

运行参数变化对水煤浆流化燃烧过程的影响

刘丝雨¹, 刘安源², 马玉峰³

(1. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;
3. 中石化胜利发电厂, 山东 东营 257087)

摘要: 为了深入了解水煤浆流化燃烧过程的规律, 以“小室”为基础, 结合流化床内气固两相流动及传热、水煤浆燃料的热解、挥发分及焦炭燃烧、污染物生成等子模型, 建立了水煤浆在流化床锅炉中燃烧的综合数学模型。分析了当水煤浆流化燃烧装置锅炉负荷、过量空气系数及燃料中的挥发分份额等参数发生变化时炉内有关参数沿炉膛高度方向的变化规律。研究表明, 与燃煤流化床锅炉相比, 水煤浆燃烧锅炉炉膛底部的温度明显较低。另外, 锅炉负荷越大, 炉内温度越高, 燃烧条件越好; 过量空气系数对燃烧的影响并不是单调变化关系; 煤种挥发分越高越有利于燃料的燃烧。

关键词: 水煤浆; 流化燃烧; 小室模型; 综合数学模型; 模拟分析

中图分类号: TQ534.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)02-0079-05

Effects of operating parameters on fluidization combustion process of coal water slurry

LIU Siyu¹, LIU Anyuan², MA Yufeng³

(1. School of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. Shengli Power Plant, Sinopec Group, Dongying 257087, China)

Abstract: In order to understand the fluidization combustion process of CWS deeply, combining two-phase flow and heat transfer, pyrolysis of CWS, combustion of volatile and char and pollution generation models, the comprehensive mathematical model for fluidization combustion process of CWS was established on the basis of compartments. By means of the model, the axial changing characteristics of some parameters in the furnace were simulated and analyzed when the operating parameters of boilers changed. The results showed that, compared with the temperature of furnace bottom of coal-fired fluidized bed boiler, that of CWS boiler was obviously lower. Higher boiler load and furnace temperature as well as higher volatile of coal helped to create better combustion condition. The influence of excess air coefficient on combustion was not monotonic function.

Key words: coal water slurry; fluidization combustion; compartment model; comprehensive mathematical model; simulation analysis

0 引 言

水煤浆是一种煤基液体燃料, 由 65% ~ 70% 的煤粉、30% ~ 35% 的水和少量化学添加剂加工制成。由于水煤浆可以像燃料油一样易于装卸、储存和管道输送, 并且价格低廉、燃烧效率高、燃烧污染小, 因而被广泛地应用于各种锅炉和工业窑炉燃烧^[1-5]。目前水煤浆在锅炉中的燃烧方式主要采用雾化燃烧

技术, 但由于水煤浆燃料中含水量较高, 且燃烧产生的灰渣在高温时会发生灰渣熔融现象, 因此雾化燃烧技术在一定程度上存在着燃烧稳定性及结焦问题。流化燃烧技术由于具有优越的燃烧稳定性及低温燃烧特点, 能够比较容易地解决水煤浆燃烧的稳定性和结焦问题, 目前在国内也得到了应用^[6]。相比水煤浆雾化燃烧技术研究, 到目前为止, 对水煤浆流化燃烧技术的研究还较少。鉴于此,

收稿日期: 2015-11-08; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.017

作者简介: 刘丝雨(1994—), 女, 山东东营人。E-mail: Siyuliu941101@163.com。通讯作者: 刘安源, 副教授, 博士, 从事煤燃烧技术及气固两相流方面的教学与科研工作。E-mail: ayliu@163.com

引用格式: 刘丝雨, 刘安源, 马玉峰. 运行参数变化对水煤浆流化燃烧过程的影响[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(2): 79-83.

LIU Siyu, LIU Anyuan, MA Yufeng. Effects of operating parameters on fluidization combustion process of coal water slurry[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 79-83.

