

文章编号:0253-9993(2013)08-1496-07

反击式破碎机破碎过程建模与仿真分析

赵丽梅¹,陈伦军¹,苏明²,何锋¹,张大斌¹,罗瑜¹

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学 机械与电气工程学院, 贵州 贵阳 550014)

摘要:为预测破碎产品粒度,有效控制破碎产品质量,基于总体平衡模型,建立了反击式破碎机的破碎过程模型,其中包括分级函数和破碎函数。确立了破碎产品粒度与破碎机转子半径、转子转速、给料粒度分布和给料速率的函数关系。为了解决给料粒度分布不均匀时,分析结果偏差较大的问题,提出采用粒度分布系数来描述给料粒度分布不均匀程度对分级函数的影响。利用CF250反击式破碎机进行破碎试验,对试验数据进行统计回归分析,建立破碎过程模型。以CF400反击式破碎机为算例,对不同转子转速和给料速率下的破碎产品粒度进行了仿真和试验分析,通过仿真分析结果与CF400反击式破碎机破碎花岗岩的试验数据相对比,验证了模型的可行性和可靠性。

关键词:破碎机;总体平衡模型;破碎过程模型;粒度分布

中图分类号:TD451 **文献标志码:**A

Modeling and simulation on crushing process of impact crusher

ZHAO Li-mei¹, CHEN Lun-jun¹, SU Ming², HE Feng¹, ZHANG Da-bin¹, LUO Yu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Mechanical & Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550014, China)

Abstract: In order to predict the size distribution of crushed product and effectively control the quality of crushed product, a model of crushing process based on population balance model in impact crushers was built incorporating classification and breakage matrices. The product size distribution was obtained as a function of the crusher's rotor radius and velocity, the feed size distribution and the feed rate. To solve the deviation in analysis results, a size distribution coefficient was introduced to describe the classification function effects due to the uneven feed size distribution. The crushing process experiment was performed by CF250 impact crusher. The test data from the crusher were regressed, and then the model of crushing process was built. Based on the model, the variations of the product size distribution resulting from the changes in rotor velocity and feed rate were investigated. The simulation results validate the feasibility and reliability of the model by comparing the experimental data from the CF400 impact crusher in granite crushing.

Key words: crusher; population balance model; model of crushing process; size distribution

反击式破碎机是在锤式破碎机基础上发展起来的一种新型高效破碎机。与颚式、圆锥和辊式等破碎机相比,反击式破碎机具有破碎比大、产品粒形好等特点,使反击式破碎机在众多的破碎机械中占有重要地位,在冶金、矿山、建材、化工、陶瓷、筑路等行业中有着广泛的应用^[1]。

破碎产品粒度是反击式破碎机的重要经济指标和技术性能指标,破碎产品粒度体现了破碎机工作性能的优劣,直接影响破碎机用户的经济效益,进而也影响破碎机生产厂家的经济效益^[2]。在破碎处理作业流水线上,必须对破碎模式进行优化组合,其中最重要的内容之一就是实现各破碎模块之间粒度的匹

收稿日期:2012-08-02 责任编辑:许书阁

基金项目:国家科技支撑计划专题资助项目(2011BAF07B01);贵州省重大专项资助项目(黔科合重大专项字[2011]6016);贵州省科学技术基金资助项目(黔科合J字[2012]2110号)

作者简介:赵丽梅(1975—),女,辽宁锦州人,副教授,博士研究生。Tel:0851-5281078, E-mail:zlm0226@163.com

配。通过破碎过程模型进行仿真,实现对反击式破碎机产品粒度的预测,就可以使各破碎模块的选择快速、准确。另外,通过模型仿真,在破碎机产品推广过程中可以方便地向用户展示用户的物料经破碎后生成的破碎产品的粒级组成,有助于更好地展现破碎机的优势。近年来,对破碎过程操作模型的深入研究已经引起国内外学者的广泛关注,并取得一大批卓有成效的研究成果^[2-8]。但针对反击式破碎机破碎过程研究的报道并不多。因此,建立反击式破碎机破碎过程仿真模型,通过模型深入研究破碎机的结构参数和工作参数对破碎产品粒度的影响,是一项非常具有理论和现实意义的工作,不仅可以实现对破碎机产品粒度的预测,而且为研制开发新型、高效、节能和环保的现代高能国产反击式破碎机奠定理论基础。

