

# 基于 Aspen Plus 煤粉工业锅炉系统建模与分析

罗伟<sup>1,2,3</sup>, 陈隆<sup>1,2,3</sup>, 崔豫泓<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

**摘要:**为了研究 SZS20-1.6-AIII 卧式煤粉工业锅炉燃烧和换热特性, 采用 Aspen Plus 对煤粉燃烧、烟气换热、锅筒蒸发和除尘等 4 个过程进行建模, 探讨 Aspen Plus 中适用于上述 4 个过程的模块及其性质, 构建完整的煤粉工业锅炉运行模拟流程, 同时在收率反应器模块 RYield 中嵌入 Fortran 语言程序以规定煤粉分解产物和碳转化率。结果表明, 建立的 Aspen Plus 模型能够准确模拟锅炉运行; 空气温度越高, 换热量越多, 当空气过量系数为 0.96 时烟气的换热量达到最大; 煤粉湿度越大, 燃烧温度越低, 换热量越少。

**关键词:**煤粉工业锅炉; 燃烧; 换热; Aspen Plus; 模拟

中图分类号: TD849; TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2015)06-0091-04

## Modeling and analysis of industrial pulverized coal boiler based on Aspen Plus

LUO Wei<sup>1,2,3</sup>, CHEN Long<sup>1,2,3</sup>, CUI Yuhong<sup>1,2,3</sup>

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Environmental Protection, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to study the combustion and heat transfer characteristics of SZS20-1.6-AIII industrial coal boiler, the process of coal combustion, heat transfer of flue gas, water evaporation in the drum and ash separation were modeled by Aspen Plus. The closest module for the four processes was investigated. The whole simulation process of boiler operation was built. To control carbon conversion rate and decomposition products, the Fortran language program was embedded in RYield which set rules for yield. The results showed that the simulation was accurate. When the air temperature was higher, the heat exchange was more and it come to the maximum when the excess air coefficient was 0.96. The flue temperature decreased when the moisture in the pulverized coal increased, and at the same time, the heat exchange become lower.

**Key words:** industrial pulverized coal boiler; combustion; heat exchange; Aspen Plus; simulation

## 0 引言

我国燃煤工业锅炉保有量近 50 万台, 每年燃煤量超过 4 亿 t, 大多数为普通链条锅炉, 污染物排放总量接近电站锅炉<sup>[1]</sup>。大量燃煤工业锅炉的使用是近年来区域性雾霾天气频繁出现的重要原因之一, 2014 年 7 月 1 日新版《锅炉大气污染物排放标准》正式实施, 该标准对燃煤工业锅炉的污染物排放提出了更高的要求。在此形势下, 煤炭科学技术

研究院有限公司研发的高效煤粉工业锅炉更加被市场认可, 高效煤粉工业锅炉采用旋流逆喷式双锥燃烧器和空气分级燃烧技术, 具有热效率高、污染物 (NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、可吸入颗粒物) 排放量低以及负荷调节方便的特点, 已在全国十几个省市推广使用<sup>[2]</sup>。目前对高效煤粉工业锅炉的研究主要有双锥式煤粉燃烧器的燃烧和空气动力场特性研究<sup>[3]</sup>、高浓度煤粉供料器的两相流动特性研究<sup>[4]</sup>、污染物排放控制技术的开发和研究<sup>[5-8]</sup>, 而在锅炉系统方面没有进行

收稿日期: 2015-10-06; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.06.022

基金项目: 煤炭科学研究总院基础研究基金资助项目(2012JC03)

作者简介: 罗伟(1982—), 男, 湖北武汉人, 助理研究员, 工学硕士, 从事煤粉工业锅炉研究工作。E-mail: luoxiwei2008@163.com

引用格式: 罗伟, 陈隆, 崔豫泓. 基于 Aspen Plus 煤粉工业锅炉系统建模与分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 91-94.

LUO Wei, CHEN Long, CUI Yuhong. Modeling and analysis of industrial pulverized coal boiler based on Aspen Plus[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 91-94.

