

基于 EDEM 的高效生成料床方法研究

王静文^{1,2}, 李毅华¹, 许 宁², 姜大志²

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224002)

摘要: 由于立式辊磨机料床粉碎所处的环境不利于观察研究, 运用离散元软件——EDEM, 仿真料床粉碎可解决该问题。相比其他形成料床的条件, 利用 EDEM 仿真生成立式辊磨机的料床时, 喂料量是最根本的影响因素, 喂料量过多或过少都不利于后续研究的进行。针对该问题, 提出了 3 种方案, 分别是直线型磨盘、增加磨辊个数和投入不同大小未完全破碎的物料。通过对 3 种方案仿真结果的对比, 最终确定投入不同大小未完全破碎物料的方案为基于 EDEM 高效生成料床的最佳方案。

关键词: EDEM; 料床粉碎; 料床; 仿真

中图分类号: TQ172.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5322(2018)01-0017-09

料床粉碎因其可以提高物料的粉磨效率, 降低生产能耗, 并且在大部分粉碎机械中都存在^[1], 所以在倡导节能减排的现今社会, 已经受到越来越多的关注。但像立式辊磨机之类的粉碎机械的料床粉碎处在密闭、尘土飞扬的环境中, 想通过监测或是其他方法直观观察粉碎过程, 对其进行研究分析, 显然是有困难的。近年来随着离散元软件——EDEM 的不断完善, 运用 EDEM 研究料床粉碎逐渐成为一种趋势。EDEM 强大的后处理工具不仅可以看到料床粉碎的全过程, 还可以分析物料颗粒的运动、受力情况, 为研究料床粉碎机理提供了理论依据^[2]。

在 EDEM 中研究料床粉碎, 需要建立物料颗粒的破碎模型。对于破碎, 通常选用 Hertz-Mindlin with bonding 模型。使用该模型时需在特定的时间点组成破碎物料的小颗粒之间产生黏结键, 含有黏结键的颗粒才能用于仿真破碎。本文除了要在小颗粒之间形成黏结键, 还涉及颗粒的替换问题。EDEM 中颗粒替换是指在某一特定的时刻, 将单个大颗粒移除, 然后用许多小颗粒组成的大颗粒去代替该单个大颗粒。实际生产中, 有

多重因素影响立式辊磨机料床的形成, 其中最主要的是物料间的内摩擦力、物料粒度的组成、料层厚度、粉磨压力以及喂料量。但在 EDEM 中仿真生成料床时, 喂料量是最根本的一个影响因素。喂料量高, 替换的大颗粒数不是一个, 而是一群, 替换后小颗粒数会更多, 软件的计算量增加, 运行变慢, 导致仿真时间加长或停止工作, 直接影响后续研究的进行; 但如果减少喂料量, 替换的大颗粒数减少, 虽缩短了仿真时间却不一定能形成料床。而且另外 4 个因素, 都要在解决喂料量问题的前提下, 才有研究的意义, 如果没有足够的物料形成料床或物料过多导致软件停止运行, 其他 4 个条件即使都满足, 也无法形成料床。因此, 本文着重考虑喂料量对料床形成的影响, 研究如何在不影响喂料量的基础上, 减少仿真时间。本文提出了采用直线型磨盘、增加磨辊个数和投入不同大小未完全破碎的物料 3 种方案, 并通过仿真研究从这 3 种方案中选择最适合的方案进行后续研究。

1 建模

1.1 EDEM 物料颗粒建模

根据矿物岩石在显微镜下的亚显微结构, 可

收稿日期: 2017-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703202); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2015057-21)

作者简介: 王静文(1993—), 女, 江苏泰州人, 硕士生, 主要研究方向为建材机械设计。

通讯作者: 许宁(1964—), 男, 四川广元人, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为建材机械与环保机械的研究与开发。

以看到矿物岩石是由多种不同的矿物质按照无序的排列组成的,并且各矿物质之间由类似于胶结材料一样的东西胶结在一起^[3]。依据这种现象,用 EDEM 建立物料颗粒的模型时,可以用许多小颗粒通过黏结键的粘结形成真实物料的形状,用于破碎仿真。实际生产中,破碎物料的形状都是不规则的,数量多且各不相同,完全依照实际物料的形状建立物料颗粒模型耗时耗力,且不切实际。为了建模的方便,假设投入的物料颗粒均为大小、形状一样的球体,进行粘结的小颗粒也是大小、形状一样的球形颗粒。由于在 3 种方案中物料颗粒均为石灰石材料,物料模型的物性参数和接触模型参数都是相同的,则 3 种方案仿真结果的不同应该与其无关,所以可省去参数标定这一步,直接参考相关文献中石灰石的这些参数数值^[4-7]。石灰石物料模型参数值如表 1、表 2 所示。

表 1 石灰石物料模型物性参数

Table 1 Physical property parameters of limestone model

参 数	数值
泊松比	0.27
剪切模量/MPa	28000
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2700
石灰石间碰撞恢复系数	0.1
石灰石间静摩擦系数	0.3
石灰石间滚动摩擦系数	0.1

