

洁净燃煤发电系统热力性能计算软件编制

肖 军, 蔡宁生, 崔 丽

(东南大学 热能工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 根据过程系统工程的思想, 利用模块化建模方法, 对洁净燃煤发电系统建立了典型设备的数学模型库及各种工质热力性质计算函数库。运用 Visual Basic 程序开发工具开发研制了界面友好, 使用方便, 组态灵活, 可扩展性强的洁净燃煤发电系统热力性能计算软件。对我国洁净燃煤发电系统电站的选型、设计以及优化分析具有较高的实用价值。

关 键 词: 热力计算; 模块化; 软件

中图分类号: TM611.3; TP311 文献标识码: A

1 前言

燃煤电站在我国占居主导地位, 但能耗高、污染严重, 因此大力发展洁净高效燃煤发电技术是我国电力工业发展的必然方向。热力系统的性能计算分析是进行电站热力系统设计、运行、特性分析及技术改造的首要环节, 随着发电系统越来越复杂, 计算机技术的发展, 目前国内已出现不少应用于常规电站热力系统计算分析的软件^[1~3], 研制的软件逐渐趋向通用化和界面友好化, 但是这些软件仅局限于进行蒸汽热力系统性能计算, 而不能进行燃气热力系统性能计算, 因而限制了其在燃气—蒸汽联合循环电站等洁净燃煤发电系统中的应用。文献[4]中的计算软件可适用于部分洁净燃煤发电系统, 但其计算程序及通用性还不完善。国外也开发了多套基于热平衡的电厂热力系统计算软件, 其中最具代表性的通用软件有 PEPSE, PRESTO^[5] 和 SALT^[6], 前两套只适用于常规燃煤电站, SALT 能用于多种发电系统热力性能仿真, 但是它们都使用不便, 对用户要求高。C. Carcaschi 等^[7]采用模块化建模, 联立方程法, 可对燃气—蒸汽联合循环热力系统进行性能计算, 其中系统按设备进行模块划分, 但其部件模型较简单, 对难以简洁表达的函数采用局部线性化, 因而使模拟的准确度受到影响。A. O. Ongiro 等利用 ASPEN PLUS SHELL 开发了适用于 IGCC 等联合循环研究设

计的软件。可见国外近年来正在开展研制适用于先进的燃气—蒸汽联合循环热力系统性能计算的通用软件。

本文作者利用过程系统工程的思想, 从系统热力过程的角度出发, 对复杂的热力发电系统进行了模块化分解, 并对系统中的典型部件和设备建立了相互独立, 物理意义明确的模块模型库, 既化繁为简, 又便于不同系统的灵活调用, 并且可扩充新的模块, 以适应于不断发展的新型发电系统的需要。以此为基础, 利用 Visual Basic 研制开发了界面友好, 组态灵活, 不仅适用于常规粉煤电站, 而且适用于目前最具发展前景的洁净燃煤发电系统(如常规粉煤电站加尾部烟气脱硫装置 PC+FGD, 增压流化床联合循环系统 PFBC-CC, 采用部分煤气化的流化床联合循环系统 PGFBC-CC, 以及整体煤气化循环系统 IGCC 等)的热力性能计算软件, 对发展我国洁净燃煤发电技术具有较高的实用价值。

2 软件系统

洁净燃煤发电系统性能计算软件主要由性能计算程序和用户界面程序组成。性能计算程序以过程系统工程的思想, 利用模块化方法, 通过对系统设备热力过程的分析, 建立了典型设备和部件的模块模型库。模块之间通过物流相连接, 配置了接口模型库和工质热物性计算函数模型库, 通过计算流程控制, 实现系统性能计算。用户界面程序则以输入系统、结果显示与查询系统、容错支持系统和在线帮助系统等为基础, 构成主控模块, 实现便利的人机对话。

2.1 模块划分

随着燃煤电站机组容量的不断增大, 以及近年来发展的洁净燃煤发电系统如: PFBC-CC、PGFBC

收稿日期: 2000-06-15; 修订日期: 2001-05-08

基金项目: 国家“八五”重点攻关基金资助项目(85-205-02-01); 东南大学科学基金资助项目(K97023); 国家基础研究发展规划(973)基金资助项目(G199902210533)

