

## 生活垃圾料层在机械炉排上的混合与分层现象研究

姜涛<sup>1</sup>,王洁华<sup>1†</sup>,刘海洋<sup>1</sup>,张智<sup>2</sup>

(1. 同济大学机械与能源工程学院,上海 201804;

2. 上海环境卫生工程设计院有限公司,上海 200232)

**摘要:**为量化表征生活垃圾料层在机械炉排上焚烧时出现的料层混合和分层现象,提出包含3种不同尺寸颗粒的垃圾料层离散单元模型,引入混合系数和分层系数表征料层整体混合强度和分层强度,基于离散单元法分析可动炉排工艺参数(运动幅度和往复频率)对料层混合强度和分层速度的影响.结果表明,料层内部组分混合主要发生在料层推进方向和高度方向,其混合强度与炉排工艺参数呈二元线性关系;料层内部组分分层区域与其组分尺寸相关,大颗粒趋于集中在料层顶部区域而小颗粒趋于集中在底部,其分层速度与炉排工艺参数呈二元非线性关系.研究结果为生活垃圾的高效焚烧与焚烧设备的工艺改进提供了有效设计参考.

**关键词:**城市生活垃圾;离散单元法;混合;分层

**中图分类号:**X705

**文献标志码:**A

## Research on the Mixing and Segregation Phenomenon of Municipal Solid Waste Layer on Mechanical Grate

JIANG Tao<sup>1</sup>, WANG Jiehua<sup>1†</sup>, LIU Haiyang<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Environmental Sanitation Engineering Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200232, China)

**Abstract:** In order to quantitatively characterize the mixing and segregation phenomenon of municipal solid waste (MSW) layer incinerated on a mechanical grate, an MSW layer model containing three different sizes of particles is established based on the discrete element method, and the mixing index and segregation index are introduced to characterize the mixing intensity and segregation intensity. Furthermore, the influence of movable grate process parameters (movement amplitude and reciprocating frequency) on the mixing intensity and segregation speed is analyzed based on the discrete element method. The results show that the mixing of the MSW layer mainly occurs along the layer's advancing direction as well as the height of the layer, and a binary linear relationship between mixing intensity and process parameters is found. The segregation of the MSW layer is related to the component size. The larger the size of the component, the more concentrated in the top area of the material layer; and a binary nonlinear relationship between segregation speed and process parameters is found. The conclusion above provides an effective de-

\* 收稿日期:2021-04-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1901200), National Key Research and Development Program of China(2018YFC1901200);上海市科研计划项目(18DZ1202601), Shanghai Scientific Research Project(18DZ1202601);上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1420800), Shanghai Sailing Program(19YF1420800)

作者简介:姜涛(1969—),男,同济大学副教授,博士生导师,博士

† 通信联系人, E-mail: 18201956230@163.com

sign reference for the efficient incineration of MSW and the optimization of incineration equipment.

**Key words:** municipal solid waste; discrete element method; mixing; segregation

随着人们生活水平的不断提高和城镇化进程的不断推进,城市生活垃圾无害化处理需求也在不断提升.采用机械炉排式垃圾焚烧炉对城市生活垃圾进行无害化焚烧发电处理,在达到垃圾减量化目的的同时还能带来额外的发电效益,在行业内得到广泛应用.由于垃圾处理效率对垃圾焚烧发电效益具有重要影响,因此垃圾处理效率提升也成为相关领域内重要研究方向.针对垃圾处理效率提升这一问题,已有的研究主要集中在垃圾料层所处外部环境,如一次风量、二次风量,焚烧温度控制以及垃圾入炉量控制等,而对垃圾料层内部混合分层运动机理的研究还较少.

在可动炉排的周期性往复推动作用下,垃圾料层在整体向炉排尾部前移的同时,内部组分之间也存在混合分层.针对可动炉排运动幅度和往复频率对料层内部分层混合运动机理的影响,已有的相关研究主要从实验或者仿真角度出发.朱新才等设计了一种用于生活垃圾运动研究的炉排实验装置,并在此基础上通过实验对垃圾料层的运动进行实验研究,分析了炉排安装倾角和炉排片行程等参数对垃圾料层运动速度和混合现象的影响<sup>[1-3]</sup>.C.N. Lim将垃圾料层进行单元划分,提出一种基于概率分析的数学模型来对料层内部颗粒间相互位置交换的概率进行预测<sup>[4]</sup>.离散单元法作为岩土力学研究领域的重要研究方法<sup>[5-7]</sup>,也被一些学者运用于垃圾焚烧领域的研究当中.Harald Kruggel-Emden等基于离散单元法用不同尺寸的球形颗粒近似替代垃圾颗粒,仿真分析了垃圾颗粒的动态混合过程,并且在不同形式的炉排间进行了对比分析<sup>[8]</sup>.Algis Dziugys等以离散单元法为仿真手段,以仿真实验为数据来源,通过两种不同的数据分析途径,对比研究分析了垃圾料层在炉排上的停留时间和料层整体的运动速度与可动炉排往复运动的幅度和频率之间的关系<sup>[9-12]</sup>.

