

垃圾炉一次风量对炉床燃烧影响的仿真研究

胡玉梅¹ 方方¹ 邵毅敏¹ 朱新才² 唐一科² 王传宾¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆科技学院机械工程学院, 重庆 400039)

摘要 针对垃圾焚烧炉床层内垃圾燃烧过程复杂性及影响垃圾燃烧效率因素多的问题, 运用数值仿真方法对某垃圾焚烧炉床层垃圾燃烧进行了模拟, 获得了垃圾质量流失速率、水分蒸发速率、挥发分释放速率、焦炭燃烧速率和烟气的温度; 并在 $50 \sim 1\,000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 范围内改变一次风流量, 获得了床层质量流失比值、过剩空气系数和烟气中各组分的质量百分比含量。仿真结果显示, 一次风流量取值 $517.47 \sim 632.09 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 时燃烧效率较高; 炉排两端区域的一次风流量在 $50 \sim 75 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 时, 可以使垃圾床表面平均温度明显提高, 而且还可以提高燃烧效率, 同时减少供风总量, 节约能源与动力资源。本研究对优化设计垃圾焚烧炉, 提高床层内垃圾的燃烧效率有一定参考价值。

关键词 垃圾焚烧炉 一次风 燃烧 数值模拟

中图分类号 TK227.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)03-0671-06

Simulation of the impact of primary air flow rate on waste combustion on grates

Hu Yumei¹ Fang Fang¹ Shao Yimin¹ Zhu Xincan² Tang Yike² Wang Chuanbin¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Mechanical Engineering Institute, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract The waste combustion in the waste bed and the impacts of the waste burning efficiency are complex. In order to solve this problem, the method of numerical simulation has been adopted to simulate waste combustion, and calculate the mass loss rate, moisture evaporation, volatile release, char burning rate. Used the total flow rate of primary air between $50 \sim 1\,000 \text{ Nm}^3/\text{min}$ to calculate the mass loss, excess air coefficient of waste bed, components of the gas. Calculated results show that the burning efficiency is higher when the total flow rate of primary air is at $517.47 \sim 632.09 \text{ Nm}^3/\text{min}$. The average surface temperature of waste bed is markedly improved when the primary air flow rate is $50 \sim 75 \text{ Nm}^3/\text{min}$ at the both ends of the grates. This can improve the burning efficiency and decrease the total flow rate of primary air to economize energy resources. So there are some reference values for the further optimization of the waste incinerator and improving the burning efficiency.

Key words waste incinerator; primary air; combustion; numerical simulation

层燃式炉排垃圾焚烧炉由于其运行安全可靠、燃料适应面广, 在国内外受到广泛应用。在层燃式垃圾焚烧炉内, 燃烧过程发生在2个区域, 如图1所示。图中的第1区域为垃圾在炉排上的床层内的燃烧区域; 第2区域为床层上部炉膛空间的气体燃烧的自由区段, 主要为床层上的垃圾燃料所产生的可燃性挥发物和部分颗粒随气流上升进入炉膛, 并与上部二次风混合的自由区段燃烧^[1,2], 对于该区段燃烧过程, 已有了一些理论模型和数值模拟工作, 可采用较为成熟的计算流体动力学的方法进行模拟^[3], 但由于缺乏完善的床层内数学模型, 自由区段的入口条件往往只能采用实验数据, 并且由于垃圾炉的庞大和测试环境恶劣, 实验数据获取难度大,

限制了自由区段的应用范围^[4]。而 FLIC 软件针对床层垃圾燃烧进行数值模拟, 不仅可以为自由区段的仿真计算提供完备的入口条件, 同时还可以深入了解炉排上垃圾床层内的燃烧分解过程, 为进一步优化设计垃圾焚烧炉, 提高床层内垃圾的燃烧效率提供指导^[5,6]。本文以某垃圾炉为研究对象, 对垃圾在炉排上床层内的燃烧和一次供风及对燃烧的影响

基金项目: 国家火炬计划基金项目(2007-769); 重庆市科委科技计划攻关重大项目(2007-397)

