

基于 FLIC 软件的生物质层燃数值模拟

肖凡^{1,2}, 胡南³, 张曼², 金燕¹, 杨海瑞²

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024;

2. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

3. 长春工程学院, 长春 130012)

摘要: 为了优化链条炉燃烧, 基于 FLIC 模拟平台对我国东北地区某 7 MW 生物质层燃热风炉进行数值模拟。模拟结果表明, 燃烧过程大致可分成 3 个阶段, 依次是位于炉排上 0~0.5 m 的水分蒸发段、0.5~2.1 m 的挥发分逸出燃烧段以及 1.0~2.8 m 固定碳燃烧阶段。该燃料挥发分占比较高, 析出后床层厚度明显减薄, 一次风温过低导致固定碳燃尽率低, 所以可以适当提高一次风温。根据燃料处于不同燃烧阶段, 按需供风, 如, 在挥发分逸出燃烧阶段提供总风量的 80%~90%, 在固定碳燃烧阶段提供总风量的 10%~20%, 以此提高燃烧效率, 并可以根据烟气温度对拱角以及炉拱覆盖长度进行结构优化, 增强炉拱的引燃以及燃尽作用。本文根据模拟所得结果提出对一次风以及其供风方式的优化策略, 从而达到优化燃烧的目的。

关键词: 生物质; 热风炉; 层燃; 数值模拟

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.025002

Numerical simulation of biomass grate furnace combustion based on FLIC

XIAO Fan^{1,2}, HU Nan³, ZHANG Man², JIN Yan¹, YANG Hai-Rui²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Based on the FLIC simulation platform, we have performed a numerical simulation study on a 7 MW biomass layer fired hot air boiler in Northeast China. The simulation results show that the biomass layer can be roughly divided into three stages, the water evaporation section (0~0.5 m), the volatile emission combustion section (0.5~2.1 m) and the fixed carbon combustion section (1.0~2.8 m). The volatile content of this fuel is relatively high, the thickness of the bed after its precipitation is significantly reduced, and the primary air temperature is too low, resulting in a low fixed carbon burnout rate, so the primary air temperature can be appropriately increased. According to the characteristics of the fuel in different combustion stages, the air can be supplied on demand. For example, 80% to 90% of the total volume can be provided during the volatiles escape combustion stage, and 10% to 20% of the total air can be provided during the fixed carbon combustion stage. This improves the fuel combustion efficiency, and can optimize the structure of the arch angle and the furnace arch coverage length according to the flue gas temperature, and enhance the ignition and burnout of the furnace arch. According to the simulation results, it is proposed to optimize the primary air and the air supply scheme to make the

收稿日期: 2020-07-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0102100)

作者简介: 肖凡(1995-), 女, 山西晋中人, 硕士研究生, 研究方向为燃烧工程. E-mail: 948197085@qq.com

通讯作者: 杨海瑞. E-mail: yhr@tsinghua.edu.cn

combustion more adequate.

Keywords: Biomass; Hot-air furnace; Grate firing; Numerical simulation

1 引言

生物质能是指可以进行光合作用的生命体将太阳能以化学能的形式固定在其体内的能量形式,和太阳能一样都属于可再生能源.从广义范围来讲,生物质涵盖所有的植物、微生物及将其作为食物的动物以及其生产出的废物.如城市及工业有机废弃物料、农作物及其废弃物料、木材和森林废弃物料、以及动物粪便等都可以称得上是代表性的生物质^[1-2].

中国生物质能能源极其丰富,各类秸秆的年产量可达 6 亿吨,薪柴等产量大约为 2 亿吨.每年仍有较大量的人畜生产粪便和工业废弃物料等.目前,除了很少一部分被用作动物口粮或者家用燃料使用外,其余大多数均被露天焚烧或者就地填埋,还有另外一部分丢在田间被生物降解.