过相关的研究。Aspen Plus 作为一款大型的通用化工流程模拟软件,能够进行精细的流程设计和稳态模拟,广泛用于石油化工和电力等领域的流程设计、模拟和优化,国内外学者使用 Aspen Plus 对煤气化系统、燃气轮机系统以及循环流化床系统进行了大量研究<sup>[9-11]</sup>,均建立了适合的模型来模拟实际运行系统,但是对煤粉工业锅炉的研究却鲜有出现,通过借鉴 Aspen Plus 建模的经验,对 SZS20-1.6-AIII 卧式煤粉工业锅炉系统流程建模并进行稳态模拟计算,模拟结果与锅炉运行实际参数有很好的符合度,在此基础上研究给风流量和温度,煤粉湿度和温度对锅炉燃烧和换热的影响。

## 1 Aspen Plus 建模

图1为高效煤粉工业锅炉系统流程。煤粉由一次风输送进入预燃室,二次风助燃,产生高温烟气进入炉膛,与水冷壁和对流管束换热。经过换热后的低温烟气在烟道省煤器中进一步放热,低温烟气经过布袋式除尘器进行除尘,经由烟囱排向大气。

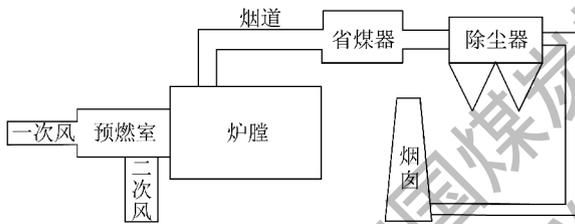


图1 高效煤粉工业锅炉流程

煤粉燃烧是复杂的物理化学过程,采用 Aspen Plus 模拟时需要假设<sup>[12]</sup>:① 燃烧系统处于稳定的状态,各项参数不随时间发生变化;② 空气与煤炭颗粒能够在瞬间完成混合;③ 煤炭中的 H、O、N、S 全部发生反应转化为气态,而 C 则会残存,以固态形式随烟气流出炉膛;④ 锅炉内部压强相等;⑤ 煤颗粒的温度分布均匀。

### 1.1 组分规定与物性方法

Aspen Plus 将物质分为常规组分和非常规组分,其中煤(COAL)、灰(ASH)和残碳(UBC)为非常规固体组分,类型为 Nonconventional; N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、NO、NO<sub>2</sub> 和 S 为常规组分,类型为 Conventional; C 为常规固体组分,类型为 Solid。由于煤燃烧包括常规固体组分和非常规固体组分,故选取总物流类型为 MCINCPSD。煤燃烧生成的烟气主要组分为 N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,烟气总体上呈现出非极性或弱极性,可以选择 RK-SOAVE、

PR-BM 或者 RKS-BM 等物性计算模型。

COAL、ASH 和 UBC 等非常规固体组分不参与相平衡和化学平衡计算,但需计算焓值和密度,本文焓值计算模型为 HCOALGEN,通过元素分析、工业分析以及硫元素分析计算煤的燃烧热、标准生成热和热容,并用三者组成的关联式计算煤焓值;密度模型为 DCOALIGT,用于计算基于干基的真实密度<sup>[13]</sup>。

### 1.2 锅炉流程模块分析

煤粉工业锅炉 Aspen Plus 模拟流程见文献[14]的图1,主要有四大模块,煤粉燃烧反应器模块 RGibbs 模块、煤粉分解反应器模块 RYield 模块、烟气换热 Heater 模块以及锅筒蒸发模块 Flash 2 模块。

#### 1.2.1 煤燃烧 RGibbs 反应器模块分析

选择 RGibbs 反应器模块模拟煤粉燃烧, RGibbs 反应器根据系统 Gibbs 自由能趋于最小值原则,计算同时达到化学平衡和相平衡时的系统组成和相分布,不需要输入具体化学反应方程式及化学反应动力学参数。为了提高模拟精度,本文规定煤燃烧烟气组分为 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、C 和 UBC,反应器压力设置为  $1.015 \times 10^5$  Pa,模拟过程中将煤粉分解热导入其中。

