

The Simulation and Analysis on Medium Motion in Ball Mill by Discrete Element Method

Li Li, Junwei Zhang

College of Mechanical & Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang
Email: 616366470@qq.com

Received: Dec. 3rd, 2013; revised: Dec. 13th, 2013; accepted: Dec. 19th, 2013

Copyright © 2013 Li Li, Junwei Zhang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Li Li, Junwei Zhang. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Based on the discrete element method, we carry out the research of the motion of single diameter of steel balls and mixed steel balls by the simulation test. Simulation results show that the motion form of steel balls in the above two kinds of movement is basically consistent, which mainly includes cascading movement, cataracting movement and eccentric exercise. Steel balls generally generate cascading movement and move slowly, and it is difficult to form a larger impact force under the low rate of speed; With the rate of speed increasing, steel balls generate obvious cataracting movement, and drop points of steel balls are generally near the bottom of the cylinder; With the rate of speed continuing to increase, cataracting movement is more obvious, and drop points of steel balls moved up and the impact velocity of steel balls is also faster.

Keywords: Ball Mill; Discrete Element Method; Movement of Single Diameter of Steel Balls; Movement of Mixed Steel Balls; Simulation Analysis

基于离散元法的球磨机介质运动仿真分析

李 力, 张峻玮

三峡大学机械与材料学院, 宜昌
Email: 616366470@qq.com

收稿日期: 2013年12月3日; 修回日期: 2013年12月13日; 录用日期: 2013年12月19日

摘 要: 基于离散元法, 通过仿真试验来研究球磨机单直径钢球运动和钢球配比运动。仿真结果表明, 上述两种运动形式下的钢球运动形态基本一致, 主要由泻落运动、抛落运动和离心运动组成。在比较低的转速率下钢球一般只作泻落运动且运动缓慢难以形成比较大的冲击力; 随着转速率增大, 钢球会有明显的抛落运动出现, 抛落点的底脚区一般就在筒体的底部附近; 转速率继续增大时, 抛落运动就更加明显, 抛落的底脚区会向上移动并加快钢球冲击速度。

关键词: 球磨机; 离散元法; 单直径运动; 配比运动; 仿真分析

1. 引言

离散元法的思想源于较早的分子动力学, 其主要思想是把整个介质看作由一系列离散的独立运动的粒子(单元)所组成。单元本身具有一定的几何(形状、

大小、排列等)和物理、化学特征; 其运动受经典运动方程控制, 整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述。这种方法的优点是适用于模拟处于离散状态的颗粒集合体在准静态或动态条件下的变形

运动过程^[1,2]。

PFC 3D 软件是基于离散元理论开发的微观力学程序，它是从介质的基本粒子结构的角度考虑介质的基本力学特性，并认为给定介质的在不同应力条件下的基本特性主要取决于粒子之间接触状态的变化，适用研究粒状集合体的破裂和破裂发展问题、以及颗粒的流动(大位移)问题^[3,4]。

球磨机是物料被破碎后再进行粉碎的关键设备之一，适用于粉磨各种矿石及其它物料^[5]。球磨机中介质尺寸、填充率和转速等是影响介质运动及磨矿效果的主要因素^[6,7]。由于球磨机工作存在诸多影响因素，且有些因素还是不定的，所以在进行分析时，往往与实际磨矿过程有偏差。本文通过离散元仿真试验既节约研究成本，也使球磨机研究更贴合实际^[8,9]。本文采用基于离散元法的 PFC 3D 软件来仿真研究球磨机介质运动规律并得出了一些相关结论。

