

破碎方式对齐大山贫赤铁矿石磨矿性能的影响

曹进成^{1,2}, 韩跃新³, 刘磊^{1,2}, 曹飞^{1,2}

- 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;
- 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006;
- 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD921 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0105-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.012

摘要 与传统破碎设备相比, 高压辊磨机具有破碎效率高、单位能耗低、所得产品可直接进行粗粒抛尾的优点。以齐大山贫赤铁矿石为实验原料, 分别考察了高压辊磨机和圆锥破碎机破碎产品的磨矿产品粒度分布、磨矿技术效率、Bond 球磨功指数, 以对比不同破碎产品的磨矿性能。结果表明, 在相同磨矿条件下, 与圆锥破碎产品相比, 高压辊磨产品的后续磨矿产品中粗粒级含量减少, 细粒级含量增加, 磨矿时间为 9 min 时, +0.15 mm 粒级减少 9.41 百分点, -0.031 mm 粒级增加 6.45 百分点; 磨矿产品中 -0.074 mm 粒级含量低于 70% 时, 磨矿技术效率有所偏低, -0.074 mm 粒级含量达到 80% 及以上时, 磨矿技术效率略高。高压辊磨产品的磨矿能耗显著低于圆锥破碎产品, 控制不同筛孔尺寸下, 高压辊磨产品的 Bond 球磨功指数较圆锥破碎产品低 2.74%~10.84%。本研究成果对高压辊磨机在矿石粉碎中的应用有一定的指导意义。

关键词 贫赤铁矿石; 高压辊磨机; 圆锥破碎机; 磨矿技术效率; Bond 球磨功指数

随着我国铁矿资源的日益消耗, 贫铁矿石的开发利用逐渐受到重视。在铁矿石选矿作业中, 矿石破碎和磨矿环节能耗较高, 通常占选矿厂总能耗的 50% 以上^[1]。研发高效节能的碎磨装备和工艺, 可显著降低铁矿石的加工成本, 尤其对贫铁矿石而言, 意义更为重大。

矿石采用高压辊磨机进行粉碎时, 在自身重力和辊面摩擦力的作用下进入破碎腔, 动辊通过辊间料层将压力传递给定辊, 此过程中料层颗粒密实度逐渐增加产生裂纹, 进而实现物料颗粒的粉碎^[2]。高压辊磨机对矿石实施准静压料层粉碎, 与传统破碎方式相比, 可有效提高矿石处理量、降低破碎能耗、降低运营成本^[3-4]。此外, 将高压辊磨机和预抛尾工艺相结合处理贫铁矿石, 可显著降低后续磨矿作业的入磨量, 提高矿石的入选品位^[5-6]。肖启飞等^[7]对南芬选矿厂北山部位磁铁矿石进行了高压辊磨机粉碎—湿式抛尾实验, 发现在矿石粉碎至 -3 mm、磁场强度 240 kA/m 的条件下, 矿石铁品位由 30.73% 提高至 36.21%, 铁回收率为 95.13%, 抛尾产率为 12.67%。韩跃新和刘磊等^[8-10]对鞍山式贫赤铁矿进行高压辊磨粉碎, 粉碎产品预先分级为 +0.5 mm 和 -0.5 mm 两个粒级, 然后粗粒级进行干式预选、细粒级进行湿式预选, 所得综合预选精矿

铁品位较原矿品位提高 8.44 百分点, 铁回收率为 86.51%, 抛尾产率为 35.71%。高航等人^[11]利用高压辊磨机对姑山铁矿石进行工业化实验, 发现高压辊磨机的生产率提高幅度介于 30%~50% 之间, 并大幅降低了后续球磨的耗能。

综上所述, 与圆锥破碎机等传统破碎装备相比, 采用高压辊磨机对贫铁矿石进行粉碎, 在节能降耗和预抛尾方面有明显优势, 但对两者破碎产品的磨矿性能研究较少。基于此, 本文以齐大山贫赤铁矿石为实验原料, 对其高压辊磨产品和圆锥破碎产品分别开展磨矿实验, 从磨矿产品粒度分布、磨矿技术效率、Bond 球磨功指数等方面进行系统的磨矿性能对比分析, 为形成高压辊磨机为主的碎磨工艺提供理论支撑。

