

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.05.006

DEM 模拟解析二元混合颗粒粒径偏析分布规律

胡招文, 郭福亮, 陈 晨, 徐 健, 白晨光

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 颗粒粒径偏析分布是高炉炉顶布料过程中不可避免的现象, 易造成炉喉处局部料层的空隙度降低和压差升高, 影响煤气流的均匀分布, 继而间接影响炉况的顺行。通过 DEM 离散单元法模拟研究二元混合颗粒的偏析分布规律, 同时, 提出一个偏析指数 T , 用以表征粒径偏析分布的相对程度。研究表明: 同一 T 值图中, 相邻区域颗粒的 T 值相差越大, 则该区域颗粒的粒径偏析程度越大; 不同 T 值图中, 所有相邻 T 值之差的平均绝对值越大, 则颗粒堆积整体粒径偏析程度越为严重。

关键词: 离散单元法; 二元混合颗粒; 粒径分布; 偏析

中图分类号: TF543.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)05-038-08

Analysis on distribution law of particle size segregation of binary particle mixtures based on DEM

HU Zhaowen, GUO Fuliang, CHEN Chen, XU Jian, BAI Chenguang

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: The distribution of particle size segregation is an inevitable phenomenon during the burden distribution process of blast furnace, which can easily lead to the decrease of porosity and the increase of pressure at the throat of the furnace top. As a result, it makes an indirect impact on the uniform distribution of gas flow, thus indirectly affecting the smooth operation of blast furnace. Based on DEM (discrete element method) simulation method, present work studies the segregation status of binary particle mixtures and proposes a segregation index T , which could be used to characterize the relative degree of particle size segregation distribution. The results show that: in the same T value graph, the greater of the difference of value T between the adjacent area is, the greater of the degree of particle size segregation of the above areas is; and in different T value graphs, the greater of the average of all the absolute difference of value T between adjacent areas is, the greater of the overall degree of particle size segregation is.

Key words: discrete element method; binary particle mixtures; particle size distribution; segregation

高炉布料过程实质上是炉料的运动过程。炉料离开旋转溜槽后的下落过程及其在炉喉处的初始堆积状况对整个高炉顺行和煤气流分布均有着重要的影响。高炉布料是高炉生产的重要环节之一, 它直接决定了炉料在炉内的初始分布, 而炉料在炉内的初始分布决定着高炉内的煤气分布, 影响煤气与炉料的热量、质量

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费(CDJZR13130031); 国家自然科学基金青年基金(51304257)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR13130031) and the National Natural Science Foundation of China(51304257).

作者简介: 胡招文(1991-), 男, 主要从事布料偏析基础理论研究;

徐健(联系人), 男, 重庆大学副教授, (E-mail)jxu@cqu.edu.cn.

的交换,从而影响高炉的生产效率^[1]。

在高炉布料过程中,炉料的粒径偏析是不可避免的现象,而炉料的粒径偏析则是影响煤气流分布的主要因素之一。经文波^[2]的研究表明,炉料粒径分布对炉顶料面的煤气流分布的影响与径向矿焦比对炉顶料面的煤气流分布的影响同样重要。毛磊等^[3]研究无钟布料参数对炉料偏析的影响,表明偏析与溜槽角度、溜槽转速以及料线高度、批重以及节溜阀开度均有关系。毕学工等^[4]研究了高炉布料中的粒度偏析现象及对气流分布的影响,得出当炉料堆积的斜坡长度一定时,粒径的偏析程度与散料体的性质、斜坡角度有密切的关系。

近年来,随着计算机数值模拟技术的日益提高,离散单元法(Discrete Element Method, DEM)在模拟颗粒流动等领域的应用越来越广泛^[5-7]。在高炉布料模拟方面,诸多学者致力于研究炉料的运动状态与力学行为。Mio等^[8]模拟了与实际操作相符的高炉内部颗粒的运动情况,推导了高炉区域与内部颗粒速度及颗粒粒径的关系。Ho等^[9]通过无钟布料颗粒的降落,研究了高炉布料过程中凹槽的形成,并分析布料过程可能出现的规律。邱家用等^[10]结合离散元模拟和物理实验对并罐式无料钟布料颗粒的流动行为进行了研究,得到布料过程的料罐壁的应力分布、排料模式的影响及颗粒流动的偏行等。上述研究工作对于炉料堆积状态下颗粒粒径偏析行为的定量化表征较为有限,因此,本文拟通过DEM数值模拟,以二元粒径颗粒混合为例,提出一个偏析指数 T ,用以考察颗粒在堆积状态下的粒径偏析特征,从而为高炉布料操作提供一定的理论参考。