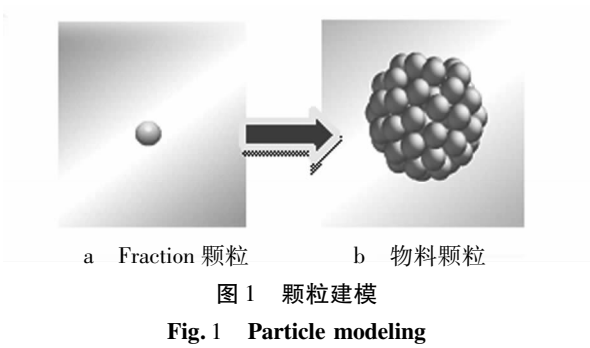
表 2 石灰石物料模型粘结键参数

Table 2 Parallel bond parameters of limestone model

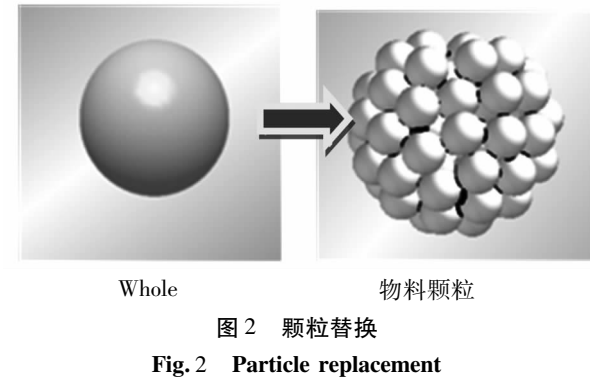
参 数	数值
法向刚度系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	6.9E+09
切向刚度系数/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	4E+09
最大法向强度/Pa	2.45E+08
最大切向强度/Pa	9.5E+07

建模时,先定义用于组成物料颗粒的小颗粒——Fraction 颗粒,然后将物料颗粒的三维模型(壁厚为 0.01 mm 的球体薄壳)导入 EDEM,再用一定数目的 Fraction 颗粒填充该三维颗粒模型的内部,完成后导出每个 Fraction 颗粒的三维坐标,生成 Particle_Cluster_Data.txt 文件。建成后的物料颗粒模型如图 1 所示。

仿真时,除了建立 Fraction 颗粒,还要再定义另一种颗粒——Whole 颗粒(颗粒替换前的物料颗粒),用于先产生物料颗粒;然后在某一特定的



时间点,通过 ParticleReplacement.dll、Particle_Replacement_prefs.txt 和 Particle_Cluster_Data.txt 3 个文件的共同作用,将 Whole 颗粒替换成由 Fraction 颗粒组成的物料颗粒^[8],同时生成黏结键(模拟实际物料内部各矿物质的胶结作用)。颗粒替换如图 2 所示,小颗粒间黑色的圆柱即为黏结键。



1.2 建立立式辊磨机三维模型

立式辊磨机本身的结构是很复杂的,但是在 EDEM 仿真时,需要用到的只有磨盘和磨辊。所以仿真时只需画出这两者的三维模型,并保存为 stl 的格式,然后导入到 EDEM。立式辊磨机三维模型如图 3 所示,模型中立式辊磨机材料为高锰钢,高锰钢的物性参数数值如表 3 所示^[5-6]。

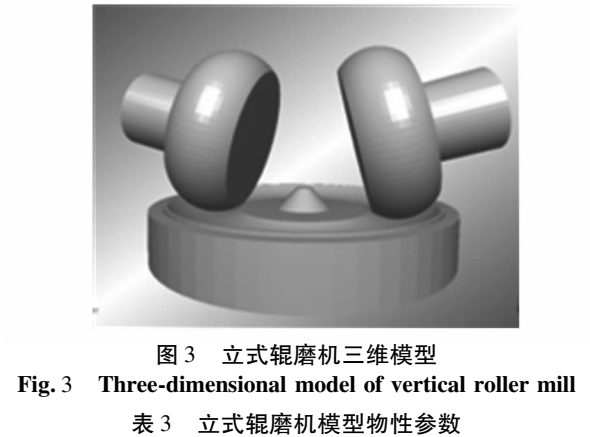


Table 3 Physical property parameters of vertical roller mill

参 数	数值
泊松比	0.29
剪切模量/MPa	20000
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7980
石灰石高锰钢间碰撞恢复系数	0.1
石灰石高锰钢间静摩擦系数	0.5
石灰石高锰钢间滚动摩擦系数	0.1

2 料床创建

利用 EDEM 研究立式辊磨机的料床粉碎,前提是要先形成料床。实际生产中,立式辊磨机形成料床的具体过程是物料以一定的速度连续投入到磨机破碎腔内,然后落到磨盘中央,并在磨盘离心力的作用下移动到磨盘边缘,经磨辊碾压粉碎后继续向前移动。由于新的物料不停地投入到磨机内,所以破碎后的物料在移动过程中又有新的

未破碎物料加入,在经过下一个磨辊时,又一起被碾压粉碎;经过反复几次碾压后,物料被压实形成料床。仿真时,由于涉及到颗粒的替换,而且软件每次替换时能替换的颗粒数有限,所以物料不可能像实际生产中一直连续投放。因此,利用 EDEM 形成料床时,可以分批进行物料颗粒的投放,每批投入的颗粒数也不必太多,这样既解决了软件一次无法替换过多颗粒的问题,也使软件的计算量逐渐增加,保证仿真的正常运行。

