

煤及煤焦燃烧特性的研究现状与展望

刘典福¹ 魏小林² 盛宏至²

(1. 安徽工业大学热能系, 安徽马鞍山 243002;

2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 对煤及煤焦燃烧基础研究的最新进展进行了综述, 重点介绍了煤及煤焦燃烧特性研究的常用方法、判别指标及燃烧动力学模型, 并提出了部分气化-燃烧集成优化的煤分级利用的研究新方向。

关键词: 煤与煤焦 燃烧特性 部分气化-燃烧

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 1005-7676(2008)01-0001-04

Research Progress and Expectation on Combustion Property of Coal and Coal Char

LIU Dian-fu¹ WEI Xiao-lin² SHENG Hong-zhi²

(1. Anhui University of Technology, Anhui Maanshan 243002

2. Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract: In this paper the general research situation of coal and coal char was reviewed. Especially, the new research progress of combustion characteristics and kinetics model of coal and coal char was highlighted. A new research direction the integrated optimum of partial gasification and combustion was proposed.

Key words: coal and coal char; combustion property; partial gasification and combustion

引言

目前中国已成为世界上最大的煤炭生产国和消费国。根据《2003年度煤炭行业分析报告》数据显示: 2003年度中国原煤总产量达17.36亿吨, 总消费量为16.84亿吨。因而中国能源结构以煤炭为主的局面在今后相当长时期内不会有根本性改变。尽管许多科研人员为了更有效、洁净地利用煤炭, 加大了煤炭在气化、液化及浆态化方面的研究, 但目前煤的直接燃烧利用仍是中国煤炭利用的主要途径。据统计, 中国每年约有80%以上的煤用于直接燃烧。然而目前我国对煤的直接燃烧利用方式, 大多利用

效率低下, 环境污染严重。因而深化对煤燃烧基本过程和各种参数及动力学模型的认识, 不仅是对煤燃烧基础积累的强化, 而且对煤燃烧的新工艺开发及有效工程应用具有重要指导意义。

1 煤及煤焦燃烧特性的研究方法

煤的燃烧特性研究包括许多方面, 如着火特性、挥发分释放特性、燃尽特性、热解特性、表面及孔隙特性、膨胀特性、积灰及磨损特性、结渣特性及污染物排放特性等, 本文主要考虑前四个方面。围绕煤及煤焦的燃烧特性, 人们进行了大量的研究工作。目前研究煤及煤焦燃烧特性的方法主要有:

投稿时间: 2007-12-6

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(NO.G1999022102-03), 国家自然科学基金项目(NO.50376069)

作者简介: 刘典福(1977-), 男, 山东烟台人, 1999年毕业于西安交通大学工程力学系, 2007年博士毕业于中科院力学所, 现为安徽工业大学教师, 主要研究方向为煤炭的气化与燃烧以及城市废弃物的综合利用。

(1) 热重分析技术，该技术通过跟踪检测燃烧过程中样品重量随时间或温度的动态变化，测定燃烧特性参数来计算燃烧反应性、反应活化能及燃烧速率，同时通过分析失重曲线及失重微分曲线还可以得到一些煤焦燃烧的特征值，比如燃烬温度、燃烬时间、最大失重温度、最大失重率等。该技术在国内外已广泛应用于研究煤及煤焦的燃烧特性，主要是因为以下几个原因：(i) 需要样品量少，通常为毫克量级，同时热电偶与样品能保持良好接触，可以保证热电偶检测到反应颗粒的实际温度；(ii) 可在减少外扩散的影响而只是处于动力学控制的条件下操作；(iii) 能够程序控温，自动收集和数据处理；(iv) 设备结构简单，成本低。其所得参数反应了煤焦物理和化学特性的总影响，如孔径分布、灰层扩散、有效表面积以及少量无机杂质的催化作用、活化中心的数量和性质等。因此由热重技术所得到的反应性数据，不仅可以预测煤焦的着火燃烧行为，还可以对煤焦的