1 DEM数值模拟方法

DEM是在颗粒运动计算中一种技术比较成熟的数值计算方法。DEM模拟计算主要包含3个步骤:运动状态初始化、计算新的运动状态和运动状态的更新。在计算过程中,3个步骤不断循环,计算各个时间步长内的物体运动特征,运动过程物体受力遵循牛顿运动定律以及初始选择的接触模型^[11]。

1.1 运动方程

在DEM模拟计算的受力分析中,需要综合考虑摩擦力、弹性应力、重力、结合力以及静电力等,计算过程中位置和速度的变化遵守牛顿定律且随时间不断循环计算直至模拟结束。此过程的牛顿定律表征为

$$m \frac{du}{dt} = \sum F, \quad (1)$$

$$u = \int_t \frac{du}{dt} dt, x = \iint_t \frac{du}{dt} dt dt. \quad (2)$$

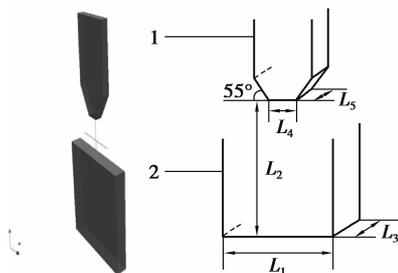
1.2 颗粒接触模型

颗粒的接触模型是DEM的核心,模拟实验中所采用的模型为湿颗粒模型。颗粒碰撞后由于弹性作用,会在正方向产生弹性正应力,而碰撞后要分离,相互之间产生摩擦力,因而切向有切应力;正应力驱动颗粒在空间作直线运动,切应力则驱动颗粒发生转动。在DEM模型中,颗粒在正应力,切应力及自身重力的共同作用下进行复杂的运动。

2 模型构建与实验方案

2.1 模型构建

模拟实验所构建的模型如图1所示,其中, $L_1=200$ mm, $L_2=265$ mm, $L_3=20$ mm, $L_4=30$ mm, $L_5=14$ mm。模拟实验所采用颗粒的主要属性如表1所示。其中,弹性模量、剪切模量、泊松比根据三氧化二铝球的物性得到,密度、摩擦系数及恢复系数由实验测得。



注:1.上料罐;2.下料罐

图1 实验模型示意图

Fig.1 Simulation model diagram

表1 颗粒属性主要参数

Table 1 Main properties of particles		
物理性能	单位	数值
密度	kg/m ³	2 099
弹性模量	GPa	375
剪切模量	GPa	152
泊松比	—	0.22
摩擦系数	—	0.70
恢复系数	—	0.50

2.2 实验方案

实验研究了两种不同粒径颗粒的混合情况,总质量为 150 g,具体实验方案如表 2 所示。

实验测得单个 3 mm,6 mm,9 mm 颗粒的质量分别为 0.031,0.247 和 0.831 g。则经过质量与颗粒个数换算,模拟实验需要输入的颗粒个数如表 3 所示。

表 2 各粒径颗粒混合质量比

Table 2 Mass ratio of binary particle mixtures

粒径比		质量比		
3:6	1:1	1:1	1:1	1:1
3:9	1:3	1:3	1:3	1:3
6:9	3:1	3:1	3:1	3:1

表 3 模拟实验中加入的各粒径颗粒的数量

Table 3 Numbers of particles used in the simulation

粒径比	颗粒数比		
	质量比 1:1	质量比 1:3	质量比 3:1
3:6	2 420:304	1 210:456	3 630:152
3:9	2 420:90	1 210:136	3 630:45
6:9	304:90	152:136	465:45