1 原料性质与研究方法

1.1 原料性质

实验所用贫赤铁矿取自齐大山铁矿选矿厂, 经颞式破碎机破碎至 -12 mm 备用。原矿化学成分分析结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 矿石中 TFe 品位为 27.02%, 主

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221698, DD20190401)

作者简介: 曹进成(1980—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 主要从事矿物加工研究工作。

通信作者: 曹飞(1982—), 男, 山西临汾人, 高级工程师, 主要从事矿产资源综合利用研究工作。

要杂质成分 SiO₂ 含量为 57.64%，有害元素 P、S 含量均较低。此外，矿石中 FeO 的含量为 2.30%，表明该矿石中的铁元素除了以 Fe₂O₃ 形式存在外，还有部分以 Fe₃O₄ 等其他形式存在。

表 1 原矿化学成分分析结果 /%

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	P	S
27.02	2.30	57.64	0.54	0.37	0.29	0.16	0.036	0.047

矿石矿物组成定量分析结果如表 2 所示。由表 2 可见，矿石中金属矿物主要为赤(褐)铁矿，占 31.34%，其次为 8.06% 的磁铁矿；主要脉石矿物为石英，占 59.24%，其他脉石矿物含量较低。

表 2 原矿矿物组成分析结果 /%

主要矿物	赤铁矿	褐铁矿	磁铁矿	石英
含量	30.82	0.52	8.06	59.24

为查明铁矿石的赋存状态，采用扫描电子显微镜对实验所用贫赤铁矿石进行了微观结构分析，结果如图 1 所示。

从图 1 可知，该矿石的微观结构主要包括以下三种形式：(1) 显微粒状结晶结构，赤铁矿和磁铁矿等金属矿物呈粒状分散分布在脉石矿物中(a)；(2) 显微交

代结构，赤铁矿广泛交代磁铁矿，形成完全替代和不完全替代的交互形态(b)；(3) 显微条带状结构，金属矿物和脉石矿物呈条带状分布(c)。可见，矿石中主要矿物嵌布关系复杂，矿物之间胶结致密，有必要强化粉碎工艺。

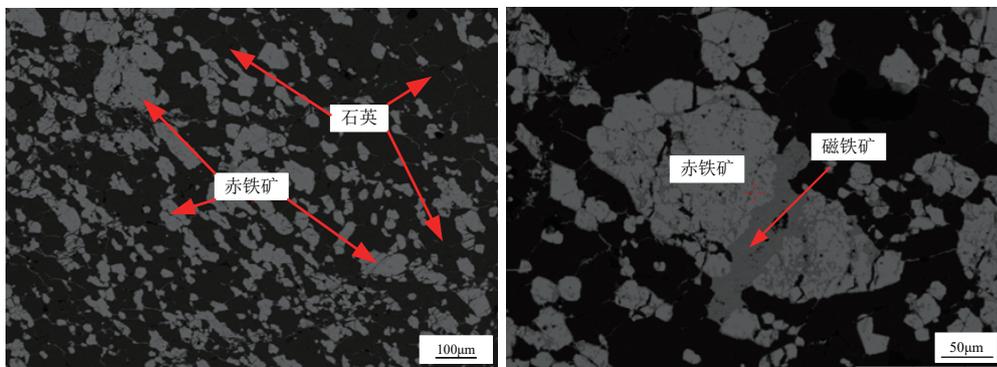
1.2 研究方法

采用高压辊磨机和圆锥破碎机分别将矿石破碎至指定细度，然后采用实验室球磨机和功指数球磨机对两种破碎产品进行磨矿实验，依次考察磨矿产品的粒度分布、磨矿技术效率、Bond 球磨功指数，以对比分析破碎方式对后续磨矿产品粒级组成、磨矿效果、磨矿能耗的影响。

1.2.1 磨矿实验

分别采用 CLF-25-10 型高压辊磨机和 GYP-300 实验型圆锥破碎机对矿石进行闭路破碎。其中，高压辊磨机主要参数为压辊直径 250 mm，压辊宽度 100 mm，电机功率 7.5 kW，辊面比压力 0~7 N/mm²，辊面速度 0~0.52 m/s，工作辊隙 4~7 mm；圆锥破碎机主要参数为动锥直径 100 mm，电机功率 7.5 kW，最大给料粒度 30 mm，排料粒度 2~8 mm 可调。