本文拟通过建立水煤浆流化燃烧过程的数学模型来模拟分析有关运行参数改变对流化燃烧过程的影响规律。模拟结果将对于水煤浆流化燃烧装置的设计及运行优化具有一定理论指导作用。

1 水煤浆流化燃烧数学模型

流化燃烧数学模型按照其流动过程处理方法的不同可以分为两大类,即基于“塞状流”或“环-核”气固两相流动经验公式的流化床燃烧总体数学模型^[7]与基于 Navier-Stokes 方程的二维或三维流化床燃烧模型^[8-10]。基于“塞状流”或“环-核”气固两相流动经验公式的流化床燃烧总体数学模型由于模型求解计算量较小,同时对于各子过程的描述又建立在相对简单、成熟的经验关联式之上,因而使模型既具有较高的精度又稳定可靠。目前,该种燃烧建模方法在国内外流化燃烧过程数学模型研究中得到了较为广泛的应用^[11-15]。

水煤浆流化燃烧综合数学模型以“小室”为基础^[7,13]。所谓“小室”(Compartment)是沿气体和固体的主要流动方向将流化床燃烧室划分成的一系列内部各相关参数均匀的小空间。通过考虑各小室内的气固相反应及其与小室外相邻小室之间的质量和能量交换建立每个小室的质量及能量平衡方程,全部小室的质量和能量守恒方程构成了流化燃烧的综合数学模型。以小室为基础,流化床燃烧综合数学模型将描述流化床内流动、传热、燃烧以及污染物排放等过程的半经验或经验公式有机地与“小室”上建立的一系列守恒方程相结合。

本文在建立流化燃烧数学模型时把炉膛密相区单独作为一个“小室”来处理,稀相区则沿炉膛高度

方向按照需要划分为多个“小室”。炉膛小室划分情况如图1所示。

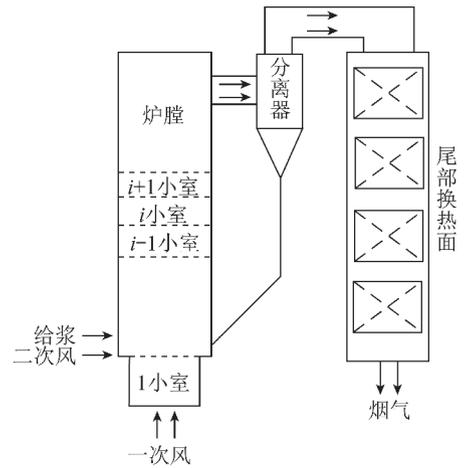


图1 锅炉“小室”划分情况

Fig. 1 Division of compartments in a CWS-fired boiler

对于炉膛中水煤浆滴的爆破,本文采用了简化处理方法,即认为浆滴在加入床层之后,便迅速破碎并磨损为粒径均匀的碳颗粒,此后粒径不再发生变化。另外,对于水煤浆流化燃烧锅炉,由于在单位时间内的底部排渣量为0,因此,单位时间加入炉内的灰分质量应等于离开分离器的烟气带走的飞灰质量。

2 模拟结果及分析

2.1 模拟装置介绍

本文模拟的水煤浆流化燃烧锅炉是为胜利油田某锅炉房设计的,用于冬季生活小区供暖。锅炉设计热负荷为14 MW,送风温度为20℃,过量空气系数为1.2。该锅炉设计燃料为水煤浆,其工业分析与元素分析见表1。

表1 设计水煤浆燃料的工业与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of CWS fuel used in boiler

工业分析			元素分析					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
$M_{\text{ar}}/\%$	$A_{\text{ar}}/\%$	$V_{\text{ar}}/\%$	$w(C_d)/\%$	$w(H_d)/\%$	$w(O_d)/\%$	$w(N_d)/\%$	$w(S_d)/\%$	
32.90	5.64	23.758	50.57	3.27	6.13	0.93	0.56	18 877

燃烧过程中所需空气分两股进入燃烧装置,一股作为一次风经风箱由布风板进入燃烧室下部密相区,使物料处于流化状态。另一股经设于燃烧室密相区上部的二次风系统送入燃烧室稀相区,强化热烟气的扰动与混合。

