

立轴冲击破碎机转子出料特性仿真实验

邢大伟, 房怀英, 杨建红

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 通过颗粒离散单元法建模,系统研究分析物料分布、转子结构参数和破碎机处理量的内在关系,优化设计转子的结构,提升破碎机的处理量.利用离散单元法进行参数优化仿真,大幅减少破碎机试制成本,缩短开发周期.结果表明:选择合适的分料盘高度和喂料环内径可使物料从出料口抛出的位置较为理想,颗粒分布的均匀性也有所改善;在结构允许的条件下,要采用小的分料盘夹角和落料高度.

关键词: 立轴破; 转子结构; 离散元; 处理量

中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A

立轴破起源于 20 世纪 70 年代的新西兰,我国于 20 世纪 90 年代开始引进生产^[1].立轴冲击式破碎机主要由转子、破碎腔、电机、传动装置、主轴系统、润滑系统以及电控系统组成^[2],广泛适用于各种岩石、水泥熟料等多种硬脆物料,对建筑、筑路用砂尤为适宜^[3].立轴冲击式破碎机核心技术和市场主要为国外大公司掌握,如 Bamac, Metso 及 Sandvik 等^[4].总体来说,由于理论研究不足,我国立轴冲击破碎机在设计制造上与世界先进水平有较大差距.对立轴冲击式破碎机的研究主要集中在对转子和破碎腔流场的研究^[5-6].王嵩等^[7]对不同流道口数下的转子进行了仿真分析,证明当采用 6 个流道口安装时,转子对颗粒的加速效果最好.对荷兰的 Kyran Csteel 制造样机进行试验,证明了同步转子概念^[8].制砂过程中,石料经常会在转子中堆积,导致出料口堵塞或者从入料口溢出,对转子以至于整个制砂系统的处理量产生很大影响,对稳定性、安全性都有极大的危害.因此,本文通过对颗粒离散单元法建模^[9],研究出料口处数据采集区通过的物料数量及均匀性分布情况.

1 立轴破碎机仿真建模

1.1 破碎机转子系统模型的构建

采用 US7 破碎机的转子,主要部件包括流道板、分料盘、同步抛料锤、喂料环、耐磨板等.转子的三维实体模型,如图 1(a)所示.将转子三维实体模型导入离散单元法分析软件 EDEM 中,离散单元分析的模型,如图 1(b)所示.为简化计算过程,圆球形石料代替破碎石料.

1.2 离散元仿真条件和约束参数的设定

将模型导入离散元仿真软件中,设定颗粒与颗粒、颗粒与几何体相互作用的物理属性.沿 z 轴的重力加速度为 $-9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.按所查资料和现场调研数据,设定转子的材料为钢铁.钢铁料属性泊松比为 0.28,剪切模量为 71 MPa ,密度为 $7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.颗粒的材料属性泊松比为 0.2,剪切模量为 50 MPa ,密度为 $2\,640\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.颗粒与颗粒之间的材料恢复系数为 $0.1^{[10]}$,静摩擦系数为 0.545,滚动摩擦系数为 0.01.颗粒与转子之间的材料恢复系数为 0.2,静摩擦系数为 0.5,滚动摩擦系数为 0.01.为模拟实际工况,设定颗粒尺寸为 $0\sim13\text{ mm}$ 的正态分布,转子转速为 $831\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.为了模拟实际生产中的进料流^[11],创建一个与转子同轴的圆柱体颗粒工厂,设定颗粒生成速度为 $55\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,仿真时间为 10 s.

收稿日期: 2015-04-18

通信作者: 房怀英(1978-),女,副教授,博士,主要从事高端机制砂产品的研究. E-mail: happen@hqu.edu.cn.

