垃圾焚烧炉炉拱改造与燃烧优化的数值模拟

李秋华[1] 夏梓洪[1] 陈彩霞[1*] 张小可[2]
(1. 华东理工大学资源与环境工程学院,上海 200237; 2. 上海环境集团,上海 200040)

摘 要 炉排式垃圾焚烧炉在处理比设计水分高、热值低的垃圾时,容易出现着火位置滞后、垃圾"烧不透"、残炭含量高等问题。采用FLIC软件的床层模型和商业软件FLUENT,对焚烧炉炉排和炉膛燃烧过程进行了模拟计算。结合某城市生活垃圾焚烧炉存在的燃烧不完全问题,通过一系列的数值实验,探索后拱高度和挡板的有无对燃烧过程的影响。比较了炉拱辐射强度、挥发分质量分数、温度沿炉排长度方向的分布以及炉膛内的速度矢量图。结果表明,降低后拱高度或增加挡板均可使着火位置有不同程度的前移;同时降低炉拱高度和增加挡板可使着火位置前移约1.1 m,提前进入稳定燃烧阶段。

关键词 垃圾焚烧炉 燃烧 炉拱 挡板 数值模拟

中图分类号 TK 229 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2012)11-4191-06

Numerical simulation of combustion and arch structure in MSW incinerator

Li Qiuhua[1] Xia Zihong[1] Chen Caixia[1] Zhang Xiaoke[2]
(1. School of Resource & Environment Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;
2. Shanghai Environment Group, Shanghai 200040, China)

Abstract The phenomena of ignition delay, incomplete combustion and high carbon content in residual ash are common problems encountered in incinerators burning high moisture wastes. In order to solve these problems, a coupling approach of FLIC and FLUENT was applied in the simulation of in-bed combustion and out-of-bed burnout. The impact of rear furnace arch height and deflector on the burnout characteristics was investigated by a series of numerical simulations, and improved designs were proposed. The comparison of radiation intensity from the furnace arch, mass fraction of volatiles and temperature along the direction of grate length and the velocity vector diagram, between the original design and the new scheme of furnace arch and deflector, was performed. It comes to the conclusion that either reducing the rear arch height or using deflector can put the ignition distance forward. With the methods mentioned above, the result shows that the distance of ignition is shortened by 1.1 m.

Key words waste incinerator; combustion; furnace arch; deflector; numerical simulation

城市生活垃圾的无害化、减量化和资源化处理是能源与环境领域的重要研究课题。现阶段,生活垃圾焚烧发电是一种较为有效的处理方式。其中,炉排式焚烧方法是目前应用最广的垃圾焚烧技术。20世纪80年代以来,我国一些城市陆续引进了国外的炉排燃烧设备[1]。由于国内城市生活垃圾分类处理较差,厨余垃圾较多,含水量大、热值低、灰分高且成分复杂,实际运行中,存在着火位置滞后、炉膛内燃烧不均匀、炉温偏低、残炭含量较高等一系列问题[2]。

Yang等[3]将垃圾在炉排上的燃烧过程分为干燥、挥发分释放/焦炭形成、挥发分燃烧和焦炭燃烬4个阶段。湿垃圾在炉排上干燥和挥发分释放过程所需要的热量一部分来自一次风的对流传热,另一部分则来自炉膛火焰和炉拱的辐射热。从原理上,调整一次风的配比和预热温度,可以一定程度上改善垃圾在炉排上的燃烧过程。但是,对于高水分的低质垃圾,炉膛内火焰的辐射较弱,调整一次风并不能彻底解决问题,因此,必须设法借助炉拱改造等措施,改善炉膛辐射热对湿垃圾的干燥[4]。根据炉排

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20876049);上海市科委资助项目(10DZ1200105)
收稿日期:2011-09-19; **修订日期**:2012-03-21
作者简介:李秋华(1986~),女,硕士研究生,主要从事垃圾焚烧及脱硝的数值模拟研究工作。E-mail:lichiuhua@163.com
*通讯联系人,E-mail:cxchen@ecust.edu.cn

