

搅拌磨与球磨磨矿对比试验

李艳军¹, 郭旺¹, 王绍兴², 刘雁玲³
(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 景德镇百特威尔新材料有限公司, 浙江金华 322003;
3. 鞍钢集团矿业设计研究院, 辽宁鞍山 114004)

摘 要: 研究了搅拌磨和球磨磨矿产品的粒度特性及其磨矿过程中的比生产率、能耗情况. 结果表明: 搅拌磨磨矿产品较为均匀, 球磨磨矿产品中微细粒和粗颗粒的质量分数较高; 分别采用直线和指数曲线拟合搅拌磨和球磨时不同入磨粒度和比生产率的关系, 随着入磨粒度的下降, 球磨的比生产率下降较搅拌磨明显; 采用 Walker 等提出的关系式, 拟合入磨粒度与能量消耗的关系, 搅拌磨的耗能增长速率远小于球磨的增长速率. 搅拌磨相对于球磨在细磨和超细磨过程中具有明显的优势.

关 键 词: 搅拌磨; 球磨; 粒度; 比生产率; 能耗

中图分类号: TD 982 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)04-0562-05

Comparative Test of Stirred Mill and Ball Mill

LI Yan-jun¹, GUO Wang¹, WANG Shao-xing², LIU Yan-ling³
(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Jingdezhen Betterwear New Material Co., Ltd., Jinhua 322003, China; 3. Anshan Iron and Steel Mining Design and Research Institute, Anshan 114004, China. Corresponding author: GUO Wang, E-mail: 1553482868@qq.com)

Abstract: The particle size characteristics, specific productivity rate and energy consumption were studied in the grinding process of stirred mill and ball mill. The results showed that the product of stirred mill was more uniform than that of ball mill, and the mass fractions of fine grain and coarse particle of ball mill are higher than that of stirred mill. The straight line and exponential curve were respectively used to fit the relationships between different grinding particle size and specific productivity under stirred mill and ball mill, and the specific production rate of ball mill decreases obviously with the decrease of mill feed size. The equation formula proposed by Walker et al was used to fit the relationship between mill feed size and energy consumption, and the energy consumption growth rate of the stirred mill is much smaller than that of ball mill. Stirred mill has obvious advantages over ball mill in the process of fine grinding and ultra-fine grinding.

Key words: stirred mill; ball mill; grain size; specific production rate; energy consumption

“贫细杂”是我国铁矿资源的主要特点, 随着对矿产资源的开发利用, 嵌布粒度粗, 矿物组成简单、品位高且易选的铁矿越来越少; 低品位, 嵌布粒度细甚至极细的铁矿资源进入了人们的视野. 嵌布粒度细的难选铁矿, 细磨甚至超细磨使有价组分充分分解离, 才是成功分选的关键. 大孤山铁矿石是典型的磁铁矿石, 铁矿物的嵌布粒度较细, 结构构造较为复杂, 在磁铁矿石中属相对难选矿石^[1].

搅拌磨^[2-6]作为一种新型的粉磨设备, 因其

磨矿效率高、磨矿效果好, 已经应用在铅锌矿、铜矿、银矿、石英、陶瓷等行业的细磨和再磨作业中. 搅拌磨主要应用在矿物加工的再磨作业中, 与传统磨机的再磨作业相比, 具有磨矿产品的粒度分布窄及更加均匀的优点, 使得再磨产品再选后精矿品位和回收率都能得到提高^[7-9], 磨矿粒度在 10~40 μm 能节约 5% 甚至更多能耗^[7-9]. 细磨及超细磨条件下, 搅拌磨显示出了传统球磨难以比拟的粉磨效率高、能量利用率高的优势.

