

振动研磨机颗粒系统的仿真试验

李梦月¹, 徐波^{1*}, 李生娟²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093)

摘要:为了探寻偏心振动磨的最佳工艺参数,达到减小乏能区、提高研磨效率的目的,以单筒偏心振动磨为研究对象,建立偏心振动磨内部介质运动数学模型。借助于离散元素法颗粒系统分析软件 EDEM,模拟不同振幅、频率组合下研磨介质与物料的运动状态。理论与试验研究表明:系统在简谐激振力作用下,筒体以高频率连续振动,介质在磨腔内形成明确的动态回转质心,且随激振频率和振幅不同有所变化;研磨介质和物料混合过程中,振幅增大混合速度增加,但振幅过大时部分物料被甩到磨腔边缘,混合均匀度反而降低;当激振频率为 16 Hz,振幅为 10 mm 时,介质运动范围较大,乏能区明显减小,物料与研磨介质间接触力增加,研磨效率大大提高。因此,可以通过控制激振频率和振幅等参数来获得更有利的研磨效果,提高研磨效率。

关键词:偏心振动磨;离散元素法;振幅;激振频率;运动轨迹

中图分类号: TG580.616; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2018)02-0036-05

Simulation Analysis and Study on Particle System of Vibration Smashing Mill

LI Mengyue¹, XU Bo^{1*}, LI Shengjuan²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Material Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to explore the optimum parameters of eccentric vibration grinding, improve the grinding efficiency and diminish the deficiency area in the center of the cylinder, single-tube eccentric vibration mill was studied as the research object to build the mathematical model of internal medium motion. The motion state of the grinding media and materials under different combination of amplitude and exciting frequency was simulated by particle system analysis software EDEM based on discrete element theory. Theoretical and experimental results show that the main body vibrates continuously with high frequency on the simple harmonic exciting force and the medium has a definite dynamic rotation center in the grinding cavity, which varies with the amplitude and exciting frequency. In the mixing process of grinding medium and material, the mixing speed increases with the larger amplitude. However, when the amplitude gets too large, part of the material is thrown to the edge of the mill, which reduces the mixing uniformity. When the amplitude reaches 10 mm and the exciting frequency remains at 16 Hz, the range of medium motion is larger and the deficiency area gets smaller. Meanwhile, under this condition, the tangential force between grinding medium and material increases significantly. This will contribute much to the efficiency of smashing. Therefore, the effect and efficiency of grinding can be improved by controlling the parameters of exciting frequency and amplitude.

Keywords: eccentric vibration mill; DEM (discrete element method); amplitude; exciting frequency; movement locus

振动磨以其结构紧凑、能耗低、粉磨粒度集中、产量高等特点,广泛应用于化工、矿山、冶金等超细粉碎领域^[1-2],其生产效率与振动磨内部介质的运动状态密

切相关。为研究振动磨内部介质运动特性,国内外学者不断探索。20 世纪 80 年代初期,王树林等^[3]设计、制造了 MGZ-1 型振动研磨机,并利用间歇式高速摄像

收稿日期: 2017-07-06; 修回日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51402192)。

第一作者简介: 李梦月(1990),女,河南新乡人,硕士研究生,主要研究压力容器的结构设计及优化。通信作者: 徐波(1963),女,博士,副教授,主要研究方向为超微颗粒制备技术。E-mail: xubo1027@sina.com

机拍摄不同激振力和旋转方向下研磨介质的运动状态,建立碰撞质量时变参数模型。苏乾益等^[4]通过高速摄像机对筒内运动介质进行拍摄观察,建立介质运动学模型。唐果宁等^[5]用高速摄像对介质群进行拍摄观察,通过对其简化分析,建立了离散磨介群模型。随着计算机技术发展, Lee 等^[6]运用离散元素法对不同回转半径和磨筒直径下振动磨的研磨特性进行数值模拟,并指出物料的破碎情况受冲击能量的影响较大。Herbst 等^[7]以介质群为研究对象,建立离散元模型,在微尺度水平上分析了介质群的破碎特性。Khanal 等^[8]基于离散元素法,分析颗粒粉碎过程中,颗粒的破裂、粒度分布及活化程度,发现加载速度和研磨筒壁影响颗粒破裂机理。江晓红等^[9]通过建立的振动磨机多自由度振动的力学模型,推导出运动微分方程,分析了方程各参数对磨机运动轨迹的影响。贾民平等^[10]以双质体振动磨为研究对象,根据拉格朗日方程建立 6 自由度系统动力学微分方程,利用数值分析的方法分析系统的动力学响应,研究激振器转速对振动磨动力学特性的影响。