2. 球磨机离散元模型建立

球磨机规格与运行参数表如表 1 所示。

球磨机离散元模型中筒体为一圆柱体，两端有透明端盖封闭。在离散元模拟中端盖用一平面墙体表示，筒体用圆柱墙体表示，球磨机筒体及提升条生成模型如图 1 所示。

3. 钢球运动仿真试验

本文主要选择单直径钢球运动和钢球配比运

动来进行仿真实验研究。

3.1. 单直径钢球运动仿真实验

单直径钢球运动实验可以比较相同直径的钢球在不同转速率和装球率条件下，钢球运动规律的变化，并可以比较在相同转速率和装球率条件下，不同直径钢球运动规律的变化。仿真实验主要是针对尺寸为 $\phi 600 \times 50$ mm 的球磨机的单直径钢球运动实验。单直径钢球运动实验主要对表 1 中的介质直径、装球率和转速率三个要素进行组合变换来进行具体实验。下面以 $\phi 40$ mm (如图中左图所示)和 $\phi 30$ mm 的钢球对比为例，通过仿真实验得到了两者在装球率分别为 0.2、0.3 和 0.4 的状态下在 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 之间变换转速率时的运动形态，见图 2~4 所示。

3.2. 钢球配比运动仿真实验

钢球配比实验是观察研究钢球混加后的运动情

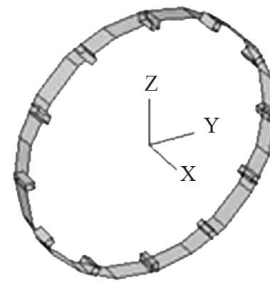


Figure 1. The model of ball mill cylinder and improve
图 1. 球磨机筒体及提升条模型

Table 1. Ball mill specification and operation parameter list
表 1. 球磨机规格与运行参数表

序号	1	2	3	4	5	6
项目	筒体直径(mm)	衬板提升条(mm)	筒体长度(mm)	筒体临界转速(r/min)	筒体切(法)向刚度(N/m)	筒体切(法)向阻尼(N/m)
内容	600	长 50, 宽 15, 高 20	50	54.6	2.0e6	2.0e6

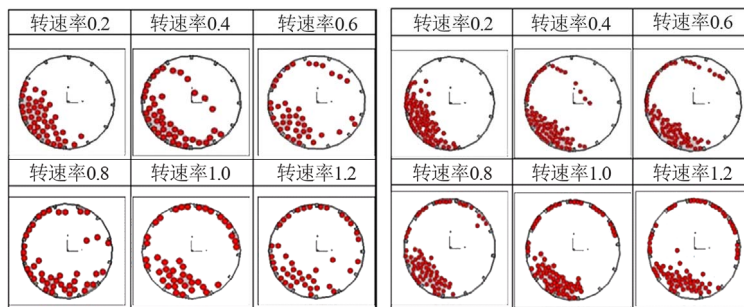


Figure 2. Steel ball in different loading rate's movement when ball rate is 0.2
图 2. 装球率 0.2 时不同转速率钢球的运动情况

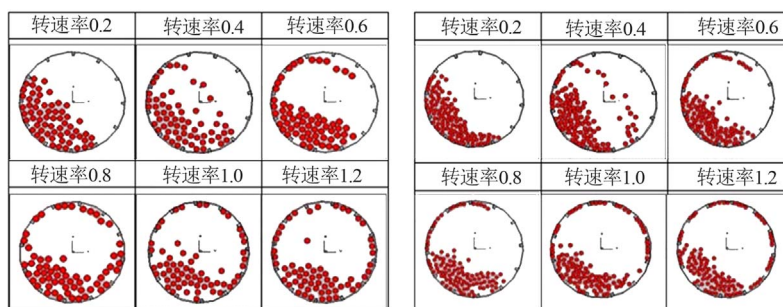


Figure 3. Steel ball in different loading rate's movement when ball rate is 0.3
图 3. 装球率 0.3 时不同转速率钢球的运动情况

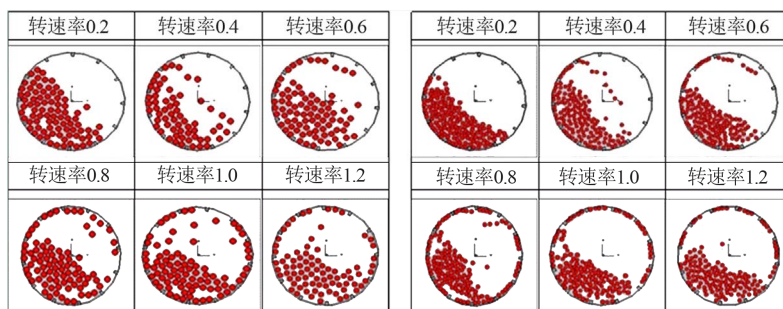


Figure 4. Steel ball in different loading rate's movement when ball rate is 0.4
图 4. 装球率 0.4 时不同转速率钢球的运动情况