1 试验物料、设备及方法

试验所采用的原料是大孤选矿厂的再磨给矿,经检测该原料中 TFe 的质量分数为 55.56%,磁性铁的质量分数及占 TFe 质量分数分别为 53.57% 和 96.42%;其次含有少量的菱铁矿和赤铁矿等,主要的脉石矿物 SiO₂ 的质量分数为 20.45%;磁铁矿在 -0.074 mm 粒级中的质量分数为 79.79%,其中在 -0.038 mm 粒级中的质量分数为 34.12%,铁矿物单体解离度较高为 86.62%,可见磁铁矿主要以细粒嵌布为主。

试验所用搅拌磨机为 SLJM-2L 立式超细搅拌磨,有效容积为 2L,磨机启动和转速由变频器控制;球磨机为 XJQ-φ240 mm×90 mm 锥形球磨机,有效容积为 6.25 L。采用 DTZ119 型三相四线智能电表测定能耗;采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定磨矿产品的粒度组成。

利用文献[10]总结提出的磨机耗能与粒度的关系式,考察搅拌磨和球磨机的能耗情况:

$$dE = -c \frac{dx}{x^n} \quad (1)$$

式中: x 为物料粒度; E 为输入到破碎过程的能量; c , n 分别为与磨机和物料性质有关的参数。

式(1)囊括了三大功耗学说,通常情况下当 n 取 1,2,1.5 时,分别代表面积学说、体积学说和裂缝学说。然而有些磨矿过程会介于其中两种学说之间,因此对于不同的矿石可推导其对应的 n 值。相比于三种学说,计算得到的磨矿功耗更能准确应用于生产实际,对于同一矿石 n 值越大能量消耗越大。

2 试验结果与讨论

2.1 磨矿产品粒度对比试验

搅拌磨磨矿条件:磨矿介质为 8 mm 钢球,物料体积与球间隙体积比为 0.8,介质占整个磨机筒体的体积分数(充填率)为 75%,矿浆的质量分数为 68.5%,搅拌器转速为 300 r/min,单次处理干矿量为 1 000 g。球磨磨矿条件:磨矿介质的直径分别为 32,25,19 mm,质量比为 5:3:2,充填率为 33.22%,料球体积比为 1.0,矿浆的质量分数为 68.5%,单次处理干矿量为 1 718 g(下同)。分别采用搅拌磨和球磨将原料磨至相同磨矿细度(磨矿产品水筛 -0.038 mm 粒级的质量分数为 80%),采用激光粒度仪测得搅拌磨和球磨产品的粒度组成,如图 1 所示。

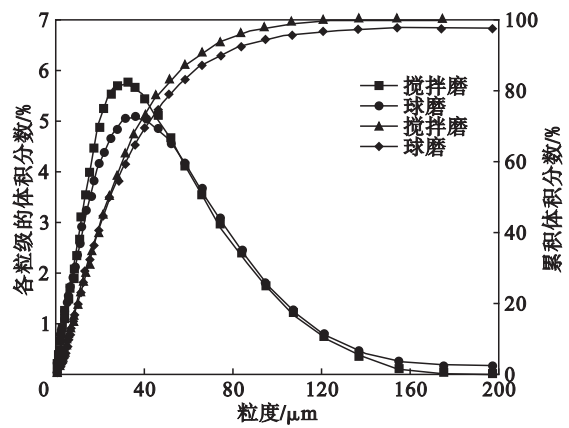


图 1 搅拌磨和球磨的磨矿产品粒度对比
Fig. 1 Comparison of grain size by stirred mill and ball mill

由图 1 可知,搅拌磨磨矿产品曲线的峰值是 5.75%,而球磨磨矿产品曲线的峰值是 5.05%。搅拌磨产品较球磨产品 -0.010 mm 粒级和 +0.174 mm 粒级体积分数小,球磨产品细粒级比搅拌磨产品多,且残留有大颗粒,球磨产品粒度分布区间更宽。该结果表明,搅拌磨磨矿产品粒度相对均匀;球磨产品的微细粒级及粗粒级含量均高于搅拌磨产品,存在过磨现象。

2.2 磨矿产品粒度随磨矿时间的变化

在搅拌磨适宜的工艺参数条件下,分别磨矿 40,80,120,160,200 s,4,5,10 min;球磨在适宜的条件下分别磨矿 10,20,30,40,50,60,90 min,并对不同磨矿时间下的产品粒度组成进行分析。各粒级的体积分数与粒度的关系如图 2 所示。