焚烧炉的特点可知:其设计的关键在于炉膛,而炉膛设计的关键是炉拱,故改造焚烧炉炉拱也是工程上调整燃烧的手段之一。

近年来,计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)方法得到了快速的发展,广泛应用于垃圾焚烧炉的优化设计。刘效洲等[5]通过对速度场、浓度场和温度场的数值模拟给出了垃圾焚烧炉的设计原则和相应的改进措施;赵颖等[2]运用PHOENICS软件对炉内流场进行模拟,研究了炉拱形状和尺寸对流场的影响,完成了对二段往复炉排焚烧炉炉拱的优化设计。

英国谢菲尔德大学废物焚烧中心,开发了床层燃烧模拟软件FLIC,Ruy等[6-8]用此软件研究了水分、脱挥发分速率和一次风热流密度对燃烧的影响,并取得了较好的结果。作者也采用该软件模拟垃圾在炉排上的燃烧过程,将得到的烟气温度、速度和各组分的浓度沿床层长度方向的分布作为炉膛入口的边界条件,进而采用商业软件Fluent 6.3对炉膛空间的辐射强度和流场进行模拟,分析了后拱高度和挡板的有无对着火位置的影响。

1 研究对象

研究对象是单机日设计处理量500 t(实际运行处理量为400 t/d)的某城市生活垃圾焚烧炉,基本结构如图1所示。炉排为链条炉排,一次风预热至498 K,从炉排下方的5个风室分别送入炉膛,各段分配比例为:0.2∶0.24∶0.24∶0.2∶0.12,文中没有考虑二次风。

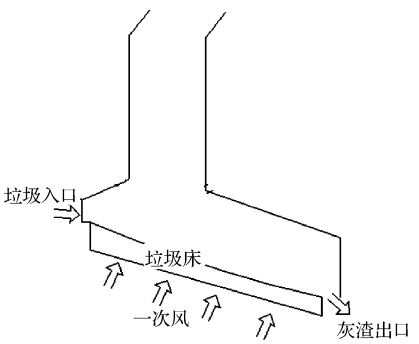

图1 垃圾焚烧炉结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of incinerator

模拟计算使用垃圾的工业分析(收到基,质量百分比,%)为:水分59%,挥发分25.62%,固定碳2.08%,灰分13.3%。元素分析(收到基,质量百分比,%)为:碳15.4%,氢1.56%,氧9.73%,氮0.38%,硫0.28%,氯0.33%。此组数据代表某城市生活垃圾平均性质,其特点是含水量较高,低位热值只有4 328 kJ/kg,比设计值5 680 kJ/kg大幅降低。

2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

对垃圾焚烧炉的模拟主要考虑两方面的内容:一是垃圾在炉排上燃烧过程的模拟;二是炉膛内气相燃烧过程的模拟。

2.1.1 炉排上气相守恒方程

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho_g\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(u_g\rho_g\varphi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_g v_g\varphi)}{\partial y}=S_s \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_g u_g\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g u_g u_g\varphi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_g u_g v_g\varphi)}{\partial y}=-\frac{\partial p_g}{\partial x}+F(u_g) \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho_g v_g\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g u_g v_g\varphi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_g v_g v_g\varphi)}{\partial y}=-\frac{\partial p_g}{\partial y}+F(v_g) \tag{3}$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho_g H_g\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g u_g H_g\varphi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_g v_g H_g\varphi)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial y}\right)+Q_h \tag{4}$$

气体组分方程:

$$\frac{\partial(\rho_g Y_{i,g}\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g u_g Y_{i,g}\varphi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_g v_g Y_{i,g}\varphi)}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{i,g}\frac{\partial(\rho_g Y_{i,g}\varphi)}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_{i,g}\frac{\partial(\rho_g Y_{i,g}\varphi)}{\partial y}\right)+S_{i,g} \tag{5}$$

扩散系数:

$$D_{i,g}=E^0+0.5\,d_p v_g \tag{6}$$

2.1.2 炉排上固相守恒方程

连续性方程:

$$\frac{\partial\rho_{sb}}{\partial t}+u_b\frac{\partial\rho_{sb}}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_{sb}v_s)}{\partial y}=-S_s \tag{7}$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho_{sb}H_s)}{\partial t}+u_b\frac{\partial(\rho_{sb}H_{si})}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_{sb}v_s H_{si})}{\partial y}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}) + Q_{sh} \quad (8)$$

组分方程:

$$\frac{\partial(\rho_{sb} Y_{i,s})}{\partial t} + u_b \frac{\partial(\rho_{sb} Y_{i,s})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_s v_s Y_{i,s})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_s \frac{\partial(\rho_{sb} Y_{i,s})}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_s \frac{\partial(\rho_s Y_{i,s})}{\partial y}) - S_{i,s} \quad (9)$$

