

预干燥燃褐煤发电系统理论研究

严俊杰¹, 刘明¹, 种道彤¹, 肖峰²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 东北电力设计院, 130021, 长春)

摘要: 利用等效热降法建立了回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统的经济性分析模型, 并给出了褐煤预干燥的节煤条件. 利用该模型对某 600 MW 机组采用回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统的热效率影响因素进行了分析. 计算结果表明: 采用该系统在额定工况下节煤量为 $11.21 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; 烟气温度每变化 10°C 节煤量约变化 $1.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; 从 1 kg 褐煤中每多干燥出 0.1 kg 水节煤量增加 $3.3 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; 从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的蒸汽量越少, 热经济性越好, 并且褐煤的干燥程度越高, 其对经济性的影响越明显.

关键词: 等效热降法; 预干燥; 褐煤; 热经济性

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)05-0001-05

Theoretical Study on Pre-Dried Lignite-Fired Power Generation System

YAN Junjie¹, LIU Ming¹, CHONG Daotong¹, XIAO Feng²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130021, China)

Abstract: A theoretical economy analysis model for a lignite-fired power generation system was established on the basis of the equivalent heat drop method. The energy saving condition of lignite pre-drying with steam of the reheat system was stated. A case study on a 600 MW power generation system was conducted to analyze the factors influencing thermal efficiency. The results show that the system can reduce the coal consumption rate by $11.21 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ under the rated condition. When the boiler exhaust temperature increases by every 10°C , the coal consumption rate will decline by about $1.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ because of lignite pre-drying. The coal consumption rate will decrease by about $3.3 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ when every 0.1 kg more water escapes from 1 kg lignite. The thermal economy rises with the decrease in the steam amount used for 1 kg moisture to escape from lignite, and the influence on the thermal economy is more obvious when the lignite is pre-dried better.

Keywords: equivalent heat drop method; pre-dried; lignite; thermal efficiency

褐煤是水分和灰分含量较高、热值较低、挥发分较高的煤种. 中国的褐煤资源主要分布在内蒙古、东北等地区, 其探明储量在 640 亿 t 以上, 占全国煤碳总量的 10%. 褐煤由于水分高、热值低、易风化和自燃, 难以洗选和储存, 造成其单位能量的运输成本较高, 长距离运输经济性差, 使其开采和利用受到很大

限制. 褐煤主要作为一种低级燃料, 在产地附近燃烧发电. 高水分褐煤直接燃烧的热效率较低, 大容量燃褐煤电站锅炉效率普遍低于 91%, 而且燃褐煤电站锅炉本体体积庞大, 造价昂贵, 加之辅机容量偏大, 使得燃褐煤机组效率较低. 随着能源短缺、环境污染的恶化, 研究新型的燃褐煤发电系统, 对提高褐煤机

组效率、减少温室气体排放具有重要意义。

褐煤预干燥技术是指在褐煤进入锅炉之前对褐煤进行预干燥,降低褐煤中的水分含量,从而提高锅炉效率,降低厂用电率,进而提高发电效率。本文所研究的回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统是利用汽轮机组的回热抽汽对褐煤进行预干燥,降低褐煤中的水分,从而提高发电厂热效率。国外对褐煤预干燥的研究主要集中在褐煤干燥方法^[1-6]、褐煤干燥后特性^[7-9]的研究,而对预干燥燃褐煤发电系统的经济性定量分析主要采用计算机仿真的方法^[10]。国内目前也开展了褐煤干燥特性^[11-13]以及预干燥燃褐煤发电系统经济性的研究^[14],目前尚无简单、快捷的理论分析方法。等效热降法^[15]以其简单、快捷、准确的特点广泛应用于火电机组定量分析。本文将等效热降法应用于回热抽汽燃褐煤发电系统分析,以获得简单的系统节能分析模型,为该系统的定量分析、系统优化设计奠定理论基础。

