

# 不同研磨介质填充率下球磨机内钢球碰撞研究<sup>①</sup>

袁文彬, 孙欣, 金凯, 王小龙, 张雁生

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:**以工业生产中使用的大型球磨机为例,将离散单元法应用到有效内径4.6 m的球磨机中,模拟研究研磨介质填充率对球磨机内部颗粒碰撞以及能耗的影响。结果表明,研磨介质填充率30%~35%时,研磨介质填充率增加,球磨机内部钢球与矿石之间的碰撞频次逐渐增加,但矿石与矿石之间的碰撞频次与总碰撞频次之比先增加后降低,且钢球与钢球、钢球与衬板之间的能量损失也会增加。增加球磨机研磨介质填充率不仅会降低球磨机磨矿效率、增加能量损失,还会增加磨机内部颗粒对衬板的磨损,不利于衬板的持续性使用。

**关键词:**球磨; 钢球; 研磨介质; 填充率; 离散单元法; 能量损失; 碰撞频次

中图分类号: TD921

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.012

文章编号: 0253-6099(2023)04-0057-04

## Investigation on Collision of Steel Balls in Ball Mills with Varied Filling Rates of Grinding Media

YUAN Wenbin, SUN Xin, JIN Kai, WANG Xiaolong, ZHANG Yansheng

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** A commercially applied large ball mill with an effective internal diameter of 4.6 m is taken for study, and the discrete element method (DEM) was introduced to simulate and investigate the influence of filling rate of grinding media (steel balls) on the collision of particles inside the mill and energy consumption. It is found that when the filling rate of grinding media is 30%–35%, the frequency of ball-ore collision increases gradually. However, the ratio of ore-ore collision frequency to the total collision frequency increases first and then decreases, and the energy loss for ball-ball and ball-liner collisions increases. It can be seen that increasing filling rate of grinding media may not only reduce grinding efficiency and increase energy loss, but also increase liner wear by steel ball, which is not conducive to sustainable usage of mill liner.

**Key words:** ball mill; steel ball; grinding media; filling rate; discrete element method (DEM); energy loss; frequency of collision

随着全球高品位矿石资源日渐衰竭,提高对低品位矿石资源的利用效率已经刻不容缓。球磨机具有结构简单、可执行性高等优点,同时也存在能量利用率不高、工作效率偏低等问题<sup>[1]</sup>。在选矿厂中,磨矿分级作业占据着选矿作业的大部分费用(约占选矿厂总费用的50%)<sup>[2]</sup>,即便是对球磨机磨矿工艺进行细微的提升,也能给整个矿物加工产业带来巨大的收益。为了在提高球磨机工作效率的同时降低球磨机能耗,国内外学者对影响球磨机工作效率的因素进行了诸多研究<sup>[3-5]</sup>。本文通过离散单元法模拟球磨机工作过程,研

究球磨机内钢球的运动状态以及不同研磨介质填充率下球磨机的能耗变化,为球磨机提能降耗提供一种新的方法。

### 1 数值模拟研究

球磨机不同填充率下研磨介质(钢球)的装载量可以通过以下公式确定:

$$G = V\varphi\delta_{球} \quad (1)$$

式中  $G$  为钢球装载量;  $V$  为磨机有效工作容积;  $\varphi$  为球磨机筒体内钢球填充率,或称装球率;  $\delta_{球}$  为钢球堆

① 收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(51974363)

作者简介: 袁文彬(1996—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,主要研究方向为球磨机数值仿真。

密度<sup>[6]</sup>。

研磨介质采用数量相等的配球法,直径 80 mm、100 mm、120 mm 的钢球质量分别为 2.09 kg、4.08 kg、7.06 kg,所以 3 种不同直径钢球的总质量  $m_{\text{总}} = m_{80\text{ mm}} + m_{100\text{ mm}} + m_{120\text{ mm}} = 13.23\text{ kg}$ 。