物料颗粒破碎形成料床一般过程如图 4 所示。仿真开始时,先用颗粒工厂(factory)产生一定数量的 Whole 颗粒(图 4a);等到了设定的替换时间再替换成物料颗粒,并在小颗粒之间形成黏结键(图 4b);物料颗粒下落到磨盘中央后,在磨盘的带动下一起旋转,并受离心力的作用逐渐运动到磨盘边缘,被磨辊碾压(图 4c);最后经过多次压实逐渐形成料床(图 4d)。

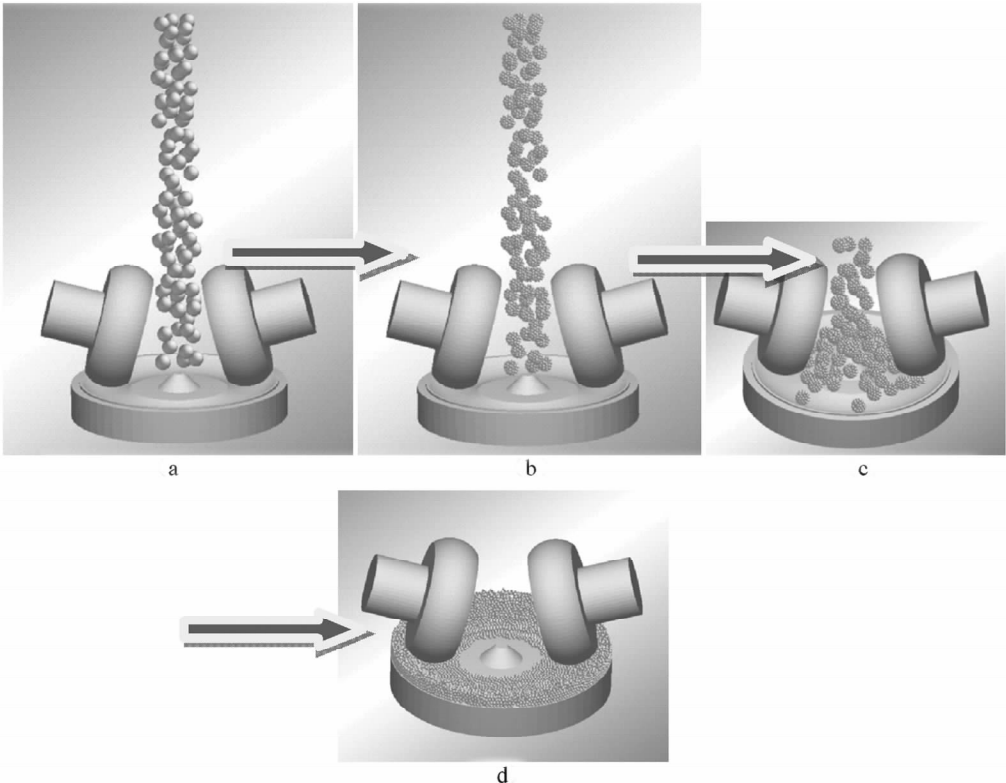


图 4 物料颗粒破碎形成料床过程

Fig. 4 The process of forming the material bed by crushing material particles

3 改进方案

3.1 采用直线型磨盘

通过观察图 4d 形成的料床可以发现,进行后

续研究时,比如想观察料床的受力情况,只需要对磨辊下方料床受压的那段区域进行研究即可,磨盘上其他地方的物料无需考虑,虽然这些物料在磨盘上形成料床的过程中,又必须存在;而且物料

在磨盘上运动的过程中,真正用来进行碾压破碎的时间很少,大部分时间都浪费在从一个磨辊到另一个磨辊的运动过程中。针对如何既能形成料床,又能减少不必要的颗粒投入和运动路程这个问题,可将圆形的磨盘改为直线型磨盘,如图 5 所示。改后的直线磨盘与两个磨辊间的间隙定为 40 mm,且磨盘的总长小于原来圆型磨盘的周长;两个磨辊间的直线距离也小于原来圆型磨盘上两个磨辊间物料运动的弧线长度,这样在不影响料床生成的情况下既减少了颗粒的投入又节约了不必要的运动时间。