收稿日期: 2009-03-14; **修订日期:** 2009-09-25

作者简介: 胡玉梅(1964~), 女, 工学博士, 教授, 主要从事汽车 CAE 与结构优化设计及汽车被动安全技术、计算流体动力学等研究工作。E-mail: cdrhym@163.com

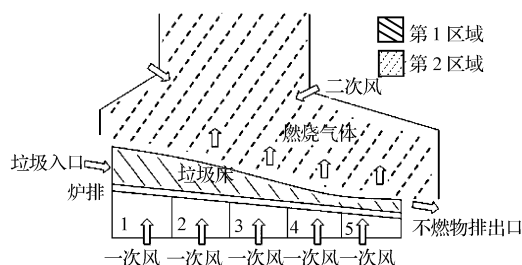


图1 垃圾焚烧炉原理图

Fig. 1 Schematic of combustion chamber in incinerator

响进行了计算机仿真研究。

1 数学模型

模型假设垃圾床层内物理量是垃圾床高度方向和炉床运动方向的函数,如床层内气相和固相的温度;将垃圾床层考虑为多孔介质;垃圾层固相由水分、挥发分、固定碳和灰分组成,垃圾焚烧过程为垃圾的干燥、热解、挥发分燃烧和焦炭燃烧,每一过程都采用对应的控制方程^[7]。

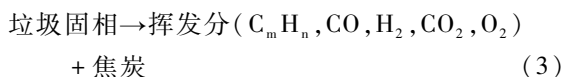
垃圾干燥过程中垃圾固相释放水的速率:

$$R_{\text{evp}} = S_a h_s (C_{w,s} - C_{w,g}) \quad \text{当 } T_s < 100^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$R_{\text{evp}} = Q_{\text{cr}} / H_{\text{evp}} \quad \text{当 } T_s = 100^\circ\text{C} \quad (2)$$

S_a 为固体颗粒的表面积(m^2); h_s 为固相和气相之间的对流传热系数($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$); $C_{w,s}$ 为固相水分浓度(kg/m^3); $C_{w,g}$ 为气相水分浓度(kg/m^3); T_s 为固相温度(K); Q_{cr} 为固相的吸收热(W/m^3); H_{evp} 为固相蒸发热(J/kg)。

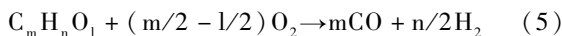
垃圾热解过程:



$$dv/dt = k_v (v_\infty - v) s^{-1} \quad (4)$$

v 为产生挥发物质的量,公式表示挥发分产生的速率。

垃圾挥发分燃烧过程:



$$R_{\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_1} = 59.8 T_g^{0.3} \exp(-12\,200/T_g) C_{\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_1}^{0.5} C_{\text{O}_1} \quad (8)$$

$R_{\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_1}$ 为碳氢化合物的燃烧速率($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)

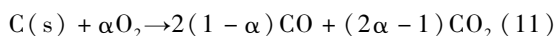
$$R_{\text{CO}} = 1.3 \times 10^{11} \exp(-62\,700/T_g) C_{\text{CO}} C_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5} C_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (9)$$

R_{CO} 为 CO 的燃烧速率($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$);

$$R_{\text{H}_2} = 3.9 \times 10^{17} \exp(-20\,500/T_g) R_{\text{H}_2}^{0.85} C_{\text{O}_2}^{1.42} C_{\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_1}^{-0.56} \quad (10)$$

R_{H_2} 为 H_2 燃烧速率($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)。

焦炭的燃烧过程:



产物 CO 和 CO_2 的比值

$$\text{CO}/\text{CO}_2 = 2\,500 \exp(-6\,420/T) \quad (12)$$

$$R_{\text{C}(\text{s})} = P_{\text{O}_2} / (1/k_r + 1/k_d) \quad (13)$$

$R_{\text{C}(\text{s})}$ 为焦炭燃烧的速率($\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$)

床层内气相和固相连续性方程、组分运输方程和能量方程^[7]。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\phi \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi \rho_g (\nu_g - \nu_B)] = S_{\text{sg}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(1-\phi)\rho_p]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_p (\nu_s - \nu_B)] \\ & = -S_{\text{sg}} \end{aligned} \quad (15)$$