模拟实验在上述条件下研究了二元混合颗粒堆积后的颗粒偏析分布规律。

3 实验结果及讨论

通过对 3 种质量比条件下二元颗粒的偏析行为进行研究,考察堆积状态与偏析之间的关联。定义实验中的偏析程度 Seg 为

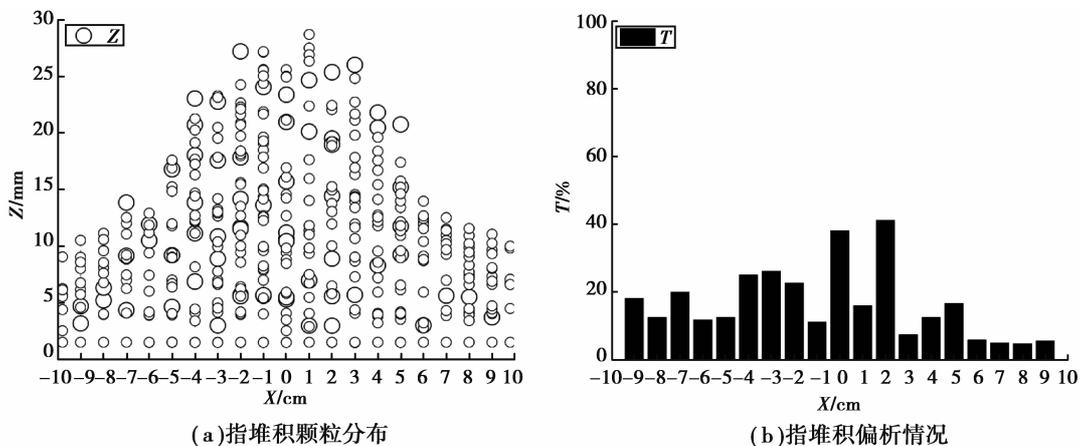
$$\text{Seg} = dT/dX, \quad (3)$$

式中:偏析指数 $T = (N_{\text{少}}/N_{\text{多}}) \times 100\%$; $N_{\text{少}}$ 为数量较少颗粒数; $N_{\text{多}}$ 为数量较多的颗粒数。 X 为模拟实验中模型下料罐底端 L_1 所在的水平线。

若以 L_1 作为 x 轴,以 T 作为 y 轴,则可得到 T 在 x 轴上的分布图。本实验中将下料罐底端 L_1 等分为 20 份,而后在每一份上求得 T 值。

3.1 3 mm 与 6 mm 颗粒混合堆积分析

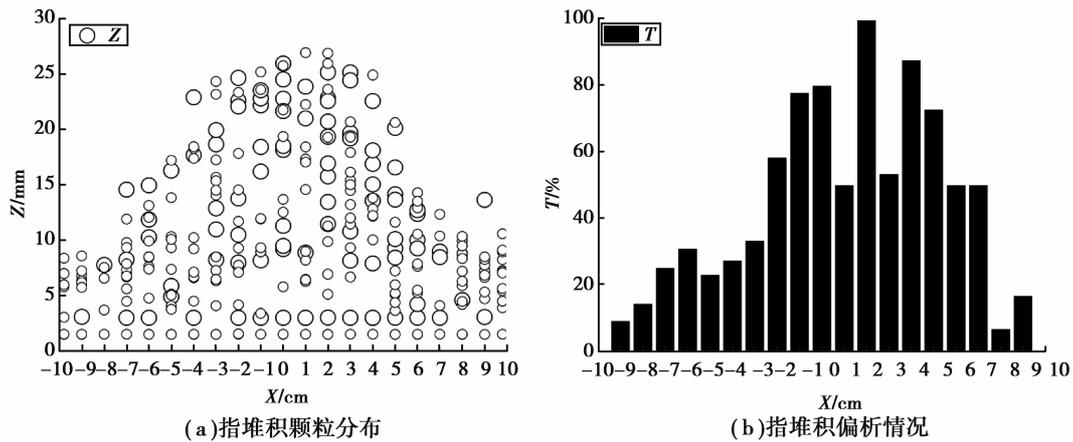
图 2~4 为 3 mm 与 6 mm 混合堆积中 3 种质量比颗粒堆积后的偏析程度分布与颗粒堆积的分布状态。从图 2 可发现,19 个 T 值之间相差不大,颗粒的整体偏析小并且各区域内偏析差异也较小,从总体上看, X 负向部分的偏析比正向部分严重,在中心位置 $X=0$ 处左右各 1 cm 范围偏析达到最大;从该图左部分的颗粒分布可分析出大颗粒比较均匀的分散在堆积中,故堆积总体的偏析比较均匀;在堆尖的顶部大颗粒比较密集,意味着在最后下降的颗粒中大颗粒比例较高,因此,中心位置的偏析最为严重,从 T 值图中看,显示的是中心位置处的 T 值较两边的 T 值大。图 3 所示堆积的偏析整体较大,大颗粒密集地堆积在各个区域,这是由于与图 2 中的情况相比,大颗粒的数目增多了,反映到 T 值图中则是 T 值总体增大。图 4 显示,由于大颗粒数量相对减少,且零星分布在小颗粒中,固而对应的颗粒偏析系数 T 普遍较小,几乎都维持在 5% 以下,这也说明了该部分颗粒的混合程度较均匀,偏析程度小。



