

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.016

振幅对颤振球磨机粉磨效率的影响研究*

柳武辉, 单继宏*, 阙子俊

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要:针对颤振球磨机通过运动耦合增强粉磨能力的问题,基于 EDEM 仿真分析了不同振幅下筒体内介质运动形态,获得了不同振幅下磨机内介质碰撞能量分布,据此得出了各振幅下磨机粉磨能力的对比,然后通过调整振动电机内偏心块夹角改变了颤振球磨机的振幅,进行了不同振幅下的粉磨实验,验证了仿真分析得到的结果。仿真与粉磨实验研究结果表明:通过调整振幅可以改变磨机筒体内研磨介质的碰撞能量分布,采用大振幅有利于粉碎较粗物料,采用小振幅有利于粉碎较细物料,在粉磨过程中调整振幅以适应物料粒度的不断变化是提高磨机粉磨效率的有效途径。

关键词:振幅;研磨介质;粉磨效率

中图分类号:TH113.1;TG580.61+6;TD453

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0857-05

Effects of amplitude on grinding efficiency of flutter ball mill

LIU Wu-hui, SHAN Ji-hong, QUE Zi-jun

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Aiming at the problem that the grinding ability of flutter ball mill was enhanced via coupling movement, the movement of medium under different amplitude in the shell was simulated via EDEM, the impact energy distribution of medium in the ball mill under different amplitude was obtained, and the comparison of grinding capacity of the ball mill under different amplitude was given based on it. then, the amplitude of the flutter ball mill can be changed via adjusting the angle between eccentric blocks in vibratory motor, and the results of simulation and analysis was verified by the investigation of grinding experiments under different amplitude. The results of simulation and grinding experiment indicate that: the impact energy distribution of the medium in the shell of the flutter ball mill can be changed via adjusting the amplitude. Using large amplitude is in favor of crushing larger particles, and using small amplitude is in favor of crushing smaller particles. During the grinding process, selecting the appropriate amplitude to adapt to the change in particle size of material is an effective way to improve the grinding efficiency.

Key words: amplitude; grinding medium; grinding efficiency

0 引言

传统球磨机通过筒体的转动来实现研磨介质对物料的碎磨作用,筒体转速对介质运动状态的影响非常大,随着转速的逐渐提高,外层介质运动依次呈现泻落状态、抛落状态和离心运动状态^[1]。

振动磨机通过筒体的振动来使得介质与物料相互冲击,在高频率小振幅的工况下研磨是磨机主要碎磨

形式;在大振幅低频率工况时冲击是磨机主要碎磨形式^[2]。为了提高磨机处理矿物颗粒的能力,颤振球磨机是在传统球磨机的基础上引入了振动激励^[3],通过运动耦合使得磨机兼备传统磨机和振动磨机的优点。有研究表明颤振球磨机随着振幅的增大低能量碰撞减少而高能量碰撞增多,振幅越大越适合粉碎最佳碰撞能量大的物料^[4]。对于特定粒度的石英砂物料,振幅作为颤振球磨机的一个运动激励参数对粉磨效率有着

收稿日期:2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275474);浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E05002)

作者简介:柳武辉(1989-),男,湖北咸宁人,主要从事矿山机械方面的研究. E-mail:lovewishhappy@sina.com

通信联系人:单继宏,男,副教授. E-mail: shanjh@zjut.edu.cn

重要影响,在筒体转速和振动频率不变的情况下如何选择合适的振幅,以获得更高粉磨效率是一个有待解决的问题。

基于 EDEM 能够仿真不同振幅下磨机筒体内研磨介质的运动形态^[5],获得筒体内介质碰撞能量分布随振幅变化的规律。本研究在仿真基础上进行不同振幅条件下的石英砂粉磨实验,得到粉磨效率随振幅变化的规律。通过粉磨实验验证仿真分析的正确性,同时为选择合适的振幅以提高颤振球磨机的粉磨效率提供依据。

1 仿真分析

1.1 仿真环境参数

颤振球磨机的整机模型如图 1 所示。



图 1 颤振球磨机

磨机筒体尺寸为 $\Phi 600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,在 EDEM 中设置介质和筒体的材料属性等参数如表 1 所示。

表 1 材料属性

参数	介质	筒体
密度/(kg/m^3)	7 800	7 980
剪切模量/Pa	6.18×10^{10}	2.46×10^{11}
泊松比	0.27	0.22
恢复系数	0.5	0.55
静摩擦系数	0.18	0.3
动摩擦系数	0.15	0.18