随着环境污染和能源短缺等问题的日益突出,人们愈加重视生物质能利用,许多国家都开始行动起来,积极投身于生物质能的开发及利用.在多种利用方式中,直燃利用是一种比较重要的规模化利用方式.生物质直燃代替化石能源,不仅能促进节能减排,还能带动农民增加收入,因此合理有效利用生物质能既具环境效益又兼具社会效益,对促进社会经济增长和改良生态环境极具意义^[3].

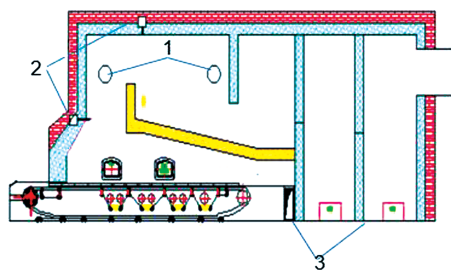
目前,对生物质进行规模燃烧的最主要的方式包括层燃燃烧和流化床燃烧^[4].其中,比较常见的是层燃燃烧,一般规模较小,但更适合生物质资源的分布规律.在东北三省,常采用生物质层燃热风炉,利用热空气对粮食进行干燥加工,可较好地实现生物质的综合利用.生物质层燃可以分为四个过程^[5],依次为干燥、热解、燃烧和燃烬阶段. Yang 等^[6-8]对垃圾层燃进行了全面系统地理论以及试验研究,开发出一个二维模拟平台 FLIC(Fluid Dynamic Incinerator Code),并综合考虑了固定燃烧和移动燃烧,该平台目前已经成为研究层燃的最常用工具.利用 FLIC 软件针对床层进行数值计算,不仅可以得到用于炉膛稀相气体燃烧的边界条件,还能得到炉篦上各成分的燃烧状况及其热解的过程,为炉排炉的设计和 optimization 提供了指导.

对于生物质燃料应用,在实验方面,李晓翔等^[9]对农林生物质进行热重实验,结果表明,生物

质热解可大致分为干燥、预热、热分解氧化以及碳化还原 4 个阶段.在数值计算方面,赵芳芳^[10]用 Fluent 软件对某电厂改造后的 48 t/h 生物质炉排炉进行研究;余昭胜等^[11]采用 FLIC 和 Fluent 软件对秸秆直燃锅炉在特定负荷,同时改变一、二次风比,对锅炉燃烧特性进行研究.与煤相比,生物质燃料挥发分含量高,固定碳含量低,然而目前很多生物质层燃炉设计和运行依旧沿用燃煤的思维,不仅影响利用效率,甚至会引发爆燃事故.本文采用数值模拟方法研究生物质燃料在炉篦上的燃烧过程,其结果可对该类锅炉的结构以及运行提供优化指导.

2 热风炉结构及燃料特性

本研究对象为东北三省某生物质热风炉,额定热功率为 7 MW.该炉结构简图见图 1,炉排长度为 4.3 m,宽度为 2.5 m,一次风从炉排下部进入炉膛,二次风喷口设在前墙和炉顶,风口内径为 27 mm,间隔 200 mm.



1. 再循环风口 2. 二次风口 3. 隔墙

图 1 锅炉简图

Fig. 1 The schematic diagram of biomass furnace

该炉燃用的是由玉米秸秆成型燃料,该燃料元素分析、工业分析见表 1,其低位热值为 12 790 kJ/kg.

表 1 生物质元素分析和工业分析

Tab. 1 Ultimate analysis and proximate analysis of biomass

| 元素分析(ar)/% | | | | | 工业分析(ar)/% | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------|------|------|
| C _{ar} | H _{ar} | O _{ar} | N _{ar} | S _{ar} | M | V | FC | A |
| 38.05 | 4.30 | 35.45 | 0.49 | 0.09 | 8.1 | 65.1 | 13.2 | 13.6 |

3 基于 FLIC 平台的层燃模拟

3.1 FLIC 软件参数设置

FLIC 是谢菲尔德大学开发的床层燃烧反应

模拟平台, 主要应用于生物质、垃圾等高水、高挥发分等燃料的层燃燃烧模拟. 用户给定燃料的工业分析、元素分析、低位发热量、一次风分配、炉排尺寸等边界条件, 然后通过求解炉排上方气相和固相的连续性、动量、能量和组分输运方程, 即可得到沿炉排运动方向的速度分布、温度分布以及组分分布, 并以此做为稀相空间数值计算的边界条件.