利用实验室球磨机在相同磨矿工艺参数下对粉碎至 -2 mm 的高压辊磨产品(HPGR)和圆锥破碎产品



(a) 矿石显微粒状结晶结构

(b) 矿石显微交代结构

(c) 矿石显微条带状结构

图 1 铁矿石的微观结构
Fig. 1 Microstructure of the iron ore

(CC)进行磨矿实验, 球磨机给矿量为 500 g。采用 0.15 mm、0.105 mm、0.074 mm、0.043 mm 和 0.031 mm 的标准筛对磨矿产品进行筛分, 确定磨矿产品的粒度组成, 并计算其磨矿技术效率。磨矿技术效率(E_t)计算方法如式(1)所示^[12]:

$$E_t = \left(\frac{\gamma - \gamma_1}{100 - \gamma_1} - \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{100 - \gamma_2} \right) \quad (1)$$

式中: γ_1 —给矿中小于粒度 x 的产率, %; γ_2 —给矿中小于过粉碎粒度 y 的产率, %; γ —磨矿产品中小于粒度 x 的产率, %; γ_3 —磨矿产品中小于过粉碎粒度 y 的产率, %。

依据式(1), 当矿石不发生磨矿作用时, $\gamma = \gamma_1$ 及 $\gamma_3 = \gamma_2$, $E_t = 0$; 当磨矿产品均磨至过粉碎时, $\gamma = \gamma_3 = 100$, $E_t = 0$ 。磨矿技术效率可以从技术上评价磨矿过程的好坏, 且磨矿技术效率越高, 磨矿效果越好。

1.2.2 Bond 球磨功指数实验

Bond 球磨功指数实验采用干式闭路操作, 循环负荷为 250%, 球磨机的给料粒度为 -3.2 mm, 实验流程如图 2 所示。测定的具体操作步骤如下:

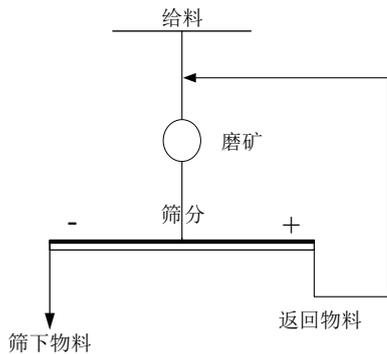


图 2 Bond 球磨功指数测定流程
Fig. 2 Flow sheet of the Bond ball milling power index test

(1)取粉碎至 -3.2 mm 的产品作为实验样品, 并测定试样的容积密度 S_v 。将试样混匀、缩分为若干份备用, 随机选取两份样品进行粒度分析, 以确定给矿的 F_{80} (F_{80} —给料中 80%)。筛析后的物料混匀, 备用。

(2)固定 Bond 功指数球磨机的起始负荷为 700 cm^3 的物料, 给矿量按式(2)计算。

$$q_0 = 700 \cdot S_v \quad (2)$$

式中: q_0 —球磨机起始负荷, g; S_v —容积密度, g/cm^3 。

(3)按图 2 所示流程进行测试, 首先预定磨机第一次运转的转数, 这一数值由矿石性质、筛孔尺寸等条件决定。

(4)一次磨矿结束后, 取出磨矿产品并采用指定筛孔尺寸的标准筛进行筛分, 确定筛上产品和筛下产品的质量。取与筛下产品质量相同的试样并与筛上产品混匀后给入磨机, 作为第二次磨矿的给矿。二次磨矿时球磨机的转数可由第一次磨矿的 G_{bp} 计算得到,

计算得到的转数是预计使磨机循环负荷为 250% 所需的转数。

当磨机运转平衡时有:

$$q_0 = q_n + q_c = 3.5q_n \quad (3)$$

$$q_n = \frac{q_0}{3.5} = \frac{700 \cdot S_v}{3.5} \quad (4)$$

$$q_n = q_u \quad (5)$$

式中: q_0 —球磨机总负荷, g; q_n —新补加物料质量, g; q_c —筛上返回物料质量, g; q_u —筛下物料质量, g。

第 i 个周期球磨机的适宜转数 n_i 为:

$$n_i = \frac{q_u - q_m}{G_{bp}} \quad (6)$$

式中: n_i —第 i 个周期的转数, r; G_{bp} —第 $i-1$ 周期球磨机每一转新生成的筛下物料的质量, g/r ; q_m —新给矿中筛下物料质量, g; q_u —磨矿平衡时的筛下物料质量, g。