#### 1.2.2 煤分解 RYield 收率反应器模块分析

RGibbs 反应器模块不能直接对非常规固体组分进行计算,因此在其之前添加用于模拟煤粉分解的 RYield 收率反应器模块。RYield 反应器只考虑物质总质量平衡,不考虑元素平衡。在该反应器中煤粉将分解为单质,并规定每种组分的初始相对产率。煤粉分解产物规定为 H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、C、S、ASH 和 UBC,每种组分最终产率按照煤的工业分析和元素分析进行计算,采用 Fortran 语言编程嵌入到 Aspen Plus 中,该程序将干基转化为收到基从而计算每种组分的最终产率。C 和 UBC 的量与煤粉燃烧时碳转化率有关,程序中碳转化率取值 98%,分解热全部导入到 RGibbs 反应器中,不考虑热损失。

#### 1.2.3 烟气换热 Heater 模块分析

采用 Aspen Plus 中 Heater 模块进行换热分析,通过输入压力和出口温度 2 个参数即可计算热负荷。定义烟气与炉膛水冷壁和对流管束内的换热为高温换热模块,烟气在省煤器内换热为低温换热模块,为了简化计算,假设将两部分换热量全部导入锅筒,并且蒸汽在锅筒内产生。高温烟气经过炉膛后温度降低至 250℃ 左右,烟气温度经过省煤器后温度降低至 158℃ 左右。

### 1.2.4 锅筒 Flash 2 模块分析

Flash 2 模块模拟锅筒产汽,模块具有 2 股流体出口,分别表示蒸汽和饱和水,锅炉给水为较冷的入口流体,规定汽包压力。将高温换热量和低温换热量输入到 Flash 2 模块后即可产生该额定压力下的饱和蒸汽及饱和水,若热量过大,则只会产生饱和蒸汽甚至过饱和蒸汽。根据实际运行数据额定压力设定为  $1.19 \times 10^5$  Pa。

### 1.2.5 烟灰分离模块 SSplit 分析

SSplit 模块用于模拟烟气中灰渣的粗分离,不规定灰渣分离半径尺度和分离效率,该模块有 2 股出口物流,分别为固体灰渣流股和洁净烟气流股。

## 2 模拟结果与准确性分析

夏季锅炉运行典型工况:耗煤量为 1438 kg/h,送风总量为 23000 m<sup>3</sup>/h,给水温度为 33.7 °C。表 1 是煤质分析,收到基的低位发热量为 27.7 MJ/kg。

表 1 煤的工业分析和元素分析 %

$M_{ar}$	$FC_d$	$V_d$	$A_d$	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(O_d)$	$w(N_d)$	$w(S_d)$
6.1	57.84	35.66	6.5	76.34	4.74	11.13	0.76	0.53

锅炉运行过程中蒸发量可以表征系统热量利用情况,烟气氧含量表征煤粉燃烧情况,根据蒸发量和烟气中氧气含量误差大小判断模型的准确性,表 2 为 Aspen Plus 模拟值,蒸发量模拟值与实际值误差极小,氧气模拟值误差较高,氧气误差较高原因主要是实验中烟气组分监测点位于烟囱内,锅炉炉膛、烟道、除尘器以及烟囱内均存在漏风,提高了烟气中氧气含量。

表 2 Aspen plus 模拟值与实际值对比

项目	模拟值	实际值	误差
蒸发量/(t · h <sup>-1</sup> )	12.56	12.6	0.32%
O <sub>2</sub> 体积分数/%	10.5	13.71	23.41%

计算得到烟气高温换热量为 8.49 MW,低温换热量为 0.78 MW,烟气总换热量为 9.27 MW,由公式(1)计算锅炉热效率

$$\eta = \frac{\text{烟气换热量}}{\text{煤粉放热量}} \times 100\% \quad (1)$$

通过计算,  $\eta = 83.82\%$ , 低于设计的额定热效率 90%,说明煤粉工业锅炉在夏季低负荷运行情况下锅炉的热效率有所降低。

## 3 优化分析

### 3.1 空气量与温度分析

采用 Aspen Plus 灵敏度分析工具,研究不同空气流量条件烟气换热量。空气量对烟气换热量影响如图 2 所示,当空气量由 10000 m<sup>3</sup>/h 增加到 11200 m<sup>3</sup>/h,烟气中 CO 含量快速降低,O<sub>2</sub> 含量微小变化后较快上升,换热量达到最大值 9.40 MW,热效率  $\eta_{\max} = 84.99\%$ ;当空气量继续上升,换热量下降。按照公式(2)计算理论空气量<sup>[15]</sup>

$$V^0 = \frac{1}{0.21} \left( 1.866 \frac{C_{ar}}{100} + 5.55 \frac{H_{ar}}{100} + 0.7 \frac{S_{ar}}{100} - 0.7 \frac{O_{ar}}{100} \right) \quad (2)$$