作者简介: 肖 军(1968-), 女, 上海人, 东南大学讲师。

—CC 和 IGCC 等, 其不仅包括蒸汽热力循环, 还包括燃气热力循环, 可见现代燃煤发电系统越来越复杂。如果仍采用传统的建模方法, 必然编程复杂, 系统通用性差, 重复性工作量大, 因此, 本文根据过程系统工程的基本思想^[8], 即从系统的观点, 通过建立系统各组元的模型以及对系统结果进行分析, 最终得到整个系统的性能模型。

燃煤电站热力系统是各种不同的热力设备通过汽(气)、水管道连接而成的, 这些设备或连接管道中都发生一个或多个热力过程。尽管系统热力过程多, 但是从性质上可分为化学过程和物理过程两大类, 化学过程的描述除了需依据热力学第一定律外, 还要遵循化学热力学和燃烧学基本原理, 而物理过程则依据热力学第一定律就可得到简明的数学模型。因此, 作者根据热力设备所发生的热力过程的性质来划分模块, 对一个同时发生物理和化学变化的系统设备分别建立数学模型, 使得化学过程和物理过程分别对应各自的模块, 例如 PGFBC—CC 系统燃气轮机顶置燃烧室内所发生的燃气燃烧过程是一个化学变化过程, 燃烧产物和来自 PFBC 炉的燃气混合过程是一个物理变化过程, 因此需分别建立顶置燃烧室燃烧模块和气体混合过程模块。而对于只发生单一物理变化的设备, 则可忽略其内部具体反应过程, 视之为一个设备模块。如加热器只发生物理变化过程, 因而只需依据热力学第一定律建立简明的数学模型。另外热力系统中有的设备有多种不同物性的物流流入, 这些物流进入该设备后首先混合成新物流, 因此模块划分的另一原则是对于包含多种物流的热力设备应考虑其物流性质的区别, 需建立一混合器模块。如 PFBC—CC 系统中余热锅炉入口烟气有来自燃气轮机排气, 旋风分离器下泄燃气及燃气轮机冷却空气(不做功的部分), 三种气体进入余热锅炉, 混合成新组分的燃气, 再与给水换热, 因而, 余热锅炉其中划分了一个混合器模块。按上述两个原则划分模块, 每个模块反映的是设备的一个热力过程, 模型的物理意义十分明确, 且便于建立简明的数学模型。

本文对几种燃煤发电系统进行了模块化分析, 其中包括 PC+FGD, PFBC—CC, PGFBC—CC, 以及 IGCC, 系统的简明流程如图 1~图 4 所示。由图示可见, 尽管热力系统复杂, 但是主要由公共的子系统及设备模块(如燃机、压气机、锅炉等模块)和少数特殊模块(如煤气净化设备模块)等所组成, 因此同类设备的相同的热力过程即可调用一个模块, 并且可