注: Z 指颗粒堆积所形成的高度

图 2 3 mm 与 6 mm 颗粒质量比 1:1 混合堆积偏析与颗粒分布

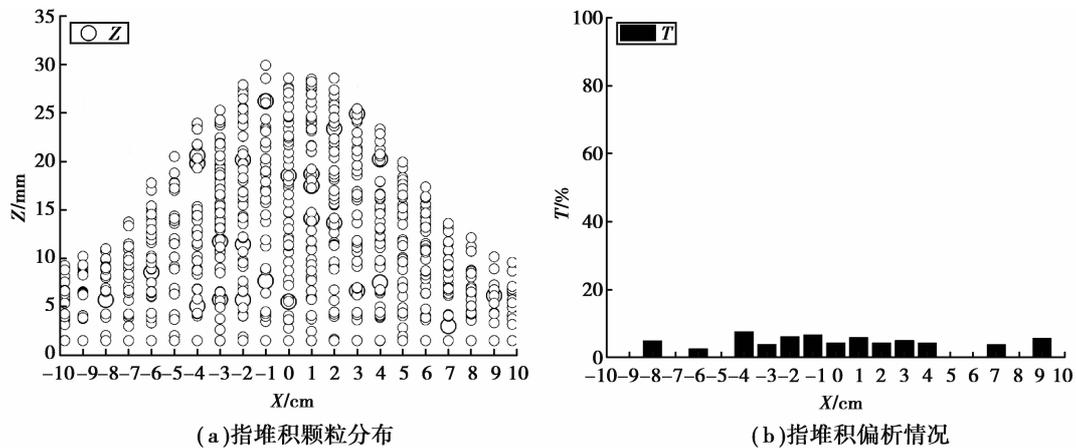
Fig.2 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 6 mm particles at the mass ratio of 1:1



注: Z 指颗粒堆积所形成的高度

图3 3 mm与6 mm颗粒质量比1:3混合堆积偏析与颗粒分布

Fig.3 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 6 mm particles at the mass ratio of 1:3



注: Z 指颗粒堆积所形成的高度

图4 3 mm与6 mm颗粒质量比3:1混合堆积偏析与颗粒分布

Fig.4 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 6 mm particles at the mass ratio of 3:1

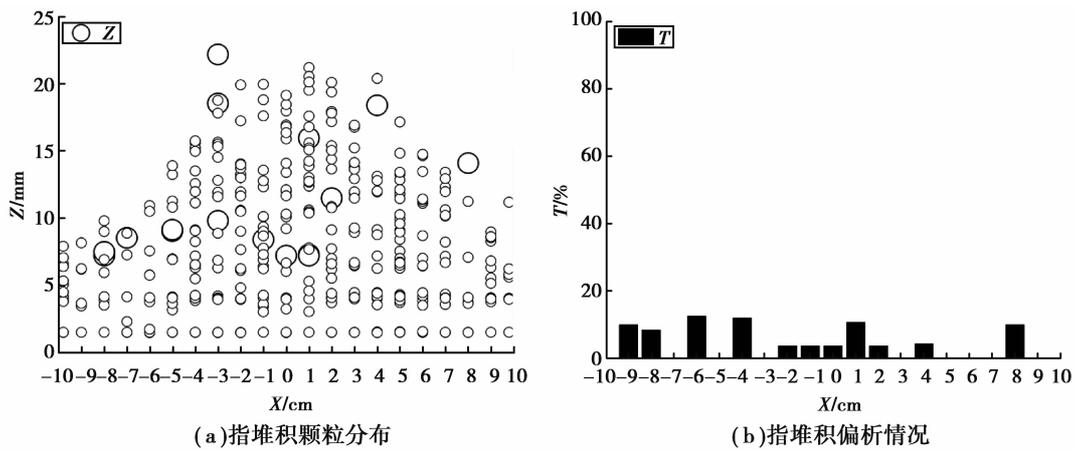
经过上述颗粒堆积形态和偏析程度的分析,研究发现,在3 mm和6 mm混合堆积中,大颗粒的存在是导致偏析的主要原因,颗粒数量多越容易引起偏析且颗粒聚集会加重堆积偏析,这也在一定程度上反映在 T 值图中;大颗粒在堆积中所处的位置影响着堆积的形状变化,偏析严重的堆积形态波动越大,边缘分布高度变低,中心及紧邻的两侧范围高度则增大。

3.2 3 mm与9 mm颗粒混合堆积分析

图5显示的是3 mm与9 mm颗粒混合堆积质量比为1:1的偏析情况,此处偏析变化与3 mm和6 mm颗粒堆积的偏析存在一定差异。研究发现,堆积的波动主要是外侧大颗粒的堆积造成的,大颗粒与小颗粒未有效混合,这种状态可认为是完全偏析。图6显示的情况和图3类似,不同之处是在两端处不存在大颗粒,说明了粒径差越大,大颗粒从高度落到小颗粒堆中越容易陷入小颗粒的包围中而不易滚向两侧。同样,图7显示的情况和图4类似,不同之处是由于大颗粒数更加稀少后导致两侧较大部分区域只存在小颗粒,也就是说,大颗粒的聚集导致了偏析。单从 T 值图上看,只有中部区域存在 T 值,两侧 T 值都为0,也可得出大颗粒集中在了中部位置。