由图 2 可知,随着磨矿时间的延长,球磨和搅拌磨磨矿产品的粒度均逐渐变细,粒度组成曲线向细粒级方向偏移。搅拌磨磨矿产品的粒度组成曲线呈整体向左偏移的趋势,且单位磨矿时间内偏移量随粒度变细而减小。偏移过程中,磨矿产品曲线的峰值是逐渐增大的,磨矿产品粒度组成的区间长度略有减小。球磨产品的粒度组成曲线的偏移量低于搅拌磨产品,且随着磨矿细度的增加,磨矿产品的最大单粒径含量随着磨矿细度的增加而呈下降趋势,粒度分布区间长度有所增大,产品中含有少量的粗颗粒。

上述结果表明,采用搅拌磨磨矿时,大颗粒物料被粉磨的概率大,使得磨矿产品的粒度组成越来越均匀,细粒级和粗粒级的相对含量越来越少,矿石的泥化现象并未随入料粒度的变细而加剧。而球磨的磨矿过程对颗粒大小无选别性,含量越高的物料颗粒越容易被研磨,导致矿产品粒度越细,越不均匀。

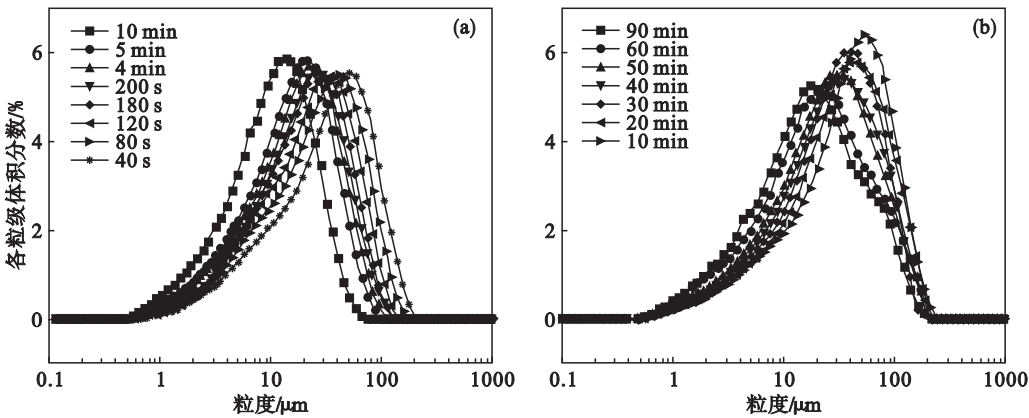


图2 磨矿时间对磨矿产品粒度的影响
Fig. 2 Effect of grinding time on particle size
(a)—搅拌磨; (b)—球磨.

2.3 入磨粒度对比生产率的影响

根据搅拌磨和球磨不同磨矿时间对应的磨矿粒度,计算相邻磨矿时间段 $t_i \sim t_{i+1}$ 时的比生产率.以磨矿时间为 t_i 时的磨矿细度为此时间段内的入磨粒度,以磨矿时间为 t_{i+1} 时的磨矿粒度为此时间段产品的粒度.从而可以计算不同入磨粒

度时比生产率的变化情况,并建立入磨粒度与比生产率的数学关系.

为了表征入磨粒度与比生产率 q 的关系,对其进行拟合,拟合曲线如图3所示.入磨粒度与比生产率的拟合函数和拟合效果如表1所示.