重复使用, 大大减少重复性工作。

2.2 模块的连接

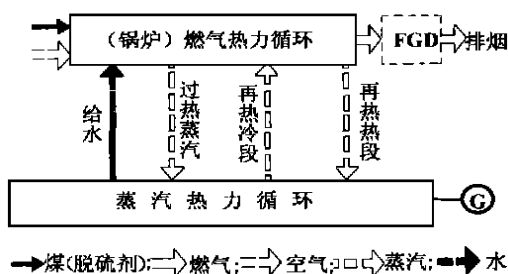


图 1 PC, PC+FGD 热力系统简明流程图

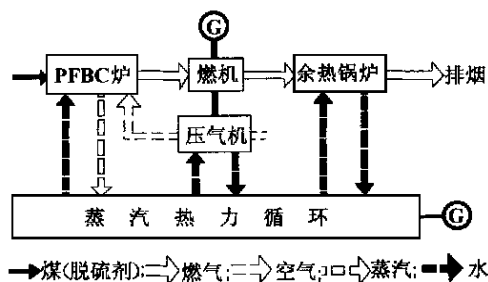


图 2 PFBC—CC 热力系统简明流程图

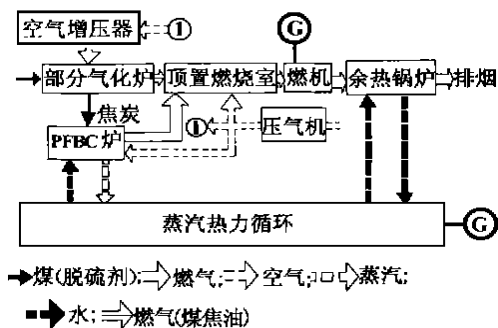


图 3 PGFBC—CC 热力系统简明流程图

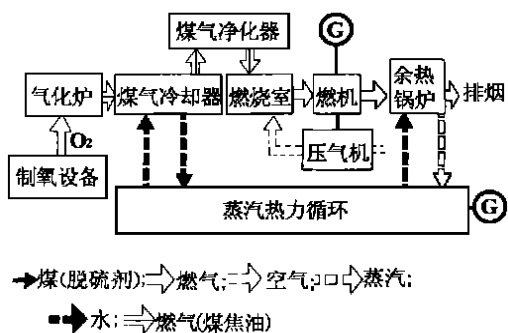


图 4 IGCC 热力系统简明流程图

以
上
将
复
杂
的
热
力
发
电
系
统
分
解
为
代
表
设
备
热
力
过
程
的
模
块
实
现
全
系
统
的
组
合
必
须
根
据
系
统
结
构
来
建
立
一
套
模
块
自
动
连
接
系
统。
依
据
上
述
模
块
划
分
方
法
模
块
或
子
系
统
之
间
靠
物
流
连
接
起
来。
燃
气
热
力
循
环
模
块
之
间
物
流
连
接
管
道
只
发
生
了
温
度
降
或
压
损
少
数
管
段
发
生
了
质
量
变
化

这些损失根据管道设备进口物流参数的测量值或根

据经验取一定值,即可确定模型进口物流参数。蒸汽热力循环中除了汽轮机的进汽、加热器进出口给水等主汽水流外,还有部分与系统运行有关的辅助汽水流,连接管道模块之间除有压力、温度变化之外,还可能有质量变化,因而建立了汽水平衡接口模块,以实现模块间的连接。至于燃气循环与蒸汽循环模块之间的接口,是通过燃气—汽水热交换模块,如锅炉模块、余热锅炉模块实现蒸汽循环与燃气循环的耦合。由此可见,在模块模型库基础上,配置接口模型库和工质热物性计算函数模型库,就可以方便灵活地组合构造用户所需的燃煤发电系统。

2.3 计算流程控制

在已有的模块化模型库和接口模型库基础上实现洁净燃煤热力系统的性能计算,还需要一定的流程控制条件,联合循环与非联合循环的热力系统的流程控制有所不同。

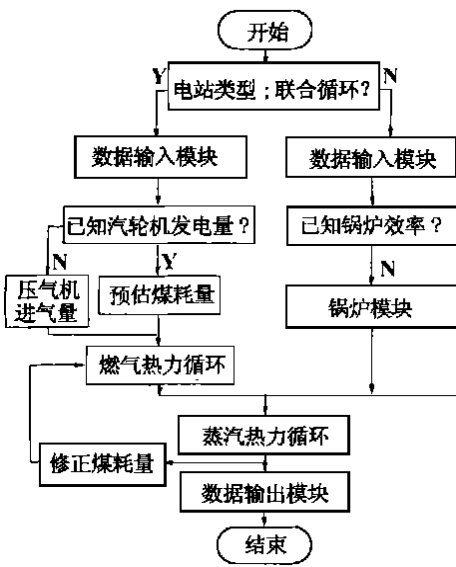


图 5 软件系统性能计算主流程图

对于属于非联合循环的热力系统,首先确定是否已知锅炉效率,已知锅炉效率则不需调用锅炉模块,否则需调用锅炉模块,确定锅炉效率。其热力计算一般有两种计算条件:一是已知发电功率,二是已知锅炉连续蒸发量。对于燃气—蒸汽联合循环电站,则既可按照压气机的进气流率计算发电系统热力性能,也可按照汽轮机发电机组的发电功率要求计算系统热力性能。其主要计算流程如图 5 所示。