1 回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统

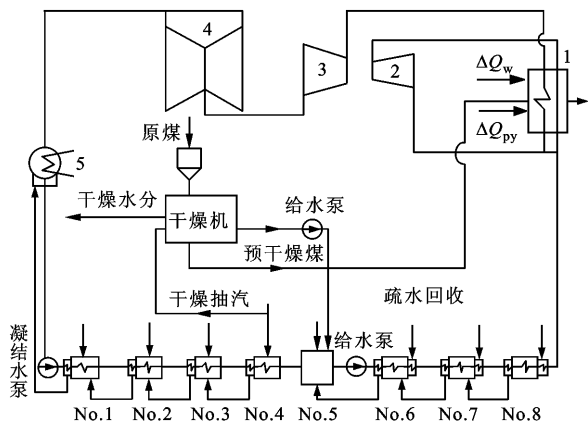
回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统是在普通燃褐煤电站的基础上,增加抽汽预干燥褐煤系统,其系统简图如图1所示。原煤进入干燥机,其中的水分在干燥机中利用回热抽汽的热量蒸发后含量降低,水分降低后的预干燥煤进入锅炉燃烧。回热抽汽在干燥机中释放热量后变成疏水被回收至除氧器中。

经过褐煤预干燥,褐煤中水分的质量分数降至10%~20%,能量密度提高40%以上,锅炉效率提高1%~3%。同时,磨煤机、锅炉风机等容量也将得以降低,从而提高了系统效率。

2 理论模型

本文对该回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统进行了以下基本假定:①新蒸汽流量保持不变;②汽轮机各级效率保持不变。

根据图1和以上两个假设,褐煤预干燥后,干燥减少的水分不在锅炉中吸热,相当于少吸收了部分热量,该部分热量可等效为通过锅炉受热面进入蒸汽侧,定义为 ΔQ_w 。同时,由于褐煤预干燥,排烟中水分降低,锅炉排烟温度降低,这也相当于一部分热量通过锅炉受热面进入蒸汽侧,定义为 ΔQ_{py} 。蒸汽侧由于抽汽预干燥褐煤,少做了部分功,使得新蒸汽做功减少 ΔH 。对上述过程进行分析和推导,可以得到回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统的理论分析模型。



1: 锅炉; 2: 汽轮机高压缸; 3: 汽轮机中压缸; 4: 汽轮机低压缸;
5: 凝汽器; No. 1~No. 8: 给水泵

图1 回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统简图

2.1 数学模型

回热抽汽预干燥褐煤对系统经济性的影响可分为3部分,即干燥水分引起的单位新蒸汽吸热量减少量、排烟温度降低引起的单位新蒸汽吸热量减少量和抽汽及疏水回收引起的做功变化量。利用等效热降法可以得到这3部分的模型如下。

2.1.1 干燥水分引起的单位新蒸汽吸热量减少量 假定褐煤中水分进入锅炉时的参数为 (P_{w0}, t_{w0}) ,褐煤未预干燥时锅炉烟囱排入大气的烟气参数为 (P_{10}, t_{10}) ,由此得到褐煤预干燥后少吸收的热量为

$$\Delta Q_w = Bm(h_{w10} - h_{w0}) \quad (1)$$

式中: B 为褐煤预干燥后锅炉燃料消耗量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; m 为褐煤预干燥程度,即1 kg褐煤通过干燥减少的水分量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_{w10} 为褐煤未预干燥时烟气中水分焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_{w0} 为褐煤中水分进入锅炉时的焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

应用等效热降法,等效热量 ΔQ_w 从锅炉进入系统,相当于新蒸汽在锅炉中的吸热量降低,相应的1 kg新蒸汽吸热量变化量为

$$\Delta Q_1 = -\frac{\Delta Q_w}{D_0} = -\frac{Bm(h_{w10} - h_{w0})}{D_0} \quad (2)$$

式中: D_0 为新蒸汽流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.1.2 烟气温度降低引起的单位新蒸汽吸热量减少量 假定褐煤干燥后排入大气的烟气参数为 (P_1, t_1) 。由于褐煤预干燥,排烟中水分降低,锅炉排烟温度降低,这也相当于一部分热量通过锅炉受热面进入蒸汽侧,该热量可以表示为

$$\Delta Q_{py} = LC_p(t_{10} - t_1) \quad (3)$$

式中: L 为预干燥后的烟气流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; C_p 为预

干燥后烟气的比定压热容, $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$.