式中:$F(u_g)$、$F(v_g)$是表示气体在床层停留时间的函数,可通过 Ergun 方程求解[9]。

式中:d 为固相颗粒直径(m);E^0 为有效扩散系数;H 为焓(J/kg);Q 为热源(w/m^3);S 为质量源项(kg/m^3 · s);t 为时间(s),T 为温度(K),u 为 x 轴速度(m/s);v 为 y 轴速度(m/s);x 为炉排方向(m);y 为床层高度方向(m);Y 为组分的质量分数;ρ 为床层的大体积密度(kg/m^3);λ 为热导率(W/m · K);φ 为垃圾层空隙率。下标中:b 为床层;g 为气体;i 为物质种类;s 为固相;sb 为大体积密度。

求解上述方程,即可获得床层的气体温度、固体温度以及各气体的组分、温度、速度随炉排长度或停留时间的变化。

在炉膛内部,主要考虑的是流动混合问题,模拟过程的基础是气相质量、动量和能量输运的守恒方程,以及描述流动混合、辐射换热以及化学反应的子模型。详细计算步骤参照 Fluent 用户手册[10]。

2.2　边界条件设置

将 FLIC 软件模拟计算得到的床层烟气中各组分浓度及温度沿炉排长度方向的分布作为炉膛燃烧的边界条件,以 Profile 方式导入。控制方程采用 Simple 算法求解;气相燃烧过程采用涡耗散概念模型(eddy dissipation concept model,EDC);湍流粘度模型采用标准 k-ε 双方程模型;辐射传热采用离散坐标辐射模型(discrete ordinates,DO)。

3　计算结果分析

3.1　原始炉型的模拟结果与分析

3.1.1　原始炉型结构简图

根据该焚烧炉实际结构进行几何建模,计算对象如图 2 所示。为满足计算精度要求,采用结构化网格对计算对象进行网格划分。

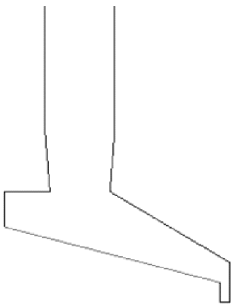

图 2　原始炉型结构简图

Fig. 2　Schematic diagram of original incinerator

3.1.2　床层模拟结果

图 3 是 FLIC 软件模拟计算得到原始炉型床层表面气相和固相温度沿炉排长度方向的分布。湿垃圾投入焚烧炉后,水分在炉膛火焰的辐射热和固体垃圾与一次风对流传热的双重作用下首先蒸发,随后开始热解过程,伴随挥发分释放、燃烧,释放大量热量。由图 3 可知,床层表面气相的温度随着水分的蒸发、挥发分与焦炭的燃烧而不断升高。由于垃圾成分的复杂性,易挥发的成分首先释放,燃烧并释放热量,造成温度出现波动。随着挥发分大量释放与燃烧,在炉排长度的 2/3 左右,气相温度达到最高值1 040 K;而固相由于含水率较高,温度升高较为缓慢,达到最高温度的时间滞后于气相。随着挥发分和固定碳的燃尽,床层表面气相温度逐渐降低,而对应的固体温度由于受到炉膛高温烟气的辐射作用,温度依然较高。

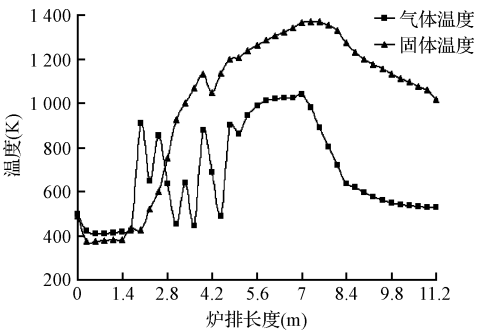

图 3　原始炉型的床层模拟结果

Fig. 3　Simulation results of original incinerator bedtop

3.1.3　气体组分模拟结果

图 4 是床层表面烟气中气体组分的质量分数沿炉排长度方向的分布图。由于垃圾含水率较高,大约在炉排的 7.8 m 处,蒸发过程才基本结束。在炉排 1.9 m 左右处,固相垃圾中易挥发成分的析出导致 C_mH_n 和 CO 出现第 1 个波峰,燃烧使得氧浓度急剧降低至几乎为 0,随后快速回升到初始浓度。在