3.3 6 mm与9 mm颗粒混合堆积分析

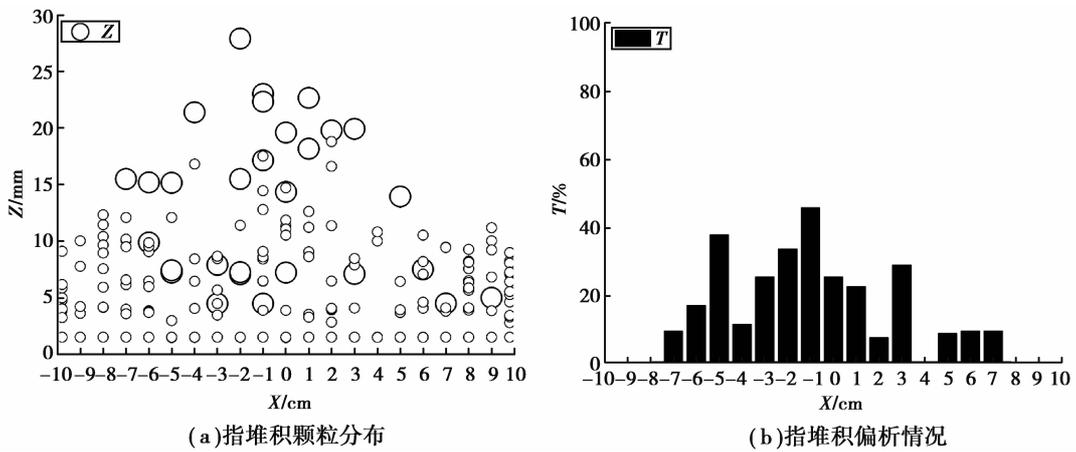
图8为6 mm和9 mm颗粒混合堆积的偏析分析与对应颗粒分布的表征图,图中显示3种质量比例下颗粒的偏析均比较严重。 T 值图中有4个偏析系数 T 达到了100%,对该值与其相邻 T 值区域的解释有两种:一是在该区域颗粒均匀混合,不存在偏析现象,而相邻区域颗粒混合不均匀导致偏析;二是该区域颗粒混合不均匀而相邻区域混合均匀也导致偏析。



注:Z 指颗粒堆积所形成的高度

图 5 3 mm 与 9 mm 颗粒质量比 1:1 混合堆积偏析与颗粒分布

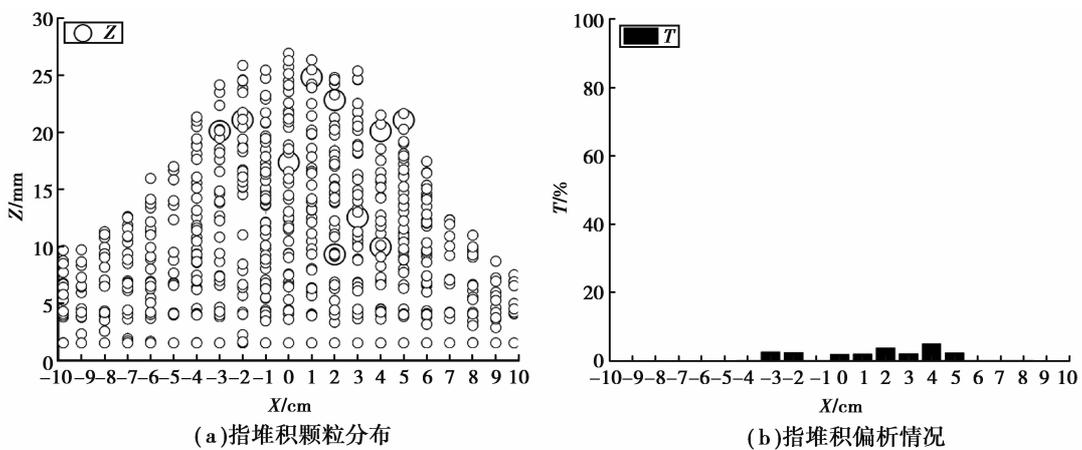
Fig.5 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 9 mm particles at the mass ratio of 1: 1



注:Z 指颗粒堆积所形成的高度

图 6 3 mm 与 9 mm 颗粒质量比 1:3 混合堆积偏析与颗粒分布

Fig.6 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 9 mm particles at the mass ratio of 1: 3



注:Z 指颗粒堆积所形成的高度

图 7 3 mm 与 9 mm 颗粒质量比 3:1 混合堆积偏析与颗粒分布

Fig.7 Particle segregation and size distribution of 3 mm and 9 mm particles at the mass ratio of 3: 1