应用等效热降法,等效热量 ΔQ_{py} 从锅炉进入系统,此时相当于新蒸汽在锅炉中的吸热量降低,1 kg 新蒸汽的吸热量变化量为

$$\Delta Q_2 = -\Delta Q_{\text{py}}/D_0 \quad (4)$$

以下给出由褐煤未预干燥时的燃煤量 B_0 推出采用褐煤预干燥系统后燃煤量 B 的计算公式. 式(3)中 L 与锅炉燃煤量有关,由此设 $L = Bg(B)$, 因此

$$\Delta Q_{\text{py}} = Bg(B)C_p(t_{10} - t_1) \quad (5)$$

由于新蒸汽流量保持不变,即蒸汽在锅炉中带走的热量不变,所以设所选褐煤的低位发热量为 Q_{net} , 有

$$Bg(B)C_p(t_{10} - t_1) + Bm(h_{w10} - h_{w0}) + BQ_{\text{net}}\eta_b = B_0\eta_b Q_{\text{net}} \quad (6)$$

$$B = \frac{Q_{\text{net}}\eta_b}{g(B)C_p(t_{10} - t_1) + m(h_{w10} - h_{w0}) + Q_{\text{net}}\eta_b} B_0 \quad (7)$$

式中: η_b 为褐煤未采用预干燥时的锅炉效率. 利用式(7)通过迭代计算,即可获得褐煤干燥后锅炉的燃煤量.

2.1.3 抽汽及疏水回收引起的做功变化量 本文所述系统采用汽轮机回热抽汽对褐煤进行预干燥,抽汽经过干燥系统释放热量对褐煤进行干燥后变成饱和疏水,而疏水则从除氧器进入系统. 由于疏水泵功对新蒸汽等效焓降的影响约占抽汽及疏水回收影响的 0.15%, 因此忽略不计.

预干燥褐煤需要的抽汽量可以表示为

$$D_{f_m} = Bmf_m \quad (8)$$

式中: f_m 为从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的抽汽量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

相应的抽汽量所占新蒸汽的份额可表示为

$$\alpha_f = \frac{D_{f_m}}{D_0} = \frac{Bmf_m}{D_0} \quad (9)$$

因为抽汽经过干燥系统后完全回收,所以疏水量及疏水所占新蒸汽的份额同样可以分别表示为 D_{f_m} 、 α_f .

预干燥褐煤抽汽离开系统,导致 1 kg 新蒸汽在系统中的做功能力降低,利用等效热降法,1 kg 新蒸汽做功变化量为

$$\Delta H_1 = -\alpha_f(h_f - h_n) = -\frac{Bmf_m}{D_0}(h_f - h_n) \quad (10)$$

式中: h_f 为干燥褐煤所用抽汽焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_n

为汽轮机末级排汽焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

这部分预干燥褐煤所用蒸汽释放过热后返回系统,相当于带热量的工质进入系统,会使新蒸汽的做功增加. 设该部分工质进入第 j 级加热器,做功变化量为

$$\Delta H_2 = \alpha_f[(h_s - h_j)\eta_j + (h_j - h_n)] = \frac{Bmf_m}{D_0}[(h_s - h_j)\eta_j + (h_j - h_n)] \quad (11)$$

式中: h_s 为预干燥褐煤抽汽返回系统时的焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_j 为第 j 级抽汽的等效热降, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; η_j 为第 j 级抽汽的抽汽效率. 所以,新蒸汽做功变化量为

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_1 + \Delta H_2 = \\ &= -\frac{Bmf_m}{D_0}(h_f - h_n) + \frac{Bmf_m}{D_0}[(h_s - h_j)\eta_j + \\ &+ (h_j - h_n)] = \frac{Bmf_m}{D_0}[(h_s - h_j)\eta_j + h_j - h_f] \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 经济性分析

前面获得了影响回热抽汽预干燥燃煤褐煤发电系统经济性的 3 个部分,下面利用等效热降法获得回热抽汽预干燥燃煤褐煤发电系统对系统经济性影响的模型,并确定该系统的节煤条件.

1 kg 新蒸汽在锅炉中吸热量减少量为

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \quad (13)$$

汽轮机装置绝对内效率相对变化量为

$$\delta\eta = \frac{\Delta H - \Delta Q\eta_i}{H + \Delta H} \quad (14)$$

式中: $\delta\eta$ 为汽轮机装置绝对内效率相对变化量; η_i 为汽轮机装置绝对内效率; H 为新蒸汽做功, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. 根据电站全厂效率相对变化量与汽轮机装置绝对内效率的关系,系统效率的相对变化量数值与 $\delta\eta$ 相同.

火电厂发电各项热经济指标之间的关系为

$$\Delta q = q\delta\eta \quad (15)$$

$$\Delta b = b\delta\eta \quad (16)$$

式中: Δq 为热力系统热耗率变化量, $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; q 为未采用回热抽汽预干燥燃煤褐煤发电热力系统的热耗率, $\text{kJ} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; b 为未采用回热抽汽预干燥燃煤褐煤发电系统的标准煤耗率, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$; Δb 为发电煤耗率变化量, $\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$.