1 反击式破碎机破碎过程模型

1.1 基于总体平衡模型的反击式破碎机破碎过程模型

总体平衡模型是指由各粒级颗粒组成的破碎产品总质量与这些散体物料在破碎前的总质量相等,也就是散体物料在破碎前后无论粒度发生怎样的变化,质量必须守恒。基于总体平衡模型 Whiten 提出的粒度分布模型^[9-10],如图 1 所示。进入破碎机的散体物料的破碎是随机发生的,破碎机内的破碎过程是具有选择性的,其中只有部分散体物料可以得到破碎,用分级函数矩阵 C 来描述, C 表示各粒级在分级后未受到破碎作用而返回的粗粒级质量分数。破碎产品粒度分布呈现一定的规律,可由破碎函数矩阵 B 描述。根据图 1 可以建立如式(1)所示的反击式破碎机破碎过程模型。

$$P = (I - C)(I - BC)^{-1}F \quad (1)$$

式中, F 和 P 分别为给料和破碎产品的粒度分布矩阵, F 和 P 的每一个元素分别为相应粒级的质量分数; C 为分级函数,是一个对角阵; B 为破碎函数,是下三角阵; I 为单位矩阵; X 为给料粒度分布函数。

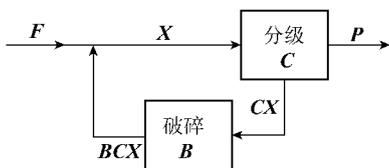


图 1 反击式破碎机破碎过程模型

Fig. 1 Scheme of the breakage model for impact crushers

1.2 分级函数的确定

学者 Whiten and White^[9-10]提出的分级函数,公式中仅包含破碎机的静态设计变量,不能反映反击式

破碎机冲击破碎的动力学特性。Attou 在 Weichert 等学者通过实验得出的单颗粒冲击破碎概率理论的基础上,提出了适合反击式破碎机特点的分级函数,但在 Attou 的分级函数公式中,当给料速率和转子速率不为 0 时,微小颗粒的破碎概率并不为 0,这就造成了实验与理论之间的矛盾^[2]。为了解决这个问题,学者 S. Nikolov 提出新的分级函数^[3-4],如式(2)所示。

$$C_i(d_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d_i}{d_{\min}} - 1\right)^k\right] \quad (2)$$

其中, d_i 为散体物料的粒径; d_{\min} 为一定操作条件下所能破碎的散体物料最小粒径,粒径小于 d_{\min} 的物料破碎概率 $C_i(d_i) = 0$; k 为形状系数。最小可碎粒径 d_{\min} 是冲击能和给料速率的函数,如式(3)所示。

$$d_{\min} = d_{\max} \exp\left\{-\left[c_0 + c_1 \ln\left(\frac{Q_0}{Q}\right)\right] \left(\frac{E}{E_0}\right)^n\right\} \quad (3)$$

式中, Q 和 E 分别为给料速率和单位质量平均冲击能; Q_0 和 E_0 为参考给料速率和参考单位质量平均冲击能; d_{\max} 为散体物料给料最大粒径; n 为与物料材料强度、硬度有关的参数; c_0 为速度常数; c_1 为散体物料颗粒之间碰撞强度系数,与散体物料的密度有关。

单位质量平均冲击能利用反击式破碎机转子的动能进行估算。考虑到转子的质量远远大于单个物料颗粒的质量,发生冲击碰撞前,破碎机板锤的速度也远远大于散体物料颗粒的速度,可知,单个物料颗粒的动能要远远小于转子动能。因此物料颗粒与板锤发生冲击碰撞前后,可以近似地认为单位质量冲击能符合动能守恒,如式(4)所示。