(5)二次磨矿结束后, 对二次磨矿产品进行筛分、称重, 称取与筛下产品质量相同的样品并与筛上产品混匀后给入磨机, 进行第三次磨矿。后续磨矿、取样等方式均与此相同, 至磨机循环负荷稳定在 $250\% \pm 5\%$ 结束, 取最后两次磨矿时的 G_{bp} 并计算其平均值, 且两次 G_{bp} 的差值不应超过其平均值的 3%。

(6)磨机循环负荷稳定在 $250\% \pm 5\%$ 后, 取磨矿产品进行粒度分析, 以确定磨矿产品的 P_{80} , 并依据式(7)计算出 Bond 球磨功指数。

$$W_{ib} = \frac{49.04}{P_1^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (7)$$

式中: W_{ib} —Bond 球磨功指数, $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{t}$; P_1 —实验筛孔尺寸, μm ; G_{bp} —产品中 80% 颗粒都能通过的方形筛孔的边长, μm ; P_{80} —产品中 80% 颗粒都能通过的方形筛孔的边长, μm 。

2 研究结果与讨论

2.1 磨矿产品粒度分布

对高压辊磨产品和圆锥破碎产品进行不同磨矿时间下的磨矿实验, 磨矿产品的粒度分布如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着磨矿时间的延长, 两种破碎产品的磨矿细度均逐渐降低。与圆锥破碎产品相比, 采用高压辊磨机破碎有利于降低后续磨矿产品中粗粒级的含量, 但磨矿产品中细粒级含量也有所增加。以磨矿时间 9 min 为例, 圆锥破碎—磨矿产品中 +0.15 mm 和 +0.031 mm 粒级含量分别为 13.16% 和 75.57%, 高压辊磨—磨矿产品中该粒级的含量分别为 3.75% 和 68.92%, 即高压辊磨产品中 +0.15 mm 粒级含量降低 9.41 百分点、-0.031 mm 粒级含量增加 6.65 百分点。

将图 3 中磨矿产品粒度分布数据带入经典的粒度特征方程, 可获得不同磨矿时间下的粒度分布方程。

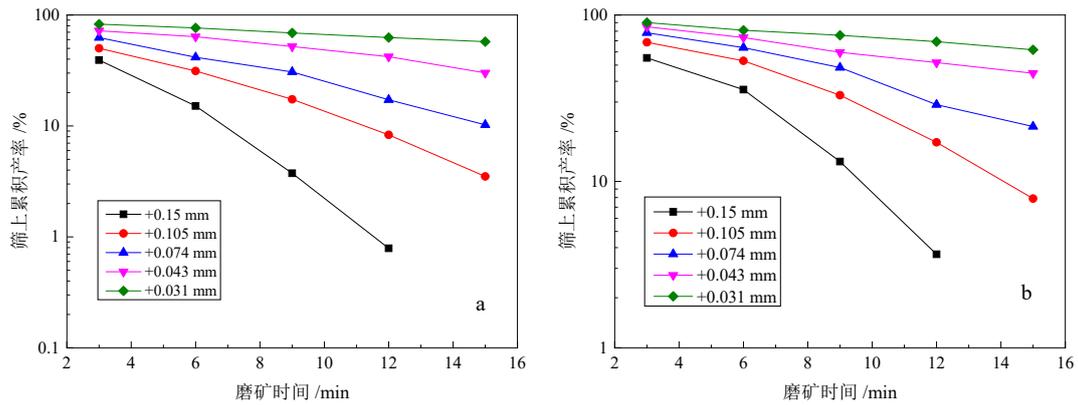


图3 高压辊磨(a)和圆锥(b)破碎产品的磨矿粒度曲线
Fig. 3 Grinding grain size curves of HPGR (a) and CC (b)