下面讨论回热抽汽预干燥褐煤的节煤条件,该系统节煤只需 $\delta\eta_i > 0$, 即 $\Delta H - \Delta Q\eta_i > 0$.

忽略烟气部分节能,可以得到

$$f_m((h_s - h_j)\eta_j + h_j - h_f) + \eta_j(h_{w10} - h_{w0}) > 0$$

即

$$h_f < \frac{\eta_i(h_{w10} - h_{w0})}{f_m} + (h_s - h_j)\eta_i + h_j \tag{17}$$

考虑烟气部分节能,可以得到

$$h_f < -\frac{D_0\Delta Q\eta_i}{Bmf_m} + (h_s - h_j)\eta_i + h_j \tag{18}$$

即

$$h_f < \frac{\eta_i(h_{w10} - h_{w0})}{f_m} + (h_s - h_j)\eta_i + h_j + \frac{\eta_i}{Bmf_m}LC_p(t_{10} - t_1) \tag{19}$$

式(1)~(16)构成回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统经济性理论分析模型,利用该模型可以在已知抽汽参数、锅炉排烟温度、干燥程度等条件下分析采用褐煤预干燥系统的节能情况. 式(17)~(19)为抽汽干燥褐煤的节煤条件,可以用来判断系统是否节能.

3 实例计算

以某 600 MW 超临界凝汽机组为例,计算工况为 THA 工况. 该工况下新蒸汽量为 462.85 kg·s⁻¹,发电功率为 600 MW. 汽轮发电机组效率为 0.478 1,过量空气系数为 1.2,锅炉效率为 0.91,管道效率为 0.99,机械效率为 0.995,发电机效率为 0.99. 由此得到发电效率为 0.430 7,发电煤耗率为 285.3 g·(kW·h)⁻¹. 该凝汽机组燃用褐煤为伊敏煤,其低位发热量为 11.79 MJ·kg⁻¹,因此未预干燥时燃用褐煤量为 118.16 kg·s⁻¹. 汽轮机组排汽焓为 2 310.8 kJ·kg⁻¹.

应用等效热降法整理该机组原始数据,可以得到如表 1 所示结果. 以表 1 中数据为基础,采用上述模型,可以计算得到回热抽汽褐煤预干燥系统对机组性能的影响.

3.1 额定工况计算

对于以上机组选定如下参数作为额定工况. 伊敏煤全水分的质量分数由 39.5%降至 19.5%,即 m 为 0.248 4 kg·kg⁻¹; f_m 为 1.1 kg·kg⁻¹;褐煤未预干燥时锅炉排烟温度为 148℃,干燥后锅炉排烟温度为 131℃. 疏水回收至除氧器. 利用以上模型的计算结果如表 2 所示.

从表 2 可以看出,采用回热抽汽预干燥燃褐煤

发电系统的节能效果是非常明显的,额定工况下采用该系统较原系统效率相对提高 3.93%,即发电效率由 43.07%提高到 44.76%,节煤量为 11.21 g·(kW·h)⁻¹.

3.2 节煤量影响因素分析

根据以上理论模型,可知影响节煤量的主要因素有排烟温度、褐煤的干燥程度、褐煤干燥所用抽气量等. 下面利用以上模型计算并分析各个因素对节煤量的影响情况.

3.2.1 排烟温度的影响 在 m 为 0.248 4 kg·kg⁻¹、 f_m 为 1.1 kg·kg⁻¹时,利用以上模型计算不同未预干燥锅炉排烟温度和预干燥后锅炉排烟温度对节煤量的影响,结果如图 2 所示.

从图 2 可以得到预干燥后锅炉排烟温度对节煤量的影响基本为线性关系,预干燥后锅炉排烟温度较未预干燥时锅炉排烟温度每下降 10℃,节煤量约增加 1.5 g·(kW·h)⁻¹. 由此可知,如果未预干燥时锅炉排烟温度越高,则采用预干燥系统后锅炉排烟温度下降越多,其节能效果就越明显.

3.2.2 干燥程度的影响 在未预干燥时锅炉排烟温度为 148℃、预干燥后锅炉排烟温度为 131℃的情况下,利用以上模型计算分析 m 对节煤量的影响,计算结果如图 3 所示.

