

基于 Aspen Plus 的褐煤高温烟气和 回转管式干燥过程模拟

何毅聪^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

摘要:为了研究高温烟气干燥和回转管式干燥特性,采用 Aspen Plus 软件对高温烟气干燥和回转管式干燥过程进行流程模拟,并运用能量平衡法和焓分析方法对2种干燥系统能量利用效率进行分析。结果表明,Aspen Plus 能够较好地模拟高温烟气干燥和回转管式干燥过程。烟气和蒸汽温度分别为750和203.1℃时,回转管式干燥的热利用效率为71.27%,较高温烟气干燥高4.04%,而回转管式干燥焓利用效率为87.68%,较高温烟气干燥高49.33%。随干燥介质温度升高,高温烟气干燥与回转管式干燥热利用效率提高,焓利用效率降低。

关键词: Aspen Plus; 褐煤; 高温烟气干燥; 回转管式干燥; 焓分析

中图分类号:TQ536 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)03-0056-05

Simulation on high temperature flue gas drying and rotating tube drying processes of lignite using Aspen Plus

He Yicong^{1,2}

(1. Research Institute of Coal Chemistry, CCTEG Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the features of high temperature flue gas drying and rotating tube drying, the two processes were simulated using Aspen Plus. Energy balancing method and exergy analyzing method were employed to analyze the energy utilizing efficiency of these two drying systems. Results show that the Aspen Plus can accurately simulate the high temperature flue gas drying and rotating tube drying processes. When the flue gas temperature is 750℃ and the vapor temperature is 203.1℃, the heat utilizing efficiency of rotating tube drying is 71.27%, which is 4.04% higher than the flue gas drying process, while, the exergy utilizing efficiency of rotating tube drying is 87.68%, which is 49.33% higher than high temperature flue gas drying. The heat utilizing efficiency of high temperature flue gas drying and rotating tube drying will increase with the rising of temperature of drying medium. On contrast, the exergy utilizing efficiency will decrease with the increase of temperature of drying medium.

Key words: Aspen Plus; lignite; high temperature flue gas drying; rotating tube drying; exergy analyzing

0 引 言

我国褐煤资源储量丰富,褐煤煤化程度介于泥炭和烟煤之间,含水率较高(30%~60%),导致其单位能量的运输成本高,不利于长距离运输和贮存,若直接燃烧又存在热效率低、温室气体排放量大等

问题^[1-2]。而褐煤液化、气化、干馏等工艺通常要求含水率低于10%。作为褐煤提质技术之一,褐煤干燥可降低褐煤含水率,提高热值,因此是洁净煤技术领域研究的重点和热点^[3-5]。褐煤干燥按干燥介质与煤的接触方式划分,可分为直接干燥和间接干燥两类。其中烟气干燥通常为直接干燥,多采用低温

收稿日期:2016-07-21;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.011

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(2012DFR60360)

作者简介:何毅聪(1987—),女,河南许昌人,助理工程师,硕士,研究方向为煤质分析与煤炭加工利用。E-mail:hyc8712@126.com

引用格式:何毅聪.基于 Aspen Plus 的褐煤高温烟气和回转管式干燥过程模拟[J].洁净煤技术,2017,23(3):56-60.

He Yicong. Simulation on high temperature flue gas drying and rotating tube drying processes of lignite using Aspen Plus[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 56-60.

烟气作为干燥介质,由于烟气温度较低,存在干燥介质用量大且难以实现深度干燥等问题。与低温烟气干燥不同,高温烟气干燥的介质使用量降低,处理量大,降低了干燥成本^[6]。目前烟气干燥研究主要集中在低温干燥,高温烟气干燥研究相对较少且常见于基础理论研究及干燥后发电系统的经济性分析^[7-8]。回转管式干燥属于间接干燥,以过热蒸汽作为干燥介质,具有安全、节能、环保等诸多优势,非常适用于褐煤的干燥。与试验研究不同,Aspen Plus 以工艺过程机理模型为基础,通过计算机并结合数学方法来描述化工过程,以实现该过程的物料衡算、热量衡算和能量分析等,获取试验条件下难以得到的参数及性能,进而优化工艺流程并指导试验。目前 Aspen Plus 已广泛应用于煤气化、发电、石化等行业,并取得了大量研究成果^[9-12],因此采用 Aspen Plus 对褐煤干燥过程模拟具有重要意义。刘娜等^[13]研究了不同干燥介质(氮气、烟气和空气)对干燥后煤温度的影响。李先春等^[14]通过 Aspen Plus 模拟重点研究低温烟气干燥对电厂经济性的影响。上述褐煤干燥研究均针对直接干燥,且干燥介质均为低温烟气,鲜见高温烟气干燥和蒸汽管式干燥,特别是对干燥系统能源利用效率的研究。目前评价热力学系统能源利用效率的方法主要为能量平衡法,该方法基于热力学第一定律,仅反映能量在“量”上的关系而并未揭示能量利用过程中存在“质”的差异,而焓分析正好能够弥补能量平衡法的局限性和不足^[15],综合采用能量平衡法与焓分析法评价高温烟气干燥和回转管式干燥能源利用效率势必更加全面。此外,干燥介质温度是影响干燥系统能源利用效率的重要因素,该因素对评价干燥系统能源利用效率的影响关系如何也需要进一步明确。鉴于此,笔者采用 Aspen Plus 软件对高温烟气干燥和回转管式干燥过程进行流程模拟,研究 2 种干燥方式对褐煤干燥特性的影响,运用能量平衡法和焓分析方法对 2 种干燥系统能源利用效率进行分析,以期有效评价干燥系统能源利用合理程度。