磨机筒体内不加衬板,不加物料,介质填充率取 45%,根据磨机筒体尺寸可得介质的总质量 172.5 kg,介质数量如表 2 所示。

表 2 介质参数

直径/mm	20	12	8
质量比例/(%)	30	60	10
个数	1 583	14 666	8 250

各组仿真中振动频率为 11.6 Hz,转速率为 75%,本研究将振幅大小作为唯一变量,进行不同振幅下研磨介质运动形态的仿真分析。

1.2 仿真结果分析

仿真时间设置为 6 s,统计各振幅下研磨介质碰撞

能耗,结果如图 2 所示。

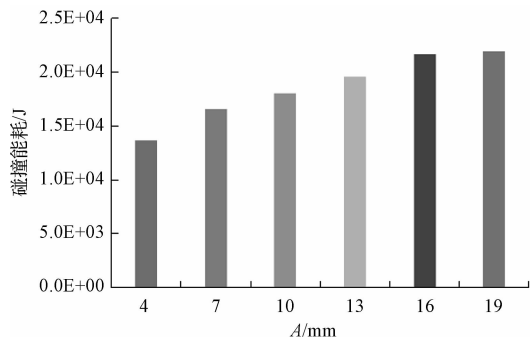


图 2 研磨介质碰撞能耗

图 2 显示不同振幅下研磨介质碰撞能耗,碰撞能耗随着振幅的增大而增大,振幅 16 mm 和振幅 19 mm 对应的研磨介质碰撞能耗几乎相等,这表明在一定条件下增大振幅不会无限制的增大碰撞能耗。将碰撞能量范围 $10^{-2} \text{ J} \sim 10^{-1} \text{ J}$ 定义为能级 1,范围 $10^{-3} \text{ J} \sim 10^{-2} \text{ J}$ 定义为能级 2,范围 $10^{-4} \text{ J} \sim 10^{-3} \text{ J}$ 定义为能级 3,范围 $10^{-5} \text{ J} \sim 10^{-4} \text{ J}$ 定义为能级 4。统计得出各能级能耗占总能耗的比例,得到各能级碰撞对总碰撞的贡献比例如图 3 所示。

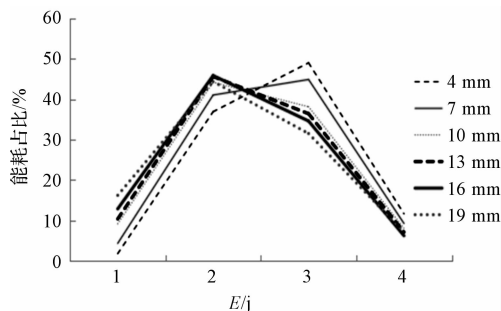


图 3 能耗比例随能级变化图

据图 3 显示,能耗比例随能级变化,随着振幅的增大能级 3 和能级 4 的能耗占比逐渐减小,而能级 2 和能级 1 的占比逐渐增大,改变振幅会改变碰撞能量分布,且改变幅度最高能够达到 18%。

有学者研究认为对于一定粒度的物料碰撞能量分布较窄的塔磨机比碰撞能量分布较宽的球磨机具有更高的能量效率^[6],从仿真结果可以看出,增大振幅一方面使得筒体内介质总碰撞能量增多,另一方面可以改变碰撞能量分布,使得碰撞能量更多的集中在能级 1 和能级 2,而减少低能级 3 和能级 4 的能耗比例。改变振幅具备调整碰撞能量

分布的功能,为了研究振幅对颤振球磨机粉磨效率的影响,本研究在其他参数不变的情况下进行了不同振幅下的石英砂粉磨实验。

2 实验及结果分析

颤振球磨机筒体尺寸为 $\Phi 600 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$,笔者将中间隔开分为两仓,进行半仓实验。磨机配备转动

和振动电机,对转动电机调频可以控制转速,对振动电机调频可以控制振动频率,而调节振动电机内部偏心块夹角可以调节磨机振幅。通过改变振幅可以调整磨介的运动形态,从而改变磨机粉磨效率。不考虑振动对磨机临界转速^[7]的影响,本研究取转速率为75%,则转动角速度为4.3 rad/s。取填充为45%,空隙率为0.38^[8],则介质总质量为258.7 kg,各尺寸钢球的质量比例与表2相同。