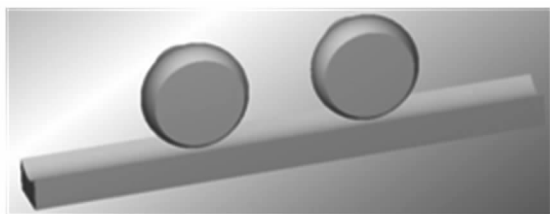


图 5 磨辊和直线型磨盘

Fig. 5 Grinding roll and linear millstone

直线型磨盘料床形成过程如图 6 所示:先由颗粒工厂(factory)产生 Whole 颗粒,因为直线磨盘不象圆型磨盘会旋转产生离心力,使物料落到磨盘上后,能随机地运动到任意磨辊处进行破碎,而在直线磨盘上,物料只能依次通过左右两个磨辊进行破碎,相比前者而言很耽误时间(图 6a)。所以为了提高效率,分别在两个磨辊的左侧设置颗粒工厂,使其同时产生 Whole 颗粒,确保两个磨辊能同时工作;到了颗粒替换的时间,Whole 颗粒被替换成了物料颗粒并在小颗粒之间形成黏结键(图 6b)。因为 EDEM 软件一次无法替换过多的颗粒,所以进行分批加料(总共加两位料),每次加的物料颗粒数都相同,第二次加料的方法步骤同 6a 和 6b。当物料颗粒下落到磨盘上,颗粒由磨盘带动不断向右移动,等待被破碎(图 6c);随着所有物料颗粒都经过了磨辊的碾压粉磨后,在磨盘的带动下这些物料颗粒逐渐堆积到磨盘的右侧(图 6d)。由于直线磨盘不能象圆型磨盘可以旋转使物料反复被磨辊碾压,而只能通过改变磨盘和磨辊的转动方向来实现。所以此时可将磨盘的运动方向改为向左运动,磨辊的转向由原来的逆时针改为顺时针转动,从而带动物料也向左运动,使之再次被磨辊粉磨(图 6e)。通过反复改变磨辊和磨盘的运动方向,物料多次受到磨辊的挤

压破碎,逐渐形成料床,如图 6f 所示。

3.2 增加磨辊个数

本文所用的立式辊磨机只有两个磨辊,所以当物料颗粒在磨盘上转一圈只能被粉磨 2 次。从破碎过程可以看出,除去物料颗粒被粉磨的阶段,其他时间则都用在向着下一个磨辊运动等待被破碎的过程中。如果把这段等待被破碎的过程也用来进行破碎,就能增加粉磨物料的次数,减少破碎时间,加速料床的形成。因此,根据磨盘和磨辊的尺寸,在原来两个磨辊的基础上再添加一个磨辊,三维模型以及磨盘和磨辊的运动方向如图 7 所示,磨盘为逆时针转动,3 个磨辊为顺时针转动,3 个磨辊和磨盘间的间隙定为 40 mm。这样单从破碎次数方面来看,物料在磨盘上转一圈,可以被粉磨 3 次。

3 个磨辊料床形成过程如图 8 所示:先用颗粒工厂(factory)产生 Whole 颗粒(图 8a);等到了设定的替换时间替换成物料颗粒并在小颗粒之间形成粘结键(图 8b);物料颗粒下落到磨盘中央后,在磨盘的带动下一起旋转,并受离心力的作用逐渐运动到磨盘边缘,被磨辊碾压(图 8c);最后经过多次压实逐渐形成料床(图 8d)。需要注意的是,料床形成过程中,同样也要进行分批加料(总共加 5 次料),每次加的物料颗粒数都相同,且后 4 次加料的方法步骤同 8a 和 8b。

3.3 投入不同大小未完全破碎的物料

无论是实际生产还是上述形成料床的两种方法都要先对物料进行破碎,使物料在磨辊的碾压下被粉磨成大小、形状不同的小碎块,再在磨辊的压实下,逐渐形成料床。观察实际料床也可以发现,料床中的物料并不都是大小一样的物料,其中既包括少许未破碎的完整物料颗粒和一些未被及时收集的成品物料,也有虽破碎了,但未破碎完的物料颗粒。

在仿真中,破碎物料花费的时间比实际生产要久,比如立式辊磨机在实际生产中磨盘转一圈只需几秒钟,但是在仿真中可能需要几十分钟,并且随着物料颗粒数的增多还会花费更长时间,而一圈中用来破碎物料的时间又很有限,所以到最终形成料床可能需要几个小时。因此,如果能将破碎物料的时间缩短或者能直接省掉破碎这道步骤,就能减少大量仿真时间,提高仿真效率。考虑到料床中包含有大小不同未完全破碎的物料和成品物料,不同于实际生产,在仿真中可以直接省去