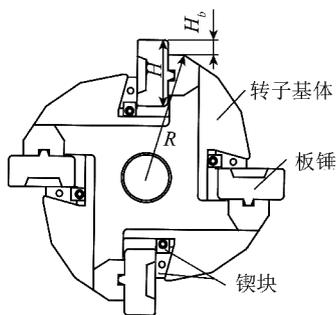
$$E = 0.5(R + 0.5H_b)^2\omega^2 \quad (4)$$

其中, R 为反击式破碎机转子半径; H_b 为板锤冲击头的高度,如图 2(a) 所示; ω 为转子角速度。这里假设大部分物料颗粒与板锤的冲击发生在板锤冲击区中部,颗粒之间和颗粒与板锤的冲击通过式(3)中的参数 c_1 和 c_0 来考虑。

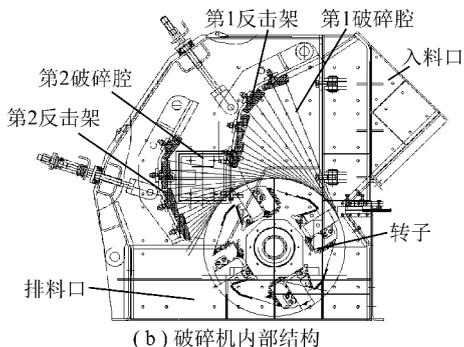
S. Nikolov 的分级函数模型在给料粒度分布比较均匀时可以得到较好的效果,但给料粒度分布不均匀时,分析结果偏差较大。其原因在于如果细颗粒散体物料所占比例较大,在冲击破碎过程中对粗颗粒散体物料形成保护,因此必须充分考虑物料粒度不均匀程度对分级函数的影响,在分级函数的建模过程中引入粒度分布系数,如式(5)所示。

$$C_i(d_i/d_{\min}, \sigma) = C_i(d_i/d_{\min})T(\sigma) \quad (5)$$

其中, σ 为粒度分布系数; T 为粒度分布系数的影响因子,为分级函数与计算分级函数之比的比值。粒度



(a) 破碎机转子结构



(b) 破碎机内部结构



(c) 云南苏家河口破碎试验现场

图2 反击式破碎机破碎产品粒度试验

Fig. 2 Impact crusher product size distributions experiment

分布系数与影响因子之间关系 $T(\sigma)$ 如式(6)所示。

$$T(\sigma) = a\sigma^2 + b\sigma + c \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\bar{d}} \left[\sum_{i=1}^n p_i (\bar{d}_i - \bar{d})^2 \right]^{0.5} \\ \bar{d} &= \sum_{i=1}^n p_i \bar{d}_i \end{aligned} \right. \quad (7)$$

其中, a, b, c 为拟合系数。文中根据表2的试验数据,通过统计回归分析得到。式(6)中 σ 粒度分布系数计算方法如式(7)所示, p_i 为粒级 i 的散体物料所占百分比; \bar{d}_i 为粒级 i 的散体物料的平均粒度; n 为粒级数。物料粒度分布越不均匀,粒度分布系数 σ 值越大,相应分级函数越小。反之,当物料粒度分布越均匀,粒度分布系数 σ 值越小,相应分级函数越大。

1.3 破碎函数的确定

在每次冲击破碎事件中,一定粒径散体物料的破碎产品粒度分布呈现一定规律,可由破碎函数描

述^[11-13],如式(8)所示^[3-4]。

$$b_{ij}(d_i, d_j) = \varphi \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^m + (1 - \varphi) \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^l \quad (8)$$

其中, φ 为破碎产品中细颗粒的质量分数,由式(9)求得; m 和 l 为材料参数, m 与物料颗粒的形状有关, l 与物料的粒径有关;破碎函数 b_{ij} 为来自于粒级 d_j 的破碎产品,代表粒径为 d_i 的质量分数。

$$\varphi = 1 - \exp \left\{ - \left[c_2 + c_1 \ln \left(\frac{Q_0}{Q} \right) \right] \sqrt{\frac{E}{E_0}} \right\} \quad (9)$$