以上学者的研究对于揭示垃圾料层内部混合分层现象与可动炉排的运动参数之间的关系具有重要的指导意义,但基本都是基于控制变量法每次只对单一运动参数进行研究.本文基于离散单元分析方法,在参考已有研究的基础上对传统的料层分析方

法进行适当改进,构建垃圾料层内部混合分层强度与可动炉排的两个关键运动参数之间的数学关系模型,为机械炉排整体结构参数优化设计提供参考依据.

## 1 垃圾料层离散化模型构建

由于城市生活垃圾内部成分复杂,理化特性不稳定,现场试验较难开展,研究垃圾料层运动特性的重要途径之一是在对垃圾料层进行适当简化的基础上,采用基于离散单元法的颗粒料层模拟垃圾料层.对于垃圾料层的简化主要有两种方法:采用同一密度不同尺寸的球形颗粒料层<sup>[12]</sup>和采用同一尺寸不同密度的球形颗粒料层<sup>[13]</sup>.本文采用第一种方法对垃圾料层进行简化,通过创建包含3种不同尺寸颗粒的料层模拟垃圾料层,具体颗粒参数设置如表1所示.

表1 颗粒参数设置

Tab.1 Parameters of different particles

颗粒参数	颗粒类型编号		
	1	2	3
数量 $n_i$	780	2152	380
直径 $d_i/\text{mm}$	36	20	30
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	800	800	800
弹性模量 $E/\text{MPa}$	100	100	100
泊松比 $\sigma$	0.4	0.4	0.4
平动摩擦系数 $\mu_1$	0.3	0.3	0.3
滚动摩擦系数 $\mu_2$	0.1	0.1	0.1

通过颗粒工厂对颗粒料层进行初始化设置,让3种颗粒按照表中的数量配置随机分布在炉排模型上方,最终形成如图1所示的料层初始化模型.在仿真过程中设置  $x$  方向和  $y$  方向(垂直纸面方向)的周期性边界条件,以此来模拟现实中垃圾料层在炉排上持续性的运动过程, $z$  方向为料层高度方向;模拟现实中炉排倾角设置重力方向与竖直方向夹角为  $10^\circ$ .可动炉排片和固定炉排片的尺寸均为长 800 mm 高 145 mm,可动炉排的往复运动方向如图1中灰色箭头标注所示,运动形式如公式(1)所示,其中  $S$  表示

可动炉排位移,  $A$  表示运动幅度,  $f$  表示运动频率.

$$S = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (1)$$

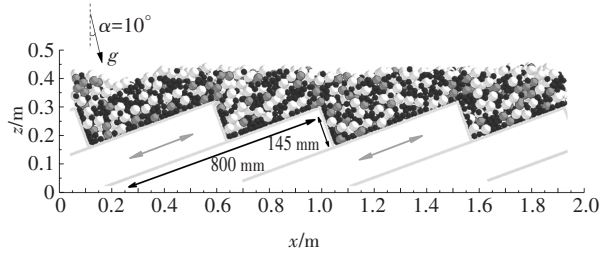


图1 颗粒料层模型初始化配置

Fig.1 Initial configuration of the particle layer model

选取可动炉排的运动幅度  $A$  和往复频率  $f$  作为变量, 其中  $A$  的取值范围为  $[0.1 \text{ m}; 0.2 \text{ m}; 0.3 \text{ m}]$ ,  $f$  的取值范围为  $[0.1 \text{ Hz}; 0.125 \text{ Hz}; 0.175 \text{ Hz}; 0.2 \text{ Hz}]$ .  $A, f$  组合共进行 12 组仿真实验, 仿真时长均为 350 s, 具体方案如表 2 所示.

表2 仿真方案

Tab.2 Simulation scheme

方案序号	运动幅度 $A/\text{m}$	往复频率 $f/\text{Hz}$	仿真时长 $t/\text{s}$
1	0.1	0.1	350
2	0.1	0.125	350
3	0.1	0.175	350
4	0.1	0.2	350
5	0.2	0.1	350
6	0.2	0.125	350
7	0.2	0.175	350
8	0.2	0.2	350
9	0.3	0.1	350
10	0.3	0.125	350
11	0.3	0.175	350
12	0.3	0.2	350

## 2 料层混合与分层评价方法

### 2.1 料层混合分析模型

参考基于颗粒层与流体之间相似性的混合强度分析模型<sup>[13-15]</sup>, 将任一颗粒速度  $v_i(t)$  分解为稳定项  $V(t)$  和波动项  $v'_i(t)$ , 如(2)式所示, 再通过(3)式用速度波动项来表征颗粒层的内部任意时刻混合强度  $Mi(t)$ .