经过计算,在 20 °C,  $1.013 \times 10^5$  Pa 条件下需理论空气量为 11672 m<sup>3</sup>/h,所以当烟气换热量获得最大时空气过量系数为 0.96。

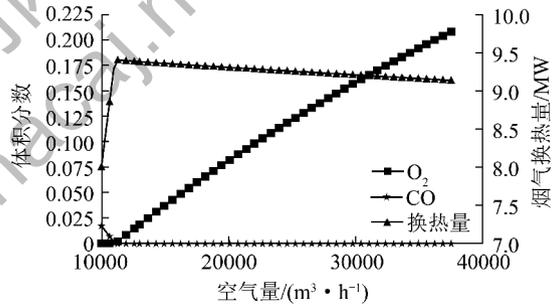


图 2 空气量对烟气换热量影响

文中锅炉安装于西北某高寒地带矿区,锅炉房内空气温度变化在 5 ~ 30 °C,如图 3 所示,当空气温度提高,烟气换热量由 9.2 MW 提高到 9.45 MW,烟气温度由 1132 °C 提高到 1152 °C。

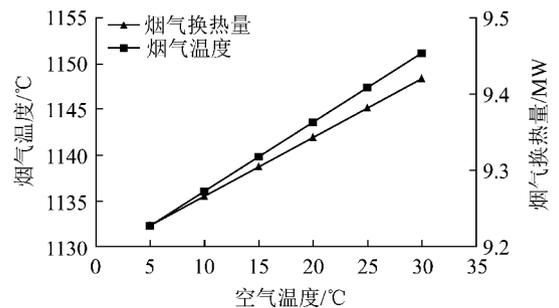
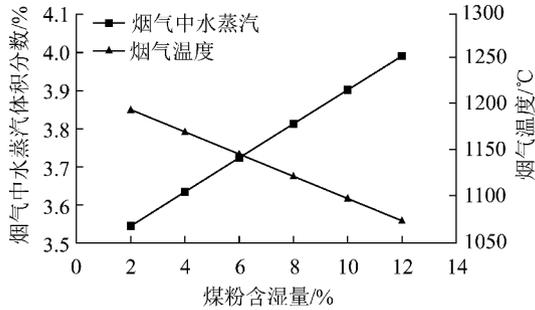


图 3 空气温度对燃烧影响(煤粉温度 20 °C)

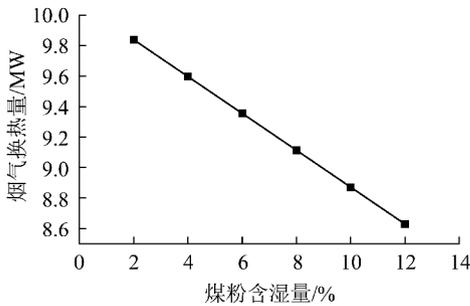
### 3.2 煤粉湿度与温度分析

高效煤粉工业锅炉采用精细研磨的煤粉作为原料,采用煤粉浓相输送技术,在预燃室进行预燃烧,图 4 为夏季典型工况下煤粉湿度对燃烧影响。当煤

粉水分由2%提高到12%,生成烟气中水蒸气体积分数由3.5%提高到4.0%,烟气温度由1192℃到1072℃,按照省煤器排烟温度150℃计算,可以获得的有效热量由9.8 MW下降到9.3 MW左右。



a) 煤粉含水量对燃烧影响



b) 煤粉含水量对换热量影响

图4 煤粉含水量对燃烧和换热量影响

煤粉制备采用中间仓储式贮存,每台锅炉独立拥有一个煤粉塔,煤粉温度受环境温度影响明显,根据实际情况,煤粉温度变化在-10~40℃,图5所示是煤粉温度变化对燃烧的影响,当煤粉温度提高,烟气温度和换热量变化不大,烟气温度由1142℃提高到接近1145℃,换热量由9.26 MW提高到9.29 MW。