炉排 6.2 m 左右 C_mH_n 和 CO 出现第 2 个波峰,此阶段垃圾成分大量热解,C_mH_n 和 CO 的含量较高,随热解过程的完成和燃烧过程的进行,两者含量下降,O_2 浓度再次迅速下降。此后,反应过程变慢,O_2 浓度逐渐上升,最后达到初始浓度。此外,床层表面烟气中的 CO_2 主要来源于挥发分析出和燃烧过程,在垃圾干燥和燃尽段含量较少。

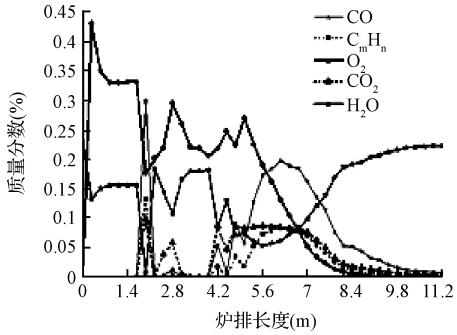

图 4 床层表面烟气中气体组分分布

Fig. 4 Mass fraction distribution of flue gas over bedtop

由图 3 和图 4 可知,垃圾含水率较高,造成干燥段持续时间较长,垃圾热解过程延后,挥发分的着火燃烧阶段发生在炉排末端,焦炭来不及燃烧即进入灰斗,从而会导致垃圾“烧不透”、残炭含量较高等问题。在实际运行中,该垃圾焚烧厂确实存在此类问题,尽管采取降低负荷及调整一次风配比等措施,问题并未能解决。

观察图 2 原始炉型结构可知,该垃圾焚烧炉的前拱出口端和后拱出口端几乎处在同一水平线上,而且后拱高度较高,焚烧低热值垃圾时,易引起火焰辐射减弱的问题。因此,考虑借助炉拱改造加强火焰对垃圾的辐射来改善垃圾的干燥、着火及燃烧。原则上,选择低而长的后拱,采用前拱出口端高于后拱出口端,形成一定的高度差,可帮助高温烟气深入到前拱区域,加强炉拱的辐射强度。此外,增加挡板也是工程上常用的一种加强炉拱辐射强度的方式[4,11]。

3.2 优化设计的炉拱结果与分析

3.2.1 优化设计炉拱结构简图

针对原始炉拱存在的问题,结合工程实际情况,提出了图 5 所示 3 种炉拱结构设计方案。即:保证前拱高度不变,降低后拱高度;在原始炉拱的基础上,在后拱处增加挡板;在降低后拱高度的同时在后拱处增加挡板。为方便比较,各炉拱方案分别记为 B、C 和 D。原始炉拱记为 A。

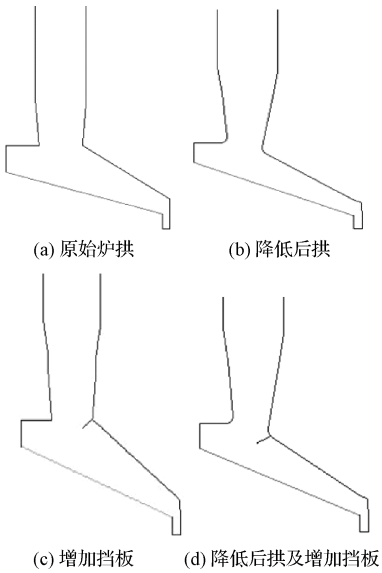

图 5 各炉拱结构简图

Fig. 5 Schematic diagrams of furnace arch

3.2.2 炉排入射热辐射强度分布比较

如图 6 所示,原始炉型 A 的辐射强度最弱,炉型 B 的最强,炉型 C 与 D 的差别不大。而在炉排长度方向的分布却差异明显。炉型 A 的峰值最为滞后,对炉排前端的湿垃圾的辐射作用很弱;炉型 B 的峰值虽然最大,但是相对于炉型 D 来说,较为滞后,而且覆盖区域较小,对炉排前端的湿垃圾的辐射效果也不理想;而炉型 D 的峰值虽不是最大,但最为靠前,且覆盖区域较广,从而湿垃圾可以在较强的辐射强度下进行干燥,水分蒸发时间缩短,挥发分较早释放,焦炭有充分的时间燃烧。