其中, c_1 与式(3)中的 c_1 为同一参数; c_2 为速度常数。

用筛孔尺寸为 $D_i (i=1, N-1)$ 且 $D_N=0$ 的一系列筛进行筛分,得到各个粒级的粒度分布。 d_i 是粒度为 $D_i > d_i > D_{i+1}$ 颗粒的代表粒径,破碎矩阵 B 中的非零元素的求法如式(10)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} B_{ij} &= b_{(i-1)j}(D_{i-1}, d_j) - b_{ij}(D_i, d_j) \\ B_{jj} &= 1 - b_{jj}(D_j, d_j) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

2 冲击破碎实验

2.1 实验原理

利用贵州成智重工生产的CF250反击式破碎机对散体物料进行冲击破碎试验,破碎机的转速 n , 给料速率 Q , 给料粒度分布 X , 对冲击破碎的破碎产品进行筛分分析,得到破碎产品粒度分布试验数据,并对数据进行统计回归分析,建立冲击破碎过程分级函数和破碎函数与给料速率、转子转速和给料粒度分布的关系模型。冲击破碎试验过程中考虑了粒度分布系数 σ 对分级函数的影响。

由式(2)~(5)可以看出,冲击破碎过程分级函数与给料速率 Q 、转子转速 n 、给料粒度分布 X 、粒度分布系数 σ 、散体物料的物理性质 Ph 、转子半径 R 与板锤冲击头高度 H_0 密切相关;由式(8)~(10)可以看出,破碎函数由给料速率 Q 、转子转速 n 、给料粒度分布 X 和散体物料的物理性质 Ph 决定,如式(11)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C &= C(Q, n, X, R, H_0, \sigma, Ph) \\ B &= B(Q, n, X, Ph) \end{aligned} \right. \quad (11)$$

当散体物料和反击式破碎机结构尺寸一定的情况下,即散体物料的物理性质 Ph 、转子半径 R 与板锤冲击头高度 H_0 一定。分级函数可以表示为给料速率 Q 、转子转速 n 、给料粒度分布 X 、粒度分布系数 σ 的函数;破碎函数可以表示为给料速率 Q 、转子转速 n 、给料粒度分布 X 的函数,如式(12)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C &= C(Q, n, X, \sigma) \\ B &= B(Q, n, X) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

因此,要建立反击式破碎机分级函数和破碎函数模型,就必须建立分级函数和破碎函数与给料速率 Q 、转子转速 n ,给料粒度分布 X 和粒度分布系数 σ 之间的关系模型。

2.2 分级函数和破碎函数实验

实验散体物料为来自云南苏家河口的花岗岩,密度为 $2.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,肖氏硬度为94.8,抗拉强度为 $1.036 \times 10^5 \text{ Pa}$,抗折强度为 $1.626 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。为适应试验要求,取粒度为125~200 mm散体物料约1500 kg,对散体物料进行筛分,确定给料粒度分布,作为实验物料。CF250反击式破碎机的转子结构和内部结构如图2所示。转子半径 $R=600 \text{ mm}$;转子板锤冲击头高度 $H_b=80 \text{ mm}$,排料开口为60 mm。图2(c)为云南苏家河口破碎试验现场。

(1) 取实验用的花岗岩散体物料70 kg左右,作

为给料;

(2) 使反击式破碎机的给料速率为244.4 t/h,转速为620 r/min,对散体物料进行冲击破碎试验;

(3) 利用铁板圆孔石子筛和电子称对冲击破碎后散体物料进行筛分分析,得到筛下粒度分布数据见表1;

(4) 将筛分后的散体物料均匀混合,作为给料;

(5) 改变转速,使转速分别为700 r/min和780 r/min进行冲击破碎试验,记录试验数据并对破碎产品进行筛分分析,得到数据见表2;