该算法基于四阶龙格库塔法^[9], 假定挥发分气体成分为 $C_m H_n$ (33.2%)、CO (17.54%), H_2 (10.22%) 和 CO_2 (31.06%). 燃料由辐射传热引燃. 计算时燃料粒径为 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, 其形状因子为 1.35. 堆积密度为 450 kg/m^3 , 其孔隙率为 0.719, 料层初始高度为 250 mm. 一次风量为 $209.2\text{ m}^3/\text{min}$, 温度为 273 K, 四个风箱中风均匀分配. 床层移动速度为 8.53 m/h .

3.2 模拟结果

燃烧计算表明: 燃料水分蒸发率为 98.25%, 挥发分析出率 100%, 焦炭燃烧率为 71.65%, 燃料总的质量损失是 84.37%, 床层计算表明其燃尽程度较高.

分布. 由于一次风温较低, 燃料随炉排进入炉膛区域以后主要依靠炉膛中烟气辐射进行加热. 由图 2b 可知, 在沿炉排前进 0.53 m 之前, 燃料处于干燥阶段, 床层厚度变化不明显, 温度较低变化也不大. 从 0.53 m 位置开始, 挥发分开始逸出并燃烧, 床层上方气温也很快随之上升, 水分蒸发加快, 燃料此时由于热解所以不断被耗尽, 厚度逐渐减薄. 在 0.6~1.0 m 之间, 床层上方气温基本保持不变, 与此同时床层高度下降, 这是由于该段有大量挥发分析出, 而热解也会吸收热量. 1 m 之后, 前段逸出的挥发分强烈燃烧, 使炉篦上燃料温度达到最高, 为 1590 K. 气相最高温度出现在沿炉篦前进方向 2~2.2 m 处, 最高可达 1348 K. 2.2 m 之后, 挥发分放热基本结束故温度开始变低, 并且此时固定碳开始燃烧, 但是由于固定碳着火温度较高且此处床层较薄, 故对一次风升温程度有限且一次风温度较低, 所以固定碳只燃烧大概 71% 便不再燃烧, 所以固定碳燃烧燃尽率并不是很高.