不同填充率下需要的每种直径的钢球个数  $N$  为:

$$N = \frac{G}{m_{\text{总}}} \quad (2)$$

本次采用有效内径 4.6 m、截面长度 0.5 m 的球磨机进行仿真,其中球磨机有效容积  $V = 9.387\text{ m}^3$ 。物料颗粒直径在 20 mm 到 30 mm 之间随机生成,物料总填充率为 10%,研磨介质填充率为 30%~35%。根据式(1)和式(2)可以得到不同研磨介质填充率下的钢球个数,如表 1 所示。

表 1 不同填充率下所需每种尺寸钢球数量

填充率/%	钢球数
30	1 029
31	1 063
32	1 097
33	1 132
34	1 166
35	1 200

## 2 EDEM 模拟

在整个球磨机筒体内部,颗粒间的碰撞情况十分复杂,而且具有非线性、大时滞、强耦合等特点,无法直观地对颗粒运动轨迹进行监测,通常都是根据现场经验来判断球磨机的运行状态。在球磨机内部,碰撞种类包括:矿石-钢球、钢球-钢球、钢球-衬板、矿石-衬板、矿石-矿石。其中,钢球-衬板和钢球-钢球这两种碰撞只会不断地对钢球与衬板造成磨损,不断消耗钢球以及衬板,降低它们的使用时长,这 2 种碰撞为无用碰撞;其他 3 种碰撞为有用碰撞。

### 2.1 离散单元法简介

离散单元法(DEM)是研究散体颗粒力学行为的一种数值方法,它将散体颗粒看成离散单元的集合,利用牛顿第二定律建立每个单元的运动方程并采用数值迭代求解,从而获得散体颗粒的整体运动形态<sup>[7]</sup>。离散单元法已被广泛应用于球磨机的仿真研究,研究人员利用离散元方法已经取得了具有现场指导意义的成果。EDEM 是由 DEM-Solution 公司开发的多用途三维离散单元分析软件,可用于工业中颗粒系统加工、处理及其处理设备生产操作的模拟分析<sup>[8]</sup>。EDEM 不仅可以模拟并追踪磨机内部每个颗粒的运动,而且可以记

录颗粒与颗粒以及颗粒与衬板间的碰撞情况。本文使用 EDEM 进行模拟分析。

### 2.2 仿真实触参数

在本次仿真中,球磨机转速为临界转速的 70%,每个条件下仿真时间为 15 s,瑞利时间步长为 25%。 $t = 0$  时,球磨机筒体内部开始生成钢球颗粒; $t = 0.5$  时,球磨机内部开始生成物料颗粒; $t = 1.5$  时,球磨机筒体开始转动。球磨机仿真运行过程如图 1 所示,材料参数及颗粒间仿真实触参数分别见表 2 和表 3。

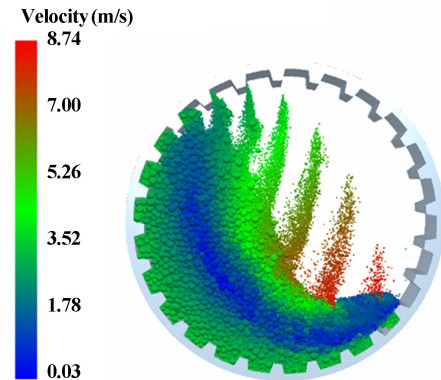


图 1 模拟球磨机运行过程

表 2 材料参数

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ )
钢球	0.3	$7 \times 10^{10}$	7.8
矿石	0.3	$2 \times 10^7$	2.678