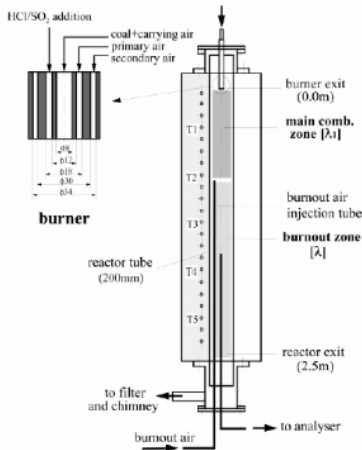


图1 携带流反应器系统示意图

2 煤燃烧特性判别指标的研究

围绕煤燃烧特性判别指标的研究，国内外进行了广泛深入的研究，至今已提出了很多有用的判别指标，其中许多判别指标已成功应用于指导工业上燃煤锅炉的设计和运行，并取得较大经济效益。在这方面，我国的科研工作者作出了不少突出贡献。

陈建原等^[3]提出煤的挥发分特性指数 D 和燃烧特性指数 S 两个煤质综合判别指标来表征煤的燃烧特性，其中 D 定义如下：

$$D = (dw/dt)_{max} / T_{max} * T_{1/3}$$

式中：(dw/dt)_{max} 为挥发分最大释放速度峰值；T_{max} 为对应于 (dw/dt)_{max} 的温度；T_{1/3} 为 (dw/dt)_{max} = 1/3

结构和性质进行更深入的了解。(2) 携带流反应器与管式沉降炉，用与实际锅炉热力工况（如炉温、空气过剩系数等）比较接近的层流条件下的携带流反应器或垂直管式沉降炉来研究煤粉和焦炭燃烧的化学动力学参数，携带流反应器系统示意图如图 1^[1]。这种方法更接近锅炉的实际运行状况。(3) 用电加热石英玻璃管流化床，配置傅立叶远红外光谱仪对烟气进行在线检测，通过对烟气成分和烟气量的计算，可以得到焦炭的反应速率，同时由于焦炭中挥发分含量很少，也可以根据 CO₂、CO、CH₄ 来计算碳的转化率。(4) 气相电位燃烧分析技术^[2] (gas-potentiometric combustion analysis, GPCA) 是一种快速、便捷并且廉价的现场测量流化床反应器中固体燃料燃烧特性的新近发展起来的技术，其系统结构示意图如图 2 所示，该技术主要是通过采用特殊设计的气体电势氧传感器探针来测量反应过程中氧分压变化，其灵敏度高且响应时间短。

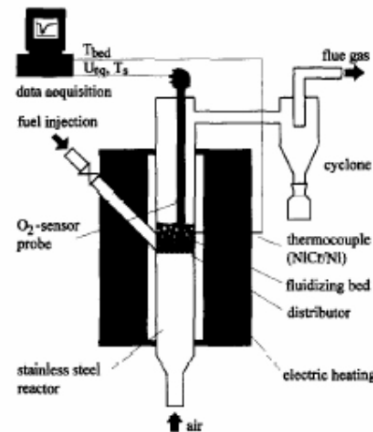


图2 GPCA 系统示意图

所对应的温度区间。

S 定义如下：

$$S = (dw/dt)_{max} * (dw/dt)_{mean} / T_i^2 * T_h$$

式中：(dw/dt)_{max} 为最大燃烧速率；(dw/dt)_{mean} 为平均燃烧速率；T_i 为着火温度；T_h 为燃烬温度。

何佩敖^[4]提出煤的可燃性指数 C 的判别方法，C 定义如下：

$$C = (dw/d)_{80} / T_i^2 \quad t_i < 500$$

$$C = (dw/d)_{80} / T_i^{(2+(t_i-500)/1000)} \quad t_i \geq 500$$

式中：(dw/d)₈₀ 为煤样在最高燃烧速度区的平均燃烧失重速度，规定该区温度范围为 80 ；T_i 为以绝对温标表示的着火温度，。T_i = t_i + 273K。C 值越大表示煤可燃性越好。

韩洪樵等^[5]提出煤的综合可燃性指标 S 的判别方

法, S 定义如下:

$$S = (dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{10} / (t_{\max} * t_f)$$