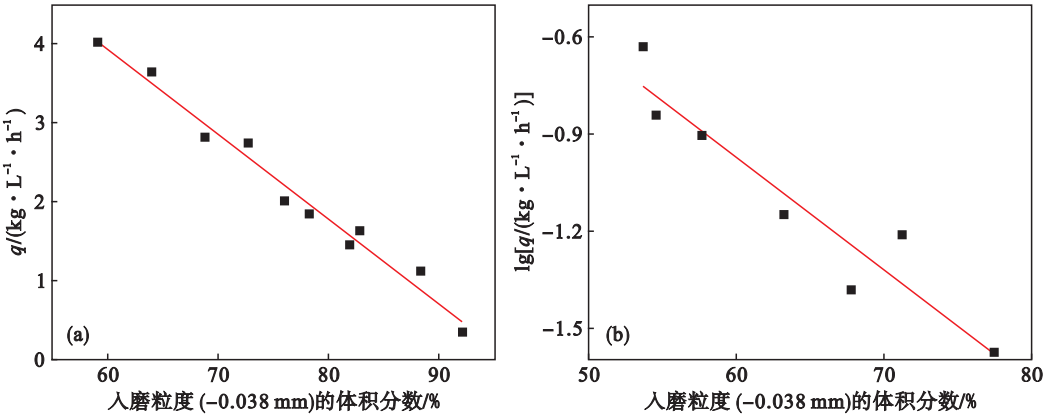


图3 入磨粒度与比生产率的关系
Fig. 3 Relation between mill feed size and specific production rate
(a)—搅拌磨; (b)—球磨.

表1 搅拌磨和球磨的入磨粒度与比生产率的拟合函数和拟合效果

Table 1 Fitting function and fitting effects of mill feed size and specific production rate by stirred mill and ball mill

方式	搅拌磨	球磨
拟合回归方程式	$q = 10.37 - 0.107\theta$	$\lg q = 1.18 - 0.035\theta$
回归方程的相关系数 R^2	0.979 5	0.900 6
磨矿产品粒度与磨矿时间的关系式	$\theta = 100 - \frac{m(100 - \theta_0)}{m + 0.107 Vt}$	$t = \frac{m(\theta - \theta_0)}{13.96 V} \cdot 1.08^\theta$

注: θ_0, θ 分别指磨矿前和磨矿后 -0.038 mm 粒级的体积分数,%; V 为磨机的有效容积, L ; t 为磨矿时间, h .

由两种磨机比生产率与入磨粒度的关系可知,在适宜区间内搅拌磨的比生产率与入磨粒度呈线性相关,而球磨的比生产率与入磨粒度呈负指数相关.随着处理矿石粒度变细,二者的比生产率都下降,但搅拌磨相对于球磨的优势越明显.例

如,搅拌磨入料粒度 (-0.038 mm) 由 59.10% 增加到 78.10% ,比生产率降低了 53.76% ;球磨入料粒度 (-0.038 mm) 由 57.63% 增加到 77.37% ,比生产率降低了 78.74% .

本次试验所用原料 -0.038 mm 粒级的 $\theta_0 =$

45.78% , 带入表 1 拟合公式, 计算可得搅拌磨最大比生产率为 5.47 kg/(L·h), 球磨机最大比生产率仅为 0.42 kg/(L·h). 则针对该矿样, 单位时间单位体积下, 球磨机的磨矿产品中 -0.038 mm 粒级含量将远小于搅拌磨的磨矿产品. 可见, 搅拌磨比

球磨更适合作为该铁矿的再磨设备.

2.4 搅拌磨机和球磨能耗的对比

搅拌磨和球磨机的磨矿产品粒度与处理单位矿石所消耗的能量之间的关系如图 4 所示. 能耗与产品粒度的拟合函数和拟合效果如表 2 所示.