况, 本实验中所用的配比方法分别为个数相等法、重量表面积法、面积相等法和重量相等法。在添加钢球后, 设定转速率在 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 之间变换, 观察和记录钢球在不同配比条件下的运动情况, 然后对各种运动状态进行分析比较, 再进行综合分析。以上四种配比方法的钢球运动形态图片如图 5~8 所示。

4. 钢球运动仿真试验结果分析

4.1. 单直径钢球运动仿真结果分析

分析图 2~4 中的图片可以看出:

1) 装球率对钢球运动规律的影响: 当装球率为 0.2 时, 在转速率增加的过程中, 除了贴着筒体运动的那层钢球被提升条作用带动, 容易提升起来作抛落运动外, 其余的钢球一般作泻落运动; 当装球率达到 0.3、0.4 时, 内外层之间的压力和摩擦力增大, 钢球容易随转速率的增加作抛落运动, 甚至出现分层抛落的情况。球磨机的转速率在 0.4 以下时, 钢球一般都作泻落运动。

2) 钢球直径对其运动规律的影响: 在实验中, 小直径的钢球容易作抛落运动状态。钢球直径大小还直

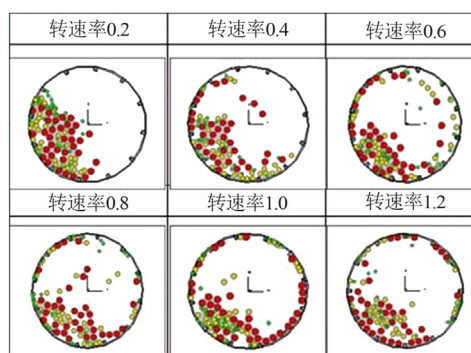


Figure 5. The experiment of equal numbers of training matching under different transfer rate
图 5. 不同转速率下个数相等法配比实验

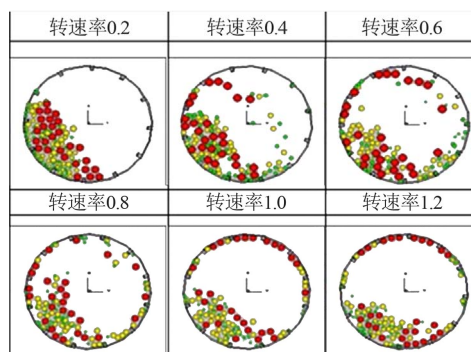


Figure 6. The experiment of quality ratio of area method under different transfer rate
图 6. 不同转速率下质量面积法配比实验

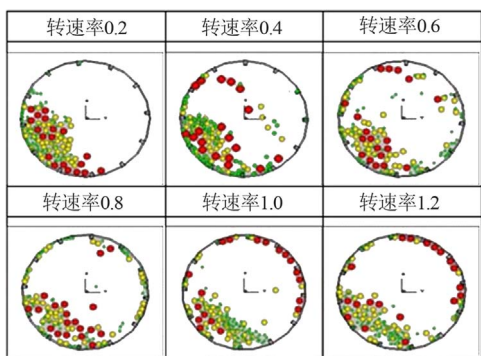


Figure 7. The experiment of equal areas of training matching under different transfer rate
图 7. 不同转速率下面积相等法配比实验

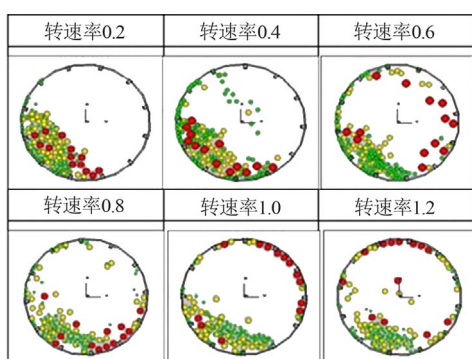


Figure 8. The experiment of equal quality method under different transfer rate
图 8. 不同转速率下质量相等法配比实验