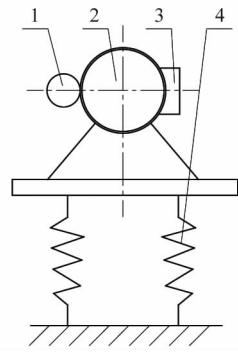
笔者以单筒偏心振动磨为研究对象,建立偏心振动磨内部介质运动数学模型,借助于离散元素法颗粒系统分析软件 EDEM,模拟不同振幅、频率组合下研磨介质与物料的运动轨迹及物料受力情况,进一步探索减小乏能区、增强介质能量传递率、降低能耗、提高研磨效率的方法。

1 偏心振动磨基本结构

单筒偏心振动磨的结构简图如图 1 所示。物料和研磨介质放在圆柱形的研磨室中,研磨室由一个横梁结构支撑,通过弹簧安装在底座上。激振电机位于研磨室横梁一侧,另一侧为平衡质量,激振器轴心在质量中心点之外,产生单面偏心激振的效果,在研磨室内形成不均匀振动。靠近激振器侧的研磨筒为垂直于轴心的椭圆运动,大大提高了能量输入。远离激振器处的研磨筒为近水平直线型椭圆运动,使振动磨中物料与研磨介质的公转速度增加近 4 倍^[11]。垂直椭圆运动和近直线型椭圆运动的附加出现,使研磨室内磨介间的冲击力很小,磨碎和剪切作用强化,提高了物料与研磨介质间的摩擦力,对细磨和分散十分有利。

2 内部介质运动方程

系统在简谐激振力作用下,筒体以高频率连续振动,研磨介质群对物料产生冲击、磨剥、滚压和剪切作用,从而达到颗粒破碎的目的^[12-13]。其激振力大小为:



1—激振器;2—研磨室;3—配重;4—弹簧。

图 1 偏心振动磨结构简图

Figure 1 Structural diagrams of eccentric vibration mill

$$F = m\omega^2 r. \quad (1)$$

激振力沿 x, y 轴方向分解为:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= m\omega^2 r \cos \omega t; \\ F_y &= m\omega^2 r \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: m 为偏心轮质量; r 为偏心半径; ω 为偏心轮角频率; t 为时间。

研究证明^[14],虽然研磨介质和物料处于松散状态,但运动中的介质群却具有明确的动力学重心,即介质在运动中形成了明确的动态回转质心。若分层考虑介质,并把每层轨道上的介质看作质点,不计滑动,则质点的运动轨迹可视为次摆线,如图 2 所示,其中 xoy 坐标系为介质瞬时质心坐标。第 i 介质层的位置矢量 r_{oi} 可表示为:

$$r_{oi} = r_i + r_p. \quad (3)$$

式中: r_i 为介质运动轨道的位置矢量; r_p 为单个介质的位置矢量。

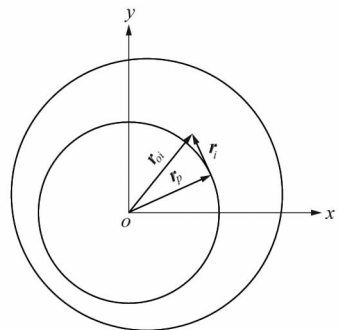


图 2 介质运动矢量图

Figure 2 Motion vector diagram of medium

其中:

$$r_i = r_i \begin{bmatrix} \sin(\omega_i t + \varphi) \\ -\cos(\omega_i t + \varphi) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_p = r_p \begin{bmatrix} \sin(\omega_o t + \alpha) \\ -\cos(\omega_o t + \alpha) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: r_i 为第 i 层介质的回转半径; ω_i 为第 i 层介质的回转频率; φ 为初相角; r_p 为机器振幅; ω_o 为振动频率; α 为机器滞后于激振力的相位角。