燃烧用水煤浆由设有空气吹扫与冷却功能的加

料装置送入下部密相区,并在密相区中处于流化状态下惰性物料的加热下迅速着火燃烧。燃烧后产生的热烟气携带部分床料与着火燃烧后的水煤浆滴形成的颗粒团通过出口烟窗进入分离装置,较大固体颗粒被分离器捕集回输至燃烧室下部密相区实现循环燃烧。经分离器分离后的热烟气进入后置的对流

管束换热。

2.2 锅炉负荷变化的影响

锅炉实际运行时经常会在偏离设计负荷的状态下工作。为了研究锅炉负荷变化对锅炉燃烧特性的影响,分别对额定负荷、70%额定负荷以及130%额定负荷3种情况进行了模拟。在进行锅炉负荷变化的模拟时,所用燃料以及过量空气系数等运行参数保持不变。

2.2.1 负荷变化对炉内温度的影响

负荷变化对炉内温度的影响规律如图2所示。可以看出,水煤浆流化燃烧炉膛内的温度分布呈中间高两头低的形状。这是因为在炉膛的底部,燃料刚被加入,由于燃料本身需要被加热,并且模拟的水煤浆燃烧锅炉的一次风不经过预热,因此炉膛底部温度较低。在炉膛的更上一些位置,由于在底部析出的挥发分开始大量燃烧,用于加热床料的热量增加,因此炉膛的温度也较高。在炉膛的顶部,此时固体床料中的可燃成分所占份额减少,燃烧放热量也减少,因此炉膛温度开始降低。

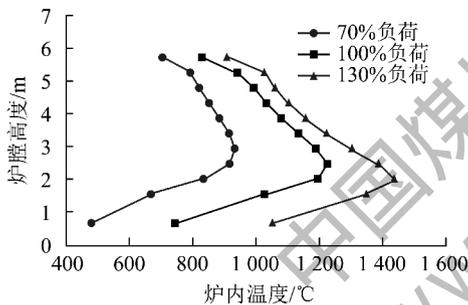


图2 负荷变化对炉膛温度的影响

Fig. 2 Effects of load on furnace temperature

在负荷增加时,可以看出炉膛内部各处的温度均整体升高。特别是在炉膛的底部,燃烧放热量增加引起的炉膛底部的温度升高尤为明显。反之,当锅炉负荷降低时,各处炉膛温度均整体降低。

2.2.2 负荷变化对飞灰含碳量的影响

图3为锅炉负荷发生变化时,炉内飞灰含碳量的变化规律。可以看出,在设计负荷下,由于炉内的炭在不断燃烧,因此炉膛中的飞灰含碳量从底部到顶部逐渐减少。对比不同负荷时的情况可知,在过量空气系数保持不变的情况下,负荷越高,炉内飞灰含碳量的份额整体降低;反之,负荷越低,炉内飞灰含碳量的份额整体升高。上述现象是由于负荷升高时炉内温度升高,焦炭燃烧速度加快造成的。

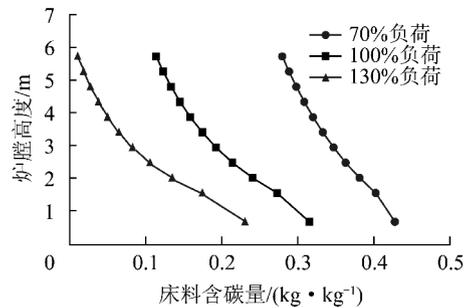


图3 负荷变化对炉内飞灰含碳量的影响

Fig. 3 Effects of load on char content in flying ash

2.2.3 负荷变化对炉内CO气相成分的影响

图4为炉膛烟气中CO体积份数的变化规律。烟气中的CO有2个主要来源,一是煤颗粒析出的挥发分中所包含的;二是烟气中的CO₂气体也会与固体C发生还原反应生成CO。CO的消耗则是由其与氧气进行氧化燃烧反应,从CO的分布曲线可以看出,在炉膛温度最高区域存在一个CO浓度最低处,这是由于该处温度较高、氧气较充分使CO氧化反应较强造成的。在炉膛底部,由于该处挥发分释放的CO较多,并且由于温度低,CO氧化反应速度较小,因此CO浓度较高。在炉膛顶部,则由于温度较低,氧化反应较弱,CO浓度有所回升。

