

鞍山式赤铁矿石球磨磨矿动力学研究

曹进成¹, 刘磊^{2,3}, 韩跃新¹
(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 国土资源部多金属矿评价与综合利用重点实验室, 河南郑州 450006; 3. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南郑州 450006)

摘要:应用 MATLAB 软件对鞍山式赤铁矿磨矿瞬时速度进行研究. 矿料在球磨过程中经历“粗粒级快速碎磨—中粒级动态碎磨—中粒级单一碎磨”三个固有阶段. 0.043 ~ 0.031 mm 粒级比 0.105 ~ 0.043 mm 粒级更早进入动态碎磨状态, 容易出现细粒级过粉碎. 与圆锥破碎机产品相比, 高压辊磨机产品在磨矿中各阶段的转折时间显著缩短, 但会更早出现细粒级过粉碎. 生产中通过提高高压辊磨机产品的入磨量来缩短球磨时间, 在提高选厂的处理能力的同时减弱排矿产品细粒级过粉碎.

关键词: 高压辊磨机; 圆锥破碎机; 磨矿动力学; 磨矿瞬时速度; 碎磨阶段

中图分类号: TD 921 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)12-1764-05

Grinding Kinetics of Anshan Type Hematite Ores in a Ball Mill

CAO Jin-cheng¹, LIU Lei^{2,3}, HAN Yue-xin¹
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, Ministry of Land and Resources, Zhengzhou 450006, China; 3. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, China Geological Survey, Zhengzhou 450006, China. Corresponding author: CAO Jin-cheng, E-mail: risel@163.com)

Abstract: Grinding specific rate of Anshan type hematite ores was analyzed using MATLAB software. Test results showed that breakage of ore particles in the grinding process went through three inherent stages: rapid grinding of coarse size fraction, dynamic grinding of middle size fraction and single grinding of middle size fraction. Particles in 0.043 ~ 0.031 mm size fraction went into dynamitic grinding stage earlier than particles in 0.105 ~ 0.043 mm size fraction, and then overgrinding of fines occurred easily in ball mill. Compared with cone crusher products, HPGR (high pressure grinding rolls) products had significantly shorter turning time points in three breakage stages, which means that HPGR products were ground faster with earlier occurrence of overgrinding. Given this, the increase of HPGR product tonnages into mills shortened the residence time of materials in ball mill, not only improving the capacity of mineral processing plants but also weakening overgrinding of fines.

Key words: high pressure grinding rolls (HPGR); cone crusher; grinding kinetics; grinding specific rate; breakage stages

磨矿作业不仅能耗及材料消耗高,而且产品质量直接影响到后续选别作业的指标^[1]. 磨矿过程是矿料粒度减小的过程,通过磨矿动力学来研究粒度减小的规律,可以计算磨机生产率,并对循环负荷的影响和实际磨矿过程的情况等做出理论上的分析和判断^[2-3].

高压辊磨机是基于料层粉碎原理设计的一种高效率超细碎设备,在金属矿山逐渐得到广泛应用^[4-6]. 前期研究发现高压辊磨机粉碎产品较常规破碎产品内部结构疏松,裂纹数量多,比表面积大,所需的磨矿时间短,可磨性好^[7]. 本文在前期研究的基础上,对不同破碎方式下的磨矿动力学参数和磨矿过程规律进行了对比分析.

1 磨矿动力学理论分析

磨矿过程可以视为一个粒度离散 - 时间连续的动态平衡过程,磨矿动力学数学模型表达式如式(1)所示,在实验室条件下,碎裂速率参数和碎裂分布参数可以通过单粒级批次磨矿试验来确定^[8-10].

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -K_i(t)m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} K_j(t)b_{i,j}m_j(t).$$

(1)

式中: $m_i(t)$ 为经过时间 t 后第 i 粒级残留物的质量分数,% ; $K_i(t)$ 为经过时间 t 后第 i 粒级碎裂选择参数,%·min⁻¹ ; $b_{i,j}$ 为经过时间 t 后第 i 粒级碎裂分布参数,无单位.