(6) 改变反击式破碎机的给料速率,使给料速率分别为280.7 t/h和333.6 t/h,重复上述实验步骤(2)~(5),得到表1,2中各项试验数据。对试验数据进行统计回归分析,得到冲击破碎过程的分级函数模型和破碎函数模型。

表1 CF250反击式破碎机破碎产品粒度的筛下百分比

Table 1 CF250 impact crusher product size distributions

序号	给料速率/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	破碎产品不同粒度(mm)筛下百分比/%							
			≤ 200	≤ 125	≤ 100	≤ 80	≤ 40	≤ 20	≤ 10	≤ 5
1		620	100	96.5	92.0	87.0	67.5	40.1	20.2	14.3
2	244.4	700	100	97.4	93.2	89.3	74.3	45.8	28.7	17.2
3		780	100	99.3	97.5	93.2	86.8	64.1	34.2	23.1
4		620	100	94.5	89.5	85.0	64.7	38.0	18.1	12.4
5	280.7	700	100	95.4	90.3	86.7	70.7	43.2	26.0	15.4
6		780	100	97.3	92.0	89.6	82.8	48.7	34.4	21.3
7		620	100	94.1	88.8	84.1	63.4	36.5	16.8	11.2
8	333.6	700	100	95.5	90.9	86.0	70.2	41.1	27.1	14.0
9		780	100	97.3	95.1	88.2	77.0	46.6	35.4	16.9

表2 考虑粒度分布系数的冲击破碎试验结果

Table 2 Experimental size distribution taking into account grain distribution ratio

序号	散体物料	给料速率/($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	分级函数	计算分级函数	粒度分布系数	影响因子
1	125~200 mm		620	0.948 2	0.951 0	0.230 8	1.000 0
2	试验1 破碎产品	244.4	700	0.521 0	0.977 2	1.023 6	0.521 0
3	试验2 破碎产品		780	0.657 6	0.991 0	0.886 0	0.657 6
4	125~200 mm		620	0.945 3	0.948 1	0.230 8	1.000 0
5	试验4 破碎产品	280.7	700	0.529 0	0.975 4	1.016 4	0.542 3
6	试验5 破碎产品		780	0.610 2	0.990 0	0.949 2	0.600 2
7	125~200 mm		620	0.941 5	0.944 3	0.230 8	1.000 0
8	试验7 破碎产品	333.6	700	0.620 7	0.972 9	0.874 2	0.638 0
9	试验8 破碎产品		780	0.679 1	0.988 6	0.856 7	0.679 1

2.3 试验数据统计回归分析

对表1所得到的试验数据进行统计回归分析,可以确定分级函数和破碎函数中的各个参数,建立分级函数和破碎函数模型。

令式(3)中参考给料速率 Q_0 为244.4 t/h,参考单位质量平均冲击能 E_0 为 $300 \text{ J/kg}^{[4]}$,对表1中试验数据进行拟合,得到分级函数式(2),(3)中的参数值和破碎函数式(8)中的参数值,见表3。

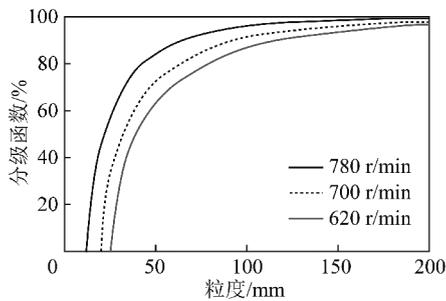
表3 分级函数和破碎函数参数

Table 3 Classification and breakage function parameters

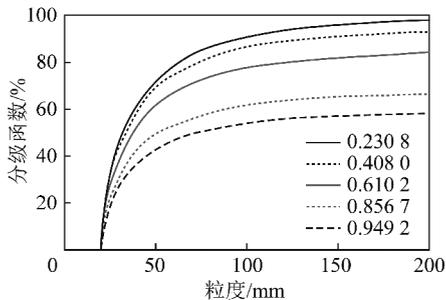
分级函数参数				破碎函数参数			
k	c_0	c_1	n	c_1	c_2	m	l
0.650	1.129	0.100	0.559	0.100	0.409	0.741	2.602