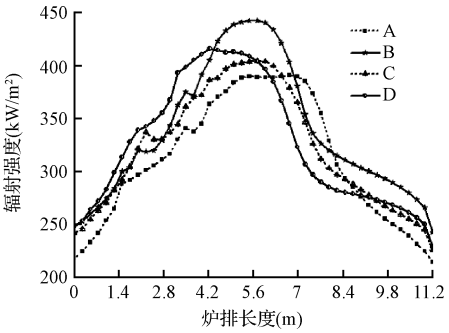

图 6 辐射强度沿炉排长度方向的分布

Fig. 6 Radiation heat flux distribution in the direction of grate length

3.2.3 挥发分释放曲线比较

由图 7 可知,炉型 D 的挥发分释放最为靠前,第 1 个波峰出现在炉排长度的 1.4 m 左右,比原始

炉型前移约 0.7 m,第 2 个波峰比原始炉型前移 1.1 m,这意味着炉型 D 着火位置比原始炉型 A 的着火位置提前。说明炉型 D 可使干燥和热解过程提前,挥发分较早释放燃烧,焦炭能够充分燃烧。比较炉型 B 和 C,第 1 个波峰几乎同时出现,观察第 2 个波峰,发现炉型 B 比 C 提前约 0.7 m,说明降低炉拱高度的效果要优于增加挡板。比较炉型 C 和 D,炉型 C 的波峰均滞后于炉型 D,因此,同时降低炉拱高度并增加挡板的双重效果要明显优于只在原始炉拱基础上增加挡板。比较炉型 B 和 D 可得出同样的结论。

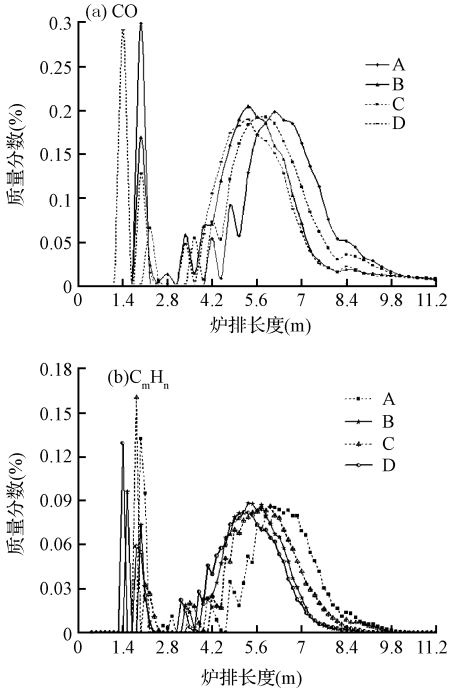

图 7　挥发分质量分数沿炉排长度方向的分布

Fig. 7　Mass fraction distribution of volatile in the direction of grate length

模拟结果还说明,辐射强度并不是愈高愈好,还要充分考虑其强度在炉排上的分布。在保证辐射强度的条件下,高强度辐射区域尽量分布在炉排前端,且分布区域尽量广,这样对强化床层燃烧效果较优。

3.2.4　气相温度分布的比较

图 8 比较了气相温度沿炉排长度方向的分布。伴随挥发分释放和燃烧,不同炉型在炉排前端均出现第 1 个波峰。随着挥发分的大量释放以及焦炭的燃烧,气相温度达到峰值。4 种炉型的温度峰值差异不大,出现位置差距明显,炉型 D 较 A 提前了约 1.5 m。此图验证了前文的分析结果,即同时降低炉拱高度并增加挡板效果要明显优于只在原始炉拱基础上增加挡板。