磨矿环境的变化所产生的任何一个 $b_{i,j}$ 都会产生一个速率参数 K 的假值, K 和 $b_{i,j}$ 之间的耦合性非常强. 鉴于此,粒级累计碎裂速率函数经常被采用,该碎裂速率函数并不需要分布函数 $b_{i,j}$ 就可以独立求解^[11],其表达式见式(2):

$$\frac{dR}{dt} = -kR.$$

(2)

式中: R 为经过 t 时间后粗级别残留物的质量分数,% ; t 为磨矿时间,min ; k 为比例系数,决定于磨矿条件;负号表示粗级别减少.

对式(2)积分可得到式(3):

$$R = R_0e^{-kt}.$$

(3)

式(3)就是一阶磨矿动力学方程. 但是通过试验验证发现, m 阶动力学方程更符合实际情况, m 阶动力学方程为

$$R = R_0e^{-kt^m}.$$

(4)

将式(4)代入式(2),可以得到磨矿速度的方程:

$$v = \frac{dR}{dt} = \frac{d(R_0e^{-kt^m})}{dt} = -R_0kt^{m-1}me^{-kt^m}.$$

(5)

对磨矿速度 v 求导数,可以得到磨矿加速度 a 的表达式:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(-R_0kt^{m-1}me^{-kt^m})}{dt} = -R_0kt^{m-2}me^{-kt^m}(m - kmt^{m-1} - 1).$$

(6)

上述式中: t 为磨矿时间,min ; R_0 为被磨物料中粗级别的原始质量分数,% ; k,m 为比例系数; v 为时间为 t 时的磨矿速度,% /min.

2 试验设备与样品

试验选用 CLM - 25 - 10 型高压辊磨机 (HPGR) 和实验型圆锥破碎机 (CC) (动锥直径为 100 mm). 试验样品为鞍山式赤铁矿,有用矿物主要是赤铁矿,含有少量磁铁矿,TFe 品位为 27.02%. 原矿 d_{80} 为 18.5 mm.

磨机型号为 XMB - 70A 型三辊四筒球磨机,磨矿时间 t 分别为 3,6,9,12,15 min,每个磨矿产品筛分分析后进行粒度分布拟合.

3 试验结果分析

不同磨矿时间下磨矿产品的粒度分布如表 1 所示. 根据表 1 构建不同破碎方式下的 m 阶动力学方程,按照式(4)对不同粒度的 m 和 k 值进行拟合,如表 2 所示.

表 1 不同磨矿时间下磨矿产品的粒度分布

Table 1 Size distribution of grinding products in different time

%

粒级/mm	CC					HPGR				
	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min	3 min	6 min	9 min	12 min	15 min
-2.0+0.2	69.43	16.95	3.17	-	-	32.83	3.89	-	-	-
-0.2+0.15	58.96	33.92	14.19	3.43	0.98	37.83	14.20	3.98	0.72	0.32
-0.15+0.1	70.04	50.95	34.50	16.20	8.45	52.52	32.90	18.48	7.91	3.35
-0.1+0.074	75.81	61.42	46.82	30.04	20.28	59.82	43.38	29.99	18.43	10.89
-0.074+0.043	82.45	71.32	62.09	49.93	42.98	70.73	60.16	50.67	39.70	31.79
-0.043+0.031	88.91	82.47	76.25	68.89	63.44	80.78	74.85	70.27	61.20	58.04
-0.031	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

将表 2 中的 m,k 值代入式(5)中,可以求出粒度瞬时磨矿速度,粒级瞬时磨矿速度(v_i)也是

视为粒度瞬时磨矿速度之差,以 $v_{(0.2-0.15)}$ 为例:

$$v_{(0.2-0.15)} = v_{(0.15)} - v_{(0.2)}.$$

表 2 试验测试的磨矿动力学参数值
Table 2 Breakage rate parameters obtained from laboratory tests