基金项目: 国际科技合作与交流项目(2015DFA710402);福建省高校产学研合作科技重大项目(2014H6017);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(2014H6017)

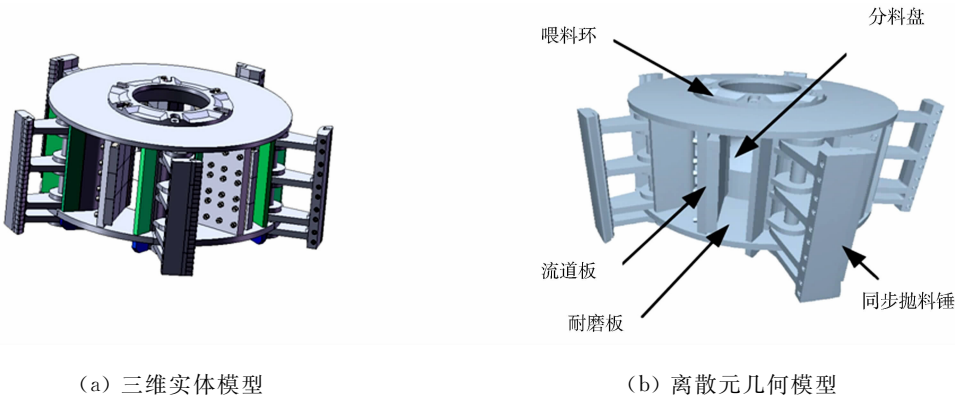


图 1 破碎机转子建模
Fig. 1 Model of the crusher rotor

2 仿真实验

物料进入转子后,被分料盘均匀地分成多股料流,并进入流道中^[12],在流道板上挤压、研磨破碎,最终经出料口甩出转子.为了研究不同的转子部件结构、落料参数和破碎机处理量特性关系,分别选取不同的分料盘高度、分料盘夹角、喂料环内径、落料高度进行离散单元仿真,分析出料口采集区颗粒的分布位置和均匀性,进而得出与破碎机处理量的特性关系.

2.1 出料口采集区域的设计

在出料口设计采集区域,单元区域的标号从下到上依次为 1~10.同时,让采集单元格随转子同速转动,颗粒在流道板上分布的均匀性,如图 2 所示.通过离散单元法仿真,统计每个采集区域通过颗粒的数量,找出颗粒在转子出料口的分布规律.

2.2 分料盘参数化仿真

在立轴冲击式破碎机中,分料盘作为转子内部第一个接触物料的部件,对物料起分流作用.分料盘的高度和夹角的改变对物料在流道板分布特性有较大影响,不同的分料盘高度使物料接触到分料盘的速度不同,反弹力、挤压力、摩擦力也会有所不同;不同的分料盘夹角使物料进入流道的速度和角度不同,将影响颗粒通过的均匀性.

分料盘结构,如图 3 所示.当分料盘夹角固定为 20°,高度(h)为 110,140,170,200,230 mm 时,进行转子抛料特性研究,如图 3(a)所示. h_1 保持不变,当 h 为 170 mm,分料盘夹角(θ)为 15°,20°,25°,30°,35°时,进行转子的抛料特性研究,如图 3(b)所示.由图 3 可知:顶部平面面积随夹角增大而增大.