本软件采用面向对象的 Visual Basic 编制系统性能计算程序和用户界面程序,由菜单、数据表格、对话框、图形等形式实现数据文件的输入输出以及系统的组态,因此具有友好的用户界面系统实现人机对话。软件组成结构如图 6 所示。

3 软件的功能和使用

3.1 软件的功能

本软件是针对洁净燃煤发电系统开发的热力系统性能分析计算软件,它可应用的系统除常规粉煤电站(PC)外还包括:(1)加装尾部烟气脱硫装置的粉煤电站(PC+FGD);(2)增压流化床联合循环(PFBC-CC);(3)采用部分煤气化的流化床联合循环(PGFBC-CC);(4)整体煤气化循环(IGCC)等洁净燃煤发电系统。软件能够识别以上几种发电系统,对其进行全厂原则性热力性能计算,确定汽轮机发电功率、各部分汽水流量、燃气轮机发电功率、全厂热效率、煤耗率等热力性能参数。

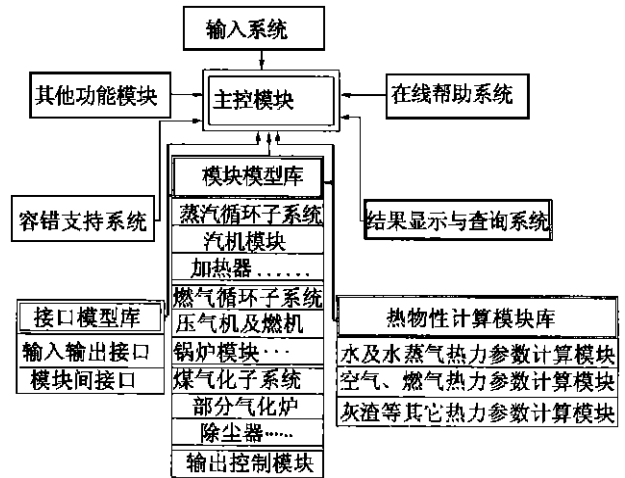


图 6 软件系统组成结构

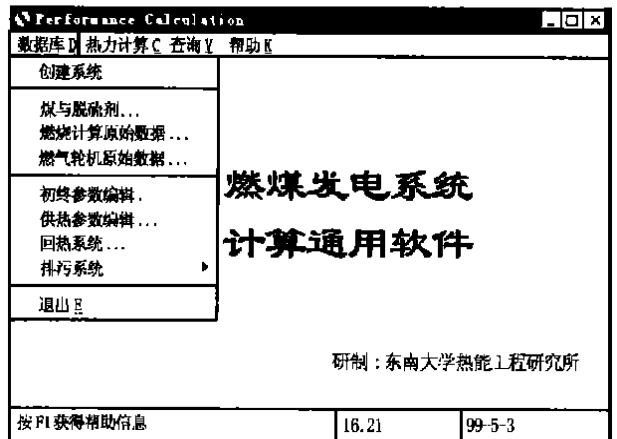


图 7 软件主窗体界面

3.2 软件的使用

本软件具有友好的用户界面,在 Windows 系统平台上运行此程序后,将自动进入主窗体界面,如图

7 所示。在数据库菜单下进行创建系统, 选择电站类型后, 系统根据不同的电站类型自动设定系统计算流程, 如: PC+FGD 和 PFBC-CC 系统, 或提供不同的系统方案供用户选择, 再确定系统计算流程, 如: IGCC 和 PGFBC-CC 系统。在数据库菜单下选择煤与脱硫剂、燃烧计算原始数据、初终参数编辑等子菜单, 出现相应的图表式数据输入界面, 汽轮机回热系统则有直观的图形化界面, 用以构造实际回热系统如图 8 所示。参数输入完成即可选择热力计算菜单中“全厂原则性计算”命令, 进行性能计算, 计算结果将直接输出到结果文件中。该软件还设有在线帮助功能, 使用中均可按“F1”键获得帮助信息。因而本软件的使用十分方便、灵活且适用范围广, 对用户要求低。