其中: $(dw/dt)_{\max}$ 为实验条件下煤⁵的最大燃烧速率; $(dw/dt)_{10}$ 为以最大燃烧速率为中心前后 10s 内的燃烧速率的平均值; t_{\max} 为燃烧峰出现时间; t_f 为煤的燃尽时间。S 值越大, 表明煤的可燃性越好。

傅维标等⁶给出了表征煤焦着火特性优劣的通用着火性能指数 Fz, 定义为:

$$Fz = (V_{ad} + M_{ad})^2 * C_{ad} * 100$$

式中: V_{ad} 、 M_{ad} 、 C_{ad} 分别为煤样工业分析空气干燥基的挥发分、水分、固定碳含量。Fz 越大表示可燃性越好, 并根据 Fz 大小将我国煤种大体分为五个不同燃烧特性类型: $Fz < 0.5$ 为极难燃煤; $0.5 < Fz < 1.0$ 为难燃煤; $1.0 < Fz < 1.5$ 为准难燃煤; $1.5 < Fz < 2.0$ 为易燃煤; $Fz > 2.0$ 为极易燃煤。该判别指标形式简单, 计算方便, 所需数据根据常规工业分析即可求得, 这对于工程设计人员和操作人员具有一定的参考指导意义。

冯晓东等⁷给出了煤的着火稳定性指数 F_1 和燃尽特性指数 F_B , 其中:

$$F_1 = a / T_i + b / T_{1\max} + c(dw/dt)_{\max}$$

式中: T_i 为着火温度; $T_{1\max}$ 为煤最大燃烧速度所对应的温度; $(dw/dt)_{\max}$ 为煤的最大燃烧失重速度; a, b, c 为因煤种而不同的计算常数。F₁ 越大表示煤的着火性能越好。

$$F_B = 10 / (x_1 G + x_2 T_{2\max} + x_3 t_f + x_4 t'_f)$$

式中: G 为燃烧后期的燃烧量; $T_{2\max}$ 为煤焦最大燃烧速度时对应的温度; t_f 为煤的燃尽时间; t'_f 为煤焦的燃尽时间; x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为因煤种而不同的计算常数。F_B 越大表示煤的燃尽性能越好。

朱跃等⁸将煤的着火稳定性指数 F_1 和燃尽特性指数 F_B 用煤的工业分析数据来表征:

$$F_1 = 4.24 + 0.047M_{ad} - 0.015A_{ad} + 0.046V_{daf}$$

$$F_B = 2.22 + 0.17M + 0.061V_{daf}$$

式中 M_{ad} 、 A_{ad} 、 V_{daf} 分别为煤样空气干燥基水分、灰分和干燥无灰基挥发分。这样就可以通过煤样的工业分析数据来判别煤的着火稳定性及燃尽特性, 方便快捷。但其对于大多数煤种的通用性需进一步检验。

谢峻林等⁹给出水泥分解炉内煤的燃尽指标 D_f , 其定义如下:

$$D_f = (dw/dt)_{\max} / (t_{1/2} t_f)$$

式中: $(dw/dt)_{\max}$ 为最大燃烧速率; $t_{1/2} t_f$ 为 $(dw/dt)_{\max} = 1/2$ 时所对应的的时间区间; t_m 为最大燃烧速率所对应时间; t_f 为燃尽时间, 可由煤的工业

分析数据来求取, $t_f = 2.5 * (V_{ad} / C_{ad})^{0.3}$ 。这样就简化了对燃尽指标 D_f 的计算求解, 但对于 t_f 由煤工业分析数据求取的有效性需进一步验证。

高正阳等¹⁰考虑反映煤燃烧速率的放热宽度, 提出表征煤样在着火后燃烧速率与燃尽性能的指数 HF, 其定义如下:

$$H_f = t_{\max} * 1n(DT / DTG_{\max}) * 10^{-3}$$

式中: DTG_{\max} 为最大失重速率; t_{\max} 为最大失重速率对应时间; DT 为放热峰宽。H_f 越小表示煤样的燃烧性能越好。

Claudia 等¹¹定义一个热解产率因子 PYI (pyrolysis yield index) 来预报煤快速热解的挥发分产率, PYI 定义为:

$$PYI = (L + V) / (1 - A / 100)$$

式中: L, V 分别为干燥无灰基的壳质组和镜质组含量, A 为煤的干燥基灰分含量。PYI 指标形式简单, 计算方便, 但需要特殊技术方法来测量壳质组和镜质组含量, 给其推广利用带来一定难度。