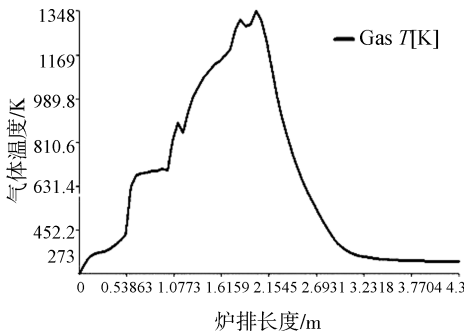


图 2a 炉排上方气体温度分布

Fig. 2a The temperature curve of flue gas

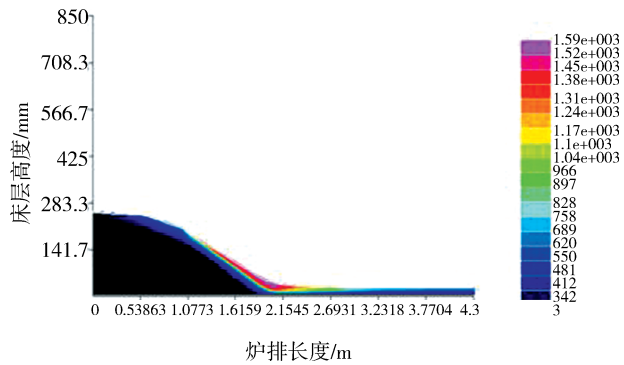


图 3 固相温度分布

Fig. 3 The temperature profile of solid phase

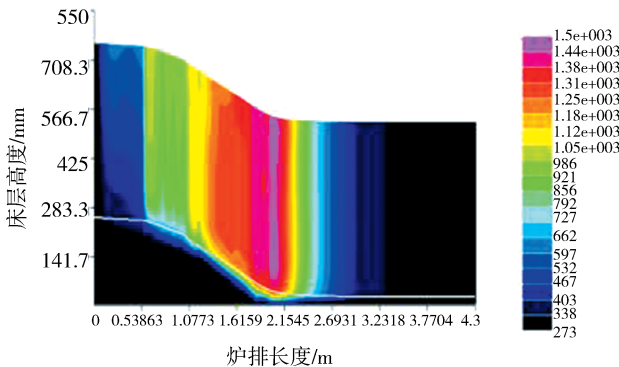


图 2b 烟气温度分布

Fig. 2b The temperature profile of flue gas

图 4 所示为燃料主要的组分变化趋势. 水分变化见图 4(a), 上部燃料受到辐射传热, 水分从燃料中脱出, 并呈抛物线状沿高度方向呈现. 图 4(b) 为挥发分变化, 与图 3 对比发现, 当其表面温度高达 600 K 时, 伴随着挥发分逸出之后燃料体积缩小, 床层厚度明显变薄. 固定碳含量变化如图 4(c) 所示, 由于其着火温度较高, 在刚燃烧初始阶段其含量保持不变, 受到辐射及自身燃烧放热加热后开始燃烧. 固定碳含量在两个阶段会发生突变: 一是挥发分逸出阶段, 此时其含量从最初的 13.23% 增大至接近 54.1%; 二是当固定碳氧化燃烧时, 在朝着炉篦前进方向大概 1~2.7 m 处, 其含量从 54.1% 降到 25.6% 以下.