粒度特征方程选择 $R-R$ 方程, 如式(2)^[13]:

$$R = 100\exp(-bx^n) \quad (8)$$

式中: R —粒度大于 x 的正累积产率, %; x —颗粒粒度

或筛孔尺寸; b —与产物粒度相关的参数; n —均匀性系数, n 越小, 粒度分布越均匀。

贫赤铁矿石高压辊磨产品和圆锥破碎产品磨矿过程中, 参数 b 和 n 随时间 t 的变化曲线如图4所示。

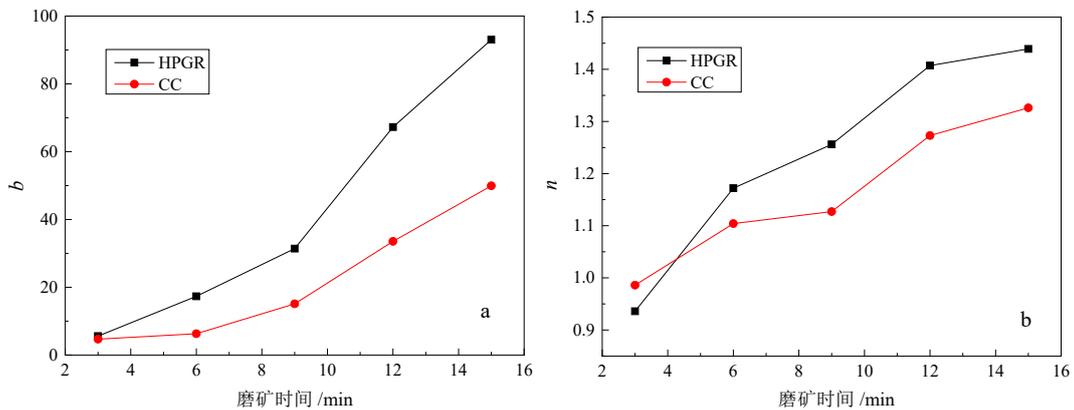


图4 参数 b (a) 和 n (b) 随时间的变化曲线
Fig. 4 The curves of b (a) and n (b) as a function of time

由图4可以看出, 高压辊磨—磨矿产品的均匀性系数 n 整体大于圆锥破碎—磨矿产品, 这可能是因为高压辊磨—磨矿产品中细粒级含量偏高导致均匀性降低。此外, 曲线 $b=f(t)$ 和 $n=f(t)$ 均呈抛物线形。因此, b 和 n 的表达如式(3)、(4):

$$b = f(t) = a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (9)$$

$$n = f(t) = c_2t^2 + c_1t + c_0 \quad (10)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)后得到式(5):

$$R = 100\exp[-(a_2t^2 + a_1t + a_0)x^{(c_2t^2 + c_1t + c_0)}] \quad (11)$$

式(5)中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 c_0 、 c_1 、 c_2 均为常数。对式(5)中各参数进行拟合求值, 结果如表3所示。

基于表3中参数所得 b 、 n 拟合曲线的相关系数均大于 0.95, 拟合结果较为准确, 将其代入式(5)得到高压辊磨产品的粒度特征方程为 $R = 100\exp[-(0.3958t^2 + 0.3716t + 0.3886)x^{(-0.0027t^2 + 0.0901t + 0.6992)}]$, 圆锥破碎产品的粒度特征方程为 $R = 100\exp[-(0.3113t^2 - 1.6801t + 6.2088)x^{(-0.0012t^2 + 0.0500t + 0.8471)}]$ 。

2.2 磨矿技术效率

依据 2.1 节得到的粒度特征方程, 可计算磨矿产品的粒度分布随时间的变化情况, 进而计算出不同破碎产品达到同一磨矿细度所用的磨矿时间和相应磨矿技术效率。设定过粉碎粒度为 0.031 mm, 不同粉碎产品的磨矿时间和磨矿技术效率随细度的变化曲线如图5所示。

由图5可以看出, 相同磨矿细度下, 高压辊磨产品所需要的磨矿时间显著低于圆锥破碎产品的磨矿时间。磨矿细度为 -0.074 mm 粒级含量占 50%~90% 时, 与圆锥破碎产品相比, 高压辊磨产品的磨矿时间

表3 式(5)中参数拟合求值结果

Table 3 Fitting results of parameters in formula 5

产 品	a_0	a_1	a_2	c_0	c_1	c_2
HPGR	0.388 6	0.371 6	0.395 8	0.699 2	0.090 1	-0.002 7
CC	6.208 8	-1.680 1	0.311 3	0.847 1	0.050 0	-0.001 2