将式(4) ~ (5)代入式(3)得:

$$\mathbf{r}_{oi} = r_i \begin{bmatrix} \sin(\omega_i t + \varphi) \\ -\cos(\omega_i t + \varphi) \end{bmatrix} + r_p \begin{bmatrix} \sin(\omega_o t + \alpha) \\ -\cos(\omega_o t + \alpha) \end{bmatrix}.$$

3 离散元素法

离散元素法(discrete element method, DEM)是求解与分析复杂离散系统的运动规律与力学特性的一种新型数值方法^[15]。颗粒系统分析软件 EDEM 是基于离散元素法的多用途 CAE 软件,在分析模拟工业颗粒的处理和制造过程方面有着广泛的应用^[16]。

4 仿真研究

4.1 工艺参数

振动磨筒体材料为合金钢 0Cr13,研磨筒直径为 200 mm,长度为 400 mm。因为研磨筒体轴线是水平的,筒内介质运动主要集中在筒体横截面上,因此研磨筒体纵向受力可忽略不计^[17]。为简化计算,截取筒长 100 mm 进行仿真试验。研磨介质材料为氧化锆陶瓷材料,形貌为球形,直径分别为 10、15 和 20 mm。物料为碳酸钙颗粒,直径为 5 mm。重力加速度取 $9.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,材料力学特性参数如表 1 所示^[18]。

表 1 材料的力学特性参数

Table 1 Material mechanical properties parameters			
名称	剪切模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比
ZrO2	65.0	5 600	0.30
CaCO3	14.7	2 930	0.29
0Cr13	70.0	7 800	0.30

各材料之间恢复系数分别设置为:物料与物料之间为 0.5;物料与研磨介质之间为 0.4;物料与筒壁之间为 0.5;研磨介质与筒壁之间为 0.5。各材料之间静摩擦因数分别设置为:物料与物料之间为 0.5;物料与研磨介质之间为 0.7;物料与筒壁之间为 0.5;研磨介质与筒壁之间为 0.5。各材料之间的滚动摩擦因数分别设置为:物料与物料之间为 0.01;物料与研磨介质之间为 0.08;物料与筒壁之间为 0.01;研磨介质与筒壁之间为 0.01。

研磨介质和物料的填充率为 70%,体积比为 4:1,对生成颗粒参数进行设置,如表 2 所示。

选取 Rayleigh 时间步长的 10% 为本次仿真的固定时间步长,颗粒生成时间为 10 s,颗粒生成后系统仿

真时间为 20 s,系统保存时间间隔为 0.05 s。

表 2 生成颗粒参数设置

Table 2 Parameter settings of generated particles		
介质	生成速率/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	生成总质量/kg
CaCO ₃	0.1	0.20
ZrO ₂ (10 mm)	1.0	1.30
ZrO ₂ (15 mm)	0.1	0.15
ZrO ₂ (20 mm)	0.1	0.15

4.2 介质分布状态

4.2.1 介质混合度

研磨介质和物料初始分布状态如图 3 所示,其中红色球代表直径为 5 mm 的物料,蓝色、绿色和粉色球分别代表直径为 10、15 和 20 mm 的研磨介质。

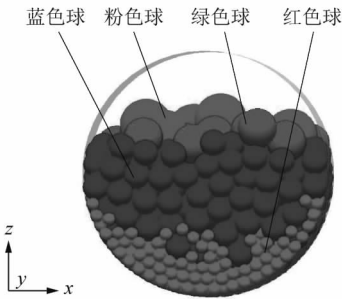


图 3 混合前筒体-介质模型

Figure 3 Barrel-medium model before mixing

仿真试验时,设激振频率 f 为 16 Hz,振幅 A 分别为 5、10 和 15 mm。将研磨介质和物料生成后开启仿真,分别导出 3 种工况下,设备在启动 1、3 和 5 s 时,研磨介质和物料的混合情况,试验结果如图 4 ~ 6 所示。