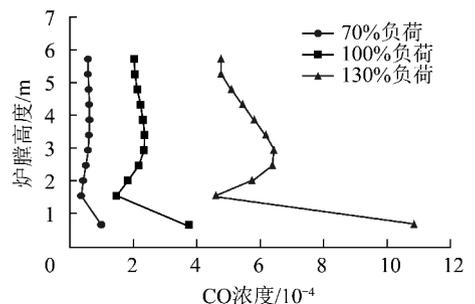


图4 负荷变化对炉内CO浓度的影响

Fig. 4 Effects of load on CO concentration in furnace

另外,随锅炉负荷的增加,锅炉烟气中CO浓度分布规律基本相同,但CO浓度数值均整体升高。

2.3 过量空气系数变化的影响

模拟过量空气系数变化时,保持燃料特性不变,锅炉处于额定负荷工况给浆量下工作。

2.3.1 过量空气系数变化对炉内温度的影响

过量空气系数变化对炉内温度影响如图5所示。从图5可看出,随着过量空气系数 α 的增加,炉内整体温度会有所降低,同时炉温在炉膛底部和顶部随 α 变化呈现出不同的特点。在炉膛底部,当 α 增加时,由于送入的冷风量增加,床温会随 α 增加而降低;但在炉膛顶部,由于 α 加大时,

燃料的燃烧过程会向后延迟,因此炉温会随 α 的增加而增加。

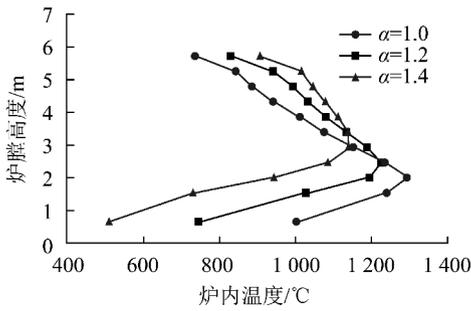


图5 过量空气系数变化对炉内温度影响

Fig. 5 Effects of air coefficient on furnace temperature

2.3.2 过量空气系数变化对飞灰含碳量的影响

过量空气系数变化对炉内飞灰含碳量影响如图6所示。从图6中可以看出,当 α 过大或过小时,飞灰的含碳量均较高,在 α 为1.2左右时的飞灰含碳量最低。这是因为当 α 太大时,尽管氧气充足但床温较低;当 α 较小时,尽管床温较高,但氧气的量较少;2种情况均不利于燃烧过程的进行。