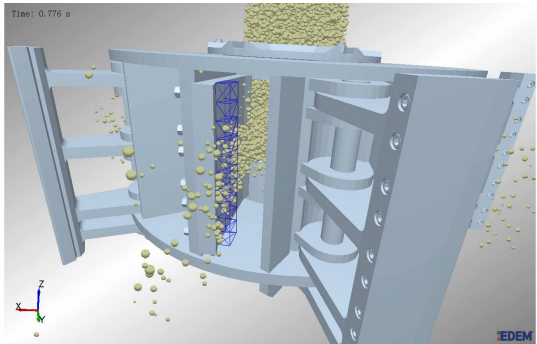


图 2 出料口采集区域
Fig. 2 Collection area on discharging outlet

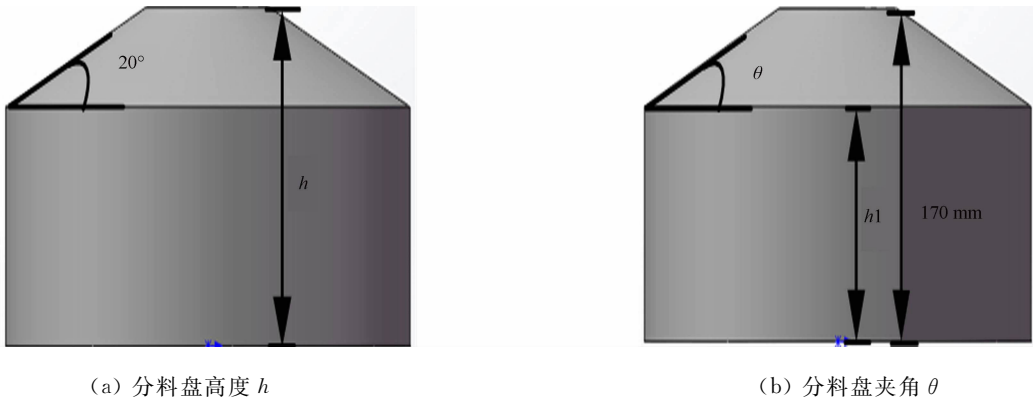


图 3 分料盘结构
Fig. 3 Structure of the material dispersing cone

不同分料盘高度下转子出料口上颗粒分布情况,如图 4(a)所示;分料盘高度对转子出料口颗粒分布均匀性的影响特性,如图 4(b)所示. 由图 4(a)可知:当分料盘高度较小时,颗粒在出料口抛出的位置较低,大部分颗粒从出料口的下半部分抛出;随着分料盘高度的增加,颗粒在出料口抛出的位置整体上升,接触流道板的初始高度也增加,之后,在离心力、摩擦力、重力、压力等合力的作用下,紧贴着流道板快速向转子外缘运动. 颗粒分布的均匀性随分料盘高度的增加先变优后变差,从仿真结果来看,选择 170 mm 左右分料盘高度能使大部分颗粒从出料口中部抛出,且均匀性较好.

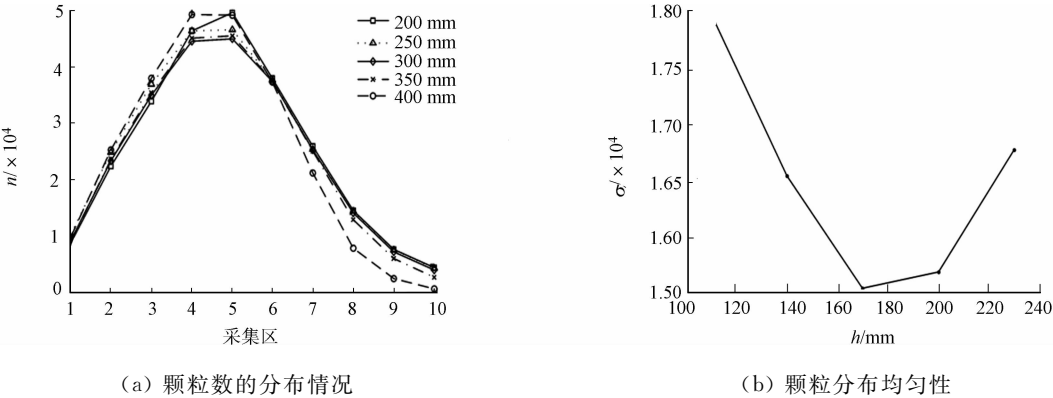


图 4 分料盘高度对颗粒分布的影响

Fig. 4 Influence of the material dispersing cone height on particle distribution

分料盘夹角对转子抛料特性的影响,如图 5 所示. 不同分料盘夹角下转子出料口上颗粒分布情况,如图 5(a)所示. 分料盘夹角对转子出料口颗粒分布均匀性的影响特性,如图 5(b)所示. 由图 5(a)可知:颗粒在 4,5 采集区域通过的颗粒数最多;在 1,10 采集区域通过的颗粒数最少;分料盘夹角的变化对颗粒在出料口的分布情况影响较小. 跟踪单颗物料颗粒和物料流的运动轨迹发现:物料在重力的作用下,以近铅垂的方向撞向分料盘,撞到分料盘上的大部分物料几乎无法反弹,而是在离心力、压力、摩擦力、重力等作用下直接在分料盘表面上分流.