从以上煤燃烧特性判别指标研究的分析可以看出, 大部分判别指标都需在实验室内采用热重分析仪来进行实验得到热重曲线后才能够确定; 只有 F_z 可以由工业分析数据来确定。今后煤燃烧特性判别指标的发展方向是简便实用, 并要具有一定的通用性。

3 煤及煤焦燃烧动力学研究

围绕煤与煤焦燃烧动力学模型的研究, 国内外已进行了广泛深入研究, 提出了诸如分形模型、模糊孔模型、移动火焰模型、零维燃烧模型、单膜燃烧模型、双膜燃烧模型及连续膜燃烧模型等许多描述煤与煤焦燃烧特性的动力学模型。这里重点介绍缩核模型和分布活化能模型。

Werner 等¹²分别采用收缩颗粒模型和收缩核模型来模拟循环流化床锅炉中煤焦的燃烧特性, 并计算了煤焦颗粒的碳转化率分布。模拟结果表明: 两种模型均能够准确的描述循环流化床锅炉中煤焦的燃烧过程。同时模型中还考虑了煤的磨损, 一次破碎, 气相质量输运等基本物理化学现象。这对于工业上循环流化床锅炉中煤焦的燃烧特性的预报具有一定的指导意义。

Raymond Everson 等¹³在高压热重分析仪中研究了适合于增压流化床燃烧系统的高灰分煤焦大颗粒的燃烧特性 (其 $A_d = 37.19\%$, $d_p = 3\text{mm}$), 并采用收缩反应核模型 (shrinking reacted core model, SRCM) 描述了高灰份煤焦大颗粒的燃烧特性。模拟结果表明, 收缩反应核模型比收缩未反应核模型具有更高的准

确性,能更好的符合实验结果。同时发现,在高温(温度大于950)状况下,收缩反应核模型模拟结果与收缩未反应核模型模拟结果基本接近。这对于工业上大型增压流化床燃烧器内高灰分煤焦大颗粒燃烧特性的预报具有一定的参考价值和指导意义。

向银花等^[14]在热天平中研究了部分气化煤焦的燃烧特性,分析了煤种、气化率、脱灰、不同气化剂等因素对部分气化煤焦燃烧特性的影响。实验结果表明:煤种不同,部分气化煤焦的燃烧特性不同;脱灰后的神木焦燃烧峰推后,其可燃性比未脱灰焦差;CO₂气氛下气化所得焦的最大燃烧速率随着气化率的增加而减小,同时二次峰越来越明显。考虑到部分气化煤焦燃烧曲线具有二次峰特性,向银花等^[15]运用两段分布活化能模型描述了部分气化煤焦的燃烧动力学,模拟结果表明:两段分布活化能模型能够准确描述部分气化煤焦的燃烧行为;随着煤焦气化率的增加,其活化能和指前因子增加,易反应物质量减小,难反应物质比例增加。

Claudia等^[11]在管式沉降炉中在高温(1000-1300)和低停留时间(60ms-320ms)的条件下研究了三种单煤和两种混煤的快速热解特性,并采用连续分布活化能模型(distribution of activation energy model, DAEM)来描述单煤和混煤的快速热解动力学参数。模拟结果表明:所采用的连续分布活化能模型能够准确的描述高温条件下煤及混煤快速热解的挥发分产率。

从以上研究者的工作结果看,缩核模型和分布活化能模型均能够准确描述煤及煤焦的燃烧动力学特性,但均有一定的适用范围,需要更进一步研究能够准确描述煤及煤焦的燃烧动力学特性的通用模型。