2.1 实验方法

物料为普通水洗石英砂,经烘干筛分处理,其粒度组成如表3所示。

表3 石英砂粒度分布

粒度范围/目	+20	-20+40	-40+120
占比/(%)	15	80	5

笔者取料球比为0.6^[9],石英砂的密度为2.65 g/cm³,则物料的质量为32.3 kg。设定筒体的振动频率为11.6 Hz,在粉磨实验开始前,将加速度传感器安装在轴承座上^[10],测定了振动电机内偏心块的夹角与振幅的关系如表4所示。

表4 振幅实验

实验组	偏心块夹角/(°)	平均筒体振幅/mm
1	150	7
2	140	11
3	120	16

每组粉磨实验总时间为60 min,从20 min开始,每隔20 min随机取样3次,然后对获取的粉体样品进行筛分,得到整个粉磨过程中物料粒度变化情况,进行一组粉磨实验的流程如图4所示。

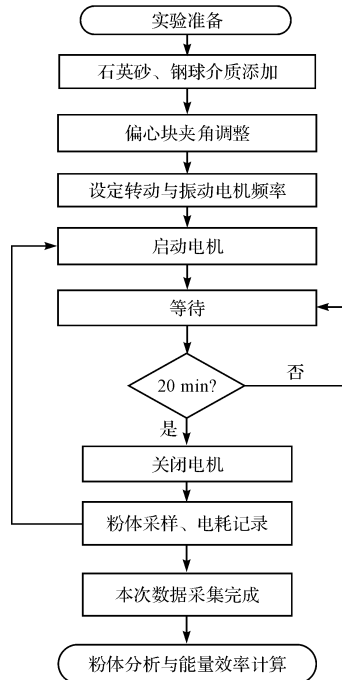


图4 粉磨实验流程图

2.2 实验结果分析

本研究将时间0~20 min定义为粉磨初始时段1,20 min~40 min定义为粉磨中间时段2,40 min~60 min定义为粉磨后续时段3,在不同的振动频率下颤振球磨机总电耗如表5所示。

表5 不同振幅下粉磨各时段电耗

实验组	各时段能耗/(kw·h)		
	时段1	时段2	时段3
1	0.67	0.69	0.68
2	0.65	0.67	0.67
3	0.66	0.65	0.68

据表5显示,总电耗随着振幅的增大而增大,采用较小的振幅能耗会更小。将随机采取的样本混合均匀进行筛分,其筛分结果如表(6~8)所示。

表6 实验1组粉体累计筛下质量百分比

目数	各时间点质量百分比/(%)		
	20 min	40 min	60 min
-16	100.0	100.0	100.0
-20	91.6	98.2	99.0
-40	58.4	92.2	98.0
-80	30.0	84.8	97.0
-100	25.4	83.2	96.8
-120	18.2	79.0	96.6
-200	14.6	73.6	96.4
-325	8.6	50.6	85.2

表7 实验2组粉体累计筛下质量百分比

目数	各时间点质量百分比/(%)		
	20 min	40 min	60 min
-16	100.0	100.0	100.0
-20	89.1	96.6	99.0
-40	54.1	87.4	97.2
-80	32.4	78.1	96.2
-100	29.0	76.5	96.2
-120	24.7	72.3	95.8
-200	21.9	67.3	95.2
-325	15.6	50.0	79.2

表8 实验3组粉体累计筛下质量百分比

目数	各时间点质量百分比/(%)		
	20 min	40 min	60 min
-16	100.0	100.0	100.0
-20	93.1	96.9	99.0
-40	61.7	86.8	97.2
-80	37.1	76.1	95.5
-100	33.4	73.9	95.3
-120	27.3	69.2	94.7
-200	23.8	63.8	93.6
-325	15.9	46.4	77.0