从图 3 可以得到干燥程度对节煤量的影响基本为线性关系,在 f_m 为 1.1 kg·kg⁻¹时,每提高 0.1 的干燥程度,节煤量增加 3.3 g·(kW·h)⁻¹. 可见,干燥程度对节煤量的影响非常大,采用预干燥系统应该设法提高干燥程度,从而提高节煤量.

表 1 等效热降法原始数据表

加热器 编号	抽汽 系数	抽汽焓/ kJ·kg ⁻¹	抽汽等效热 降/kJ·kg ⁻¹	抽汽 效率
1	0.028 51	2 474.5	163.7	0.070 64
2	0.031 38	2 621.7	303.7	0.128 50
3	0.024 89	2 739.6	407.9	0.171 80
4	0.051 62	2 979.4	633.6	0.250 20
5	0.041 00	3 199.7	811.6	0.311 50
6	0.040 13	3 410.9	954.4	0.367 50
7	0.070 00	2 983.7	1 091.1	0.535 00
8	0.056 40	3 062.7	1 097.5	0.566 40

表 2 额定工况下计算结果

干燥水分少吸收热量 /kJ·kg ⁻¹	烟气温度降低少吸收热量 /kJ·kg ⁻¹	抽汽做功变化量 /kJ·kg ⁻¹	系统效率变化量 /%	节煤量变化量 /g·(kW·h) ⁻¹
167.89	24.12	-38.12	3.93	11.21

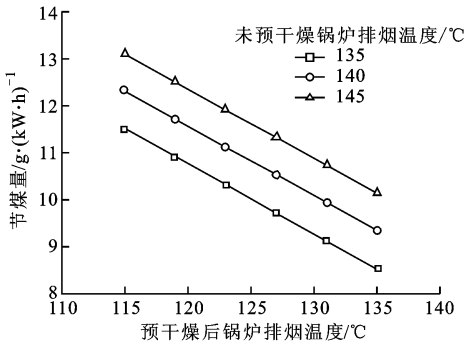


图 2 节煤量随排烟温度的变化

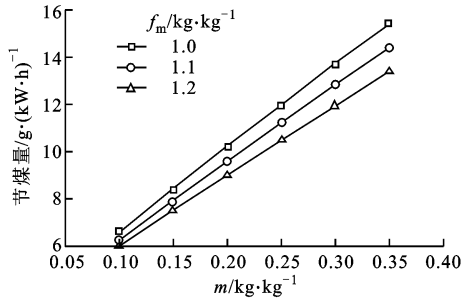


图 3 节煤量随 m 的变化

3.2.3 抽汽量的影响 在未预干燥时锅炉排烟温度为 148 ℃、预干燥后锅炉排烟温度为 131 ℃的情况下,利用以上模型计算从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的抽汽量 f_m 对节煤量的影响,计算结果如图 4 所示。

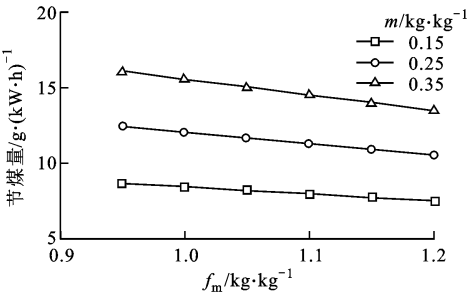


图 4 节煤量随 f_m 的变化

从图 4 可以看出: f_m 对节煤量的影响基本为线性关系, f_m 越小,节煤量越高,而且干燥程度越高,其影响越明显。在 m 为 0.15 时, f_m 降低 0.1 节煤量约为 $0.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$,而在 m 为 0.35 时, f_m 降低 0.1 节煤量约为 $1 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。因此,设计高效的干燥机使褐煤干燥用抽汽量降低而干燥程度提高,可以明显地提高系统效率。

4 结 论

本文利用等效热降法建立了回热抽汽预干燥燃

褐煤发电系统经济性理论分析模型,并且利用该模型计算分析了某 600 MW 超临界凝汽机组的节能情况,以及锅炉排烟温度、干燥程度等参数对机组节能情况的影响。实际计算表明,采用该模型可以方便快捷地计算回热抽汽型预干燥燃褐煤发电系统对整厂经济性的影响。