1 褐煤干燥的数值模拟

1.1 高温烟气干燥及回转管式干燥工艺

本文研究的高温烟气干燥转筒是略带倾斜并能转动的圆筒体,其倾斜角度为 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。待干燥的煤从转筒一端上部进入,干燥后的煤从另一端下部排出。干燥介质为锅炉烟气,温度为 $650 \sim 800^{\circ}\text{C}$,从

进料端进入,从另一端上部排出,出口烟温约 120°C 。转筒内装有顺向抄板,使煤在筒体回转过程中不断抄起、洒下与热烟气充分接触,以提高干燥效率并使煤向转筒出口移动。

回转管式干燥以蒸汽为加热介质进行间接加热干燥,筒体内以同心方式排列加热管路并呈倾斜状态。待干燥煤从上方入口送入筒体内的干燥管内,当筒体旋转时,煤加热干燥后向出口移动。干燥过程所需热量由管外的低压蒸汽($0.15 \sim 0.55 \text{ MPa}$)提供。低压蒸汽沿筒体轴向进入筒内,并迅速向干燥管外表面扩散。干燥经干燥机下方底部出口排出,干燥产生的蒸汽随空气由干燥装置尾部排气口流入大气^[16]。

1.2 干燥模型的建立

王志超等^[7]对低温烟气干燥流程模拟进行研究,模型可为供高温烟气干燥模拟提供参考。高温烟气干燥模型与低温烟气干燥模型基本相同,流程如图 1 所示。其中干燥模块采用化学计量反应器(Rstoc),模拟原煤吸热水分蒸发过程;分离模块采用 SEP 模型,模拟气固分离过程。原煤、高温烟气以及原煤携带的空气直接进入干燥模块,干燥过程中所需热量由高温气体通过直接换热的方式获得。



图 1 高温烟气干燥模型

Fig. 1 Model of high temperature flue gas drying

与烟气干燥不同的是,回转管式干燥属于间接干燥。因此本文在烟气干燥模型的基础上建立了回转管式干燥模型如图 2 所示。干燥模块和分离模块与高温烟气干燥模型一致,由于回转管式干燥属于间接干燥,因此干燥过程中所需的热量由换热模块提供。换热模块选用 Heater 模型,模拟低压蒸汽与原煤间接换热干燥,低压蒸汽换热后形成冷凝水。

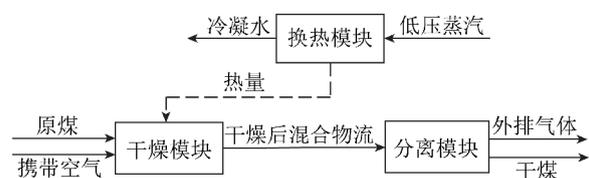


图 2 回转管式干燥模型

Fig. 2 Model of rotating tube drying

为验证所建立的回转管式干燥模型的正确性,

将模型模拟结果与已有文献数据进行对比,具体见表1。由表1可知,模拟值与文献值吻合良好,说明

本文建立的干燥模型能够很好地反映蒸汽回转管式干燥过程。

表1 回转管式干燥模拟结果与文献值比较

Table 1 Comparison of the reference values and simulating results of rotating tube drying model