组分运输方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi \rho_g Y_{\text{ig}})}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi \rho_g (\nu_g - \nu_B) Y_{\text{ig}}] \\ & = \nabla \cdot [D_{\text{ig}} \nabla (\rho_g Y_{\text{ig}})] + S_{\text{yig}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(1-\phi)\rho_p Y_{\text{is}}]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_p (\nu_s - \nu_B) Y_{\text{is}}] \\ & = -S_{\text{yis}} \end{aligned} \quad (17)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi \rho_g H_g)}{\partial t} + \nabla \cdot [\phi \rho_g (\nu_g - \nu_B) H_g] \\ & = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T_g) + Q_h \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(1-\phi)\rho_p H_s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\phi)\rho_p (\nu_s - \nu_B) H_s] \\ & = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + \nabla \cdot q_r + Q_{\text{sh}} \end{aligned} \quad (19)$$

扩散系数:

$$D_{\text{ig}} = E^0 + 0.5 d_p \nu_g \quad (20)$$

式中:

d_p ——固相粒子直径(m);

E^0 ——有效扩散系数;

H_g ——气相的焓(J/kg);

H_s ——固体颗粒中各组分(水分、挥发分、固定碳、灰分)的焓(J/kg);

Q_h ——垃圾气相热源(W/m^3);

Q_{sh} ——垃圾固相热源(W/m^3);

q_r ——辐射热流(W/m^2);

S_{yig} ——水分蒸发、热解、焦炭燃烧的气相质量

源项;

S_{vis} ——固相质量源项;

S_{sg} ——垃圾水分蒸发、热解、焦炭燃烧速率
(kg/m^3);

T_g ——气相温度(K);

T_s ——固相温度(K);

t ——时间(s);

Y_{ig} ——气体各组分(H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 和 $\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_l$)的质量分数;

Y_{is} ——颗粒中各组分(水分、挥发分、固定碳和灰分)的质量分数;

ρ_g ——气体密度(kg/m^3);

ρ_p ——垃圾固体密度(kg/m^3);

ν_B ——炉排的运动速度(m/s);

ν_g ——气体速度速度(m/s);

ν_s ——垃圾颗粒的平均运动速度(m/s);

ϕ ——垃圾层空隙率;

λ_g ——热扩散系数(W/mK);

λ_s ——垃圾料层的有效热导率(W/mK)。

式(14)和(15)满足质量守恒定理,右边表示单位时间流入微元体的净质量,左边表示同一时间间隔内微元体中质量的增加;式(16)和(17)是组分质量守恒方程,垃圾床中每一种组分都遵守组分质量守恒定律,垃圾热解的气相物质组分为 H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 和 $\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_l$,固相物质组分为水分、挥发分、固定碳和灰分。式(18)和(19)满足能量守恒定理,右边表示单位时间内外界给予微元体的热量和功的能量之和,左边表示同一时间间隔内微元体的能量增量。

2 炉排炉垃圾燃烧的计算机仿真

垃圾置于炉排上燃烧的焚烧炉称为炉排炉,根据炉排的运动与否,又可以分为固定炉排炉和活动炉排炉,炉排炉是目前固体废弃物焚烧炉的主流形式,包括三菱马丁炉、法国 ALSTOM 公司焚烧炉等,都是大型炉排炉的代表^[8]。

本文中涉及的是垃圾处理能力为 10 t/h 的马丁炉,炉排长度为 9.16 m,宽度为 3.2 m。仿真基本参数:垃圾床层初始高度 960 mm,孔隙率 0.4,垃圾床层大体密度 465 kg/m^3 ,一次风的总流量为 500 Nm^3/min ,空气温度 300 K,垃圾在炉排上的停留时间为 90 min,垃圾的低热值为 7 656 kJ/kg ,垃圾工业基分析垃圾各组分质量分数为水分 36%、灰分