模型关键的部分在于  $V(t)$  的求解, 已有的相关研究对于  $V(t)$  的求解是通过计算包含当前颗粒在内的附近区域所有颗粒的局部平均速度来获得, 但对

附近区域所涉及的范围并未进行严格定义, 导致  $V(t)$  的值依赖于附近区域的人为定义, 缺乏客观性, 此外通过局部平均速度构建的分析模型更偏向于反映料层局部混合强度, 而无法充分解释料层整体混合强度. 考虑到以上  $V(t)$  求解方法存在的局限性, 为了避免主观因素对求解  $V(t)$  的影响, 同时使模型能更充分解释料层整体的混合强度, 本文通过求解炉排上所有颗粒的全局平均速度来获取  $V(t)$ .

$$v'_i(t) = v_i(t) - V(t), i \in [1, N] \quad (2)$$

$$Mi(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v'_i(t)]^2} \quad (3)$$

$$V(t) = \frac{\sum_{i=1}^N v_i(t)}{N} \quad (4)$$

将  $v'_i(t)$  分解为三个不同方向分量  $v'_{i-x}(t)$ ,  $v'_{i-y}(t)$  和  $v'_{i-z}(t)$ , 则  $Mi(t)$  可得到(5)式所示变换, 其中  $Mi_x(t)$ ,  $Mi_y(t)$  和  $Mi_z(t)$  分别表示颗粒料层在  $x, y$  和  $z$  三个方向任意时刻的混合强度. 由于  $Mi(t)$  和  $Mi_k(t)$  ( $k \in [x, y, z]$ ) 与时间相关, 在整个仿真时长  $t$  内进行积分运算得到和时间无关的常量  $MI$  和  $MI_k$  ( $k \in [x, y, z]$ ), 分别表示颗粒料层在炉排上的混合强度系数以及其在  $x, y, z$  三个方向上的分量. 具体计算公式如(6)、(7)所示.

$$\begin{aligned} Mi(t) &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ [v'_{i-x}(t)]^2 + [v'_{i-y}(t)]^2 + [v'_{i-z}(t)]^2 \}} \\ &= \sqrt{[Mi_x(t)]^2 + [Mi_y(t)]^2 + [Mi_z(t)]^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$MI = \frac{1}{t} \int_0^t Mi(t) dt \quad (6)$$

$$MI_k = \frac{1}{t} \int_0^t Mi_k(t) dt, k \in [x, y, z] \quad (7)$$

### 2.2 料层分层分析模型

颗粒料层分层现象研究的一种常用方法是基于不同颗粒层的平均高度求解颗粒料层的分层系数, 并以此来表征料层的分层强度<sup>[16-18]</sup>. 相关研究方法更多地是针对包含 2 种不同尺寸或者密度类型颗粒的颗粒料层. 由于垃圾料层组分复杂, 3 种颗粒类型相比于 2 种颗粒类型能更好地体现垃圾料层组分复杂的特点. 在对以上方法进行适当改进后, 同样适用于包含 3 种不同尺寸颗粒类型的情况.

以  $H_i(t)$  表示第  $i$  种类型颗粒的分层系数, 其为关于时间  $t$  的函数, 求解公式如下.

$$H_i(t) = \frac{h_i(t)/h_c(t) - 1}{1 - p_i}, i \in [1, 2, 3] \quad (8)$$

$$h_i(t) = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_j(t), i \in [1, 2, 3] \quad (9)$$

$$h_c(t) = \sum_{i=1}^3 p_i h_i(t) \quad (10)$$

$$p_i = \frac{n_i d_i^3}{n_1 d_1^3 + n_2 d_2^3 + n_3 d_3^3}, i \in [1, 2, 3] \quad (11)$$

$h_i(t)$ 表示对应的第*i*种类型颗粒相对于炉排上表面的平均高度, $h_c(t)$ 表示整个颗粒料层的平均高度, $p_i$ 表示第*i*种类型颗粒在整个颗粒料层中的体积分数( $p_1 + p_2 + p_3 = 1$ ), $n_i$ 和 $d_i$ 分别表示第*i*种类型颗粒的数量和直径(见表1).

对于3种颗粒类型的分层, $H_i(t)$ 的理论取值范围在-0.5~0.5之间.当 $H_i(t)$ 越接近0.5,表示第*i*种颗粒的分布区域越靠近料层的顶部; $H_i(t)$ 越接近-0.5,则相应颗粒的分布区域越靠近料层底部; $H_i(t)$ 越接近0,则相应颗粒分布区域越靠近料层中间区域.