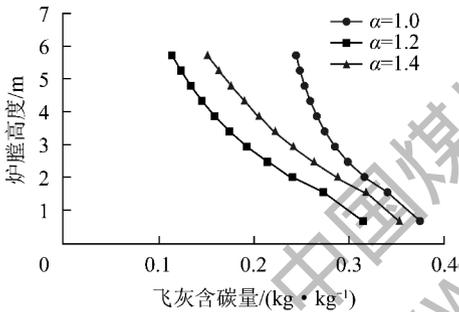


图6 过量空气系数变化对炉内飞灰含碳量影响

Fig. 6 Effects of air coefficient on char content in flying ash

2.3.3 过量空气系数变化对CO气相成分的影响

过量空气系数变化对CO浓度影响如图7所示。图7显示随着过量空气系数 α 的减小,由于氧气不充足,并且烟气总量较小,因此烟气中CO的体积份额增加。

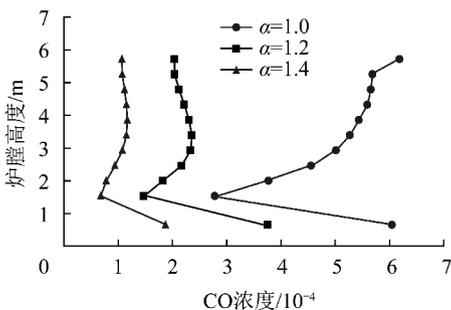


图7 过量空气系数变化对CO浓度影响

Fig. 7 Effects of air coefficient on CO concentration in furnace

2.4 燃料挥发分变化的影响

模拟燃料收到基挥发分变化对燃烧特性的影响,假定燃料灰分保持不变,燃料挥发分与固定碳的总和保持不变。同时,锅炉负荷及过量空气系数均为额定工况参数。

2.4.1 燃料挥发分变化对炉内温度的影响

挥发分变化对炉内温度的影响如图8所示。从图8可以看出,当挥发分增加时,由于挥发分比较容易燃烧,燃烧初期的炉膛温度较高,使得后面焦炭的燃烧反应速度增加,因此在整个炉膛高度上的温度均会整体增加。

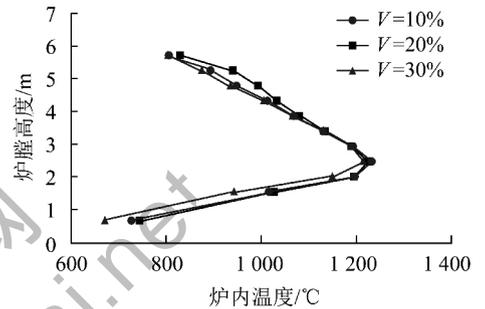


图8 挥发分变化对炉内温度的影响

Fig. 8 Effects of volatile content on furnace temperature

另外,图8中在距炉膛底部2~3m处不同挥发分燃料的炉膛温度比较接近,这可能与本文假定所用燃料挥发分与碳含量之和不变有关。在距炉膛底部2~3m处,尽管低挥发分燃料的挥发分燃烧放热较小,但由于固定碳较高,其燃烧放热量要多一些,因此低挥发分与高挥发分燃料在该处的燃烧温度相差不多。

2.4.2 燃料挥发分变化对飞灰含碳量的影响

挥发分变化对飞灰含碳量影响如图9所示。从图9可以看出,由于挥发分增加时,炉膛温度也会随之增加,焦炭的燃烧条件改善,燃烧反应速度增加,因此炉内飞灰的含碳量会随挥发分的增加而减小。

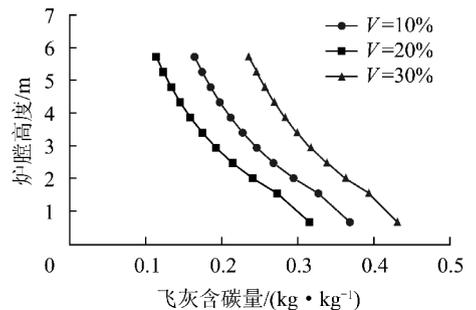


图9 挥发分变化对飞灰含碳量影响

Fig. 9 Effects of volatile content on char content in flying ash

2.4.3 燃料挥发分变化对CO气相成分的影响

挥发分变化对CO浓度的影响如图10所示。由图10可看出,当炉内挥发分增加时,由于煤颗粒中释放的挥发分增加,因此烟气中CO的体积份额沿炉膛高度分布规律虽基本不变,但数值会有所增加。

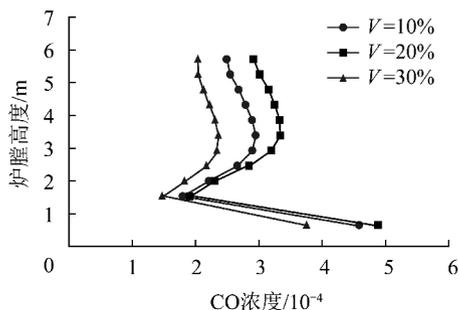


图10 挥发分变化对CO浓度的影响

Fig. 10 Effects of volatile content on CO concentration in furnace

3 结 论

1) 水煤浆流化燃烧过程总体数学模型以燃煤循环流化床锅炉总体数学模型为基础,并针对水煤浆锅炉不排渣连续运行的特点进行了改进。利用该模型计算得到了炉内温度、飞灰含碳量以及CO等气相组分沿炉膛高度的分布规律。