32%、挥发分 8.2% 和固定碳 23.8%。床层划分了 160 × 188 个网格,控制方程采用 Simple 算法求解。

表 1 垃圾固相各组分属性

Table 1 Properties of each individual component in the solid waste

	水	挥发分	固定碳	灰分
密度 (kg/m^3)	1 000	1 500	2 300	2 630
比热 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	4 180	3 431	1 434	1 230

基于上述参数,采用 FLIC 软件对床层垃圾燃烧进行了数值模拟分析,获得了自由区段计算所需的入口条件,如烟气的温度、速度和组分等,图 2 为垃圾炉内各点的温度云图。图 2 显示,中间区域烟气温度在 1 000 K 左右,中间区域为燃烧区域,燃烧是一种剧烈的氧化反应,常伴有光和热的现象,即辐射热,也常伴有火焰现象,会导致周围温度的升高^[9]。

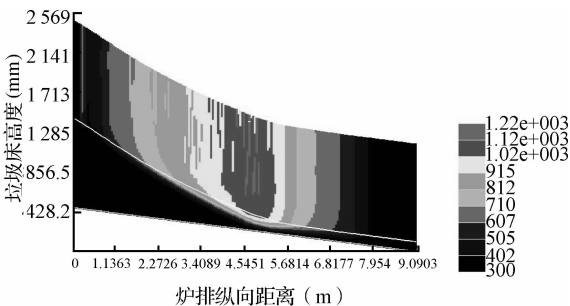


图 2 垃圾炉内烟气温度

Fig. 2 Gas temperatures in incinerator

图 3 为垃圾床内各物理和化学变化速率。由图中的水分蒸发速率曲线可见,垃圾料层在炉排的前 1 m 位置内,由于受炉内的高温辐射温度上升,水分开始蒸发,并且水分的蒸发速率很快达到峰值,随后,沿炉排长度方向,水分的蒸发速率逐渐降低;由挥发分释放速率曲线和焦炭燃烧速率曲线可见,在炉排 1 m 左右位置开始有挥发分释放和焦炭燃烧,因为靠近表层的垃圾水分被蒸发完后,垃圾的温度继续升高,当干燥的垃圾温度上升到 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右时开始热解(热解是利用有机物的热不稳定性,在无氧和缺氧条件下利用热能使化合物的化合键断裂,由大分子量的有机物转化为小分子量的可燃气体、液体燃料等的过程^[10]),在炉排 1 ~ 6 m 的位置热解析出大量挥发分燃烧并释放大量的热;同时由焦炭燃烧速率曲线可见,在炉排 1 ~ 8 m 的位置上热解产生的焦炭也在燃烧并释放大量的热,并且在 4 ~ 7 m

的位置焦炭燃烧速率较大,在挥发分释放和焦炭燃烧2种反应的叠加区域4~6 m的位置正好形成了图2中的垃圾炉内的高温区域。

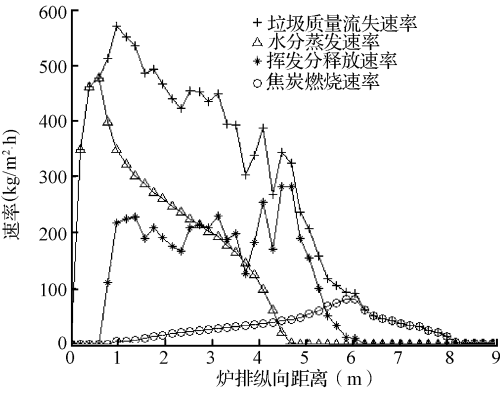


图3 垃圾床内各物理和化学变化速率

Fig. 3 Physical and chemical change rate in waste bed

3 不同一次风量的数值仿真

氧化物是燃烧反应中不可缺少的物质,最普通的氧化物为含有21%氧气的空气,空气量的多寡及与燃料的混合程度直接影响燃烧的效率。而垃圾燃烧需要的氧气来自于一次供风,因此一次风流量的大小直接影响着燃烧的过程^[9],为此本文基于数值仿真,针对一次风流量对垃圾焚烧过程的影响进行了研究。仿真中假设炉排下吹入的一次风流量是均匀的,一次风总流量的取值范围为50~1 000 Nm³/min 仿真计算。