在其他结构参数不变的情况下,分料盘的夹角越小,分料盘的顶部平面则越小,斜面面积越大. 增大的斜面面积有助于分料盘上物料的分流,提高转子的物料处理量. 小部分没有受到后续物料加入影响的物料,撞击到分料盘斜面后反弹,分料盘夹角越小,反弹到流道板上的竖直高度越大,使得通过出料口上部的颗粒数增多,抛出颗粒在出料口上分布的均匀性越好. 由图 5(b)可知:随着分料盘夹角的增大,颗粒在出料口分布的均匀性变差.

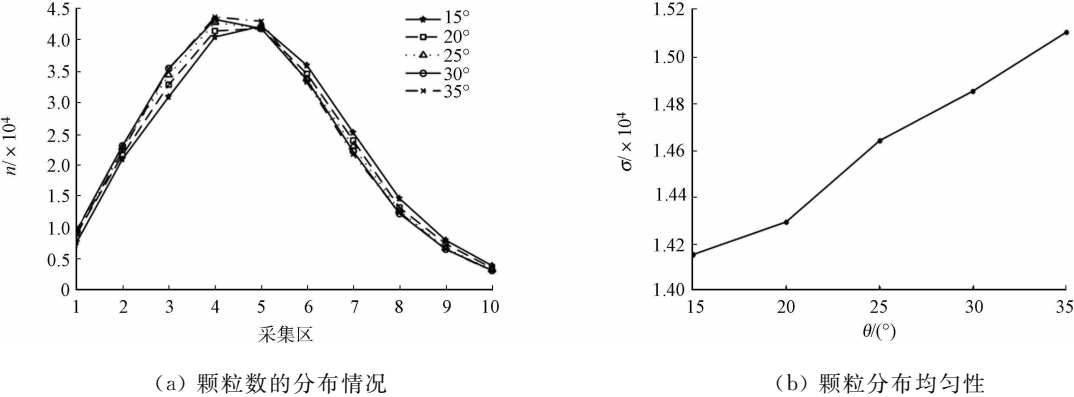


图 5 分料盘夹角对颗粒分布的影响

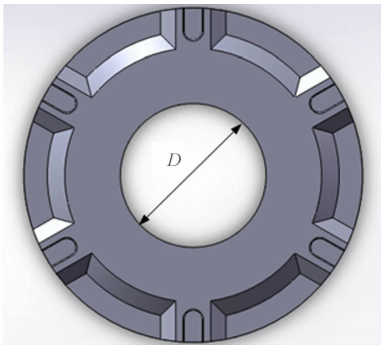
Fig. 5 Influence of the material dispersing cone angle on particle distribution

2.3 落料特性参数化仿真

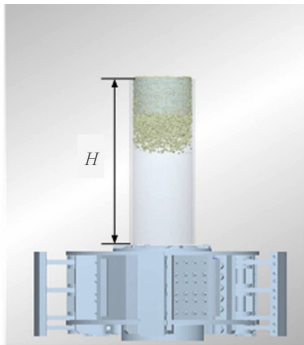
喂料环内径参数,如图 6(a)所示. 图 6(a)中:外径为 480 mm;内径(D)分别为 200, 250, 300, 350, 400 mm;分料盘锥底直径 395 mm;分料盘夹角为 20°. 落料高度参数(H),如图 6(b)所示. 图 6(b)中:高度为 660, 860, 1 060, 1 260, 1 460 mm.

在分料盘结构尺寸一定时,物料通过喂料环进入转子,不同的料流截面与分料盘的相对面积发生变

化,影响物料在分料盘上的反弹情况和分流效果;不同的落料高度直接影响物料进入转子内的速度,较高的落料高度导致颗粒与颗粒,颗粒与转子的撞击、干涉、挤压更强烈,直接影响颗粒分布均匀性。