图 2、图 3 分别表示炉篦上方气、固体的温度

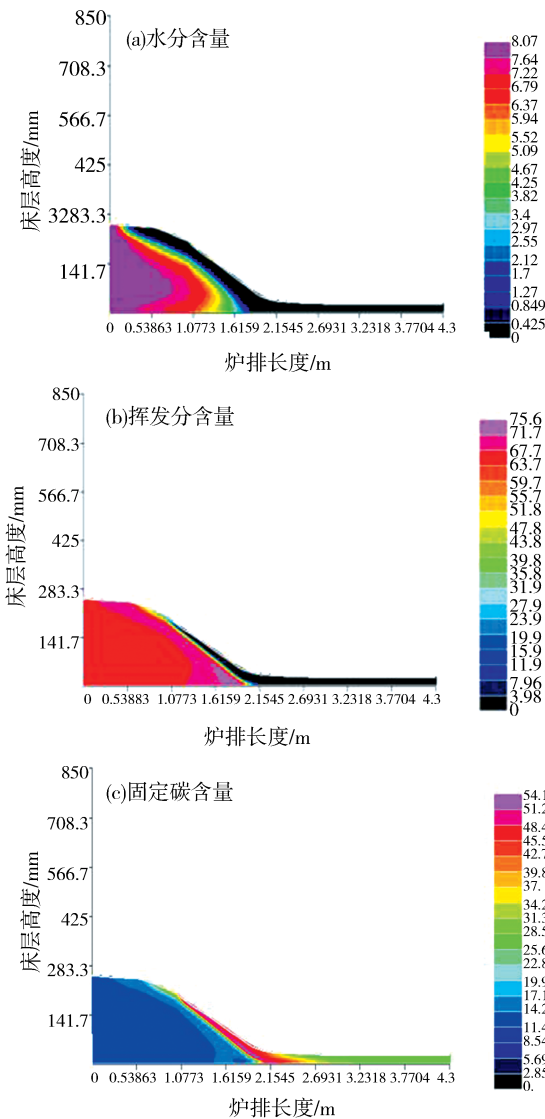


图 4 燃料组分含量变化

Fig. 4 The changes of composition contents

图 5、图 6 分别为沿炉篦前进方向燃料各组分的变化率和烟气各组分质量分数变化。在朝炉篦前进方向 0~1.9 m 处水分脱出。从 0.5 m 处开始,温度持续上升,到 600 K 挥发分开始逸出,当析出的可燃气氧化燃烧时,氧气的质量分数急剧下降至接近 0%,生成产物 CO₂ 和 H₂O。固定碳燃烧所需温度更高,在沿炉排前进方向大概 1 m 处,床层表面温度达到了 1 040 K,开始燃烧并生成产物 CO₂。在 1.5 m 处,燃烧率达到最高,温度同样也达到最高 1 590 K。到朝炉篦前进方向 2.8 m 处,基本完成燃烧,床温下降到 966 K。从图 5 还可也看出在燃烬后段所需氧气很少,因此消耗量少,故其质量分数接近空气中氧气的质量分数。图 5 显示挥发分组分变化过程中会产生两个峰值:第一个峰是由于受热后挥发分逸出,逸出的同时会吸收

热量,而且热量尚未完全传递到内部,所以逸出量逐渐减少;此后,由于里层燃料受热温度升高,之前处于内层挥发分随之逸出,因此第二个逸出峰也随之出现。本文假定挥发分主要组分是 C_mH_n、CO 以及 H₂,由图 6 知,C_mH_n、CO 和 H₂ 也出现相同逸出规律。从图 6 中可以看出水的质量分数变化出现三个峰:第一个峰是由于温度升高燃料中的水分蒸发;第二个峰是由于挥发分中 H₂ 析出与 O₂ 反应生成了 H₂O;而第三个峰的出现也是由于热传导使得内层燃料中挥发分逸出后与氧气发生反应而后形成。

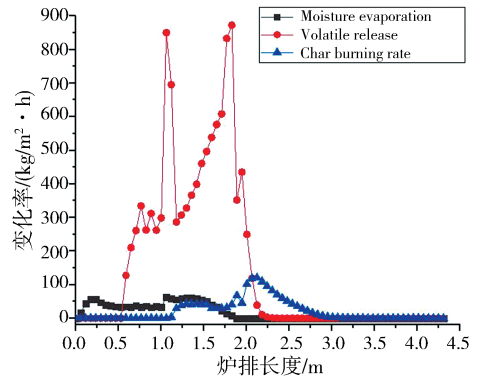


图 5 燃料中各组分的变化率

Fig. 5 The release rates of compositions

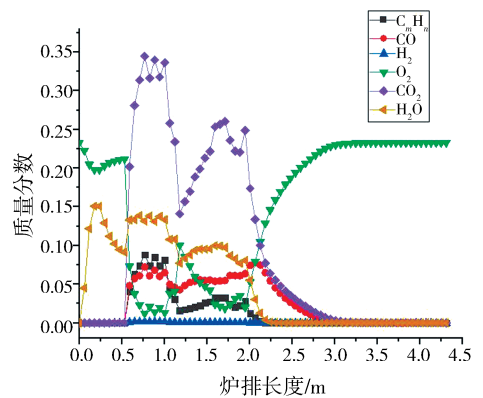


图 6 烟气各组分质量分数变化

Fig. 6 The changes of mass percentages of flue gas

3.3 运行优化分析

为了避免因配风原因影响燃烧,所以在实际运行中,应根据各个阶段不同的风量需求供应不同风量。例如本文中,在朝炉篦前进方向 0~0.5 m 段水分脱出,此时并没有氧气消耗,理论上无需供风;朝炉篦前进方向 0.3~3 m 为挥发分逸出及固定碳燃烧段,需要大量消耗氧气,此段供风量应达到总风量的 80%~90%^[11];朝炉篦前进方向 3~4.3 m,属燃烬段,也只需少量氧气供应,此段风量供应可以调整为总风量的 10%~20%,按需配风,