3.1 过剩空气系数和质量流失比值

在垃圾焚烧炉的运行过程当中,过剩空气系数越大,表示实际供给的空气量比燃烧所需的理论空气量越大,炉膛里的氧气就愈充足。根据C和H元素完全燃烧的化学反应方程式和垃圾组分参数,可得1 kg生活垃圾完全燃烧所需外界供空气量为2.27 Nm³/kg,将此空气量称为理论空气量。

在一次风流量不同,其他条件相同时,经燃烧后的垃圾质量减少得越多,则表明燃烧的效率越高。在此定义:

质量流失比值 = $\frac{\text{总的垃圾床流失质量}}{\text{初始的垃圾总质量}}$

图4为由仿真结果得到的一次风总流量在50~1 000 Nm³/min 范围内,过剩空气系数与质量流失比值曲线。因为初始的垃圾质量相同,所以质量

流失比值越高,总的垃圾流失质量就越大。由图4可知,当一次风流量从50 Nm³/min 开始,过剩空气系数为0.13,实际供给的空气量比燃烧所需的理论空气量小很多,说明这时的空气供给量是不够的。此时的质量流失比值为62.21%,是质量流失比值曲线的最低点,说明在空气供给量不足时垃圾燃烧效率低。随着一次风标准体流量的增加,过剩空气系数线性增加,质量流失比值呈现波动上升,由垃圾焚烧过程的控制方程(1)~(13)可以看出,垃圾的干燥、热解、挥发分燃烧和焦炭燃烧都与温度成复杂的非线性关系,而一次风量的大小会影响到垃圾床层的温度,影响到各组分的燃烧速率,所以一次风量的大小与垃圾的焚烧也是成复杂的非线性关系的,因而出现波动。但从曲线的上升趋势当中可以看出一次风标准体流量是影响垃圾燃烧效率的主要因素。当一次风流量上升到517.47 Nm³/min 时,质量流失比值达到第一个峰值76.57%,过剩空气系数为1.37,一次风流量增加到632.09 Nm³/min 时,质量流失比值在经过很小的波动后又达到另一峰值76.90%,此时的过剩空气系数为1.67,一次风流量继续增加后质量流失比值开始下降到了73.2%。这说明合适的一次风流量,本文所分析的垃圾焚烧炉的一次风流量在517.47~632.09 Nm³/min 之间时可以获得较高的垃圾燃烧效率,或者说过剩空气系数在1.37~1.67之间时可以获得较高的垃圾燃烧效率,这与过剩空气系数经验值在1.2~1.7之间^[4]一致。当一次风流量过大时,炉膛内的部分火焰可能会由于高流速的冷空气而熄灭,并且过大流量的一次风进入炉膛后对反应区域具有冷却的作用,最终降低了垃圾燃烧效率。

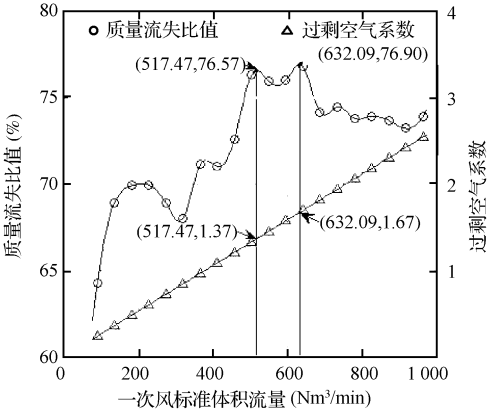


图4 一次风流量对燃烧过程的影响

Fig. 4 Impact of primary air flow rate on combustion

3.2 烟气各组分的含量

一次风流量的多少对烟气各组分的含量也有一定影响。这里主要针对烟气中 H_2O 、 CO 、 CO_2 和 O_2 的质量百分比含量进行了对比,下面各图中等高线的值为炉排上方 0.6 m 处烟气中各组分的质量百分比含量。