(a) 喂料环内径 D

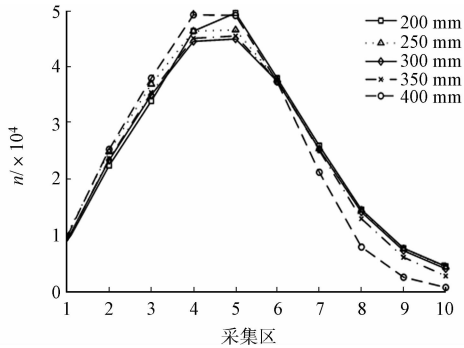


(b) 落料高度 H

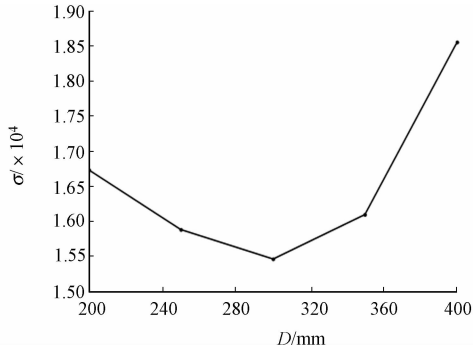
图 6 落料特性参数

Fig. 6 Feeding parameters

喂料环内径影响特性,如图 7 所示. 由图 7(a)可知:喂料环内径的改变对颗粒在出料口处的整体分布趋势影响不大,多数物料分布在 3~6 采集区内. 由图 7(b)可知:颗粒分布的均匀性会随喂料环内径的增加,先减小后增大。



(a) 颗粒数的分布情况



(b) 颗粒分布均匀性

图 7 喂料环内径对颗粒分布的影响

Fig. 7 Influence of the feeding ring inner diameter on particle distribution

颗粒反弹路径图,如图 8 所示. 图 8 中:分料盘顶部平面直径为 120.25 mm. 由图 8 可知:当喂料环内径较小时,进入转子的物料多数接触分料盘的顶部平面,并受到后续进料的干涉,无法反弹,进入转子的物料与分料盘接触的斜面面积小,不利于物料的分流;随着喂料环内径的增大,与分料盘的顶部平面接触的物料比例下降,可以反弹的物料比例增多,而斜面反弹点的高度降低(A,B 点所示),料流可接触的分料盘斜面面积增大,促进与分料盘接触料流的分流,提高物料分布的均匀性。

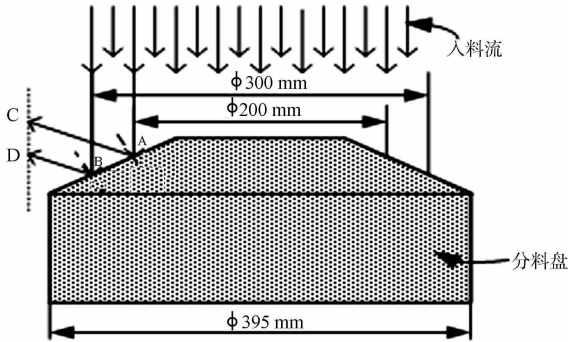


图 8 颗粒反弹路径

Fig. 8 Rebound paths of the particles

反弹后撞到流道板上的初始高度下降(C,D 两点所示),从而造成了图 7(a)中随着喂料环内径增大,出料口下部颗粒数增多,上部颗粒数减小的现象. 当喂料环内径增大到 400 mm 时,料流与分料盘接触点高度进一步降低,出料口上部颗粒数减小,且此时料流截面大于分料盘的直径,分料盘底部堆料严重,出料口物料分布均匀性急剧下降,从仿真的数据来看,应取 300 mm 左右的喂料环内径。

不同落料高度下,颗粒在出料口上的分布情况,如图 9 所示. 由图 9(a)可知:颗粒在出料口中间区域通过的颗粒数较多. 不断进入转子的颗粒会对已经接触到分料盘的颗粒产生挤压,最终使颗粒沿着分

料盘的斜面运动. 随着高度的增加, 这种挤压作用越强烈, 从而出现了实验结果中随落料高度的增加, 出料口上颗粒分布整体下移, 上部颗粒少的现象. 由图 9(b)可知: 颗粒在出料口分布的波动性增大, 但在仿真参数内, 颗粒分布均匀性增大值小于 5%, 因此, 可以忽略不计.