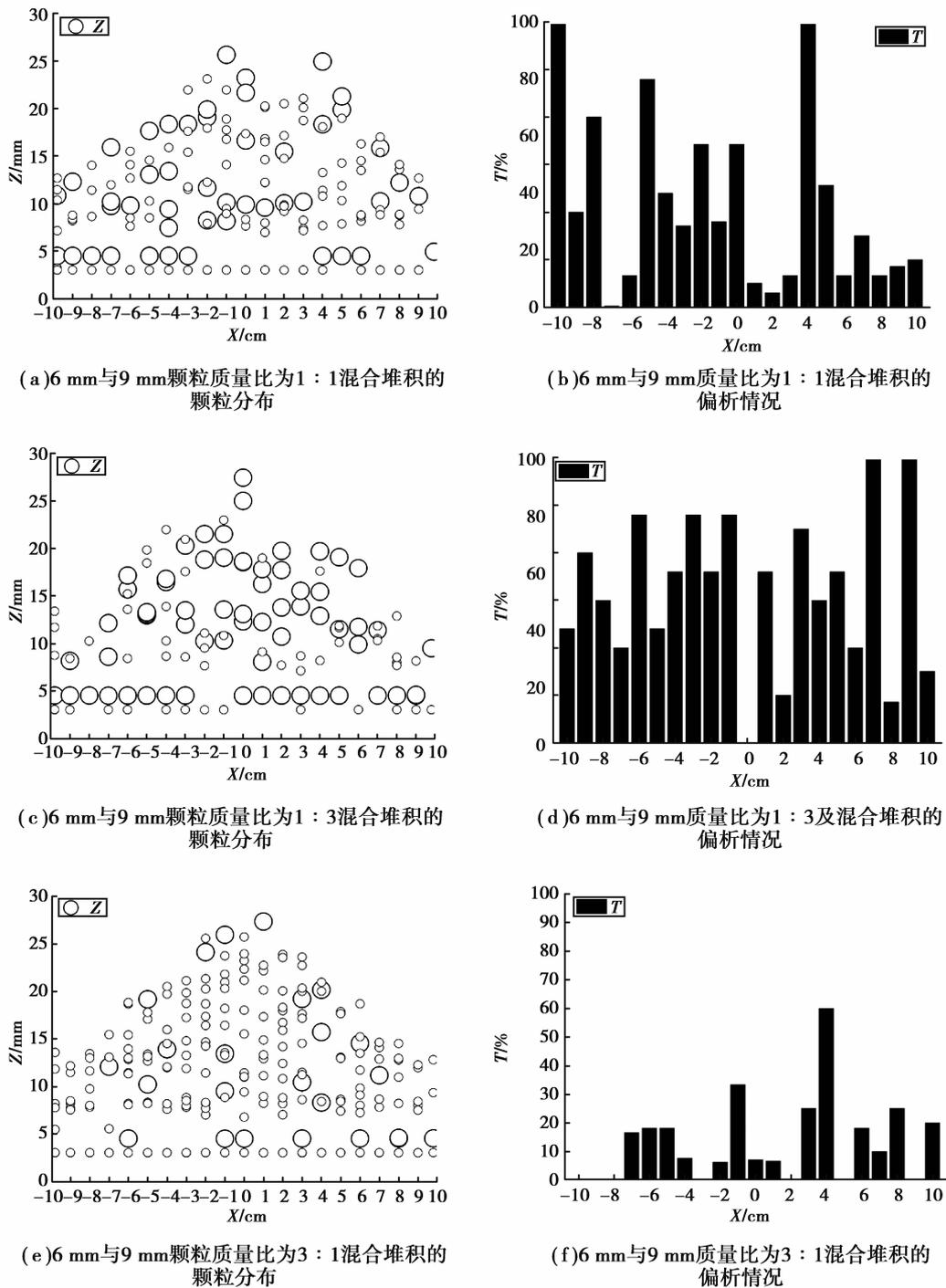


图 8 6 mm 与 9 mm 混合颗粒偏析与颗粒分布状态

Fig.8 Particle segregation and size distribution of 6 mm and 9 mm particles

3.4 综合分析

将 L_1 等分为 20 份,求得每一份(即每隔 1 cm 的区域)上的 T 值, T 值本身并不能说明偏析的程度,但是相邻 T 值之差的绝对值则可以说明相邻区域不同粒径颗粒混合的相对偏析程度。如图 9 与图 10 所示。