接影响着衬板提升条的作用点位置，这对提升钢球的力大小和方向也产生了影响。

3) 转速率对钢球运动规律有决定性的作用。在比较低的转速率下，实验中是转速率为 0.2 时，钢球一般只作泻落运动，并且运动缓慢难以形成比较大的冲击力；当转速率达到 0.4 时，钢球会有明显的抛落运动出现，抛落点的底脚区一般就在筒体运转的底部附近；当转速率上升到 0.6~0.8 时，抛落运动就更加明显，并且抛落的底脚区会向上移动，并加快钢球冲击速度；当转速率到达临界转速，一部分钢球会沿着筒壁处于离心状态，还有一部分钢球则以抛落的形式运动，特别是在装球率比较大的情况下；当转速率为 1.2 倍临界转速时，更多的钢球处于离心状态。

4.2. 钢球配比运动仿真结果分析

分析图 5~8 的图片，可以得到以下结论：

1) 配比运动的基本运动状态和单直径钢球的运动状态基本一致，主要也是由泻落运动、抛落运动和

离心运动组成的，其运动方向是相同的。

2) 在转速率 0.2 的情况下，所有钢球基本都作泻落运动，不同直径的大小钢球都随着筒体内壁作曲线运动，当上升到一定高后沿着泻落面滚落，基本运动都一致。但可以发现，20 mm 和 30 mm 的钢球作圆运动区的空间比 40 mm 的钢球作圆运动区的空间要大。

3) 在转速率达到钢球作抛落运动时，图中是图片转速率为 0.4、0.6 和 0.8 时，大小钢球会有分层的运动产生，小直径的钢球脱离圆运动位置比大直径钢球脱离位置要高。

4) 当转速率达到和超过临界转速时，大小钢球运动过程中仍有抛落运动形态存在，且钢球分层开始明显。

5. 结论

1) 钢球配比运动状态和单直径钢球运动状态是基本一致，主要是由泻落运动、抛落运动和离心运动组成的。

2) 上述两种钢球运动形式均为在比较低的转速率下钢球作泻落运动，并且运动缓慢难以形成较大的冲击力；随着转速率增大，钢球会有明显的抛落运动出现，抛落点的底脚区一般就在筒体的底部附近；继续增大转速率时，抛落运动就更加明显，并且抛落的底脚区会向上移动，并加快钢球冲击速度。但在钢球配比运动中，不同直径的钢球出现分层抛落的运动形态，且小钢球的冲击点位置比大钢球的冲击点位置高，这也使得其动态转球率要比单直径钢球运动形式的要高。

3) 在两种钢球运动形式下，小直径钢球的脱离位置均比大直径的要高，其做圆运动的空间比大直径钢球的要大。

参考文献 (References)

[1] 王泳嘉, 邢纪波 (1991) 离散单元法及其在岩土中的应用. 东北工学院出版社, 沈阳.
 [2] Khanal, M. and Morrison, R. (2008) Discrete element method study of abrasion. *Mining Engineering*, **21**, 751-760.
 [3] 夏恩品 (2010) 球磨机介质运动数值分析及介质直径实验研究. 硕士学位论文, 昆明理工大学, 昆明.
 [4] 美国 Itasea 咨询公司 (2003) PFC 3D v3.0 用户手册.
 [5] 赵敏, 卢亚平, 潘英民 (2001) 粉碎理论与粉碎设备发展评述. *矿冶*, **2**, 36-41.

- [6] 王卓 (2010) 球磨机磨球直径选择及数值模拟研究. 硕士学位论文, 昆明理工大学, 昆明.
- [7] Kiangi, K. and Moys, H. (2008) Particle filling and size effects on the ball load behaviour and power in a dry pilot: Experimental study. *Powder Technology*, **187**, 78-87.
- [8] 李文亮, 杨涛, 于向军, 等 (2007) 国外大型球磨机发展现状. *矿山机械*, **1**, 13-15.
- [9] Khanl, M. (2001) Charge behaviour and power consumption in ball mills: Sensitivity to mill operating conditions, liner geometry and charge composition. *International Journal of Mineral Processing*, **63**, 79-114.