由图 5 可知,随着一次风流量的增加,烟气中 H_2O 的质量百分比含量逐步减小,原因是一次风流量的增加,使得其他组分明显增加。

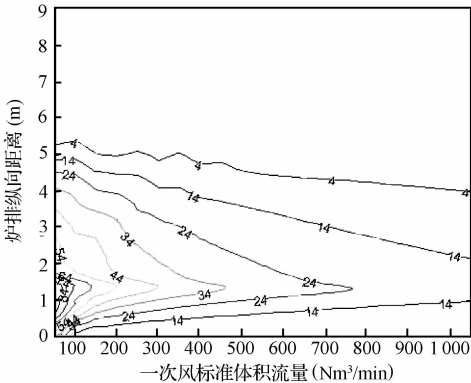


图 5 烟气中 H_2O 的质量百分比含量
Fig. 5 Mass fraction of H_2O in gas

由图 6 可知,随着一次风流量的增加,烟气中 CO 的质量百分比含量在流量为 $100 \sim 300 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之间陡然减小,流量超过 $300 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 后稳步减小。烟气中 CO 的质量百分比含量在流量为 $100 \sim 300 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 之间陡然减小,原因主要是 O_2 质量分数的增加,使得 CO 和 O_2 产生了燃烧反应;流量超过 $300 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 后缓慢减小,原因是在 CO 和 O_2 产生了燃烧反应的同时, CO 的解析速率也增加了,有更多的 CO 产生,所以缓慢减小。

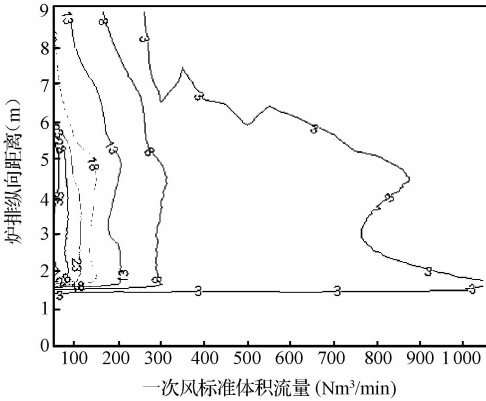


图 6 烟气中 CO 的质量百分比含量
Fig. 6 Mass fraction of CO in gas

由图 7 可知,随着一次风流量的增加,烟气中 CO_2 的质量百分比含量先增加,之后有所减小。烟气中 CO_2 的质量百分比含量先增加的原因是 CO 和 O_2 反应生 CO_2 的速率增加,随后 CO 和 O_2 反应生 CO_2 的速率稳定,但由于 O_2 的质量百分比含量增加, CO_2 的质量百分比含量有所减小。

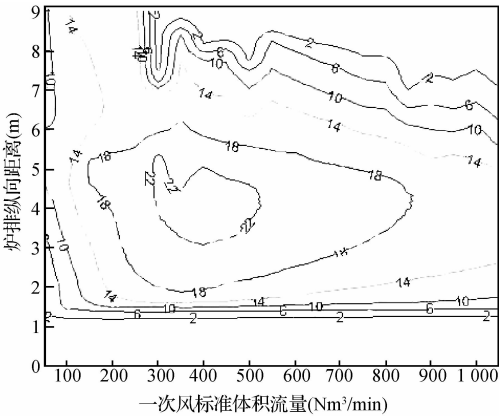


图 7 烟气中 CO_2 的质量百分比含量
Fig. 7 Mass fraction of CO_2 in gas

由图 8 可知,随着一次风流量的增加,烟气中 O_2 的质量百分比含量逐步增大,因为一次风带来了更多的 O_2 ;同时在垃圾床的入口处和垃圾床的末端区域, O_2 的质量百分比含量很高。在入口处的区域因为还没有热解出可燃气体和 O_2 反应,而在垃圾床的末端区域是因为垃圾中的可燃成分已经燃尽。所以从燃烧的需要来看,垃圾床的两端的区域内不需要太多的 O_2 ,可将均匀供风改为分区域的不均匀供风。