表 3 接触参数

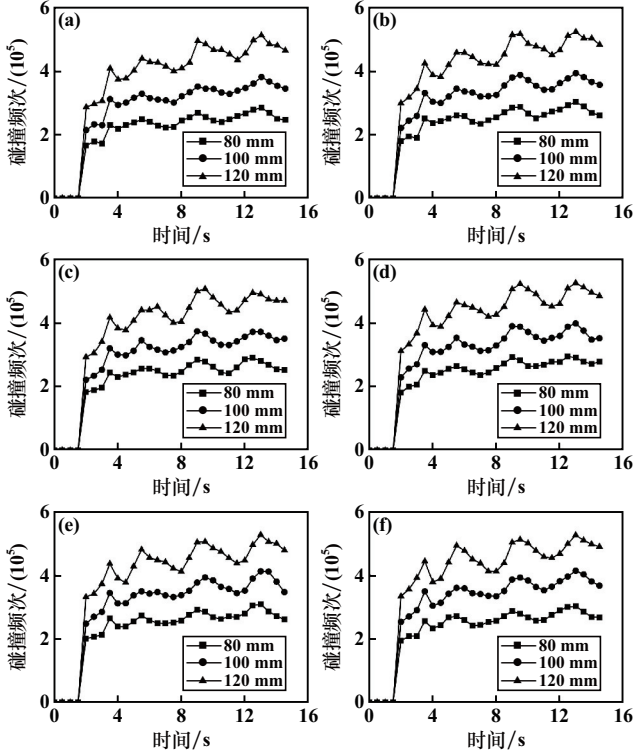
参数	钢球-钢球/钢球-衬板	钢球-矿石/衬板-矿石	矿石-矿石
恢复系数	0.5	0.2	0.1
静摩擦系数	0.5	0.5	0.545
滑动摩擦系数	0.01	0.01	0.01

## 3 结果与讨论

由图 1 可知,球磨机运行过程中,颗粒流清晰而密集,随着球磨机转动,大量的矿石颗粒做抛落运动,实际情况中,越多的颗粒做抛物线运动,代表了越多的颗粒具有较高的动能,所以球磨机的磨矿效率越高。而在靠近球磨机筒体的部分,大部分颗粒运动速度较低,在此区域,球磨机的研磨能力较强。

不同粒径(80 mm、100 mm、120 mm)钢球在不同填充率下的碰撞频次图谱如图 2 所示。由图 2 可知,不同粒径钢球的碰撞趋势基本一致。填充率 30% 时,各粒径钢球碰撞频次较低;随着研磨介质填充率逐步增加,钢球碰撞频次保持不变。由于球磨机筒体做周期转动,颗粒的运动轨迹也呈现出周期性改变,随着时

间推移,颗粒间碰撞频次逐渐趋于平稳。在各粒径钢球数量相等的情况下,钢球直径越大,钢球与不同颗粒间的接触面积越大,颗粒间碰撞的频次提高。由此也说明在粗磨条件下,直径大的钢球有助于提高研磨效率,应在合理条件下适当增加直径较大钢球的填充率。



(a) 30%; (b) 31%; (c) 32%; (d) 33%; (e) 34%; (f) 35%  
图 2 不同填充率下各尺寸钢球与矿石碰撞情况

通过 EDEM 软件统计颗粒间的碰撞分布情况可以更加精准地了解各颗粒间的碰撞情况。图 3 为不同磨矿介质填充率下钢球-矿石和矿石-矿石之间的碰撞频次占总碰撞频次的比值。由图 3 可知,在整个研磨过程中,矿石颗粒数量多,矿石颗粒之间的总碰撞频次高,其余碰撞主要发生在钢球与钢球或钢球与矿石之间。由于磨矿主要通过钢球对矿石进行破碎,钢球与矿石之间的碰撞情况是判断球磨机工作效率的一个重

