired units during water recovery from flue gas[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46 (12).
[17] Liu Jianmin, ZHU Fahua, MA Xiuyuan. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification [J]. Engineering, 2018, 4 (3): 416-420.
[18] 郭东明等. 脱硫工程技术与设备 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011, 47-48.
[19] Guo Dongming. Desulfurization engineering technology and equipment [M] Beijing: chemical and industrial Press, 2011, 47-48.
[20] 庄焯, 顾鹏, 欧阳丽华, 等. 燃煤电厂烟囱降雨机理分析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(03): 714-722.
[21] Zhuang Ye, Gu Peng, Ouyang Li-hua, et al. Experimental study of formation mechanism of stack rainout from coal-fired power plant[J]. China Environmental Science, 2015, 35(03): 714-722.
[22] 蒋康颖, 莫佳波, 屠锦. 湿法脱硫后烟气抬升高度研究[J]. 广东化工, 2015, 24(42): 47-48.



[23]Jiang Lianying, Mo Jiabo, Tu Jinjun. Study on uplifted hHeight of flue gas from wet desulphurization[J]. guangdong chemistry, 2015, 24(42): 47-48.

收稿日期:

作者简介: 李楠 (1991—), 男, 汉族, 宁夏, 硕士, 工程师, 从事燃煤锅炉烟气污染物治理研究