### 3 仿真试验结果分析

#### 3.1 料层混合

应用以上定义的数学分析方法对仿真实验结果进行分析.图2、图3所示为 $A=0.3\text{ m}$ , $f=0.2\text{ Hz}$ 时对应的颗粒料层在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向的瞬时混合系数 $Mi_x(t)$ 、 $Mi_y(t)$ 和 $Mi_z(t)$ 在整个仿真时长350 s内以及前50 s内随时间变化的曲线图.

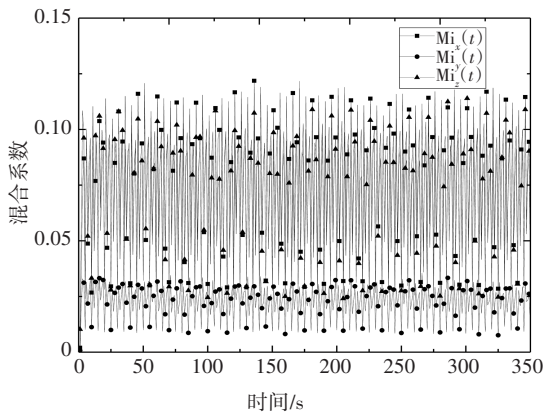


图2 整个仿真周期内颗粒料层混合系数随时间变化曲线

Fig.2 Evolution curve of the particle layer's mixing index over the entire simulation period

从图中可以看出, $Mi_x(t)$ 和 $Mi_z(t)$ 重叠区域较多,且均处于 $Mi_y(t)$ 的上方,表明颗粒料层在沿着炉排的 $x$ 方向(料层推进方向)和 $z$ 方向(料层高度方向)的混合强度基本一致,且均大于 $y$ 方向的混合强度.由于可动炉排的推动作用使得料层的运动主要

集中在 $x$ 和 $z$ 方向,因此料层内部组分的混合也主要发生在对应的两个方向.

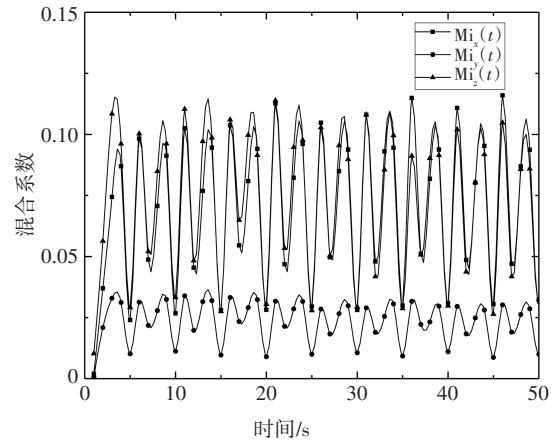


图3 0~50 s期间颗粒料层混合系数随时间变化曲线

Fig.3 Evolution curve of the particle layer's mixing index over 0-50 s

通过(5)(6)式对料层三个方向的瞬时混合系数进行积分运算,得到颗粒料层在整个仿真时长内的混合系数MI,以此表征料层在整个仿真时长内的混合强度,计算结果如表3所示.图4为分别以MI为 $z$ 轴, $A$ 为 $x$ 轴, $f$ 为 $y$ 轴得到的散点图,通过散点图可以发现,MI与 $A$ 和 $f$ 之间存在非常明显的线性相关关系,因此对三个变量进行多元线性拟合分析,拟合函数如下:

$$MI = b_0 + b_1 \times A + b_2 \times f \quad (12)$$

表3 不同仿真条件对应的混合系数值

Tab.3 Values of mixing index corresponding to different simulation conditions

方案序号	运动幅度 $A/\text{m}$	往复频率 $f/\text{Hz}$	混合系数 $MI/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	0.1	0.1	0.020 0
2	0.1	0.125	0.023 5
3	0.1	0.175	0.032 3
4	0.1	0.2	0.036 8
5	0.2	0.1	0.037 5
6	0.2	0.125	0.044 1
7	0.2	0.175	0.061 7
8	0.2	0.2	0.070 2
9	0.3	0.1	0.055 4
10	0.3	0.125	0.065 6
11	0.3	0.175	0.091 9
12	0.3	0.2	0.105 3



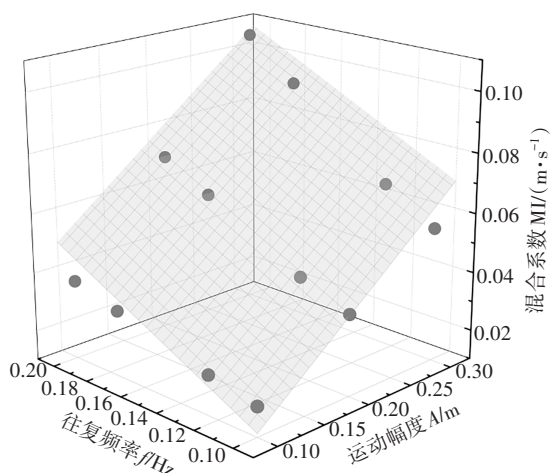


图 4 MI 散点图和二元线性拟合平面  
Fig.4 Scatter plot of mixing index and the corresponding bivariate linear fitting plane