由图 9 分别求得 3 mm 与 6 mm 颗粒混合时 3 种质量比 $|T_i - T_{i+1}|$ 之和的平均值分别为 2.92, 10.23, 18.19, 从中可知, 3 mm 与 6 mm 颗粒质量比为 1:3 时颗粒总体偏析程度比其质量比为 1:1 及 3:1 时都大。由图 10 分别求得 3 mm、6 mm、9 mm 颗粒两两混合且质量比为 1:1 时各 $|T_i - T_{i+1}|$ 之和的平均值为 10.23, 5.59, 32.48, 从中可知, 粒径差同为 3 mm 时, 3 mm 与 6 mm 颗粒混合的总体偏析程度要小于 6 mm

与 9 mm 颗粒混合的总体偏析程度。而对于不同粒径差之间的偏析程度比较,仅仅采用 $|T_i - T_{i+1}|$ 之和的平均值是不够的。

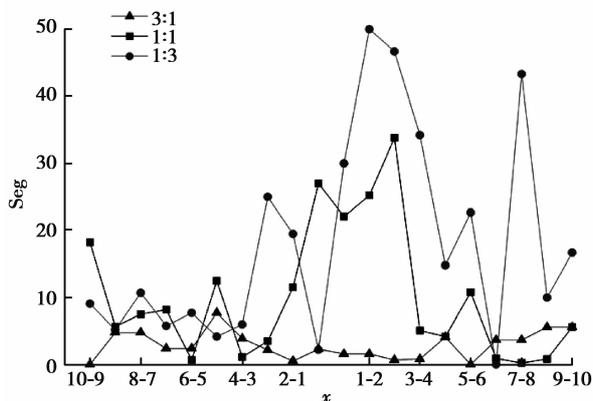


图 9 3 mm 与 6 mm 颗粒不同质量比的偏析程度比较
Fig.9 Comparison of the extent of size segregation among different mass ratios of 3 mm and 6 mm particles

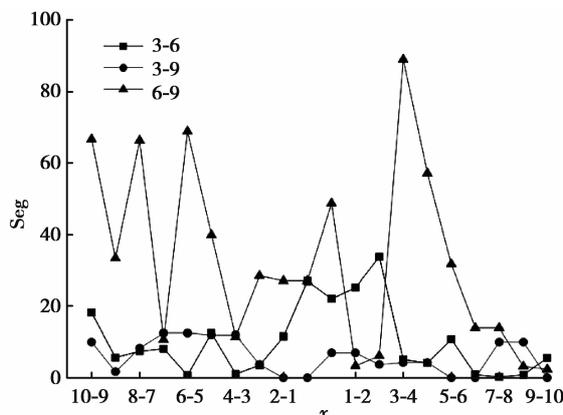


图 10 3 mm、6 mm、9 mm 颗粒两两混合且质量比为 1:1 时的偏析程度比较
Fig.10 Comparison of the extent of size segregation among different binary mixtures at the same mass ratio of 1:1

相邻区域的 T 值之差越大,则说明该两个区域颗粒的总体偏析程度越大;一部分区域的 T 值不为 0,而相邻另一部分区域的 T 值都为 0,则这两部分区域的颗粒偏析程度较大,且 T 值不为 0 的区域 T 值越大,其总体偏析程度也越大。

4 结 论

在文中研究实验条件下,通过模拟二元颗粒混合堆积的粒径偏析分布状态,得到以下结论:

1) 两种粒径不同的颗粒混合时,在总质量相同的情况下,大粒径颗粒是决定颗粒偏析的决定性因素,其一般弥散分布在小粒径颗粒中。

2) 颗粒出现聚集情况时,堆积所形成的偏析越为严重,而大粒径颗粒在下落过程中容易出现颗粒聚集的现象,小粒径颗粒则更容易分散。

3) 在同一实验条件下所得到的 T 值图中,通过比较相邻区域 T 值的相对大小,可以得出 T 值之差越大,则相邻区域的总体偏析程度越严重。在 3 mm 与 6 mm 颗粒混合中,质量比为 1:3 时其总体偏析程度较 1:1 及 3:1 时均严重。

4) 在不同实验条件下所得到的 T 值图中,在满足一定的颗粒混合条件时,通过比较 $|T_i - T_{i+1}|$ 之和的平均值,可以得出平均值越大,颗粒整体偏析程度越严重。在 3 mm、6 mm 及 9 mm 颗粒两两混合中,粒径差相同时,6 mm 与 9 mm 颗粒混合的总体偏析程度比 3 mm 与 6 mm 混合时更严重。

参考文献:

- [1] 刘云彩,刘莎莎.高炉布料与煤气分布[J].炼铁,2011,30(2):19-21.
LIU Yuncai, LIU Shasha. Burden discharging and gas distribution for bf[J]. Ironmaking, 2011, 30(2): 19-21. (in Chinese)
- [2] 经文波.无料钟高炉布料特性研究[J].江西冶金,2005,25(1):1-3,16.
JING Wenbo. Study on character of burden distribution for bell-less BF[J]. Jiangxi Metallurgy, 2005, 25(1): 1-3, 16. (in Chinese)
- [3] 毛磊,白晨光,李进,等.无钟布料参数对炉料偏析的影响[J].冶金丛刊,2011(2):15-18.
MAO Lei, BAI Chenguang, LI Jin, et al. Effect of operating parameters on segregation of charging [J]. Metallurgical Collections, 2011(2): 15-18. (in Chinese)
- [4] 毕学工,熊玮,周勇,等.高炉布料中的粒度偏析现象及对气流分布的影响[C]//中国金属学会 2004 年全国炼铁生产技术暨炼铁年会 2004.
BI Xuegong, XIONG Wei, ZHOU Yong, et al. Particle size segregation during the burden distribution and its effect on the

- gas distribution[C]//Chinese society for metals in 2004 the ironmaking production technology and ironmaking convention 2004.(in Chinese)
- [5] Yu Y W, Saxén H. Effect of DEM parameters on the simulated inter-particle percolation of pellets into coke during burden descent in the blast furnace[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2012, 52(5): 788-796.
- [6] Wang X S, Rhodes M J. A DEM study of particle motion near the walls of gas fluidized beds[J]. Powder Technology, 2005, 160(1): 15-19.
- [7] 林成城, 杜鹤桂. 离散单元法高炉无钟炉顶布料模拟研究[J]. 钢铁, 1998, 33(3): 6-10.
LIN Chengcheng, DU Hehui. On simulation of charging in bell-less top blast furnace with distinct element method[J]. Iron and Steel, 1998, 33(3): 6-10. (in Chinese)
- [8] Mio H, Yamamoto K, Shimosaka A, et al. Modeling of solid particle flow in blast furnace considering actual operation by large-scale discrete element method[J]. The Iron and Steel Institute of Japan International, 2007, 47(23): 1745-1752.
- [9] Ho C K, Wu S M, Zhu H, et al. Experimental and numerical investigations of gouge formation related to blast furnace burden distribution[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(5): 986-994.
- [10] 邱家用, 张建良, 孙辉, 等. 并罐式无钟炉顶装料行为的离散元模拟及实验研究[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(6): 598-609.
QIU Jiayong, ZHANG Jianliang, SUN Hui, et al. DEM simulation and experimental investigation of burden distribution in the parallel-hopper bell-less top blast furnace[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35(6): 598-609. (in Chinese)
- [11] 李强, 冯明霞, 邹宗树. COREX 3000 竖炉布料的离散元模型[J]. 钢铁, 2012, 47(10): 20-23.
LI Qiang, FENG Mingxia, ZOU Zongshu. Discrete element model for charging process of COREX 3000 shaft[J]. Iron and Steel, 2012, 47(10): 20-23. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)

(上接第 31 页)

- [9] 李光森, 魏国, 李小刚, 等. 含氟烧结矿黏结相流动性的探讨[J]. 东北大学学报, 2007, 28(6): 834-838.
LI Guangshen, WEI Guo, LI Xiaogang, et al. Fluidity discussion of binding phase in sinter containing fluorine[J]. Journal of Northeastern University, 2007, 28(6): 834-838. (in Chinese)
- [10] Pei Y D, Zhao Z X, Ban L L, et al. Determination of initial melting temperature and ending solidifying temperature of liquid phase during sintering process[C]// Current Advances In Materials And Processes-The Iron and Steel Institute of Japan International, 2011 (24): 226.
- [11] 裴元东, 赵志星, 班丽丽, 等. 一种研究烧结过程中铁矿粉高温特性的方法[C]// 中国金属学会. 第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 冶金工业出版社: 2011.
PEI Yuandong, ZHAO Zhixing, BAN Lili, et al. A method of studying high temperature properties of iron ore during sintering process[C]// The Chinese Society for Metals. Eighth Annual Conference of Chinese Steel. Metallurgical Industry Press: 2011. (in Chinese)
- [12] Buckingham E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations[J]. Physical Review, 1914, 4(4): 345-376.
- [13] Chattopadhyay K, Sengupta A, Ajmani S K, et al. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle: a water model study[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(7): 537-542.
- [14] 季淑娟. 现象广义相似的观察与研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
JI Shujuan. Observation and study on generalized similarity of phenomena[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2005. (in Chinese)
- [15] 吴铿, 王梦, 赵勇, 等. 测定铁矿粉同化特性新方法的探索[J]. 东北大学学报, 2012, 34(7): 961-965.
WU Keng, WANG Meng, ZHAO Yong, et al. A new method for the measurement of assimilation characteristics of iron ore powder[J]. Journal of Northeastern University, 2012, 34(7): 961-965. (in Chinese)

(编辑 侯湘)