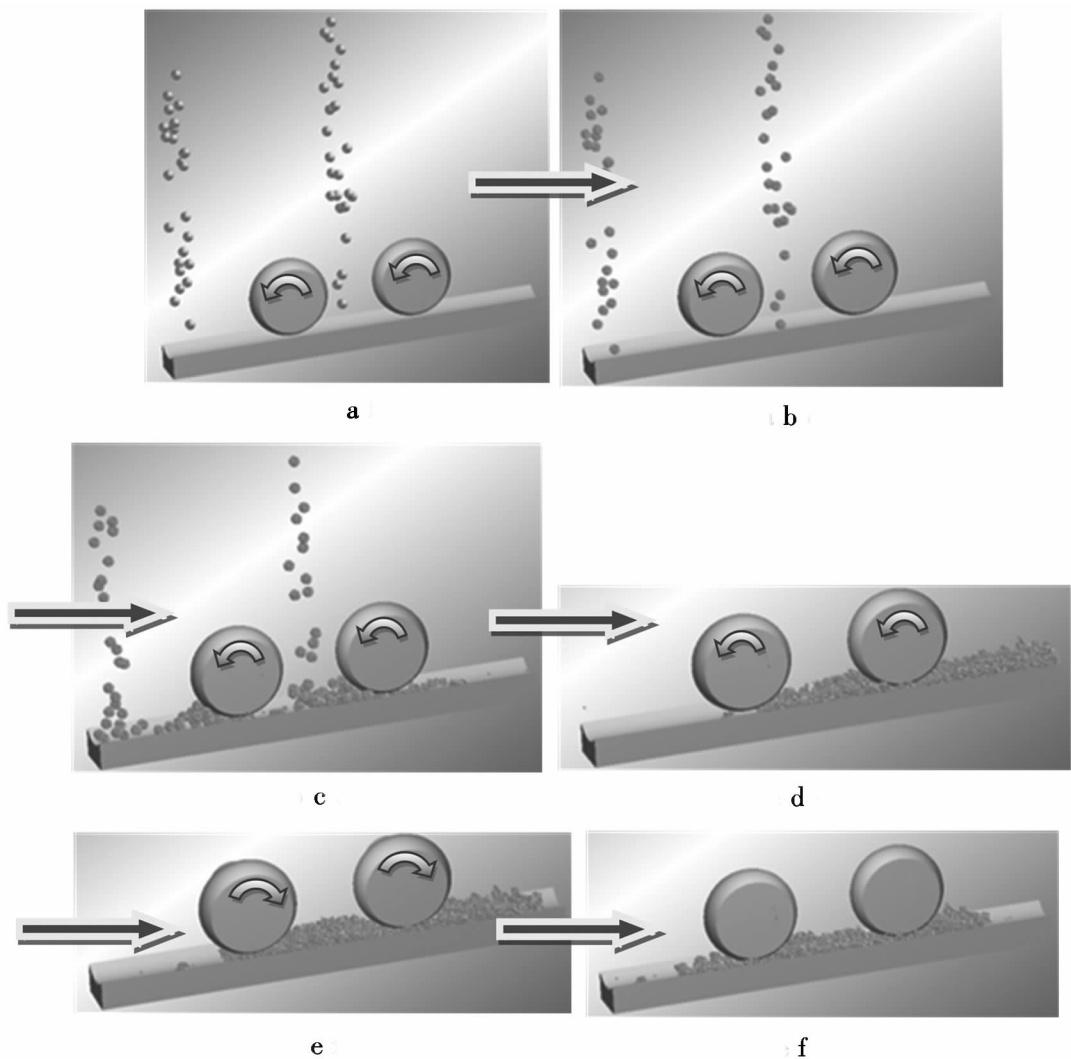


图 6 直线型磨盘形成料床过程

Fig. 6 The process of forming the material bed by using linear millstone

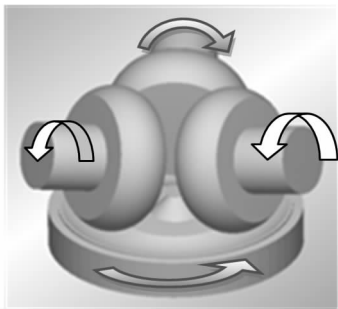


图 7 含 3 个磨辊的立式辊磨机三维模型

Fig. 7 Three-dimensional model of vertical roller mill with three grinding rolls

破碎物料颗粒这道步骤,提前生成这些未完全破碎且大小不同的物料,投入到立式辊磨机中,通过磨辊的压实,形成料床。

观察物料颗粒被破碎后的形态,假设只投入 4 种不同形状大小的物料,如图 9 所示。图 I 是物料被完全破碎后的形态,另外 3 种则是未完全破碎的形态。实际料床中还有少许的完整物料,但相对未完全破碎的物料颗粒而言个数很少,所以在这里就忽略不计。这 4 种物料虽然和实际情况中物料被破碎后随机生成的形态、大小有所差别,但是这些物料被投入到磨盘上后,在形成料床的过程中,可能被磨辊又破碎成其他形状大小的物料,和实际情况中物料形态的多样性基本接近。仿真时,4 种物料投入的个数百分比分别为: 51.6% (I)、12. 9% (II)、16. 1% (III)、19. 4% (IV),磨盘和两个磨辊间的间隙定为 40 mm。