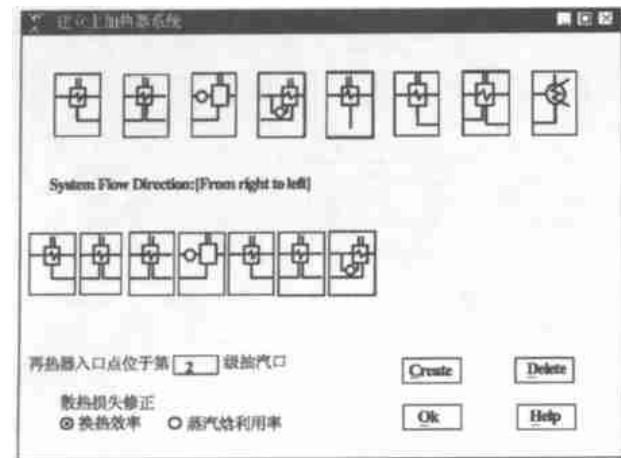


图 8 回热系统构造界面

4 计算示例

应用本软件对下列示例进行了热力性能计算。

示例一: PFBC-CC 燃煤发电系统, 采用 PFBC 锅炉, 蒸汽循环配国产 N300-16.7/537/537 型亚临界一次中间再热凝汽式汽轮机机组。

示例二: PGFBC-CC 燃煤发电系统, 半焦燃烧采用 PFBC 锅炉, 空气进入气化炉和 PFBC 锅炉, 蒸汽循环配国产 N300-16.7/537/537 型亚临界一次中间再热凝汽式汽轮机机组。示例一、示例二主要计算结果如表 1 所示。

从表 1 的计算结果可清楚地看到, 应用本软件分别可得到燃气、蒸汽热力性能以及全厂热经济性。另外在配置相同的汽轮机机组的情况下, 采用部分气化的增压流化床联合循环 PGFBC-CC 的经济性

能要优于不采用气化的增压流化床联合循环 PFBC-CC。由此可见, 应用本软件不仅可对同类电站进行性能比较, 也可方便地对非同类电站进行性能分析和比较。

表 1 示例一、二主要计算结果

| | PFBC-CC | PGFBC-CC |
|---|------------|------------|
| 燃气轮机 | | |
| 压比 | 16 | 16 |
| 压气机进气流量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ | 377 | 433.77 |
| 压气机功耗/kW | 139 495.08 | 171 903.1 |
| 燃气轮机做功/kW | 209 328.37 | 332 735.98 |
| 燃气轮机发电功率/kW | 66 383.53 | 152 887.71 |
| 部分气化炉和 PFB 锅炉 | | |
| 气化炉气化能量转换份额 | | 0.3 |
| 煤气主要成份 CO | | 0.088 4 |
| H ₂ | | 0.202 1 |
| CO ₂ | | 0.106 3 |
| N ₂ | | 0.373 6 |
| 煤气低位热值/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ | | 3 906.35 |
| 耗煤量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ | 42.35 | 33.48 |
| 蒸汽轮机 | | |
| 锅炉蒸发量/ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$ | 838.68 | 956.39 |
| 余热锅炉换热量/kW | 82 731.24 | 223 924.77 |
| 蒸汽轮机发电功率/kW | 291 649.57 | 299 998.07 |
| 全厂热经济性 | | |
| 总发电功率/kW | 358 033.13 | 461 100.98 |
| 发电标准煤耗率/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ | 298.44 | 274.19 |
| 发电效率/% | 41.17 | 46.68 |
| 供电功率/kW | 343 711.81 | 434 770.95 |
| 供电效率/% | 39.52 | 44.81 |
| 供电效率校核/% | 39.52 | 44.81 |

5 结论

综上所述, 本软件具有以下特点:

(1) 可对目前最具发展前景的几种洁净燃煤发电系统进行性能计算和分析, 对我国洁净燃煤发电系统电站的选型、设计以及优化分析具有很好的实用价值;

(2) 用户界面友好, 使用方便, 组态灵活;

(3) 利用过程系统工程的思想, 从热力过程角度出发, 进行模块化分析, 建立的模块模型库通用性强, 系统可重复使用相同模块, 而且在原有模块的基础上可创建新的模块, 具有很好的可扩展性, 适应于不断发展的、越来越复杂的热力发电系统需要, 为进一步开发打下了良好的基础;