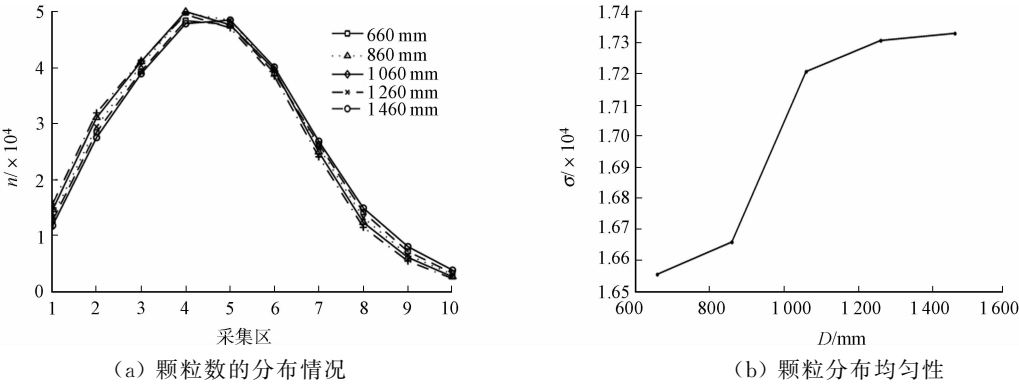


图 9 落料高度对颗粒分布的影响

Fig. 9 Influence of the feeding height on particle distribution

3 抛料特性对处理量的影响

物料被转子抛出后, 在破碎室内形成物料衬层. 在出料口上, 分布位置和均匀性的不同, 直接影响物料到达破碎腔内壁后形成物料衬层的形状和质量, 影响颗粒撞击到破碎腔内壁后反弹的速度大小和方向, 进一步对同步抛料锤的二次破碎和整形产生作用, 最终影响破碎效果和破碎机处理量.

不同落料高度下颗粒在出料口上的分布情况, 如图 10 所示. 当物料从转子出料口抛出的位置偏上、均匀性较差时, 物料在破碎腔内会形成物料衬层, 如图 10(a)所示. 此时的物料衬层上部大、下部小, 后续抛射进入的物料经物料衬层整体向下部反弹, 造成同步抛料锤的二次破碎的效果不佳, 且大量物料会堆积在出料整形区. 同时, 物料衬层也容易坍塌, 不利于对物料的整形和物料的下落, 影响处理量, 如图 10(b)所示. 当物料从转子出料口抛出的位置适中、均匀性较优时, 形成的物料衬层较为均匀, 质量高. 此时, 颗粒经反弹后的路径分散, 能充分发挥同步抛料锤的二次破碎功能, 在出料整形区对物料进行有效地研磨整形, 有助于物料的下落, 提高处理量. 当物料从转子出料口抛出的位置偏下、均匀性较差时, 物料在破碎腔内会形成物料衬层, 如图 10(c)所示. 大量的颗粒堆积在破碎腔下部, 降低了同步抛料锤在出料整形区的整形效果, 不利于物料的下落, 严重影响处理量, 甚至会造成转子堵塞, 引发安全事故. 因此, 当物料从转子出料口抛出的位置适中、均匀性较优时, 能提升破碎机处理量.