通过表 3 中的 12 组数据进行拟合分析得到拟合结果如表 4 所示. 其中  $R^2=0.9540$ , 接近于 1, 表明模型的拟合优度非常高; 在给定显著性水平  $\alpha = 0.05$  条件下, 查  $F$  分布表得到临界值  $F_{\alpha}(2, 9) = 4.256$ ,  $F > F_{\alpha}(2, 9)$ , 表明 MI 与  $A$  和  $f$  之间的线性相关关系在 95% 的水平下显著成立. 将拟合结果代入(12)式得:

$$MI = -0.048 + 0.2572A + 0.3352f \quad (13)$$

表 4 二元线性拟合结果

Tab.4 Result of bivariate linear fit

拟合结果			评价指标	
$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$	$F$
-0.048 0	0.257 2	0.335 2	0.954 0	93.384 0

公式(13)将料层的整体混合系数和可动炉排的运动幅度以及往复频率直接关联, 揭示了炉排上的料层内部组分间的混合强度与可动炉排相关运行参数之间的关系.

### 3.2 料层分层

图 5 为  $A = 0.3 \text{ m}$ ,  $f = 0.2 \text{ Hz}$  时 3 种类型颗粒在料层高度方向的分层系数  $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$  和  $H_3(t)$  在整个仿真时长 350 s 内随时间变化的曲线图. 图 6 所示为料层在 0 s、50 s、100 s、150 s、200 s、250 s、300 s、350 s 时刻的分层状态, 其中白色颗粒为颗粒 1 (颗粒直径为 36 mm), 黑色颗粒为颗粒 2 (颗粒直径为 20 mm), 灰色颗粒为颗粒 3 (颗粒直径为 30 mm).

从图中可以看出随着时间变化, 料层整体逐渐出现分层, 并最终产生稳定的分层现象. 根据仿真实

验初始配置, 初始时刻 3 种不同尺寸类型颗粒在料层中随机分布并未开始出现分层现象[图 6(a)], 因此分层系数均接近零值. 随着可动炉排的不断往复推动, 三种颗粒之间开始出现明显的分层, 大约经过 50 s 左右  $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$  和  $H_3(t)$  达到稳定值 0.3、-0.32 和 -0.05. 其中  $H_1(t)$  稳定值约为 0.3, 表明颗粒 1 在经过分层后集中分布在靠近料层顶部区域[图 6(b)]所示白色颗粒区域;  $H_2(t)$  稳定值约为 -0.32, 表明颗粒 2 在经过分层后集中分布在靠近料层底部区域[图 6(b)]所示黑色颗粒区域;  $H_3(t)$  稳定值约为 -0.05, 表明颗粒 3 在经过分层后集中分布在料层中间区域(图 6-(b)所示灰色颗粒区域). 上述分层现象可以通过巴西果效应(Brazil nut effect)来解释, 该效应指出, 在粒状料层被施加外部振动时, 大尺寸颗粒会趋向分布于料层顶部, 小尺寸颗粒则趋向分布于料层底部, 这也与仿真实验结果相符合.

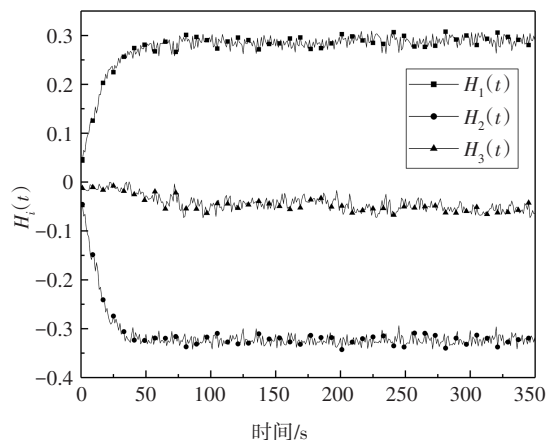


图 5 整个仿真周期内颗粒料层分层系数随时间变化曲线  
Fig.5 Evolution curve of the particle layer's segregation index over the entire simulation period

通过上述分析可知, 在可动炉排的往复推动作用下, 料层内部不同组分间会发生分层现象, 其中较大尺寸颗粒会朝着料层顶部集中, 较小尺寸颗粒朝着料层底部聚集, 中等尺寸颗粒则主要分布在料层中间区域. 此外, 随着时间推移, 分层现象会越来越明显, 3 种类型颗粒对应的分层系数最终会达到一个稳定值.