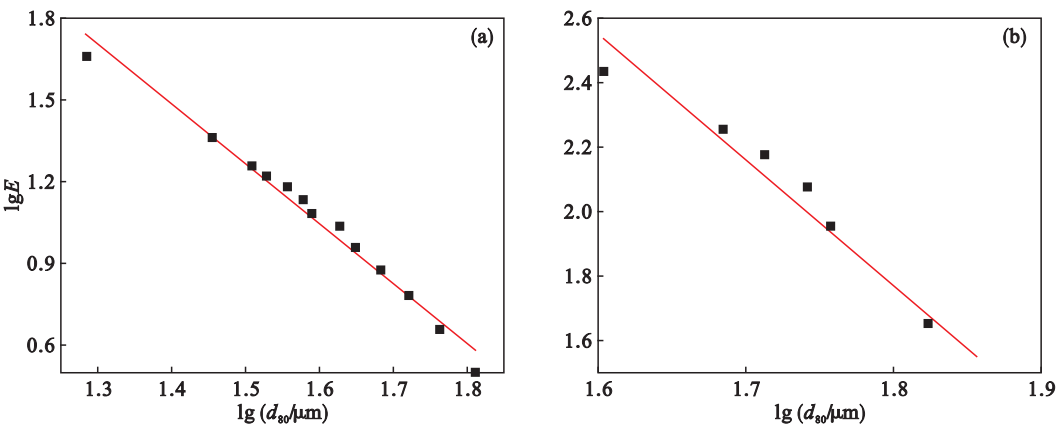


图 4 磨矿粒度与能耗的关系

Fig. 4 Relation between grain size and energy consumption

(a)—搅拌磨; (b)—球磨.

表 2 搅拌磨和球磨的能耗与产品粒度的拟合函数和拟合效果

方式	搅拌磨	球磨
线性回归方程式	$\lg E = 4.56 - 2.20 \lg(d_{80})$	$\lg E = 8.81 - 3.91 \lg(d_{80})$
回归方程的相关系数 R^2	0.978 7	0.958 0
回归方程式整理	$dE = -c \frac{dx}{x^{2.2}}$	$dE = -c \frac{dx}{x^{3.91}}$

由表 2 可知, 能耗的对数与产品粒度 (d_{80}) 的对数近似呈线性关系, 拟合回归方程的相关系数大于 0.95, 拟合效果较好. 回归方程能准确地反映处理单位矿石量消耗的能量与粒度的关系. 搅拌磨的 n 值为 2.2, 球磨的 n 值为 3.91, n 值均大于 2, 显然三种磨矿学说均不适用于此粒度磨矿. 三种经典学说的提出至今已上百年, 当时的磨矿细度要求比现在的要粗. 根据段希祥^[11]对细粒磨矿规律的研究, 随着粒度变细磨矿过程功耗的增大系数逐渐增大, 且增长率越来越大, 即磨机的功耗随粒度的降低呈指数上升趋势. 从两种磨机的 n 值对比来看, 球磨的 n 值是搅拌磨的 1.78 倍, 即球磨磨矿过程能耗的增长指数是搅拌磨的 1.78 倍. 可见球磨的磨矿能耗较高, 随着粒度的变细, 球磨的能量消耗增长速度远高于搅拌磨. 从能耗的角度来看, 球磨更不适于作此矿石在此粒度下的磨矿设备.

3 结 论

1) 从相同磨矿粒度和磨矿产品随磨矿时间

的变化来看, 搅拌磨磨矿产品较为均匀, 球磨磨矿产品中微细粒和粗颗粒含量较高.

2) 对不同入磨粒度条件下的比生产率的关系拟合发现: 搅拌磨相应的拟合关系为 $q = 10.37 - 0.107\theta$, 球磨相应的拟合关系为 $q = 13.96/1.08^\theta$. 搅拌磨和球磨 -0.038 mm 粒级比生产率都随入磨粒度的变细逐渐下降, 球磨的比生产率下降较搅拌磨明显.

3) 从现有经典磨矿理论出发, 考虑细磨和超细磨条件下的适用理论, 拟合得出搅拌磨和球磨磨矿过程中入磨粒度与能量消耗之间的关系分别为 $dE = -cdx/x^{2.2}$ 和 $dE = -cdx/x^{3.91}$. 通过对比各自的拟合方程发现, 处理单位矿石量磨机的能耗随入磨粒度呈指数形式增长, 且搅拌磨的耗能增长速率远小于球磨的增长速率. 搅拌磨相对于球磨在细磨和超细磨过程中具有明显的节能优势.