项目	文献值 ^[16]			模拟值		
	流量/(kg·h ⁻¹)	温度/℃	压力/MPa	流量/(kg·h ⁻¹)	温度/℃	压力/MPa
原煤入口	130.15	20	0.1	130.15	20	0.1
干燥后煤	68.29	110	0.1	68.27	110	0.1
蒸汽入口	74.88	203.1	0.223	74.86	203.1	0.223
冷凝液	74.88	117.1	0.2	74.86	117.1	0.2
排气	123.72	110	0.1	123.74	110	0.1

2 数值模拟结果与分析

2.1 模拟条件及定义

以某褐煤为模拟煤种,采用已建立的干燥模型对高温烟气干燥和回转管式干燥进行模拟,模拟煤种的工业分析和元素分析见表2。

能量不但存在数量上的差异还有品位的高低,

热量只可以部分转化为有用功,而有用功则可全部转化为热量。焓定义为在任意给定环境下,任一形式的能量中理论上能转换为有用功的那部分能量,因此焓的能量品质要优于热量。工程上通常为开口系统稳态稳流工况,在不考虑动能和势能的前提下,物流焓计算式为

$$E_x = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (1)$$

表2 模拟煤种煤质分析

Table 2 Properties of coal sample used for simulation

工业分析/%				元素分析/%				
M_t	A_d	V_d	FC_d	C_d	H_d	O_d	N_d	$S_{t,d}$
32.90	15.16	37.50	47.34	61.19	3.76	18.09	0.98	15.16

式中, H 和 S 分别为物流在所分析状态下的焓(J)和熵(J/K); H_0 、 S_0 和 T_0 分别为物流在环境状态下的焓(J)、熵(J/K)和温度(K)。

由于煤在 Aspen Plus 中属于非常规组分,因此本文中焓值简化为煤分析状态与环境状态下的焓差。评价干燥系统能源利用效率的主要参数有热利用效率和焓利用效率,热利用效率以热力学第一定律为基础,定义为干燥水分升温及蒸发所需热量(Q_1)与干燥介质带入干燥系统的热量(Q)之比,热利用效率越高,说明热损失越小。

$$\eta_Q = \frac{Q_1}{Q} \quad (2)$$

与热利用效率类似,焓利用效率 η_E 定义为流出干燥系统的焓(E_{out})与流入干燥系统的焓(E_{in})的比值,焓利用效率越高,则焓损失越小,即实际可用能量损失越小。

$$\eta_E = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3)$$

2.2 热利用效率和焓利用效率分析

高温烟气干燥系统入口原煤温度 25℃,压力 0.101 3 MPa,质量流率 130.1 kg/h,干燥用烟气温度 750℃,压力 0.101 3 MPa,干燥后烟气温度 110℃,干燥后原煤含水率降至 10%。回转管式干燥系统入口原煤温度 25℃,压力 0.101 3 MPa,质量流率 130.1 kg/h。干燥用蒸汽温度 203.1℃,压力 0.223 MPa,经干燥换热后温度为 117.1℃,压力 0.2 MPa,原煤经干燥后温度升高至 110℃,含水率降低至 10%。高温烟气干燥系统与回转管式干燥系统热利用效率和焓利用效率对比如图 3 所示。

由图 3 可知,回转管式干燥的热利用效率为 71.27%,焓利用效率为 87.68%,而高温烟气干燥热利用效率为 67.23%,焓利用效率为 38.35%。与高温烟气干燥相比,回转管式干燥的热利用效率高

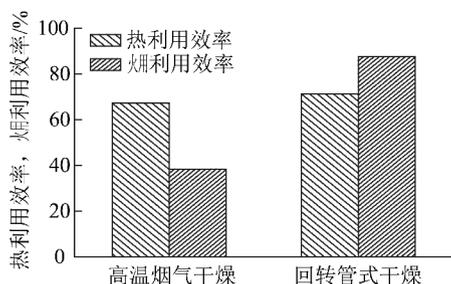


图3 高温烟气干燥及回转管式干燥热力学分析对比

Fig. 3 Thermodynamic analysis and comparison of high temperature flue gas drying and rotating tube drying

4.04%。干燥相同数量的原煤时,热利用效率主要与未被利用而带出系统的热量有关,而烟气用量要大于蒸汽用量,因此烟气干燥热利用效率相对较低。由于热利用效率基于能量守恒定律,仅考虑了能量数量上差别而未体现质的高低,因此烟气干燥与蒸汽干燥在热利用效率上差别不大。焓分析结果表明,蒸汽干燥的焓利用效率比烟气干燥高49.33%。从能源品质角度来看,750℃高温烟气属于高品位热源,而203.1℃蒸汽能源品质相对较低,高温烟气焓损失大的本质在于能源利用的不对等性,就干燥系统而言,焓损失主要源于传热温差,温差越大焓损失越大。由于烟气干燥热源温度较高为750℃,与待干燥原煤温差为725℃,而蒸汽干燥热源温度203.1℃,传热温差为178.1℃,因此烟气干燥较蒸汽干燥焓损失大。