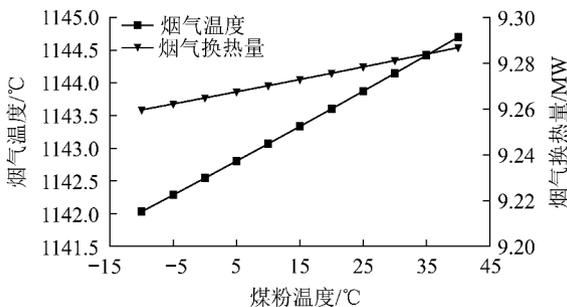


图5 煤粉温度对燃烧影响(空气温度20℃)

### 3 结论

1)采用工程软件 Aspen Plus 对高效煤粉工业锅炉系统进行建模和稳态模拟,研究煤粉分解和燃烧、烟气换热、烟灰分离以及锅筒产汽等4个重要过

程并在 RYield 模块中嵌入 Fortran 程序,模拟计算结果与实际相符;

2)夏季典型负荷情况下,空气量为11200 m<sup>3</sup>/h时换热量达到最大,此时空气过量系数为0.96;空气温度由5℃提高到30℃,烟气温度由1132℃提高到1152℃,烟气换热量由9.2 MW提高到9.45 MW;

3)煤粉含湿量由2%提高到12%,烟气中水蒸气体积分数由3.5%提高到4.0%,烟气温度由1192℃下降到1072℃,烟气换热量由9.8 MW下降到9.3 MW;煤粉温度在-10~40℃变化时对燃烧烟气温度和烟气换热量影响较小。

### 参考文献:

- [1] 严炳荣,罗晓明,时贵玉,等.燃煤粉工业锅炉的发展前景及节能减排技术创新[J].节能技术,2010,28(1):65-69.
- [2] 冯现河.高效煤粉工业锅炉技术开发及示范推广[J].洁净煤技术,2011,17(4):62-66.
- [3] 姜思源,王永英,周建明,等.中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J].煤炭学报,2014,39(6):1147-1153.
- [4] 刘振宇,王乃继,纪任山.文氏管煤粉混合器的数值模拟[J].煤炭转化,2013,36(3):52-55.
- [5] 李高亮,王乃继,肖翠微,等.空气分级对降低煤粉工业锅炉氮氧化物排放的实验研究[J].工业锅炉,2014(6):1-5.
- [6] 龚艳艳,王乃继,肖翠微,等.灰钙循环烟气脱硫反应器空床阻力的数值模拟[J].工业锅炉,2015(1):15-19.
- [7] 罗伟,何海军,纪任山,等.高倍率灰钙循环耦合脱硫除尘技术研究[J].煤化工,2013,40(5):74-76.
- [8] 胡满银,乔欢,杜欣,等.烟气再循环对炉内氮氧化物生成影响的数值模拟[J].华北电力大学学报,2008,34(6):77-82.
- [9] 彭伟锋,钟伟民,孔祥东,等.德士古水煤浆气化过程的建模与优化分析[J].计算机与应用化学,2012,29(7):779-783.
- [10] 王颖.200 MW级IGCC系统优化及静态特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:82-104.
- [11] Frey H C, Akunuri N. Probabilistic modeling and evaluation of the performance, emissions, and cost of texaco gasifier-based integrated gasification combined cycle systems using Aspen [D]. Pittsburgh, PA:North Carolina State University for Carnegie Mellon University and US Department of Energy,2001:40-86.
- [12] Watkinson A, Lucas J, Lim C. A prediction of performance of commercial coal gasifiers[J]. Fuel,1991,70(4):519-527.
- [13] Aspen Plus. Aspen Plus getting started modeling processes with solids[M]. Burlington, MA, Aspen Technology, Inc., 2010:31-52.
- [14] 崔豫泓,罗伟.基于 Aspen Plus 煤粉工业锅炉污染物排放分析[J].洁净煤技术,2015,21(5):95-98.
- [15] 车得福,庄正宇,李军,等.锅炉[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2012:85-86.