本研究将单位能耗生产的粉体质量定义为能量效率,根据表(5~8)得到各粉磨时段平均能量效率随振幅变化情况如图5所示。

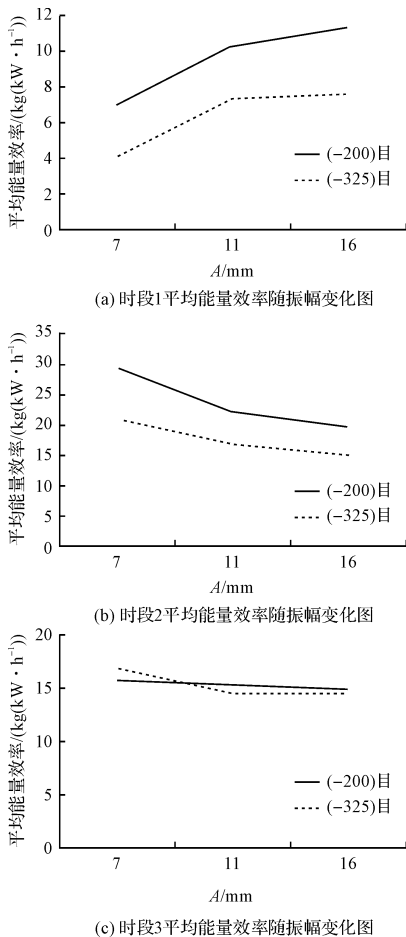


图5 各时段平均能量效率随振幅变化图

(1) 粉磨初始时段中平均能量效率随振幅变化如图5(a)所示。-200目曲线和-325目曲线的变化趋势大致相同,且-200目的曲线一直高于-325目曲线,该阶段以产生-200目的石英砂粉体为主。在振幅7 mm~14 mm区间,石英砂粉体平均能量效率随着振幅的增大而增大,该阶段以冲击碎磨为主。仿真中总能耗随着振幅的增大而增大,且能级1和能级2的能耗比例随着振幅的增大而增大,这说明高能级碰撞适合粉碎较粗物料。

(2) 粉磨中间时段平均能量效率随振幅变化如图5(b)所示。-200目曲线和-325目曲线的变化趋势大致相同,且-200目的曲线一直高于-325目曲线,该阶段以产生-200目的石英砂粉体为主。在振幅7 mm~14 mm区间,石英砂粉体平均能量效率随着振幅的增大而减小,该阶段仍然以冲击碎磨为主。仿真中能级3和能级4的能耗比例随着振幅的增大而大幅减小,这说明较低能级适合粉碎较细物料。

(3) 粉磨后续时段中平均能量效率随振幅变化如图5(c)所示。-200目曲线和-325目曲线有交叉点,在该时段筒体内的-200目的粉体占比80%以上,该阶段以产生-325目的石英砂粉体为主。在振幅

7 mm~11 mm区间,-325目石英砂粉体平均能量效率随振幅增大减小,该阶段以研磨粉碎为主。仿真中研磨介质碰撞能耗随着振幅的增大而增大,但碰撞能耗的增大在该阶段并没有起到提高粉磨效率的作用。同时提高振幅使得能级3和能级4的低能量碰撞减小,反而导致振幅越大粉磨效率越低。综合来看在后续粉磨阶段振幅对平均能量效率的影响较小,但采用较小的振幅更节能。

3 结束语

振幅作为颤振球磨机的一个运动激励参数对粉磨效率有重要影响,本研究利用 EDEM 仿真分析了振幅对磨机粉磨效率的影响,并进行了相关的验证性粉磨实验,得出以下重要结论:

(1) 改变振幅可以调整磨机筒体内介质的碰撞能量分布,高振幅时有更多碰撞能耗发生在高能级区域,低振幅时有更多碰撞能耗发生在低能级区域。

(2) 物料较粗时,振幅越大能量效率越高;物料较细小时,振幅越低能量效率越高;随时间推移物料粒度不断变细,应不断降低振幅以使得碰撞能量分布适应物料粒度变化。

(3) 在粉磨过程中调整振幅会有一定的停机时间,如何改进振幅调整方法,设计一套振幅随物料粒度变化的系统以获得更高的粉磨效率是有待解决的问题。

参考文献 (References):

- [1] 刘宇. 球磨机介质运动的实验与仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学动力与机械学院, 2011.
- [2] 彭猛. 振动磨机离散磨介动力学破碎机理研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学机电工程学院, 2009.
- [3] 应男, 孙毅, 毛亚郎. 颤振球磨机整机模态分析研究[J]. 矿山机械, 2012, 40(2): 58-61.
- [4] 应男. 颤振球磨机的介质碰撞能量与粉碎性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2012.
- [5] 陈焯, 李爱峰, 李光, 等. 大型液压挖掘机斗杆挖掘阻力的离散元素法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 79-02.
- [6] MORRISON R D, CLEARY P W, SINNOTT M D. Using DEM to compare the energy efficiency of pilot scale ball and tower mills[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(7): 66-72.
- [7] 梁曼, 孙毅, 纪朋朋, 等. 正多边形角螺旋衬板对球磨机粉磨效率影响的数值分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 20-12.
- [8] 汤健, 赵立杰, 岳恒, 等. 基于多源数据特征融合的球磨机负荷软测量[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(7): 140-413.
- [9] 畅晓亮, 董为民, 曹雪丽. 料球比对球磨机磨矿效果影响

的试验研究[J]. 新技术新工艺,2012(2):4-6.