立式辊磨机磨盘和磨辊的运转方向如图 10 所示,磨盘为逆时针转动,磨辊为顺时针转动。

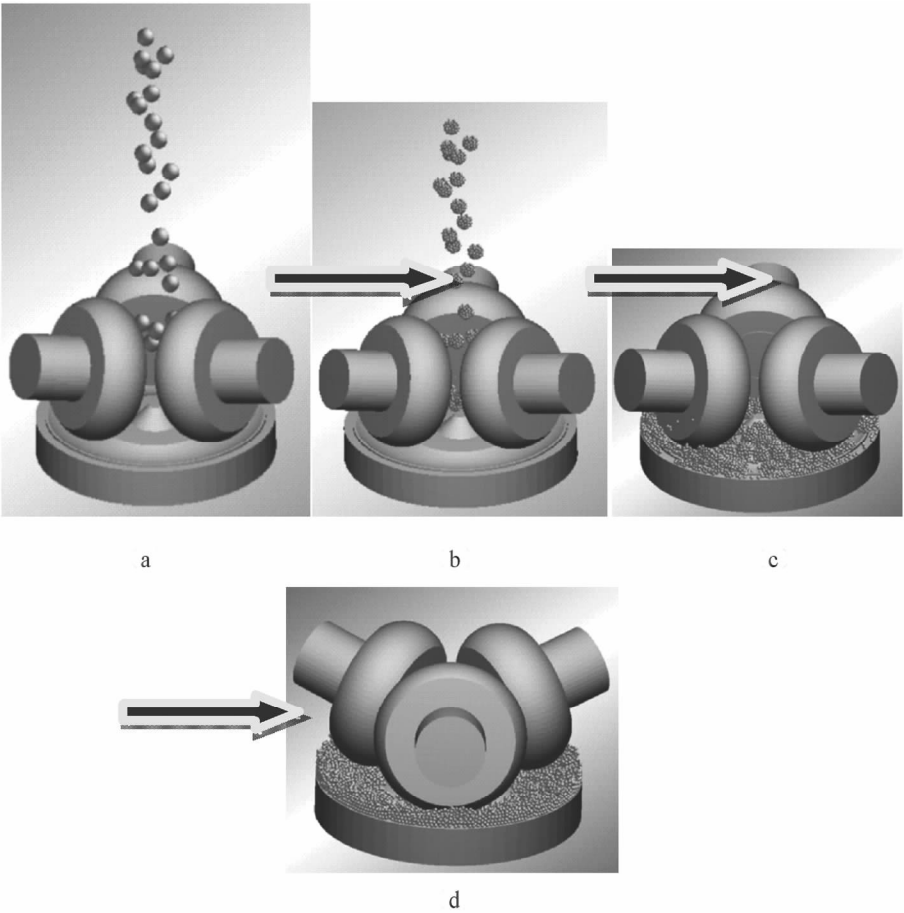


图 8 三个磨辊形成料床过程

Fig. 8 The process of forming the material bed by using three grinding rolls

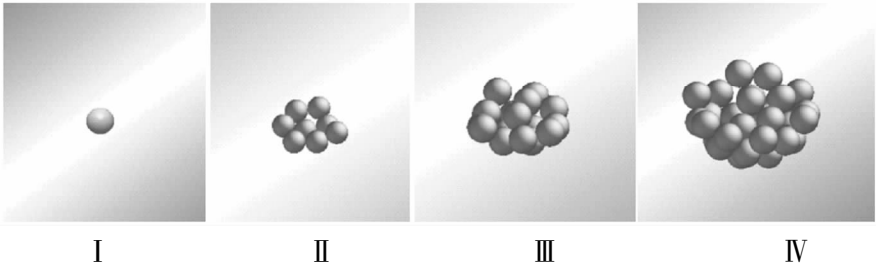


图 9 四种物料

Fig. 9 Four kinds of materials particles

投入不同大小未完全破碎的物料料床形成过程如图 11 所示:先由颗粒工厂(factory)产生 Whole 颗粒(图 11a);到了颗粒替换时间,先替换成 II 颗粒并在小颗粒之间形成黏结键(图 11b)。再重复前面的步骤,产生 Whole 颗粒,依次替换成 III、IV 颗粒,如图 11c ~ 11f 所示。II、III、IV 颗粒总共分批投入 3 次,3 种物料颗粒每次添加的个数都相同,后 2 次投料的方法步骤同图 11a ~ 11f;最后为 I 颗粒替换,因为 I 颗粒为 Fraction 颗粒,前面已经定义好,不用进行替换,直接由颗粒工厂

产生 Fraction 颗粒就行,如图 11g 所示。I 颗粒分批投入 2 次即可,每次添加的物料个数都相同,第二次投料的方法步骤同图 11g。物料投入完毕后,随着磨盘离心力的作用,4 种物料逐渐相互混合并运动到磨辊下方,通过磨辊的碾压,逐渐形成料床,如图 11h 所示。

4 结果与讨论

3 种仿真方案磨辊周围生成的料床如图 12 ~ 图 14 所示。分别从仿真快慢、生成的 Fraction 颗

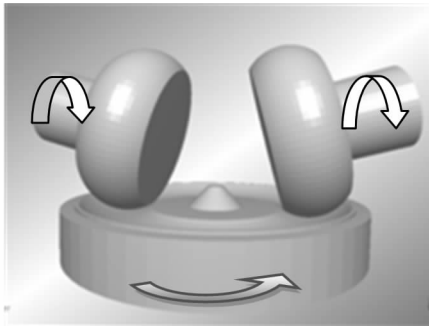


图 10 立式辊磨机的运转方向
Fig. 10 Rotation direction of vertical roller mill

粒个数(因为物料颗粒都是由 Fraction 颗粒构成的,统计其个数最为直接)、磨辊个数、料床生成情况、存在的问题、优点方面进行比较,结果如表 4 所示。

从图 12 ~ 图 14 和表 4 可以看出,方案 1 虽然仿真效率最高,但是存在的问题也很多,尤其是在形成料床方面;方案 2 仿真时间过长导致后续对料床粉碎的相关研究可能会花费大量时间,降低效率;方案 3 和方案 2 类似,但是省去了破碎物料颗粒这个环节,为形成料床节约了大量时间。