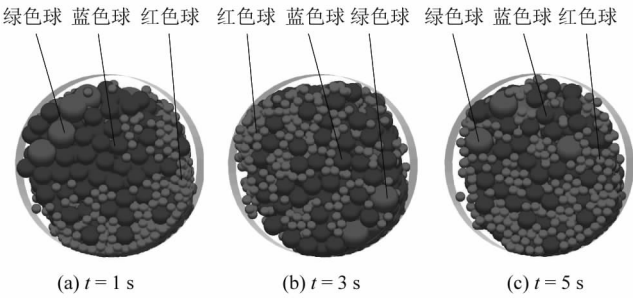


图 4 $f = 16 \text{ Hz}$, $A = 5 \text{ mm}$ 时,介质混合状态

Figure 4 State of mixing medium when $f = 16 \text{ Hz}$, $A = 5 \text{ mm}$

从图 4 中可以看出,当振幅为 5 mm 时,因筒体振动幅度较小,介质运动幅度相对较低,筒内介质分布较为松散。由于介质流动性较差,混合速度较慢,均匀度较低。图 5 显示当振幅提高到 10 mm 时,介质流动速

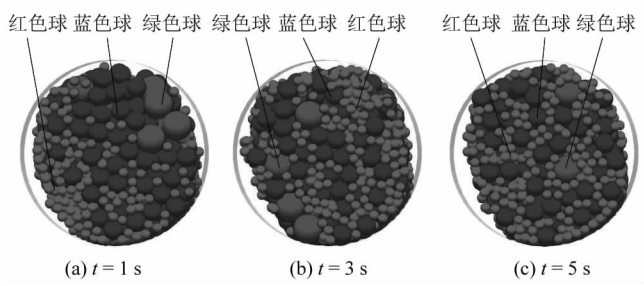


图5 $f=16\text{ Hz}$, $A=10\text{ mm}$ 时,介质混合状态
Figure 5 State of mixing medium when
 $f=16\text{ Hz}$, $A=10\text{ mm}$

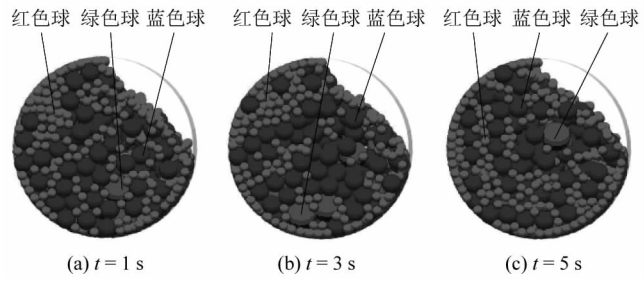


图6 $f=16\text{ Hz}$, $A=15\text{ mm}$ 时,介质混合状态
Figure 6 State of mixing medium when
 $f=16\text{ Hz}$, $A=15\text{ mm}$

度明显加快,随着混合的进行,物料和研磨介质接触增多,混合均匀度提高,混合速度加快。由图6可见,当继续提高振幅至15 mm时,介质单向冲击力增加,部分物料被带到磨腔边缘,与研磨介质碰撞机会减少,混合均匀度降低。

4.2.2 振幅对介质运动的影响

将混合后的颗粒设为初始状态,激振频率 f 为16 Hz,振幅 A 为5,10和15 mm工况下进行模拟,模拟参数见表3。

表3 不同振幅下的模拟参数

振幅/mm	x 分量/mm	z 分量/mm	激振频率/Hz	初相角/(°)
5	3	4	16	90
10	6	8	16	90
15	10	12	16	90

图7为系统在启动0~20 s时间内,不同振幅下介质的运动轨迹。图7(a)为振幅5 mm时介质运动轨迹,可看到磨筒内介质分布不均,中心部位存在较大的乏能区,介质的流动性较差,主要分布在研磨室底部。保持激振频率不变,将振幅提高到10 mm,图7(b)显示乏能区有所减小,介质流动性增强,介质活化程度较高,能量分布较为均匀。将振幅增大到15 mm时,介