(4) 在本软件的基础上, 有利于与热经济学优化方法相结合, 研究洁净燃煤发电系统的性能优化方法, 开发研制复杂循环发电系统的性能优化软件。

废物衍生燃料(RDF)加压热解特性及其动力学研究

金保升, 董长青, 仲兆平

(东南大学 热能工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 利用加压热重分析仪对城市固体废弃物衍生燃料(RDF)中厨余物等典型有机组份进行了加压热分析研究, 实验载气为高纯氮气, 加热速率为 20 K/min, 终温 773 K。通过对热重(TG)、微分热重(DTG)曲线的深入分析, 得出了加压条件下 RDF 中几种典型有机组份的热解反应动力学参数, 并提出相应的热解机理。

关键词: 废物衍生燃料; 热解特性; 动力学参数; 热重分析

中图分类号: X705; O642

文献标识码: A

符号说明

| | |
|--------------------|---|
| α ——样品热解转化率 | W_t —— $T(t)$ 时样品重量/mg |
| k ——反应速度常数 | W_∞ ——最终样品重量/mg |
| n ——反应级数 | A ——频率因子/ min^{-1} |
| t ——反应时间/s | E ——活化能/ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| T ——绝对温度/K | ΔW ——样品重量差($W_t - W_0$)/mg |
| W_0 ——样品初始重量/mg | ΔW_∞ ——样品重量($W_\infty - W_0$)/mg |

1 引言

纵观国内外城市垃圾的处理方式, 随着垃圾中可燃物所占比例的上升, 以焚烧为代表的处理方式迅猛发展。同时也暴露出许多问题, 如热效率低、产生的烟气易造成设备损坏和形成二次污染。

燃气—蒸汽联合循环发电技术能较大幅度提高发电效率, 已在燃煤电厂获得了成功应用, 特别是带前置式裂解炉的第二代增压流化床联合循环和第二

代整体煤气化联合循环发电技术, 不仅发电效率达 45% 以上, 而且对环境污染很小^[1~3]。同样, 采用基于加压气化思想的垃圾联合循环发电技术, 既可提高综合发电效率, 又可通过在流化床气化炉内和对产生的燃气添加脱除剂去除大量的气相污染物, 燃烧室内的高温燃烧使飞灰熔融后骤冷固化可消除重金属和有机致癌物质对环境的不良影响, 同时也达到了除尘效果。其中加压气化是决定该技术先进性和实用性的重要因素之一, 本文针对中国 RDF 的某些典型有机组份, 着重研究了加压对各物料热解特性的影响, 并提出相应的热解动力学模型。

2 实验

2.1 实验物料

城市固体废弃物是多种废物的混合物, 其组成随季节、地区等因素变化很大, 比较典型的组份如表 1, 其中厨余物含量最高。城市固体废弃物衍生燃料(RDF)中可燃物的元素与热值分析(表 2)可知废塑料热值最高, 其余依次为废橡胶、废木料、废织物和废纸, 厨余物热值最低(约为 4 650 kJ/kg, 高位发热量)。本文选取 RDF 中有代表性的厨余物以及废木料和废纸作实验物料。

收稿日期: 2000-07-13; 修订日期: 2001-04-28

作者简介: 金保升(1961—), 男, 江苏淮阴人, 东南大学教授, 博导。

参考文献:

- [1] 李政. 全图形化的热力发电厂热力计算系统[J]. 汽轮机技术, 1996, 38(3): 188-190.
- [2] 胡念苏. 电力热力系统静态特性计算软件的通用化[J]. 热力发电, 1995(1): 20-25.
- [3] 江苏省电力试验研究所. 大型火力发电机组热经济性通用计算软件[R]. 南京: 江苏省电力试验研究所, 1997.
- [4] 廖世克. 洁净燃煤发电系统性能评价软件研究[D]. 南京: 东南大学, 1997.
- [5] FULLER L C, SIOVALL T K. User's manual for PRESTO—A computer code for the performance of regenerative, superheat steam turbine cycle[R]. ORNL-5547, NASA-CR-159540 1979.
- [6] GEYER HOWARD K, BERRY GREGORY F. The systems analysis language translator (SALT): User's Guide[R]. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois U S A, 1985.
- [7] CARCASI C. A numerical method for power plant simulations[J]. Transactions of ASME J of Energy Resources Technology, 1996, 118(3): 36-43.
- [8] 杨翼宏. 过程系统工程导论[M]. 北京: 轻工业出版社, 1991.