计算结果表明:采用回热抽汽对预干燥褐煤可以明显提高发电效率。对本文所列额定工况计算表明,其可以使机组效率相对提高 3.93%,节煤量为 $11.21 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。通过理论分析发现:预干燥后锅炉排烟温度对节煤量的影响基本为线性关系,预干燥后锅炉排烟温度较未预干燥时锅炉排烟温度每下降 10 ℃,节煤量增加 $1.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。干燥程度对系统节能效果影响明显,在从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的抽汽量为 1.1 时,每提高 0.1 的干燥程度,节煤量可增加 $3.3 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$;从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的抽汽量越小,节能效果越明显,而且干燥程度越高其影响就越明显,在干燥程度分别为 0.15、0.35 时,若从褐煤中干燥出 1 kg 水分需要的抽汽量降低 0.1,则节煤量分别为 $0.5 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $1 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

本方法可以从理论上定量分析回热抽汽预干燥燃褐煤发电系统的节能情况,同时可以通过理论分析,实现该系统的优化设计。

参考文献:

[1] HATZILYBERIS K S, ANDROUTSOPOULOS G P. An RTD study for the flow of lignite particles through a pilot rotary dryer: part I Bare drum case [J]. Drying Technology, 1999,17(4/5): 745-757.

[2] HATZILYBERIS K S, ANDROUTSOPOULOS G P. An RTD study for the flow of lignite particles through a pilot rotary dryer: part II Flighted drum case [J]. Drying Technology, 1999, 17(4/5): 759-774.

[3] CALBAN T, ERSAHAN H. Drying of a Turkish lignite in a batch fluidized bed [J]. Energy Sources, 2003, 25(12): 1129-1135.

[4] HOEHNE O, LECHNER S, SCHREIBER M, et al. Drying of lignite in a pressurized steam fluidized bed-theory and experiments [J]. Drying Technology, 2010, 28(1): 5-19.

[5] HATZILYBERIS K S, ANDROUTSOPOULOS G P, SALMAS C E. Indirect thermal drying of lignite: design aspects of a rotary dryer [J]. Drying Technology, 2000, 18(9): 2009-2049.

[6] CALBAN T. The effects of bed height and initial

- moisture concentration on drying lignite in a batch fluidized bed [J]. *Energy Sources: Part A Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2006, 28(5): 479-485.
- [7] SALMAS C E, TSETSEKOU A H, HATZILYBRIS K S, et al. Evolution lignite mesopore structure during drying effect of temperature and heating time [J]. *Drying Technology*, 2001, 19(1): 35-64.
- [8] AGRANIOTIS M, GRAMMELIS P, PAPAPAVLOU C, et al. Experimental investigation on the combustion behaviour of pre-dried Greek lignite[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(9): 1071-1079.
- [9] AGRANIOTIS M, STAMATIS D, GRAMMELIS P, et al. Numerical investigation on the combustion behaviour of pre-dried Greek lignite [J]. *Fuel*, 2009, 88(12): 2385-2391.
- [10] KAKARAS E, AHLADAS P, SYRMOPOULOS S. Computer simulation studies for the integration of an external dryer into a Greek lignite-fired power plant [J]. *Fuel*, 2002, 81(5): 583-593.
- [11] 王海锋, 朱书全, 任红星, 等. 通辽褐煤在流化床干燥器中的干燥特性研究[J]. *选煤技术*, 2007, 4(4): 43-47. WANG Haifeng, ZHU Shuquan, REN Hongxing, et al. Drying characteristics research of Tongliao lignite in fluidized bed drier [J]. *Coal Preparation Technology*, 2007, 4(4): 43-47.
- [12] 李先春, 余江龙, 胡广涛, 等. 印尼褐煤干燥和水分再吸收特性的试验研究[J]. *现代化工*, 2009, 29(S1): 5-7. LI Xianchun, YU Jianglong, Hu Guangtao, et al. Lignite dehydration and predrying technology [J]. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(S1): 5-7.
- [13] 赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 等. 褐煤等温脱水热重分析[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(14): 74-79. ZHAO Weidong, LIU Jianzhong, ZHOU Junhu, et al. Investigation on the isothermal dewatering of brown coal by thermobalance [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(14): 74-79.
- [14] 阎维平, 马凯, 李春启, 等. 褐煤干燥对电厂经济性的影响[J]. *中国电力*, 2010, 43(3): 35-37. YAN Weiping, MA Kai, LI Chunqi, et al. Economical effect of lignite coal drying on coal-fired electric power plant [J]. *Electric Power*, 2010, 43(3): 35-37.
- [15] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994.

(编辑 荆树蓉)