质的运动状态如图7(c)所示。乏能区虽有所减小,但介质大多集中在筒体左下方,能量偏心现象较为严重。

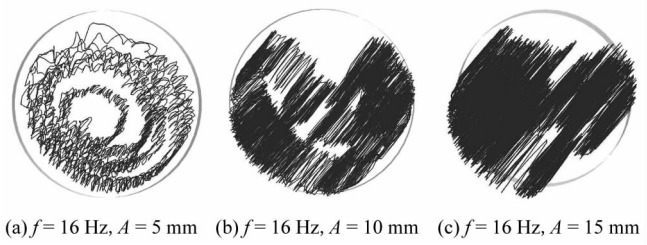


图7 不同振幅时介质运动轨迹
Figure 7 Medium trajectories with different amplitude

图8为激振频率16 Hz、振幅不同时物料与研磨介质接触力变化曲线。当振幅为5,10和15 mm工况时,物料与研磨介质间最大接触力分别为74.22, 646.95和962.63 N。振幅为5 mm时,物料与研磨介质间的接触力虽然较为恒定,但数值过小,不利于颗粒破碎;振幅增大到10 mm时,物料与研磨介质间平均接触力为300 N左右,曲线呈现出近似于正弦函数的波动形式,有利于颗粒的均匀破碎;当振幅达到15 mm时,物料与研磨介质间的平均接触力增大到500 N左右,但接触力曲线不均匀。由于物料所受的力大多来自于冲击碰撞,振幅过大会造成能量流失,研磨出的物料球形度也随之下落。在激振频率不变的情况下,随着振幅增加,物料与研磨介质间冲击力提高,相互作用力加大,研磨筒振动加剧,产生较大的剩余能量,使研磨效率降低。

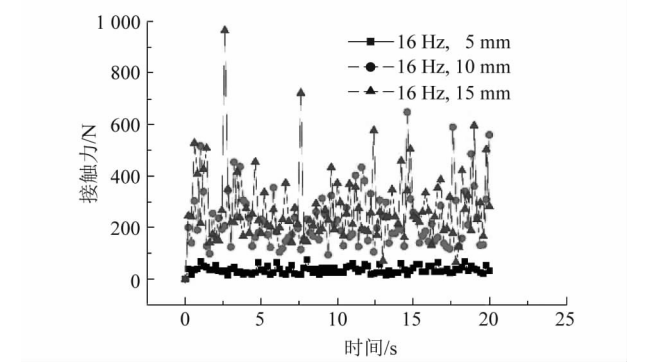


图8 不同振幅时物料与研磨介质接触力
Figure 8 Tangential force between grinding medium and material with different amplitude

4.2.3 激振频率对介质运动的影响

设混合颗粒为初始状态,振幅10 mm,在激振频率分别为16,20和25 Hz工况下进行模拟,模拟参数见表4。

表4 不同激振频率下的模拟参数
Table 4 Simulation parameters with different exciting frequency

振幅/mm	x 分量/mm	z 分量/mm	激振频率/Hz	初相角/(°)
10	6	8	16	90
10	6	8	20	90
10	6	8	25	90

图9为系统在启动0~20 s时间内,不同激振频率时介质的运动轨迹。由图9可以看出,激振频率从16 Hz增加到25 Hz时,研磨筒内介质的分布状态并没有改善,且乏能区域略有增加,位于研磨室底部的介质增多,介质活化程度降低,能量分布趋于偏心状态。图10为振幅10 mm,不同激振频率时研磨介质与物料间接触力变化曲线。当激振频率由16 Hz提高至20 Hz时,物料与研磨介质间的平均接触力从312.41 N增大到436.15 N;激振频率为20 Hz时,接触力不稳定,在20 s内变化较大,易造成物料受力不均;当激振频率达到25 Hz时,由于研磨筒振动加剧,介质处于离心状态,介质与器壁分离,集中度增加,乏能区增大,能量偏心情况趋于严重,物料与研磨介质间最大接触力减小至94.49 N,过剩的能量转化为热能和噪声,研磨效率下降。