2.3 干燥介质温度对热利用效率和焓利用效率的影响

在高温烟气干燥系统入口原煤参数、干燥出口参数和干燥后煤的含水率保持不变的前提下,烟气温度与干燥系统热利用效率及焓利用效率的关系如图4所示。由图4可知,烟气温度对干燥系统热利用效率及焓利用效率影响较大。烟气温度为600℃时,热利用效率为62.20%,干燥系统的热利用效率随烟气温度的升高而升高,烟气温度800℃时,热利用效率提高至67.23%。从能量守恒角度来看,由于干燥原煤数量及干燥效果不变,干燥水分升温及蒸发所需热量恒定,随着烟气温度的升高,干燥所需的烟气量减小,干燥后未被利用而带出系统的热量减小,因此热利用效率提高。烟气温度为600℃时,焓利用效率42.63%,与热利用效率相反,烟气温度升高时,焓效率逐渐降低,当烟气温度为800℃时焓利用效率为38.35%。焓反映的是能量品质的高低,能源利用追求“温度对口,梯级利用”,烟气温度越

高能源利用的不对等性越大,导致焓损失越大,因此随着烟气温度升高焓利用效率反而降低。

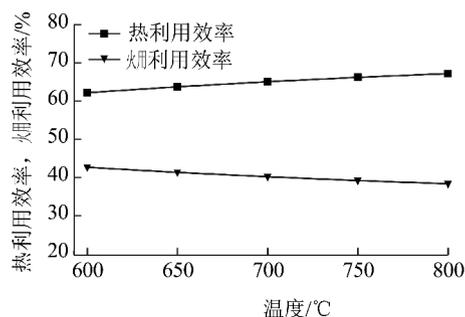


图4 烟气温度对干燥系统热利用效率及焓利用效率的影响

Fig. 4 Influence of flue gas temperature on the heat utilizing efficiency and exergy utilizing efficiency of drying system

保持回转管式干燥系统入口原煤参数、干燥出口参数和干燥后煤的含水率不变,干燥用蒸汽温度与干燥系统热利用效率及焓利用效率的关系如图5所示。由图5可知,与高温烟气干燥中烟气温度对干燥系统热利用效率及焓利用效率影响关系类似,干燥热利用效率均随干燥介质(蒸汽)温度升高而提高,焓利用效率均随干燥介质(蒸汽)温度的升高而降低。这是由于干燥介质温度的升高虽然减少了干燥介质用量,减少未被利用而带出系统的热量,提高了热利用效率,但是提高干燥介质温度却加大了换热温差,增加了传热过程中不可逆的焓损失。上述分析结果表明,干燥介质温度升高虽然对热利用效率有积极影响,减少热量损失,但却以牺牲高品质能量为代价,因此综合考虑干燥强度、干燥成本及焓利用效率等因素,选择合适的干燥介质温度很重要。

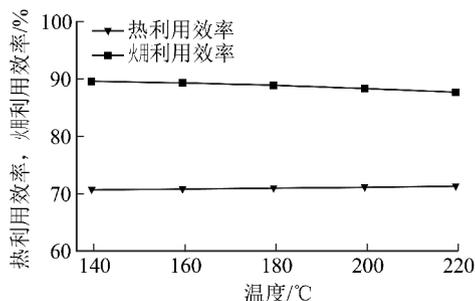


图5 蒸汽温度对干燥系统热利用效率及焓利用效率的影响

Fig. 5 Influence of vapour temperature on the heat utilizing efficiency and exergy utilizing efficiency of drying system

3 结 论

1) 建立了回转管式干燥模型,模拟值与文献值

吻合良好,说明 Aspen Plus 可以较好地模拟回转管式干燥。

2)干燥用烟气温度 750 °C 时,烟气干燥热利用效率为 67.23%,焓利用效率为 38.35%。干燥用蒸汽温度为 203.1 °C 时,蒸汽干燥的热利用效率为 71.27%,焓利用效率为 87.68%,热利用效率较烟气干燥高 4.04%,焓利用效率较烟气干燥高 49.33%。