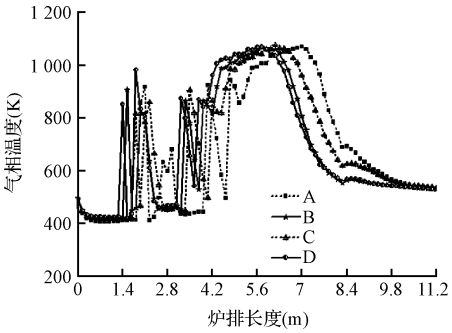

图 8　气相温度沿炉排长度方向的分布

Fig. 8　Gas temperature distribution in the direction of grate length

3.2.5　速度矢量分布比较

由图 9 可知,原始炉型 A 由于后拱较高,且喉部区域较开阔,高温烟气沿后拱直接进入炉膛,对炉排前端的湿垃圾辐射作用较弱,起不到加热干燥的作用;由于采取降低后拱高度、增加挡板的措施,炉型 B、C 和 D 有不同程度的压火作用,其中炉型 D 的效果最为明显。后拱高度的降低迫使高温烟气流向炉排前方,增强着火区和燃烧区的辐射及对流传热。此外,烟气从后拱冲向炉排前端时吹起的炽热灰粒和碳粒回流落到垃圾层表面,也可以起到一定的引燃作用。挡板的增加,不同程度地改变了烟气的流向,加强了扰动的作用,在喉部区域形成涡流,烟气充分混合,达到完全燃烧的目的。

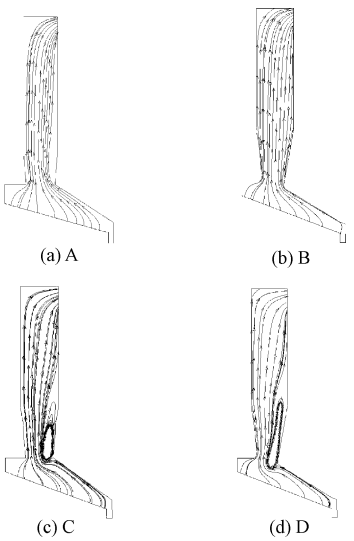

图 9　速度矢量分布

Fig. 9　Velocity vector diagram

4 结 论

(1)原始炉型模拟结果表明,炉膛对床层垃圾辐射强度较弱,导致湿垃圾干燥不充分,在床层燃烧时,挥发分释放靠后,着火位置位于炉排尾端。这与实际运行情况一致。

(2)降低后拱高度或增加挡板均使炉膛火焰中心前移,对床层的辐射强度增加,提高对湿垃圾的干燥能力,使挥发分释放和着火提前,保证垃圾的充分燃烧。若同时降低后拱高度并增加挡板,效果更为显著。

(3)炉拱结构 D 为较优设计方案,其着火位置比原始炉拱前移了约 1.1 m, 垃圾提前进入稳定燃烧和燃烬阶段。

参 考 文 献

[1] 白良成. 生活垃圾焚烧处理工程技术(第 1 版). 北京:中国建筑工业出版社,**2009**. 4-5

[2] 赵颖,刘富强,聂永丰,等. 二段往复炉排焚烧炉炉拱的优化辅助设计. 环境工程,**2004**,22(2):49-51
Zhao Y., Liu F. Q., Nie Y. F., et al. Furnace arch aided design of the two-stage reciprocating grate incinerator. Environmental Engineering,**2004**,22(2):49-51(in Chinese)

[3] Yang Y. B., Goh Y. R., Zakaria R., et al. Mathematical modeling of MSW incineration on a traveling bed. Waste Management,**2002**,22(4):369-380

[4] 林宗虎,张永照. 锅炉手册(第 1 版). 北京:机械工业出版社,**1989**. 145-159

[5] 刘效洲,余战英,蒋宏利,等. 垃圾焚烧炉拱的结构设计及数值模拟. 动力工程,**2002**,22(4):1908-1811
Liu X. Z., Yu Z. Y., Jiang H. L., et al. Structural design and mathematical simulation for furnace arch in rubbish boiler. Power Engineering, **2002**, 22 (4): 1908-1811 (in Chinese)

[6] Ryu C., Yang Y. B., Sharifi V. N., et al. Thermal reaction modelling of a large municipal solid waste incinerator. Combust. Sci. Technol.,**2004**,176(11):1891-1907

[7] 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. Fuel,**2003**,82(18):2205-2212

[8] Yang Y. B., Sharifi V. N., Swithenbank J. Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated solid waste in a packed bed. Fuel, **2004**,83(11-12):1553-1562

[9] Vafai K., Sozen M. Analysis of energy and momentum transport for fluid flow through a porous bed. Journal of Heat Transfer,**1990**,112(3):690-699

[10] FLUENT 6.3. Manual: Fluent Inc., USA

[11] 冯俊凯,沈幼庭,杨瑞昌. 锅炉原理及计算(第 3 版). 北京:科学出版社,**2003**. 116-120,271-272