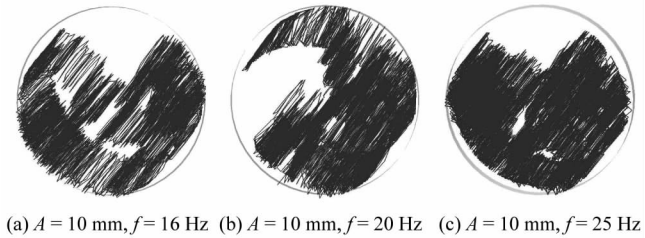


图9 不同激振频率时介质运动轨迹
Figure 9 Medium trajectories with different exciting frequency

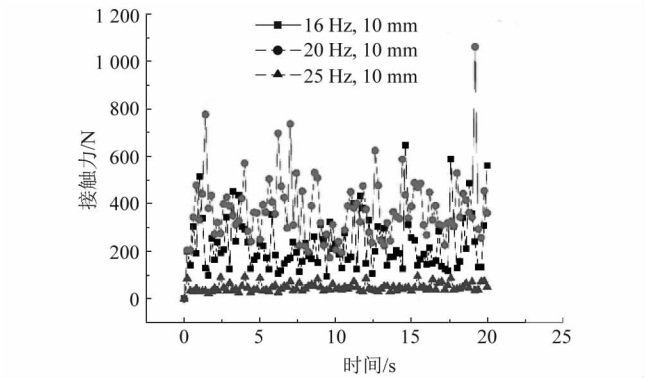


图10 不同激振频率时物料与研磨介质接触力
Figure 10 Tangential force between grinding medium and material with different exciting frequency

5 结语

- 1) 理论研究表明,系统在简谐激振力作用下,筒体以高频率连续振动,介质在磨腔内形成明确的动态回转质心,且随激振频率和振幅不同有所变化。
- 2) 仿真试验结果显示,研磨介质和物料在混合过程中,随着振幅增大,混合速度随之增加;但当振幅过高时,部分物料被甩到磨腔边缘,混合均匀度降低。
- 3) 当激振频率为16 Hz,振幅为10 mm参数组合时,介质运动范围较大,乏能区明显减小,物料与研磨介质间接触力增加,研磨效率大大提高。

参考文献:

[1] 龚莉.超细粉体振动磨机的设计[J].林业机械与木工设备,2013,41(11):48.

[2] 侯彤.振动磨在粉体加工中的应用[J].化工矿物与加工,2014(10):46.

[3] 王树林,刘美清,胡沂清,等.振动棒磨机非线性振动试验研究[J].机械工程学报,1997,33(4):19-25.

[4] 苏乾益,刘政.振动磨机介质运动规律及参数设计[J].南方冶金学院学报,2002,23(1):13-18.

[5] 唐果宁,彭猛.振动磨机离散磨介群动力学模型研究[J].中国机械工程,2008,19(11):1347-1350.

[6] LEE H, CHO H, KWON J. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill[J]. Powder technology, 2010, 198(3): 364-372.

[7] HERBST J A, POTAPOV A V. Making a discrete grain breakage model practical for comminution equipment performance simulation[J]. Powder technology, 2004, 143/144(26):144-150.

[8] KHANAL M, SCHUBERT W, TOMAS J. Discrete element method simulation of bed comminution [J]. Minerals engineering, 2007, 20(2):179-187.

[9] 江晓红,张永忠,丁江.振动磨机的振动力学模型及运动分析[J].中国矿业大学学报,1998,27(2):192-195.

[10] 贾民平,周浩,杨小兰,等.双质体振动磨动力学建模及参数优化[J].振动与冲击,2016,35(9):59-65.

[11] 张世礼.特大型振动磨及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2007,40.

[12] 徐波,王树林,李生娟.振动磨磨机动力学分析及仿真试验[J].机械工程学报,2008,44(3):106.

[13] 柳武辉,单继宏,阙子俊.振幅对颤振球磨机粉磨效率的影响研究[J].机电工程,2016,33(7):857-861.

[14] 王树林.粉体技术手册:第四章[M].北京:化学工业出版社,2004,74.

[15] 胡国明.颗粒系统的离散元素法仿真分析[M].武汉:武汉理工大学出版社,2002:1.

[16] 王国强,郝万军,王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2010:9.

[17] 杨小兰,刘极峰,周亚军,等.离散元法之振动磨介流数值模拟与试验[J].振动工程学报,2016,29(3):479-487.

[18] 朱张校.工程材料[M].3版.北京:清华大学出版社,2001:274.