机料位检测[J]. 机电工程,2008,25(4):9-4.

[10] 杨孝威,许飞云,贾民平. 基于振动信号小波分析的球磨

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

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.

LIU Wu-hui, SHAN Ji-hong, QUE Zi-jun. Effects of amplitude on grinding efficiency of flutter ball mill[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):857-861.
《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第 830 页)

3 结束语

本研究将球磨机内颗粒破碎的过程简化为磨介对颗粒床的多次冲击粉碎过程,通过单次碰撞下粒级 i 颗粒的破碎质量分数累计得到 t 时刻粒级 i 颗粒的破碎质量分数,最终理论推导得到粒级 i 的颗粒破碎率函数表达式。基于碰撞能分布仿真实验,并结合粉磨试验对推导的破碎率公式进行了验证,实例计算结果表明公式计算的破碎率值与 Kotake 粉磨实验中的破碎率值比较吻合,验证了推导的破碎率公式的适用性。

该破碎率函数的计算方法将颗粒的属性和球磨机操作参数对破碎率的影响区别开来,用 EDEM 仿真不同操作参数下球磨机内介质运动情况,方便计算不同球磨机操作参数下的破碎率参数。

参考文献(References):

- [1] 杨云山. 球磨机两种故障的处理[J]. 机电工程,2009,26(3):111-112.
- [2] 杨孝威,许飞云,贾民平. 基于振动信号小波分析的球磨机料位检测[J]. 机电工程,2008,25(4):91-94.
- [3] 梁曼,孙毅,纪朋朋,等. 正多边形角螺旋衬板对球磨机粉磨效果影响的数值分析[J]. 机械工程学报,2015,51(17):203-212.
- [4] GENÇÖ, ERGÜN İ, BENZER A H. The dependence of specific discharge and breakage rate functions on feed size distributions, operational and design parameters of industrial scale multi-compartment cement ball mills [J]. **Powder Technology**, 2013, 239(17):137-146.
- [5] GUPTA V K. Validation of an energy-size relationship obtained from a similarity solution to the batch grinding equation [J]. **Powder Technology**, 2013, 249(11):396-402.
- [6] AUSTIN L G. A review introduction to the mathematical description of grinding as a rate process [J]. **Powder Tech-**

nology, 1972, 5(1):1-17.

- [7] SHI F N, XIE W G. A specific energy-based size reduction model for batch ball mill [J]. **Minerals Engineering**, 2015, 70(1):130-140.
- [8] DATTA A, RAJAMANI R. A direct approach of modeling batch grinding in ball mills using population balance principles and impact energy distribution [J]. **Int J Miner Process**, 2002, 64(4):181-200.
- [9] BILGILI E, CAPECE M. Quantitative analysis of multi-particle interaction during particle breakage: A discrete non-linear population balance framework [J]. **Powder Technology**, 2011, 213(1-3):162-173.
- [10] GUPTA V K, SHARMA S. Analysis of ball mill grinding operation using mill power specific kinetic parameters [J]. **Advanced powder Technology**, 2014, 25(2):625-634.
- [11] PIEPER M, KUTELOVA Z, AMAN S, et al. Modeling of barite batch grinding in a vibratory disc mill [J]. **Advanced Powder Technology**. 2013, 24(1):229-234.
- [12] 毛亚郎,孙毅,计时鸣,等. 介质球间非限制料层加持形态研究[J]. 中国机械工程. 2014, 25(23):3212-3215.
- [13] VOGEL L, PEUKERT W. Breakage behaviour of different materials-construction of a mastercurve for the breakage probability [J]. **Powder Technology**, 2003, 129(129):101-110.
- [14] VOGEL L, PEUKERT W. From single particle impact behaviour to modeling of impact mills [J]. **Chem Eng Sci**, 2003, 8(1):203-210.
- [15] KOTAKE N, SUZUKI K, ASAHI Y, et al. Experimental study on the grinding rate constant of solid materials in a ball mill [J]. **Powder Technology**. 2002, 122(2-3):101-108.
- [16] KHANAL M, MORRISON R. Discrete element method study of abrasion [J]. **Minerals Engineering**, 2008, 21(11):751-760.

[编辑:李 辉]