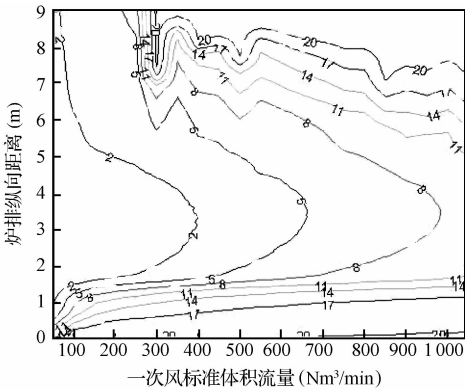


图 8 烟气中 O_2 的质量百分比含量
Fig. 8 Mass fraction of O_2 in gas

垃圾燃烧时沿炉排长度方向上各区域需要氧气量是不一样的,干燥和燃尽区域不需要过多的氧气,在热解和燃烧区域需要供给足量的氧气,依此原则可以减少炉排两端进风区域的进风量。为了比较均匀供风与非均匀供风对垃圾燃烧的影响,参考垃圾焚烧炉原理(图 1),将炉排下的一次风入口分为 5 个区域,设置了 1~5 的工况,计算了不同供风情况下的结果,如表 2 所示。

表 2 各区域不同供风计算结果

Table 2 Results of different incinerator operating cases

工况	各区域一次风标准体积流量 (Nm ³ /min)					垃圾床表面 平均温度(K)	质量流失 比值(%)
	1#	2#	3#	4#	5#		
1	100	100	100	100	100	693.2	72.6
2	75	100	100	100	75	770.5	76.16
3	75	100	100	75	50	786.7	76.16
4	50	100	100	100	50	800.4	76.78
5	50	100	100	75	50	817.9	76.77

由表 2 可知,减小炉排两端区域的一次风流量,使得垃圾床表面平均温度有明显的提高,而且还提高了燃烧效率,同时减小了供风总量,节约了能源和动力,尤以第 5 种工况明显。

4 结 论

(1)燃烧过程高温区形成的原因有 2 个:一个是由于析出大量挥发分燃烧而产生的高温区;另一个是在垃圾燃烧进行到一定阶段后,热解出的大量焦炭开始迅速燃烧放热所产生的高温区。在挥发分释放和焦炭燃烧 2 种反应的叠加区域 4~6 m 的位置形成了垃圾炉内的高温区域。

(2)一次风流量对垃圾床中垃圾燃烧效率有明显的影响。当一次风流量达到某一数值时,燃烧效率达到最大值,之后一次风流量继续增大,燃烧效率开始波动下降。也就是说,过高的一次风流量会使着火峰面的火焰不稳定,而且会降低床内热量。

(3)一次风流量对烟气中各组分的质量百分比含量有明显影响。O₂ 质量百分比含量随一次风流量的增加而增加,CO₂ 质量百分比含量先增加后减小,CO 质量百分比含量明显减小。

(4)减小炉排两端区域的一次风流量,不仅可使垃圾床表面平均温度提高,而且还可提高燃烧效率,同时减小供风总量,节约能源与动力资源。

参 考 文 献

[1] 孙燕. 几种垃圾焚烧炉及炉排的介绍. 环境卫生工程, **2002**, 10(2): 77~80

[2] 顾恬, 曹汉鼎, 胡兴胜. 城市生活垃圾焚烧炉结构对燃烧的影响及结构选型的研究. 动力工程, **2003**, 23(1): 2186~2197

[3] 马晓茜. 垃圾焚烧炉热力模型研究. 化学工程, **2000**, 28(4): 36~40

[4] 郭强. 层燃式城市固体垃圾焚烧炉床内燃烧过程试验研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, **2006**

[5] 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): 2205~2221

[6] 马晓茜, 刘国辉, 余昭胜. 基于 CFD 的城市生活垃圾焚烧炉燃烧优化. 华南理工大学学报, **2008**, 36(2): 101~106

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

[8] 龚佰勋. 环保设备设计手册——固体废物处理设备. 北京: 化学工业出版社, **2004**

[9] Hans-Heinz Frey, Bernhard Peters. Characterization of municipal solid waste combustion in a grate furnace. Waste Management, **2003**, 23: 689~701

[10] 聂永丰. 三废处理工程技术手册. 北京: 化学工业出版社, **2003**