进一步研究分层现象完成的速度(即分层系数达到稳定值的快慢程度)与可动炉排运动幅度和往复频率间的关系. 根据以上分析, 当  $t \rightarrow \infty$ ,  $H_i(t) \rightarrow$  常数时, 结合分层系数曲线变化趋势提出式(14)所示

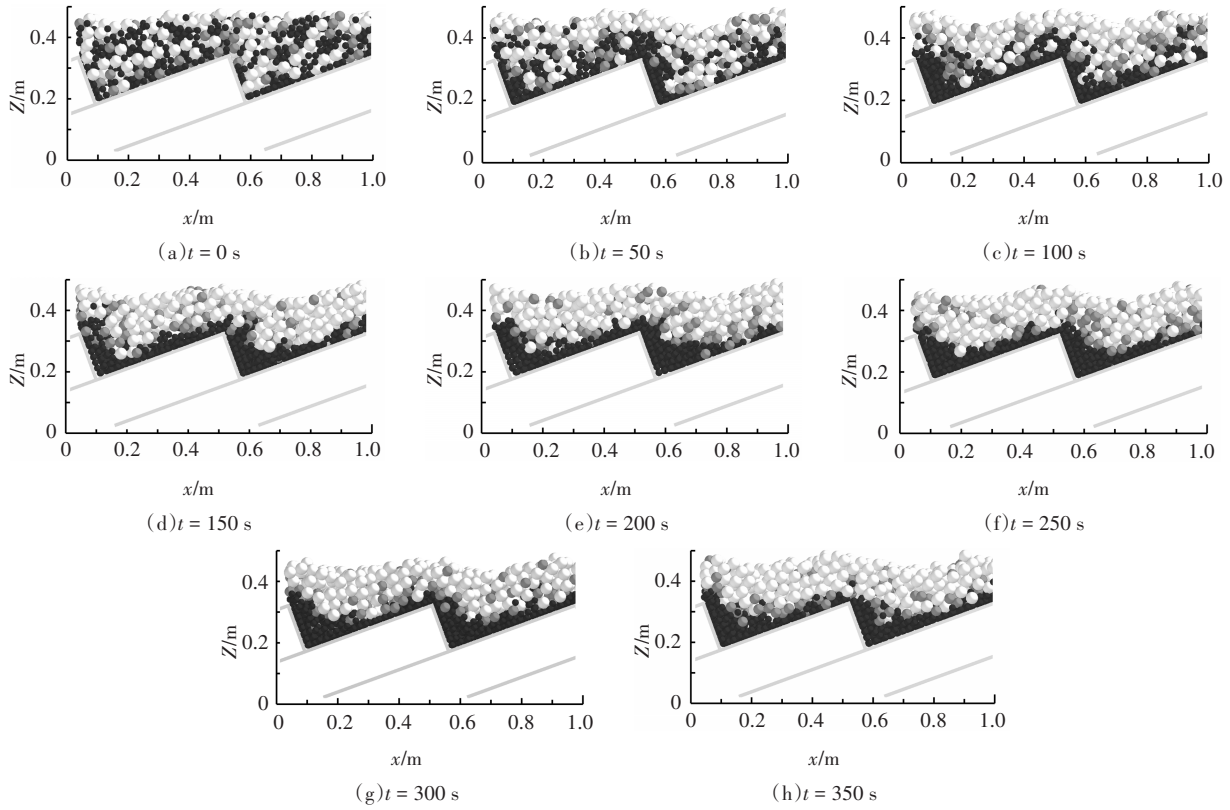


图6 料层分层状态随时间变化过程

Fig.6 Segregating process of particle layer over the entire simulation period

经验公式对  $H_i(t)$  进行拟合, 其中  $c_0$  表示  $H_i(t)$  的稳定值,  $c_1$  为调整系数,  $\tau$  为时间常数, 其大小与  $H_i(t)$  变化快慢直接相关,  $\tau$  越大  $H_i(t)$  越快达到稳定, 因此以  $\tau$  表征料层分层快慢. 拟合曲线如图7所示, 拟合结果  $\tilde{H}_i(t)$  能够准确地预测  $H_i(t)$  的变化趋势. 此处只展示  $A=0.3m, f=0.2Hz$  时的拟合结果, 其他仿真组的最终拟和结果在表5中列出.