2) 利用综合数学模型对设计条件下锅炉的工作特性进行了模拟分析。结果表明,与燃煤循环流化床锅炉相比,水煤浆燃烧锅炉炉膛底部的温度明显较低。

3) 模拟了锅炉负荷、过量空气系数及燃料挥发分等变化对锅炉燃烧装置工作特性的影响。结果表明,锅炉负荷越大,则炉内温度越高,燃烧条件越好;过量空气系数对燃烧的影响并不是单调变化关系;当煤种挥发分越高时,越有利于燃料的燃烧。

参考文献:

[1] 岑可法,姚强,曹欣玉. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,1997.

[2] 王柱勇,李燕君,张明. 中国水煤浆技术发展现状及产业化建议[J]. 洁净煤技术,2001,7(1):28-31.

Wang Zhuyong, Li Yanjun, Zhang Ming. The present situation of coal water slurry technology development in China and industrialization suggestion[J]. Clean Coal Technology, 2001, 7(1): 28-31.

[3] 刘建文,谢雨晴,陈楠. 高效水煤浆制浆燃烧集成技术研制与应用[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):35-39,44.

Liu Jianwen, Xie Yuqing, Chen Nan. Research and application of preparation and combustion technology of efficient coal water mixture[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 35-39, 44.

[4] 马玉峰,李建强,万启科. 水煤浆燃烧技术及其发展[J]. 洁净煤技术,2003,9(3):13-17.

Ma Yufeng, Li Jianqiang, Wan Qike. Coal water slurry combustion technology and its development[J]. Clean Coal Technology, 2003, 9(3): 13-17.

[5] 薄煜. 水煤浆旋风炉高温低灰燃烧试验及模拟研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.

Bo Yu. Combustion test and simulation research of coal water slurry cyclone furnace with high temperature and low ash content[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[6] 马玉峰,姜秀民,万启科,等. 水煤浆流化-悬浮燃烧技术在胜利油田的应用[J]. 热能动力工程,2006,21(6):644-647.

Ma Yufeng, Jiang Xiumin, Wan Qike, et al. Application of coal water slurry fluidization-suspension combustion technology in Shengli oilfield[J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2006, 21(6): 644-647.

[7] 李政. 循环流化床锅炉通用整体数学模型、仿真与性能预测[D]. 北京:清华大学,1994.

Li Zheng. General mathematical model, simulation and performance prediction of circulating fluidized bed boiler[D]. Beijing: Tsinghua University, 1994.

[8] 刘安源. 流化床内流动、传热及燃烧特性的离散颗粒模拟[D]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2002.

[9] 刘安源,刘石,马玉峰,等. 流化床锅炉热烟气点火过程的离散颗粒模拟[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):120-124.

Liu Anyuan, Liu Shi, Ma Yufeng, et al. Discrete particle simulation of hot gas ignition process of a fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(3): 120-124.

[10] 王其成. 气固流化床内流动和传热特性的CFD模拟与相似性研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2009.

[11] 肖显斌,杨海瑞,吕俊复,等. 循环流化床燃烧数学模型[J]. 煤炭转化,2002,25(3):11-16.

Xiao Xianbin, Yang Hairui, Lyu Junfu, et al. Mathematical model of circulating fluidized bed combustion[J]. Coal Conversion, 2002, 25(3): 11-16.

[12] 沈来宏. 循环流化床燃烧数学模型及试验研究[J]. 煤炭转化,1999,22(4):57-62.

Shen Laihong. Mathematical model and experimental study of circulating fluidized bed combustion[J]. Coal Conversion, 1999, 22(4): 57-62.

[13] 王勤辉. 循环流化床锅炉总体数学模型及性能试验[D]. 杭州:浙江大学,1997.

[14] 杨晨. 大型循环流化床锅炉整体动态数学模型的建模与仿真方法研究[D]. 重庆:重庆大学,1999.

[15] 周陵生. 异密度循环流化床焚烧含油污泥炉内整体模型[D]. 上海:上海交通大学,2009.