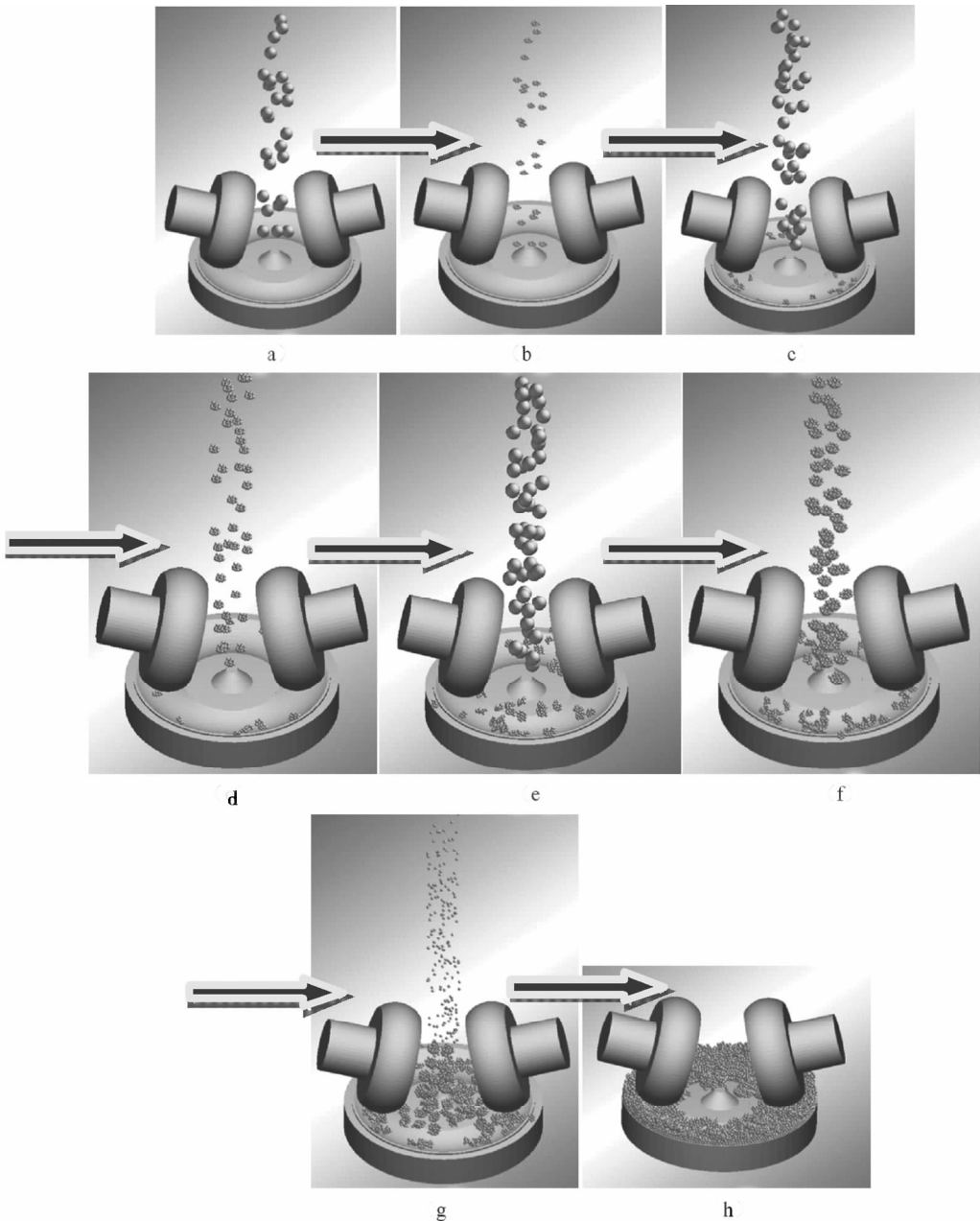
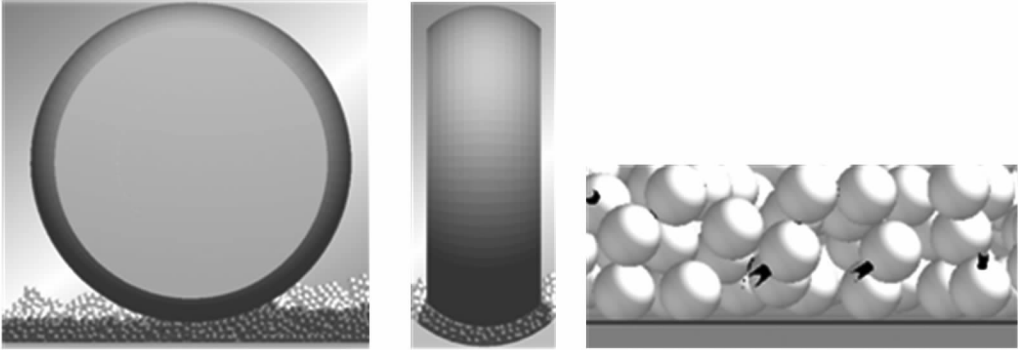