并以此提高燃烬率, 同时也可避免炉膛因供风量过大导致烟气热损增加。针对朝炉篦前进方向 0.5~2.1 m 处高温烟气, 可以在锅炉进行结构设计时适当改变前、后拱角以及其覆盖范围, 以此增强辐射, 加速燃烧。鉴于本文一次风温度未经过预热, 挥发分析出后料层变薄, 同时一次风温度较低使得料层温度降低, 进而达不到固定碳燃烧温度, 使得固定碳燃尽率只有 71.65%, 所以为了提高燃尽率, 可以适当提高一次风温度。

4 结 论

本文对我国东北三省某用于粮食加工的层燃热风炉进行数值计算, 并获得朝炉篦前进方向固相、气相温度分布, 以及烟气中的主要成分在朝炉篦前进方向的变化规律。结果显示, 层燃过程可分成水分脱出、挥发分及固定碳逸出燃烧 3 个阶段。根据不同阶段特点, 按需配风, 从而减少烟气热损, 保障燃烧效率, 并建议根据烟气温度设计拱角以及覆盖长度, 增强炉拱辐射强度, 加速燃烧进程。针对一次风温低导致固定碳燃烬率低的情况, 建议适当提高一次风温来提高固定碳燃尽率。本文模拟结果对生物质层燃锅炉的运行与结构优化设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 肖军, 段善春, 王华, 等. 生物质利用现状[J]. 安全与环境工程, 2003(1): 11.
- [2] 娄喜艳, 丁锦平. 生物质能源发展现状及应用前景[J]. 中国农业文摘: 农业工程, 2017(2): 12.
- [3] 孙永明, 袁振宏, 孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源, 2006(2): 78.

- [4] 宋景慧, 湛志钢, 马晓茜, 等. 生物质燃烧发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [5] 吕游, 蒋大龙, 赵文杰, 等. 生物质直燃发电技术与燃烧分析研究[J]. 电站系统工程, 2011(4): 4.
- [6] Yang Y B, Sharifi V N, Swithenbank J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviors of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds [J]. Fuel, 2004, 83: 1553.
- [7] Yang Y B, Goh Y R, Zakaria R, *et al.* Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed [J]. Waste Manage, 2002, 22: 369.
- [8] Yang Y B, Nasserzadeh V, Goodfellow J, *et al.* Parameter study on the incineration of municipal solid waste fuels in packed beds [J]. J I Energy, 2002, 75: 66.
- [9] 李晓翔, 舒新前, 李刚, 等. 3 种农林生物质的热解及动力学研究[J]. 可再生能源, 2010(6): 63.
- [10] 赵芳芳. 48t/h 直燃生物质锅炉数值模拟及优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [11] 余昭胜, 马晓茜. 秸秆直燃锅炉燃烧数值模拟[J]. 农业机械学报, 2008(4): 73.
- [12] Yang Y B, Yamauchi H, Nasserzadeh V, *et al.* Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed [J]. Fuel, 2003, 82: 2205.
- [13] Yang Y B, Lim C N, Goodfellow J, *et al.* A diffusion model for particle mixing in a packed bed of burning solids [J]. Fuel, 2005, 84: 213.
- [14] 马括, 郭思柯, 王小聪, 等. 生物质颗粒燃料层燃燃烧的 FLIC 数值模拟与分析[J]. 可再生能源, 2015(5): 766.

引用本文格式:

中 文: 肖凡, 胡南, 张缦, 等. 基于 FLIC 软件的生物质层燃数值模拟[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 025002.

英 文: Xiao F, Hu N, Zhang M, *et al.* Numerical simulation of biomass grate furnace combustion based on FLIC [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 025002.