基于式(5),(8)所示的分级函数模型和破碎函数模型,利用 Matlab 数值仿真模拟,可得到如图3(a)所示的不考虑粒度分布系数的分级函数曲线和如图3(c)所示的破碎函数曲线。考虑粒度分布系数的影响,通过表2的试验数据统计回归分析,得到式(5)中的 $T(\sigma)$ 如式(13)所示。图3(b)为转子转速为700 r/min时考虑粒度分布系数影响的分级函数曲线,可见粒度分布越不均匀,粒度分布系数 σ 值越大,相应分级函数越小。因此,粒度分布系数可以有效地描述粒度分布不均匀对分级函数的影响。

$$T(\sigma) = -0.5549\sigma^2 + 0.0983\sigma + 1 \quad (13)$$



(a) 不考虑粒度分布系数分级函数模型



(b) 考虑粒度分布系数分级函数模型

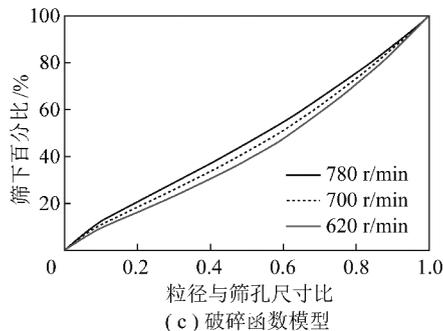


图3 分级函数与破碎函数模型

Fig. 3 Classification and breakage function model

转子转速和给料速率对物料最小可碎粒径 d_{\min} 的影响如图4所示。可以看出 d_{\min} 受转子转速和给料速率的影响很大,在给定范围的操作条件下, d_{\min} 在13.7~26.6 mm之间变化。这是因为最小可碎粒径 d_{\min} 值依赖于冲击能,因此要减小 d_{\min} 就要增大转子转速,使板锤对物料的冲击能增大。给料速率越大,散体物料颗粒与颗粒之间碰撞的频率越高,发生碰撞会消耗动能,碰撞的频率越高,物料颗粒动能消耗越快,冲击能减小,这样就会产生更大的 d_{\min} 值以及更多的粗粒度破碎产品。

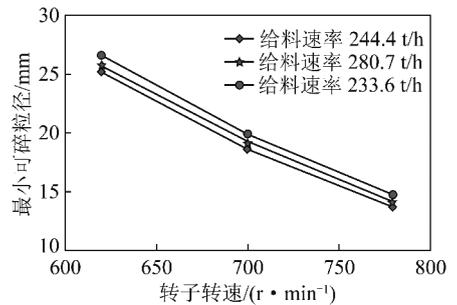


图4 转子转速和给料速率对最小可碎粒径的影响

Fig. 4 Effect of rotor velocity and feed rate on the minimum breakable size

本模型适用于花岗石、石灰石、城市混凝土固体垃圾等多种类型散体物料的破碎产品仿真分析,对于不同类型、不同硬度、强度、不同散体物料密度、不同粒形、不同粒径粗细的散体物料,只需在不改变其他参数的情况下,采用正交试验的方法,确定分级函数和破碎函数中的相关材料参数即可。

3 算例分析与验证

为了验证反击式破碎机分级函数、破碎函数和破碎过程模型的可行性和可靠性,以成智重工 CF400 反击式破碎机为算例,给定3个不同的给料速率(244.4, 280.7和333.6 t/h),对应于每一个给料速率分别使转子的转速为620, 700和780 r/min,对破碎产品粒度分布进行了试验和仿真分析。CF400反击式破碎机转子半径 $R = 600$ mm;转子冲击板高度 $H_b = 80$ mm,与CF250相同。排料开口为60 mm,破碎物料仍为来自云南苏家河口的花岗岩物料。给料速率为244.4 t/h时,不同的转子转速下的试验和仿真产品粒度分布如图5所示。转子转速为 $\omega =$