$$\tilde{H}_i(t) = c_0 - c_1 e^{-t/\tau} \quad (14)$$

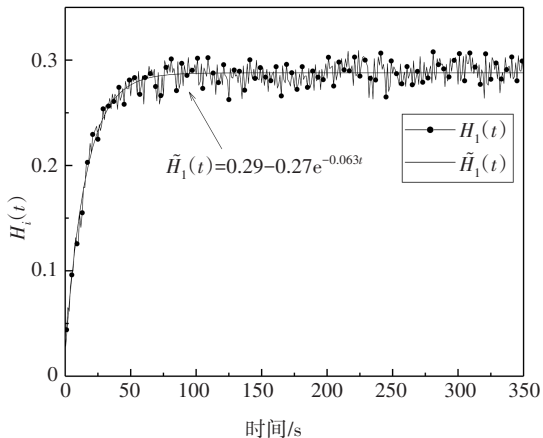


图7 颗粒料层分层系数随时间变化趋势拟合

Fig.7 Nonlinear fitting of segregation index evolution trend

图8为以时间常数  $\tau$  为  $z$  轴、 $A$  为  $x$  轴  $f$  为  $y$  轴得到的散点图. 如散点图所示, 当  $f$  (或者  $A$ ) 保持不变,  $\tau$  与  $A$  (或者  $f$ ) 之间存在线性相关关系, 且随着  $f$  (或者  $A$ ) 增大, 斜率也越大. 基于以上特征, 提出公式(15)所示拟合函数对三个变量进行多元非线性拟合分析:

$$\tau = d_0 + d_1 \times A \times f \quad (15)$$

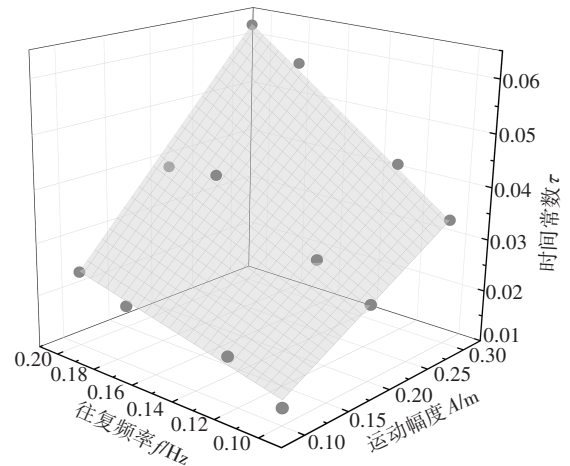


图8 时间常数  $\tau$  散点图和二元非线性拟合平面

Fig.8 Scatter plot of time constant and the corresponding bivariate nonlinear fitting plane

通过表5中的12组数据进行拟合分析得到拟合结果如表6所示.其中 $R^2 = 0.9879$ ,接近1,表明模型的拟合优度非常高,能够很好地解释 $\tau$ 与 $A$ 和 $f$ 之间的关系;均方差MSE(模型的预测值与实际值之间误差的平和均值)为 $3.092e-06$ ,接近0,表明模型预测值和实际值之间误差很小.将拟合结果代入(15)式得:

$$\tau = 0.0048 + 0.97A \times f \quad (16)$$

公式(16)建立起料层内部分层速度和可动炉排的运动幅度以及往复频率之间的数学关系,通过控制可动炉排的相关运行参数可以达到调节垃圾料层分层时间的目的,对于解释垃圾料层内部分层现象具有一定参考价值.

表5 分层系数变化趋势拟合结果

Tab.5 Fitting result of segregation index evolution trend

方案序号	$c_0$	$c_1$	$\tau$
1	0.279 0	0.243 2	0.013 2
2	0.277 3	0.249 5	0.018 7
3	0.283 0	0.245 0	0.021 0
4	0.286 8	0.258 3	0.024 3
5	0.284 9	0.248 7	0.024 5
6	0.287 6	0.258 3	0.029 6
7	0.286 5	0.253 0	0.040 0
8	0.285 9	0.244 4	0.039 1
9	0.280 3	0.234 4	0.034 1
10	0.283 5	0.244 9	0.042 2
11	0.285 8	0.257 9	0.057 2
12	0.287 9	0.265 3	0.063 0

表6 二元非线性拟合结果

Tab.6 Result of bivariate nonlinear fit

拟合结果		评价指标	
$d_0$	$d_1$	$R^2$	MSE
0.004 8	0.970 0	0.987 9	3.092e-06

## 4 结 论

基于离散单元法的仿真实验方法,建立了包含3种不同尺寸类型颗粒的颗粒料层模拟垃圾料层,在引入颗粒料层混合和分层数学分析模型的基础上,

通过12组仿真实验对料层内部的混合和分层现象分别进行研究,得到以下主要结论:

1)可动炉排的往复运动导致垃圾料层内部组分之间的混合主要发生在沿着炉排的料层推进方向和料层高度方向;

2)垃圾料层内部组分之间的混合强度 $MI$ 与可动炉排运动幅度 $A$ 和往复频率 $f$ 之间存在非常明显的二元线性相关关系;

3)可动炉排的往复运动会导致垃圾料层内部不同尺寸组分相互分层,其中较大尺寸组分会朝着料层顶部集中,较小尺寸组分朝着料层底部聚集,中等尺寸组分则主要分布在料层中间区域;

4)表征垃圾料层内部分层快慢程度的时间常数 $\tau$ 与可动炉排运动幅度 $A$ 和往复频率 $f$ 之间存在二元非线性相关关系.