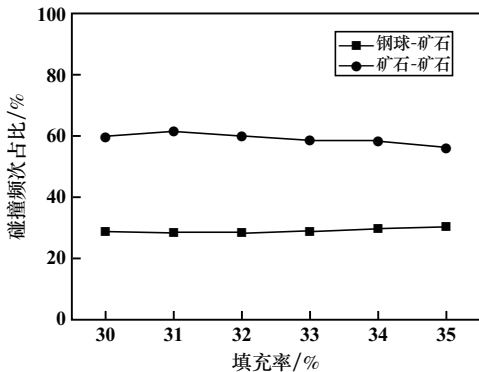


图 3 不同研磨介质填充率下钢球-矿石和矿石-矿石间的碰撞情况

要依据。由图 3 可知,在这 6 种填充率下,钢球与矿石之间的碰撞频次基本一致,而矿石与矿石之间的碰撞频次随着研磨介质填充率增加先增加后降低,填充率 31% 时最高。综上,填充率 31% 时,球磨机能对矿石有较充分的研磨作用并进行破碎。

在球磨机内部,总能量损失包含了法向能量损失和切向能量损失。能量损失由球磨机内部颗粒间非弹性接触所致,其计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$E = E_n + E_s = \int_0^{t_{\text{contact}}} F_n d\xi_n + \int_0^{t_{\text{contact}}} F_s d\xi_s \quad (3)$$

式中  $F_n$  和  $F_s$  分别为法向接触力和切向接触力; $t_{\text{contact}}$  为碰撞过程的接触时间; $E_n$  和  $E_s$  分别为法向和切向碰撞能量损失; $\xi_n$  和  $\xi_s$  分别为法向和切向压缩位移。

磨矿过程中,法向力主要用于冲击破碎矿石,切向力主要用于研磨矿石,法向力和切向力做的功分别对应法相能量损失和切向能量损失。在本次仿真过程中,球磨机颗粒间碰撞的平均损失能量如图 4 所示。由图 4 可得,平均碰撞能量损失与研磨介质填充率之间的关系非常明显。填充率 31% 时,颗粒间平均损失能量较低;填充率 35% 时,平均损失能量较高。

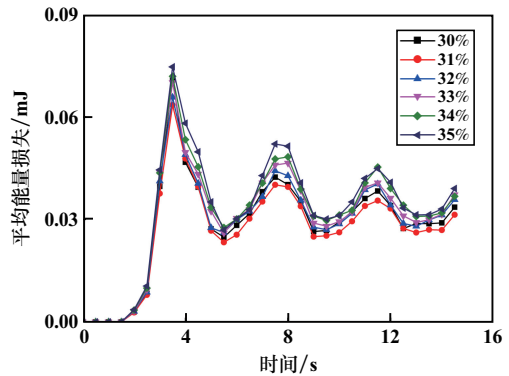


图 4 不同研磨介质填充率下平均损失能量随时间的变化

球磨机的能量主要消耗在以下几个方面<sup>[10-12]</sup>:① 破碎球磨机内部的矿石;② 颗粒对衬板的磨损;③ 球磨机转动过程中由于摩擦而产生的声音、热量以及弹性形变。通过 EDEM 对球磨机能量损失进行统计,结果见表 4。由表 4 可以看到,在各填充率下,钢球与钢球之间的碰撞能量损失均占总能量损失的 60% 以上。结合图 2 可知,虽然矿石与矿石之间碰撞频次是最高的,但钢球与钢球之间的碰撞能量损失是最高的,说明钢球与钢球之间的碰撞是低频高能碰撞,而矿石与矿石之间的碰撞是高频低能碰撞,这也从另一方面解释了球磨机效率低下的原因。钢球与矿石之间碰撞所损失的能量主要用于破碎矿石,而矿石与矿石之间的碰

撞不会对矿石产生破碎效果或只会产生微小的研磨效果。填充率31%时,钢球与钢球之间碰撞能量损失较低、钢球与矿石之间碰撞能量损失较高、钢球和矿石对衬板的磨损较小,说明在此条件下球磨机磨矿效率较高、能量损失较低、衬板磨损较小,为球磨机较优工况。