转子转速和给料速率对物料最小可碎粒径 d_{\min}

620 r/min 时,不同给料速率对破碎产品粒度的影响如图 6 所示。从图 5,6 可以看出通过破碎过程模型仿真得到的破碎产品粒度随着转子的转速和给料速率的变化而变化,在不同操作条件下获得的仿真与试验结果稍有偏差,其主要原因在于破碎过程给料情况偏差、破碎机操作水平、理论建模的前提假设等因素的影响^[14-15]。但就总体而言,仿真计算结果与实际粒度偏差不大,从而验证了反击式破碎机破碎过程模型的有效性与其可靠性。

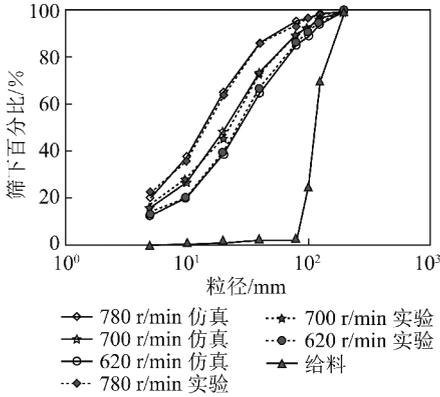


图 5 给料速率为 244.4 t/h 不同转子转速试验和仿真的破碎产品粒度

Fig. 5 Experimental and simulated product size distributions at different rotor velocities for feed rate $Q=244.4$ t/h

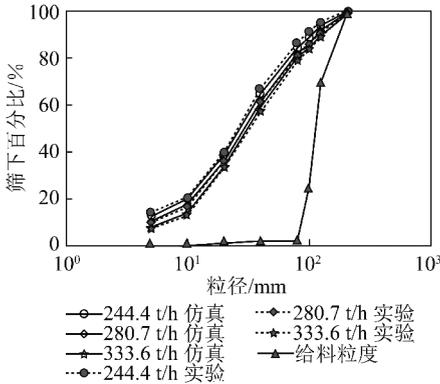


图 6 转子转速为 620 r/min 不同给料速率对破碎产品粒度的影响仿真

Fig. 6 Simulated and measured influence of the feed rate on the product size distribution for rotor velocity $\omega=620$ r/min

从图 5 可以看出在一定的给料速率下,转子转速较高时破碎产品中细粒级的颗粒较多,相反转子转速较低时粗粒级颗粒所占的百分比增加。从图 6 可以看出转子转速不变,当给料速率较大时,破碎产品中粗粒级的颗粒较多,相反当给料速率较小时,可以获得较多的细粒级破碎产品。

取图 5 中 CF400 反击式破碎机给料速率为 244.4 t/h,转子转速为 700 r/min 时破碎产品粒度的

试验和仿真数据,分析各个粒级的仿真偏差,即为考虑粒度分布系数 σ 时的仿真结果偏差,与相同条件下不考虑粒度分布系数 σ 时的仿真结果偏差相对比,见表 4。由表 4 可以看出,考虑粒度分布系数 σ 时破碎产品各个粒级的仿真偏差明显小于不考虑粒度分布系数 σ 时的仿真偏差。从而进一步证明了采用粒度分布系数可以有效地描述粒度不均匀程度对分级函数的影响,解决了给料粒度分布不均匀时仿真计算结果偏差较大的问题。

表 4 粒度分布系数对仿真结果的影响
Table 4 Simulated influence of the size distribution coefficient

粒度/mm	不考虑 σ 仿真/%	考虑 σ 仿真/%	试验/%	不考虑 σ 偏差/%	考虑 σ 偏差/%
≤ 125	96.21	96.74	97.41	1.20	0.67
≤ 100	94.73	93.43	93.22	1.51	0.21
≤ 80	92.07	90.28	89.31	2.76	0.97
≤ 40	77.19	74.01	74.30	2.89	0.29
≤ 20	52.88	48.86	45.82	4.02	3.04
≤ 10	26.74	27.01	28.71	1.97	1.70
≤ 5	14.32	15.47	17.20	2.88	1.73