筛尺寸/mm	HPGR			CC		
	m	k	R^2	m	k	R^2
0.200	1.532 9	0.170 8	0.996 2	1.729 7	0.068 3	0.998 7
0.150	1.583 1	0.087 9	0.999 7	1.753 3	0.037 5	0.996 9
0.105	1.424 3	0.062 8	0.998 9	1.609 5	0.028 3	0.996 0
0.074	1.337 4	0.051 0	0.999 1	1.502 3	0.024 2	0.997 1
0.043	1.110 8	0.047 4	0.998 6	1.268 2	0.024 6	0.998 3
0.031	1.028 7	0.027 5	0.994 3	1.221 2	0.014 6	0.999 5

应用 MATLAB 软件对粒级瞬时磨矿速度进行可视化分析,如图 1~图 7 所示。

于 i_j 粒级的 $P_G(j)$. 该阶段可视为粗粒级快碎磨碎阶段。

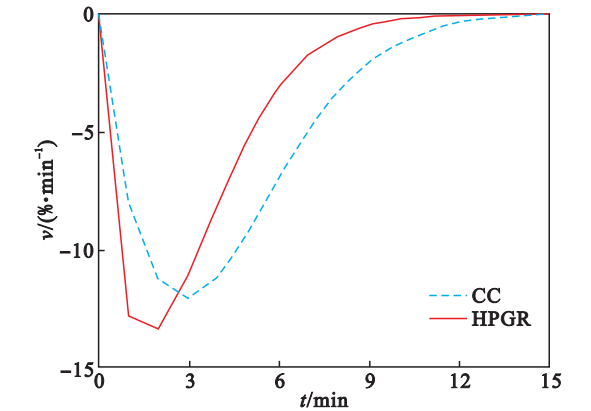


图 1 -2.0+0.2 mm 磨矿速度曲线
Fig. 1 Grinding specific rate curves for -2.0+0.2 mm size

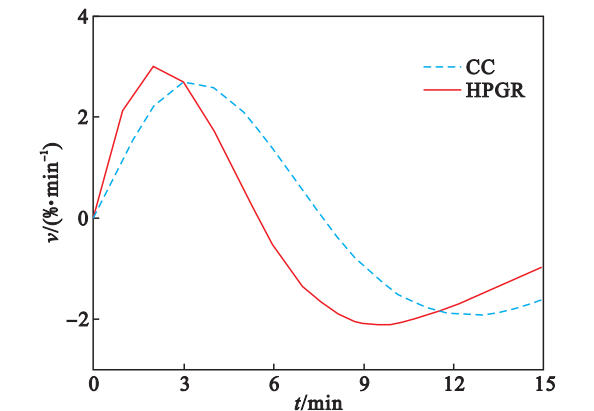


图 3 -0.15+0.105 mm 磨矿速度曲线
Fig. 3 Grinding specific rate curves for -0.15+0.105 mm size

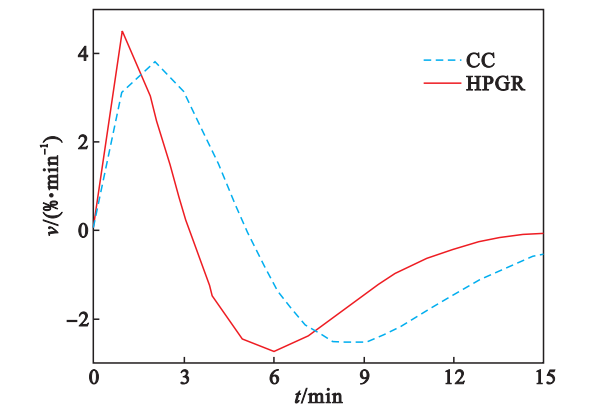


图 2 -0.2+0.15 mm 磨矿速度曲线
Fig. 2 Grinding specific rate curves for -0.2+0.15 mm size

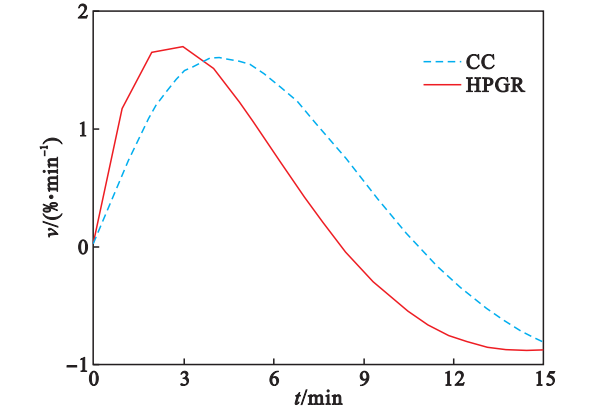


图 4 -0.105+0.074 mm 磨矿速度曲线
Fig. 4 Grinding specific rate curves for -0.105+0.074 mm size