表4 不同研磨介质填充率下碰撞能量损失分布

碰撞方式	不同填充率下碰撞能量损失/%					
	30%	31%	32%	33%	34%	35%
钢球-钢球	67.3	60.6	72.4	68.2	66.9	70.2
钢球-矿石	20.2	22.4	17.0	19.1	19.3	17.7
钢球-衬板	0.8	0.7	0.5	0.8	1.0	1.9
矿石-矿石	11.1	15.6	9.9	11.2	12.2	9.5
矿石-衬板	0.6	0.8	0.3	0.7	0.6	0.7

## 4 结 论

1) 研磨介质填充率是影响球磨机工作效率的关键性因素之一。球磨机内部颗粒间发生有效碰撞以及颗粒间碰撞所产生的能量损失会随着研磨介质填充率改变而变化,进而影响球磨机的工作效率。

2) 仿真过程中,矿石颗粒间的碰撞频次最高,但绝大部分为低能碰撞。破碎矿石主要依靠钢球对矿石的冲击效果,钢球对矿石的切向力对研磨矿石起到一定的作用。

3) 研磨介质填充率31%时,钢球与钢球之间的能量损失较低,钢球与矿石之间的能量损失较高,钢球以及矿石对衬板的磨损较小,该工况下不仅可以提高球磨机磨矿效率,而且可以有效减少衬板磨损,提高衬板使用寿命。

## 参考文献:

- [1] Cleary P W, Cummins S J, Sinnott M D, et al. Advanced comminution modelling: Part 2 - Mills[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 88:307-348.
- [2] XIE C, MA H, SONG T, et al. DEM investigation of SAG mill with spherical grinding media and non-spherical ore based on polyhedron-sphere contact model[J]. Powder Technology, 2021, 386:154-165.
- [3] XIE C, ZHAO Y, SONG T, et al. Investigation of the effect of filling level on the wear and vibration of a SAG mill by DEM[J]. Particology, 2022, 63:24-34.
- [4] 王 晓. 基于 EDEM 的球磨机不同填充率下颗粒碰撞与能量变化探究[J]. 矿山机械, 2019, 47(8):29-34.
- [5] Cleary P W, Owen P. Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear[J]. Minerals Engineering, 2018, 117:42-62.
- [6] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [7] Cleary P W. A multiscale method for including fine particle effects in DEM models of grinding mills[J]. Minerals Engineering, 2015, 84:88-99.
- [8] 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] Cleary P W. Ball motion, axial segregation and power consumption in a full scale two chamber cement mill[J]. Minerals Engineering, 2009, 22:809-820.
- [10] Jacob W, Cooper D R, Gutowski T, et al. The efficiency of copper ore comminution: A thermodynamic exergy analysis[J]. Minerals Engineering, 2017, 109:21-31.
- [11] XU L, LUO K, ZHAO Y, et al. Influence of particle shape on liner wear in tumbling mills: A DEM study[J]. Powder Technology, 2019, 350:26-35.
- [12] 李腾飞,林蜀勇,张 博,等. 不同转速下球磨机内钢球的碰撞研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2):251-256.

引用本文: 袁文彬,孙 欣,金 凯,等. 不同研磨介质填充率下球磨机内钢球碰撞研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):57-60.

(上接第56页)

- [8] 杨有威,王有霖,罗玉霞,等. 温压条件下不同含水高岭石对  $\text{NH}_4^+$  吸附的分子模拟[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8):3720-3727.
- [9] 严华山. 稀土水合离子在高岭石表面吸附行为的第一性原理研究[D]. 赣州:江西理工大学资源与研究工程学院, 2019.
- [10] CHEN J, MIN F F, LIU L Y. The interactions between fine particles of coal and kaolinite in aqueous, insights from experiments and molecular simulations[J]. Applied Surface Science, 2019, 467-468:

12-21.

- [11] 危 阳,马新国,祝 林,等. 二硫化钼/石墨烯异质结的界面结合作用及其对带边电位影响的理论研究[J]. 物理学报, 2017, 66(8):267-276.

引用本文: 邹志强,黄李金鸿,李新冬,等. 铜离子和铵离子在高岭石表面的吸附机理研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):52-56.