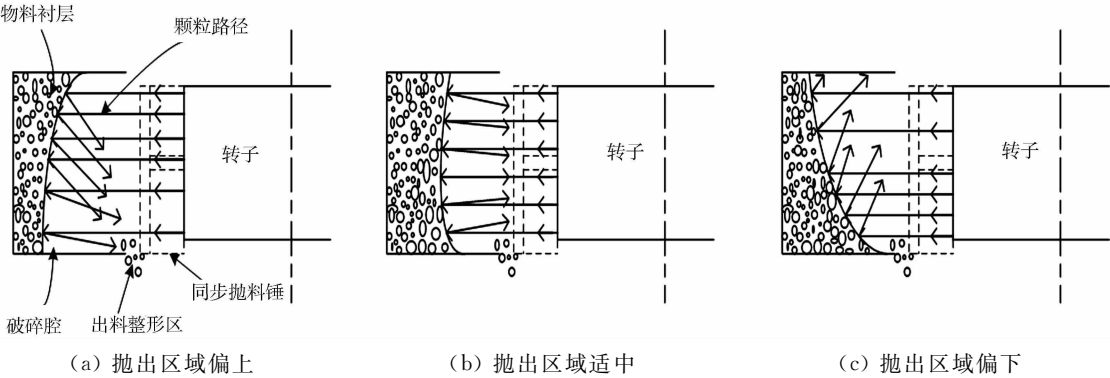


图 10 破碎腔内物料运动特性

Fig. 10 Motion characteristics of the particles in crushing chamber

4 结论

以提高破碎机处理量为研究目标, 对转子结构和落料特性进行优化, 构建冲击破碎机转子仿真模型. 基于离散单元法, 分析颗粒在出料口的分布特性. 仿真研究了分料盘高度、分料盘夹角、喂料环内径、

落料高度与出料口颗粒分布特性的关系,可以得出以下 4 种结论. 1) 随着分料盘高度增加,转子处理量也相应提高;当提高到一定高度时,出现峰值,之后,则呈下降趋势. 2) 增加分料盘夹角会降低转子出料特性,影响处理量. 3) 随着喂料环内径的增加,转子的处理量相应得到提高,增加到某一尺寸时,出现峰值,之后,呈下降趋势. 4) 不宜通过提升落料高度优化转子的处理量.

仿真研究生产参数对转子出料特性的影响规律,以提高破碎机处理量为目标优化转子的设计参数,为立轴冲击式破碎机的研究提供借鉴.

参考文献:

[1] DUAN De-rong,WANG Song,ZHAO Fang. Analysis of particle motion in vertical shaft impact crusher rotor[C]// 2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Switzerland: Trans Tech Publications, 2011:54-57.

[2] 刘敏芳. 立轴冲击式破碎机及磨损仿真研究[D]. 济南: 济南大学, 2008:1-7.

[3] 高澜庆,王文霞,马飞. 破碎机的发展与现状[J]. 冶金设备, 2001(4):13-15.

[4] 黎正辉,刘绍星,庞团结. 论立轴冲击破碎机制砂工艺[J]. 矿山机械, 2007,35(7):24-27.

[5] 张军明,赵方. 基于 ADAMS 的立轴冲击式破碎机转转载荷[J]. 煤炭学报, 2009,34(6):853-856.

[6] 孙成林. 破碎机的最新发展[J]. 中国粉体技术, 2006,6(2):32-39.

[7] WANG Song,ZHAO Fang,DUAN De-rong. Research of vertical shaft impact crusher rotor channels number based on EDEM[C]// Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering. Atlanta:IERI Press,2011:253-255.

[8] CATEEL K. Synchro inside[J]. World Mining Equipment, 2000(1/2):44-47.

[9] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010:10-35.

[10] 夏鹏,李郁,杨公波. 散粒物料堆积角离散元仿真研究[J]. 起重运输机械, 2015(2):107-109.

[11] 路文典. 立轴冲击式破碎机制砂规律与效果改进研究[J]. 水利水电施工, 2008,107(2):8-10.

[12] 鞠萍,朱东敏,刘劲松,等. 立轴冲击式破碎机转子的改进设计[J]. 现代机械, 2013(4):76-78.

Simulation Experiment Study on Discharging Characteristic
of A Vertical Shaft Impact Crusher Rotor

XING Da-wei, FANG Huai-ying, YANG Jian-hong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: By using the particle discrete element method, the internal relationship between material distribution, rotor structure parameters and processing capacity of the crusher was studied systematically. The structure of the rotor was optimized and the processing capacity of the crusher was improved accordingly. Using the discrete element method to optimize the simulation parameters can greatly reduce the production cost of the crusher as well as shorten the development cycle. Results show that selecting suitable material dispersing cone height and feeding ring inner diameter can make an ideal thrown position on the discharging outlet, and the particle distribution uniformity is also improved. Under the condition of structure permission, it is necessary to adopt small material dispersing cone angle and feeding height.

Keywords: vertical shaft crushing; rotor structure; discrete element; processing capacity

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 杨建红)