(复 编辑)

活性矾土与烟气污染物的脱除 = **Removal of Pollutants in Flue Gases through the Use of Activated Alumina** [刊, 汉] / HAN Chun-li, ZHANG Jun, YAN Zheng, LIU Kun-lei, XU Yi-qian (Thermal Energy Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 355 ~ 358

A brief account was given of the research results on the technology for removing a variety of pollutants, such as alkali metals, SO_x and NO_x through the use of activated alumina. The valuable information provided may benefit the further probe of the role of the activated alumina as a pollutant-removal agent. **Key words:** activated alumina, alkali, SO_x , NO_x

燃煤电厂飞灰碳含量与 PAHs 有机污染物吸附量之间相关性研究 = **A Study of the Correlation between the Carbon Content in Fly-ash of Coal-fired Power Plants and Adsorption Quantity of PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) Organic Pollutants** [刊, 汉] / LIU Hui-yong, XU Xu-chang, YAO Qiang (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), ZHANG Ai-yun (China National University of Geology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 359 ~ 362

With five coal-fired power plants serving as objects of study an experimental analysis was conducted of the content of total carbon, elemental carbon and organic carbon in fly ash. On this basis a study has been performed of the correlation of the content of the above items and the adsorption quantity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in fly ash. Furthermore, also studied was the correlation of PAHs given off by the burned coal and the PAHs in coal located at the furnace front. From the perspective of coal chemistry and coal combustion science discussed and explored was the adsorption reaction mechanism of the PAHs organic pollutants. As a result, proposed was a kind of major mechanism of PAHs formation during the burning of pulverized coal, the so-called adsorption reaction mechanism of unburned carbon particles. It is noted that the carbon in fly ash serves not only as a major adsorption location but also as an important reaction location for PAHs. **Key words:** polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), adsorption and reaction mechanism of unburned carbon particles

洁净燃煤发电系统热力性能计算软件编制 = **Preparation of a Thermodynamic Performance Calculation Software for a Clean Coal-fired Electrical Power Generation System** [刊, 汉] / XIAO Jun, CAI Ning-sheng, CUI Li (Thermal Energy Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 363 ~ 366

Based on the thought of process system engineering and through the use of a modularization model building method the authors have set up a method for mathematical modeling of typical equipment for a clean coal-fired electrical power generation system. Moreover, also established for the above-cited system were the mathematical model base of a typical equipment and function base for the calculation of thermodynamic properties of various working mediums. With the use of a development tool, i. e., Visual Basic program, a software for calculating the thermodynamic performance of a clean coal-fired electrical power generation system has been developed. Featuring a friendly interface, ease of use, configuration flexibility and a high potential for expandability, the proposed software is of high practical value for the type selection, design and optimization analysis of Chinese-made clean coal-fired electrical power generation systems. **Key words:** thermodynamic calculation, modularization, software

废物衍生燃料 (RDF) 加压热解特性及其动力学研究 = **A Study of Pressurized Pyrolysis Characteristics of Refuse Derived Fuels (RDF) and Their Kinetic Parameters** [刊, 汉] / JIN Bao-sheng, DONG Chang-qing, ZHONG Zhao-ping (Thermal Energy Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 367 ~ 370, 374

With the help of a pressure thermogravimetric analyzer a pressurized thermal analytical study was conducted of kitchen refuse and other typical organic components of municipal refuse derived fuels (RDF). The RDF pyrolysis tests were carried out under the ambient condition of high-purity N_2 with a heating rate of 20 K/min and a final temperature of 773 K. Through an analysis of thermogravimetric and differential thermogravimetric curves obtained were the pyrolysis reaction kinetic parameters of several kinds of typical organic components in RDF under pressurized conditions. In addition, also