3)干燥介质温度对热利用效率和焓利用效率的影响不同,高温烟气干燥与回转管式干燥热利用效率均随干燥介质温度升高而提高,而焓利用效率均随干燥介质温度的升高而降低。因此干燥介质温度并不是越高越好,必须综合考虑干燥强度、干燥成本以及干燥系统的焓利用效率等因素。

参考文献 (References) :

- [1] Muthusamy Karthikeyan, Wu Zhonghua, Arun Mujumdar. Low-rank coal drying technologies - current status and new developments[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(3) : 403-415.
- [2] Jeon D M, Kang H T, Kim H T, et al. Investigation of drying characteristics of low rank coal of bubbling fluidization through experiment using lab scale[J]. *Science China(Technological Sciences)*, 2011, 54(7) : 1680-1683.
- [3] Osman H, Jangam S V, Lease J D, et al. Drying of low-rank coal (Irc) - a review of recent patents and innovations[J]. *Drying Technology*, 2011, 29(15) : 1763-1783.
- [4] Arash Tahmasebi, Yu Jianglong, Li Xianchun, et al. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(10) : 1821-1829.
- [5] 赵鹏, 李文博, 梁江朋, 等. 低阶煤提质技术现状及发展建议[J]. *洁净煤技术*, 2015, 21(1) : 37-40.
Zhao Peng, Li Wenbo, Liang Jiangpeng, et al. Status and development suggestion of low rank coal upgrading technologies[J]. *Clean Coal Technology*, 2015, 21(1) : 37-40.
- [6] 李战国, 毛永清, 温志强, 等. 褐煤高温热烟气滚筒干燥工程应用及评价[J]. *电站系统工程*, 2013(5) : 27-29.
Li Zhanguo, Mao Yongqing, Wen Zhiqiang, et al. Engineering application and evaluation of lignite drum-type drying technology with high temperature flue gas [J]. *Power System Engineering*, 2013(5) : 27-29.
- [7] 王志超, 姚伟, 张小宏, 等. 烟气预干燥褐煤热经济性分析[J]. *热力发电*, 2016, 45(6) : 5-10.
Wang Zhichao, Yao Wei, Zhang Xiaohong, et al. Thermal economic analysis of flue gas pre-drying lignite[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(6) : 5-10.
- [8] 赵孟浩, 张守玉, 董建勋, 等. 单颗粒褐煤高温烟气干燥过程数值模拟[J]. *化工学报*, 2016, 67(4) : 1534-1540.
Zhao Menghao, Zhang Shouyu, Dong Jianxun, et al. Numerical simulation of single lignite particle drying process in high temperature flue gas[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering(China)*, 2016, 67(4) : 1534-1540.
- [9] Yao Yuehua, Chen Yanjie, Jiang Zhenxi, et al. Comparison and analysis of the process simulations of shell pulverized coal gasification and texaco slurry coal gasification[J]. *Computers & Applied Chemistry*, 2012, 29(1) : 75-79.
- [10] Abdelouahed L, Authier O, Mauviel G, et al. Detailed modeling of biomass gasification in dual fluidized bed reactors under aspen plus[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26(6) : 3840-3855.
- [11] Ramzan N, Ashraf A, Naveed S, et al. Simulation of hybrid biomass gasification using aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(9) : 3962-3969.
- [12] 靳皎, 姚晓虹, 刘晓花, 等. Aspen Plus 在煤气化技术中的应用进展[J]. *山东化工*, 2016, 45(13) : 71-73.
Jin Jiao, Yao Xiaohong, Liu Xiaohua, et al. The application progress of Aspen Plus simulation in coal gasification[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2016, 45(13) : 71-73.
- [13] 刘娜, 黄雪莉. 基于 Aspen Plus 的煤干燥过程模拟计算[J]. *煤炭转化*, 2013, 36(1) : 65-67.
Liu Na, Huang Xueli. Simulation and calculation for coal drying process by Aspen Plus [J]. *Coal Conversion*, 2013, 36(1) : 65-67.
- [14] 李先春, 任海飞, 余江龙, 等. 富氧燃煤电厂褐煤干燥过程的数值模拟[J]. *煤炭转化*, 2014, 37(3) : 38-41, 54.
Li Xianchun, Ren Haifei, Yu Jianglong, et al. Numerical simulation of lignite drying process in oxy-fuel combustion power plant [J]. *Coal Conversion*, 2014, 37(3) : 38-41, 54.
- [15] Aljundi I H. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(2/3) : 324-328.
- [16] Kakaras E, Ahladas P, Symopoulos 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.