从图 1~图 7 可以看出,除上限粒级 (i_0) ($-2.0+0.2\text{ mm}$) 和下限粒级 (i_n) (-0.031 mm) 外, i_j 粒级磨矿速度曲线(图 2~图 6)理论上均存在两个极值点,两个极值时间点 (t_1, t_2) 将磨矿过程分为三个阶段。

当磨矿时间 $0 < t \leq t_1$, $a_{ij} > 0$, v_{ij} 正向骤增。当 $t = t_1$ 时,加速度 $a_{ij} = 0$, v_{ij} 达到正向最大值。就磨碎概率 (P_G) 而言, $i_{<j}$ 粗粒级的 $P_G(<j)$ 远大

当磨矿时间 $t_1 < t < t_2$ 时, $a_{ij} < 0$, v_{ij} 正向减小后负向增大。该阶段 $i_{<j}$ 粒级继续被磨碎的同时 i_j 粒级矿粒开始得到有效磨碎, i_j 粒级含量进入一个有进有出的动态变化过程。 $P_G(<j)$ 降低而 $P_G(j)$ 增加。当 $v_{ij} = 0$, $P_G(<j) = P_G(j)$, 此时, i_j 粒级的含量变化到达动态平衡点, i_j 粒级的含量最大,设此时对应的时间点为 t_0 。当磨矿时间 $t_1 < t < t_0$ 时, $P_G(<j) > P_G(j)$, i_j 粒级的含量保持

增加的状态;当磨矿时间 $t_0 < t < t_2$ 时, $P_G(<j) < P_G(j)$, i_j 粒级的含量进入减少的状态. 当 $t = t_2$ 时, 加速度 $a_{ij} = 0$, v_{ij} 达到负向最大值, $i_{<j}$ 粗粒级矿粒绝大多数已被磨碎, $P_G(j)$ 同时达到最大. 该阶段可视为中粒级动态碎磨阶段.

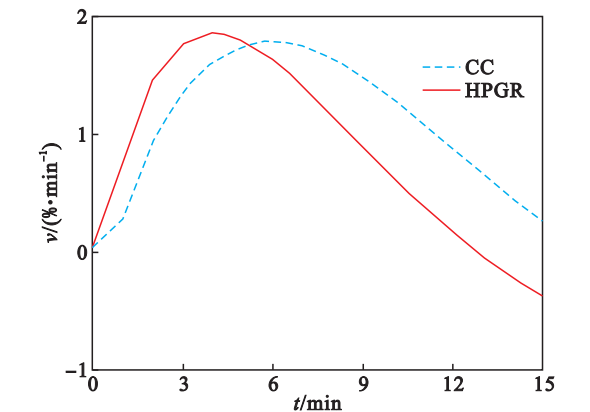


图 5 -0.074 +0.043 mm 磨矿速度曲线
Fig. 5 Grinding specific rate curves for -0.074 +0.043 mm size

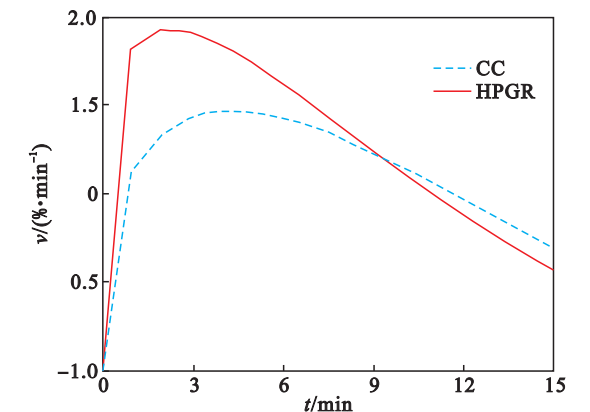


图 6 -0.043 +0.031 mm 磨矿速度曲线
Fig. 6 Grinding specific rate curves for -0.043 +0.031 mm size