通过量化分析料层内部组分运动机理,为解释垃圾料层内部混合与分层现象提供参考依据.在此基础上分析了可动炉排的工艺参数运动幅度和往复频率,对垃圾料层内部混合和分层的影响,为机械炉排的优化提供参考.

## 参考文献

- [1] 朱新才,李鹏,冯威,等.生活垃圾机械炉排运动试验研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2012,26(3):46-50.  
ZHU X C, LI P, FENG W, *et al.* Experimental study about MSW movement on mechanical grates[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2012, 26(3):46-50. (In Chinese)
- [2] 李鹏.城市生活垃圾机械炉排试验装置设计及实验研究[D].重庆:重庆理工大学,2012.  
LI P. Research on the design and experiment on mechanical grates experimental device of MSW [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2012. (In Chinese)
- [3] 冯威.城市生活垃圾焚烧炉排系统设计及其优化[D].重庆:重庆理工大学,2012.  
FENG W. Research on the design and optimization on grate system of MSW incinerator [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2012. (In Chinese)
- [4] LIM C N, GOH Y R, NASSERZADEH V, *et al.* The modelling of solid mixing in municipal waste incinerators [J]. Powder Technology, 2001, 114(1-3): 89-95.
- [5] 谭鑫,赵明华,金字轩,等.碎石桩单桩受荷模型试验的离散单元法数值模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46

- (3): 106–113.  
TAN X, ZHAO M H, JIN Y X, *et al.* Numerical simulation of loading test on a single stone column using discrete element method [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(3): 106–113. (In Chinese)
- [6] 孔洋, 石崇, 朱珍德, 等. 复杂应力环境下单节理岩体渗流-应力耦合特性研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(S0): 161–166.  
KONG Y, SHI C, ZHU Z D, *et al.* Study on seepage-stress coupling characteristics of rock mass with single joint under complex stress state [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2018, 45(S0): 161–166. (In Chinese)
- [7] 李涛, 蒋明镜, 孙若晗. 多种应力路径下结构性土胶结破损演化规律离散元分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(6): 1159–1166.  
LI T, JIANG M J, SUN R H. DEM analysis of evolution law of bond degradation for structured soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(6): 1159–1166. (In Chinese)
- [8] KRUGGEL-EMDEN H, SIMSEK E, WIRTZ S, *et al.* A comparative numerical study of particle mixing on different grate designs through the discrete element method [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2007, 129(4): 593–600.
- [9] DŽIUGYS A, PETERS B, HUNSINGER H, *et al.* Experimental and numerical evaluation of the transport behaviour of a moving fuel bed on a forward acting grate [J]. *Granular Matter*, 2007, 9(6): 387–399.
- [10] PETERS B, DŽIUGYS A. Influence of bar motion on heat-up and temperature dispersion of a wooden bed on a forward acting grate [J]. *Chemical Engineering Transactions (CET Journal)*, 2011, 24: 637–641.
- [11] DŽIUGYS A, PETERS B, HUNSINGER H, *et al.* Evaluation of the residence time of a moving fuel bed on a forward acting grate [J]. *Granular Matter*, 2006, 8(3/4): 125–135.
- [12] PETERS B, DŽIUGYS A, HUNSINGER H, *et al.* An approach to qualify the intensity of mixing on a forward acting grate [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60(6): 1649–1659.
- [13] DŽIUGYS A, PETERS B, NAVAKAS R, *et al.* Density segregation on a moving grate [J]. *Powder Technology*, 2017, 305: 323–332.
- [14] DŽIUGYS A, NAVAKAS R. The role of friction in mixing and segregation of granular material [J]. *Granular Matter*, 2009, 11(6): 403–416.
- [15] DŽIUGYS A, NAVAKAS R, ŠLANČIAUSKAS A, *et al.* Numerical simulation of mixing and segregation of granular material [J]. *Mechanika*, 2005, 53(3): 52–56.
- [16] DWIVEDI V, OTTINO J M, LUEPTOW R M, *et al.* Granular segregation induced by a moving subsurface blade [J]. *Physical Review E*, 2019, 100(5): 1–10.
- [17] LIU S Y, MCCARTHY J J. Validating granular segregation rate models [J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(9): 3756–3763.
- [18] SUN L Y, ZHAO F X, ZHANG Q H, *et al.* Numerical simulation of particle segregation in vibration fluidized beds [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2014, 37(12): 2109–2115.