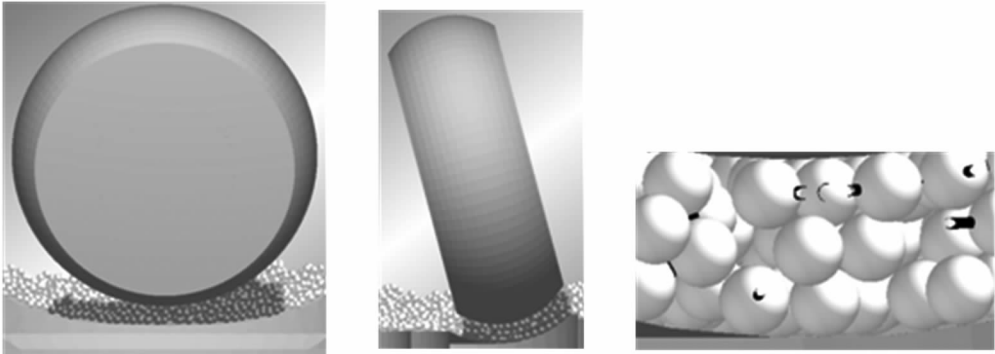
图 11 投入不同大小未完全破碎的物料形成料床过程
Fig. 11 The process of forming the material bed by putting into the different sizes of the material particles that are not broken completely



a 料床主视图 b 料床右视图 c 局部放大图

图 12 直线型磨盘形成的料床

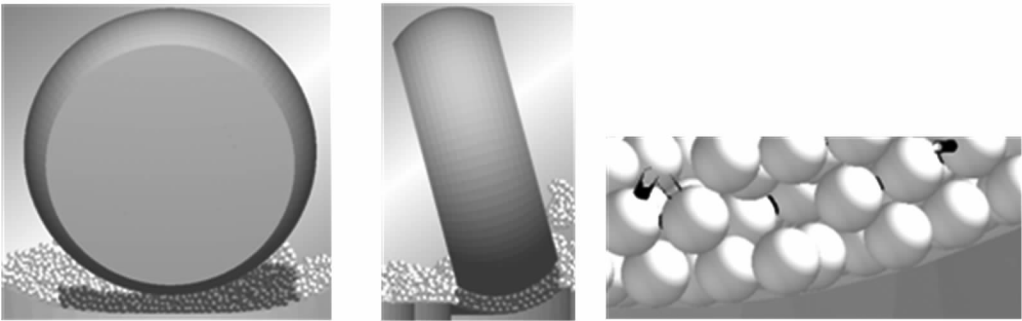
Fig. 12 The material bed formed by linear millstone



a 料床主视图 b 料床右视图 c 局部放大图

图 13 增加磨辊个数形成的料床

Fig. 13 The material bed formed by three grinding rolls



a 料床主视图 b 料床右视图 c 局部放大图

图 14 投入不同大小未完全破碎的物料形成的料床

Fig. 14 The material bed formed by different sizes of the material particles that are not broken completely

表 4 3 种方案的比较
Table 4 Comparison of three programs

方案	仿真快慢	Fraction 颗粒个数	磨辊个数	料床生成情况	存在问题	优点
1	快	6500	2	不易生成料床,或料床生成后磨盘的速度、运动方向控制不当,料床会消失	缺少离心力,需要不停控制磨盘和磨辊运动方向,操作复杂,料床不易生成	仿真时间快,物料颗粒数少
2	慢	8060	3	料床易生成	物料颗粒数多,仿真时间长	与实际情况更为接近
3	较快	8000	2	料床易生成	物料颗粒数多,仿真时间较长,操作复杂	节约了破碎物料颗粒的时间

综合各种因素,方案 3 无论是从仿真效率还是与实际情况相符来看,都比另外两个方案略有优势。因此,最终确定方案 3 为基于 EDEM 的高效生成料床的最佳方案。

参考文献:

[1] 刘子河. 料床粉碎原理与立磨节能[C]. 华北地区硅酸盐学会第九届学术交流会论文集,2008;137-147.

[2] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22): 36-42.

[3] 郑浩龙. 基于离散元的层压破碎模型及破碎过程的研究[D]. 赣州:江西理工大学,2015.

[4] 谢仁海,渠天祥,钱光谟. 构造地质学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2007.

[5] 肖观发. 基于 EDEM 的颞式破碎机衬板参数分析与结构优化[D]. 赣州:江西理工大学,2015.

[6] 聂景亮. 立式磨粉磨性能分析与仿真实验技术研究[D]. 济南:济南大学,2011.

[7] 雷强. 基于离散元的物料破碎机理研究[D]. 赣州:江西理工大学,2012.

[8] 王国强,郝万军,王继新,等. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业出版社,2010.

Research on Efficient Generation of Material Bed Based on EDEM

WANG Jingwen^{1,2}, LI Yihua¹, XU Ning², JIANG Dazhi²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China;)
(2. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224002, China)

Abstract: Because the environment of vertical roller mill material bed comminution is not conducive to observation and research, the problem can be solved by using the discrete element software-EDEM to simulate material bed comminution. By using EDEM simulation to generate the material bed of vertical roller mill, the feeding amount is the most fundamental factor compared with other conditions of forming material bed. Too much or too little is not conducive to the follow-up study. Aiming at this problem, three kinds of efficient generating material bed are proposed to reduce the simulation time and do not affect the feeding amount, which are using linear grinding disc, increasing the number of grinding rolls and the input of materials which are not completely broken in different sizes. By comparing the simulation results of the three methods, a simulation scheme based on EDEM efficient generating bed was established to determine the materials with different sizes of incomplete crushing finally.

Keywords: EDEM; material bed comminution; material bed simulation

(责任编辑:张英健)