粒级/mm	表 3 不同破碎方式下磨矿速度曲线的 t_1 , t_2 和 t_0 Table 3 t_1 , t_2 and t_0 values in different crushing modes					
	t_1/min		t_2/min		t_3/min	
	HPGR	CC	HPGR	CC	HPGR	CC
-2.0 +0.2	1.589 8	2.865 7	-	-	-	-
-0.2 +0.15	0.971 9	1.940 6	5.929 4	8.470 7	3.307 2	5.090 2
-0.15 +0.105	2.160 4	3.354 4	9.550 7	12.510 4	5.489 5	7.655 9
-0.105 +0.074	2.637 5	4.261 4	14.435 2	17.892 7*	8.264 4	10.853 2
-0.074 +0.043	3.955 0	5.885 8	22.884 1*	27.246 3*	12.726 4	16.308 1*
-0.043 +0.031	2.281 6	4.340 1	43.487 1*	43.942 2*	22.393 5*	24.003 5*
-0.031	1.013 4	7.873 8	-	-	-	-

注:表中带*的数据为超出试验时间范围的理论计算数据.

4 结 论

1) 磨矿过程中“粗粒级快速碎磨-中粒级动态碎磨-中粒级单一碎磨”三个阶段与给料的破

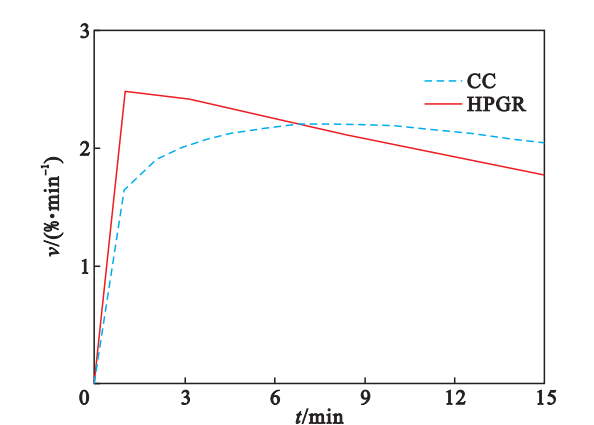


图 7 -0.031 mm 磨矿速度曲线
Fig. 7 Grinding specific rate curves for -0.031 mm size

当磨矿时间 $t > t_2$ 时, 由于 $i < j$ 粗粒级矿粒绝大多数被磨碎, i_j 粒级增加量约为 0, i_j 粒级进入单一的磨碎过程, 粒级含量逐渐减少, $|v_{ij}|$ 逐渐降低至 0. 该阶段可视为中粒级单一碎磨阶段.

令各粒级的磨矿速度 $v = 0$, 加速度 $a = 0$, 可以求出不同破碎产品磨矿速度曲线的 t_1 , t_2 和 t_0 , 如表 3 所示.

从表 3 可以看出, 各个粒级的 $t_1 \ll t_2$, 这说明矿粒在磨矿过程中绝大多数时间处在中粒级动态碎磨阶段. 随着粒级范围的降低, t_2 和 t_0 时间逐渐延长; 而 t_1 时间先延长, 当粒级范围小到 -0.043 +0.031 mm 后缩短.

此外, 与圆锥破碎机产品相比, 高压辊磨机产品各个粒级的 t_1 , t_2 和 t_0 显著缩短, 这说明高压辊磨机更早进入中粒级动态磨矿阶段, 同时也会更早出现细粒级过粉碎 ($t_{1(\text{HPGR})} = 1.0134 \ll t_{1(\text{CC})} = 7.8738$).

碎方式无关. 粗粒级快速碎磨阶段中, $i < j$ 粗粒级矿粒被快速磨碎后导致 $i \geq j$ 粒级含量急剧增加, 而 i_j 粒级矿粒并未得到有效粉碎.

(下转第 1777 页)