4 结 论

(1) 基于总体平衡模型,建立反击式破碎机破碎过程模型,为破碎产品粒度预测和质量控制提供了方法。

(2) 利用 CF250 反击式破碎机进行冲击破碎试验,通过对试验数据进行统计回归分析,建立反击式破碎机破碎过程分级函数模型和破碎函数模型。

(3) 提出在分级函数的建模过程中引入粒度分布系数的影响因子,有效地描述了给料粒度分布均匀程度对分级函数的影响,解决了给料粒度分布不均匀时,分析结果偏差较大的问题。

(4) 以 CF400 反击式破碎机为算例,对破碎产品粒度进行试验和仿真分析,并将仿真结果与试验数据进行了比较,验证了破碎过程模型的可行性和可靠性。

参考文献:

[1] 郎宝贤,郎世平. 破碎机[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:20-21.
Lang Baoxian, Lang Shipping. Crusher[M]. Beijing: China Metallurgy Industry Press, 2008: 20-21.

[2] Csoke B, Racz J. Estimation of the breakage and selection functions for comminution in hammer mill[J]. Proceedings of the 9th European Symposium on Comminution, 1998, 1: 393-401.

- [3] Nikolov S. Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers[J]. Mineral Processing, 2004, 74: 219-225.
- [4] Nikolov S. A performance model for impact crushers[J]. Minerals Engineering, 2002, 15: 715-721.
- [5] 黄冬明, 范秀敏, 武殿梁, 等. 挤压类破碎机破碎产品粒度分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 201-207.
Huang Dongming, Fan Xiumin, Wu Dianliang, et al. Crushing product size-reduction analysis of compressing crusher[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 201-207.
- [6] 李军霞, 寇子明, 王志刚. 基于大煤块的液压冲击破碎装置特性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 1041-1044.
Li Junxia, Kou Ziming, Wang Zhigang. Characteristic simulation research of hydraulic impact crushing installment based on the large-piece of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 1041-1044.
- [7] Evertsson C M. Cone crusher performance[D]. Chalmers; Chalmers University of Technology, 2000: 45-67.
- [8] Magnus Bengtsson C, Magnus Evertsson. Modelling of output and power consumption in vertical shaft impact crushers[J]. Miner Process, 2008, 88(1): 18-23.
- [9] Whiten W J. A model for simulating crushing plants[J]. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1972, 72(10): 257-261.
- [10] Whiten W J, White M E. Modeling and simulation of high tonnage crushing plants[A]. Proceedings of the 12th International Mineral Processing Congress[C]. 1979: 148-158.
- [11] 李启衡. 粉碎理论概要[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 60-71.
Li Qiheng. Comminution theory[M]. Beijing: China Metallurgy Industry Press, 1993: 60-71.
- [12] 黄冬明. 挤压类破碎机工作机理和工作性能优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 45-67.
Huang Dongming. Research on working mechanism and working performance optimization of compressive crusher[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007: 45-67.
- [13] Zhao Limei, Chen Lunjun, Zhang Dabin. Modelling and simulation of particle breakage in jaw crushers[A]. Applied Mechanics and Materials[C]. 2012: 1148-1151.
- [14] 董 钢, 范秀敏, 黄东明. 基于产品质量控制预测机制的圆锥破碎机优化方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 152-157.
Dong Gang, Fan Xiumin, Huang Dongming. Cone crusher optimization based on quality control and prediction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 152-157.
- [15] 刘宣宇, 邵 诚. 基于密封舱压力场的盾构土压平衡控制建模与仿真[J]. 煤炭学报, 2011, 37(5): 130-134.
Liu Xuanyu, Shao Cheng. Modeling and simulation for shield earth pressure balance control based on the pressure field of the pressure chamber[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 37(5): 130-134.