4 煤及煤焦燃烧特性研究展望

煤炭利用中的重大科学问题总是与煤炭的主要利用方式联系在一起的,煤的燃烧利用现在乃至今后几十年仍将是煤的主要利用方式。在污染物排放指标允许的条件下尽可能提供更多的能量是目前煤燃烧领域研究的主要方向。目前,更多研究工作集中于研究煤灰与煤燃烧的相互作用。除继续以固体的形式直接燃烧外,煤部分气化后燃烧的方式,因其高效和低污染的优点将逐步增加,在将来煤部分气化-燃烧集成优化的方式可能成为燃煤发电的主要形式。煤部分气化-燃烧的核心思想是根据煤中固定碳和挥发分在不同转化阶段反应性各不相同的特点,对煤炭实施分级利用(即所谓的拔头):在较低温度下采用外热源加热方式,如循环热灰和熔融

灰渣等,分离出煤中的挥发分,用做燃料或化工原料;气化后产生的固体残留物(即所谓的半焦),主要用来燃烧,产生蒸汽发电供热,形成“气热电多联供”,这样可以得到较高的煤炭综合利用效率。但由于半焦具有高灰分、高固定碳、低挥发分、着火温度高、不易燃尽等不利于燃烧的特点,给半焦的燃烧利用带来一定困难。因此运用已有的研究方法,研究煤部分气化后半焦的燃烧特性及其燃烧动力学参数对于提高煤炭综合利用效率具有非常重要的参考价值和指导意义。

参考文献:

- [1] Xiadin Wei, Xiaohai Han, Uwe Schnell, et al. The Effect of HCl and SO₂ on NO_x Formation in Coal Flames[J]. Energy & Fuels, 2003, 17: 1392-1398
- [2] Heike Lorenz and Helmut Rau. A new method for investigating the combustion behavior of solid fuels in FBC[J]. Fuel, 1998, 77(3): 127-134
- [3] 陈建原, 孙学信. 煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定[J]. 动力工程, 1987, 7(5): 13-18
- [4] 何佩敖. 我国电站锅炉燃煤特性的试验研究及展望[J]. 动力工程, 1990, 10(4): 1-14
- [5] 韩洪樵, 王涤非, 唐林. 用快速加热热天平研究煤的可燃性指标[J]. 工程热物理论, 1990, 11(3): 342-345
- [6] 傅维标, 张恩仲. 煤焦非均相着火温度与煤种的通用关系及判别指标[J]. 动力工程, 1993, 13(3): 34-42
- [7] 冯晓东, 王浙芬, 李敏, 等. 煤燃烧特性研究方法概述[J]. 能源工程, 1998, 1: 24-26
- [8] 朱跃, 郭文靖, 刘明仁, 等. 煤的热天平分析实验结果与工业分析数据的相关性研究[J]. 黑龙江电力技术, 1998, 20(5): 257-263
- [9] 谢峻林, 何峰, 袁润章. 分解炉内煤的燃尽特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(7): 11-14
- [10] 高正阳, 方立军, 周健, 等. 混煤燃烧特性的热重试验研究[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1764-1767
- [11] Claudia Ullca, Alfredo L. Gordon, Ximena Garcia. Distribution of activation energy model applied to the rapid pyrolysis of coal blends[J]. Journal of analytical and applied pyrolysis. 2004, 71: 465-483
- [12] Werner, A. et al. Simulation of char combustion according to shrinking particle and shrinking core model in circulating fluidized bed boilers[J]. VGB Technical. Ver. Grosskrntwerksbet, 1998, 17(1): 1-6.(in German)
- [13] Raymond Everson, Hein Neomagus, Rufaro Kaitano. The modeling of the combustion of high-ash coal-char particles suitable for pressurized fluidized bed combustion: shrinking reacted ore model[J]. Fuel, 2005, 84(9): 1136-1143
- [14] 向银花, 王洋, 张建民, 等. 部分气化煤焦燃烧特性的研究[J]. 煤炭转化, 2002, 25(4): 35-38
- [15] 向银花, 王洋, 张建民, 等. 部分气化煤焦燃烧动力学的活化能分布模型研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(6): 566-570