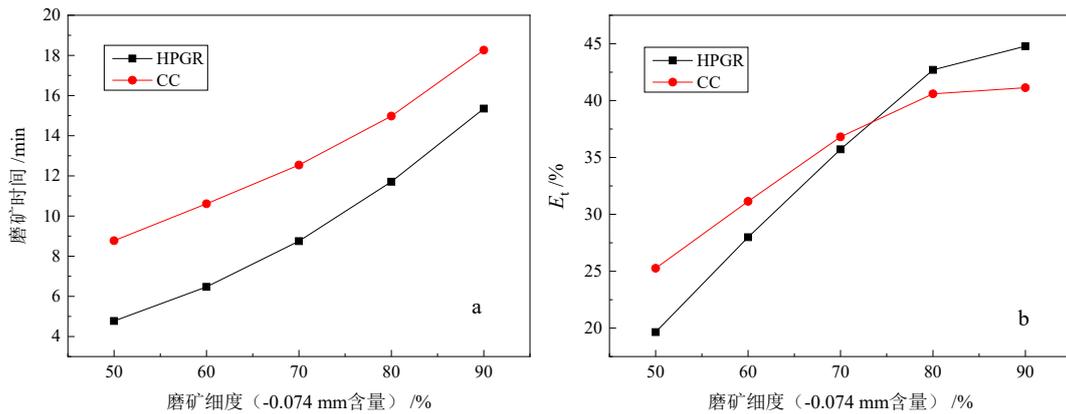


图 5 磨矿时间(a)和磨矿技术效率(b)随细度的变化曲线
 Fig. 5 The curves of grinding time (a) and technology efficiency (b) as a function of fineness

可缩短 15.94%~45.61%，即高压辊磨产品较圆锥破碎产品可磨性更好。此外，随着磨矿产品细度的增加，高压辊磨产品和圆锥破碎产品的磨矿技术效率均有所提高。其中磨矿细度由-0.074 mm 粒级含量由 50% 增加到 70% 时，圆锥破碎产品的磨矿技术效率高 于高压辊磨产品，但二者的差值逐渐减小，由 5.61 百分点降至 1.10 百分点；当磨矿细度增加至-0.074 mm 粒级含量分别为 80% 和 90% 时，圆锥破碎产品的磨矿技术效率增加幅度较小，高压辊磨产品的磨矿技术效率超过圆锥破碎产品 2.11 和 3.65 百分点。这是因为与圆锥破碎产品相比，高压辊磨产品的内部裂纹发

育更为充分，细粒级含量高，物料的机械强度低。在磨矿初期，高压辊磨产品细粒级部分发生随机性“贯穿破碎”的概率会显著提高；而到磨矿中后期，高压辊磨产品内部裂纹在磨矿作用下形成了新的断裂面，新生颗粒内部结构致密，与圆锥破碎产品相比，过粉碎不再显著^[14]。

2.3 Bond 球磨功指数

对两种破碎产品分别进行 Bond 球磨功指数测试实验，预先设定筛孔尺寸分别为 0.28 mm、0.15 mm、0.10 mm 和 0.074 mm，实验结果如表 4 所示。

表 4 不同破碎产品的 Bond 功指数参数

Table 4 Parameters of bond work index test for different crushing products

筛孔尺寸/mm	HPGR				CC			
	转数/r	$G_{bp}/(g \cdot r^{-1})$	$F_{80}/\mu m$	$P_{80}/\mu m$	转数/r	$G_{bp}/(g \cdot r^{-1})$	$F_{80}/\mu m$	$P_{80}/\mu m$
0.28	81	3.562	1 124	206	120	2.893	1 508	217
0.15	139	2.171	1 124	109	182	1.912	1 508	115
0.10	188	1.694	1 124	89	236	1.495	1 508	91
0.074	245	1.252	1 124	65	291	1.163	1 508	66

由表 4 可以看出，在预定的筛孔尺寸条件下，达到磨矿平衡时，高压辊磨产品的磨机转数均小于圆锥破碎产品，且筛孔尺寸较大时，二者的差别较大；筛孔尺寸较小时，二者的差别也较小。筛孔尺寸为 0.28 mm、0.15 mm、0.10 mm 和 0.074 mm 时，高压辊磨产品的磨机转数较圆锥破碎产品的磨机转数分别减少 32.50%、23.63%、20.34% 和 15.81%。同时，在预定的筛孔尺寸下，高压辊磨产品的 G_{bp} 均大于圆锥破碎产品。当筛孔尺寸为 0.28 mm、0.15 mm、0.1 mm 和 0.074 mm 时，高压辊磨产品 G_{bp} 较圆锥破碎产品 G_{bp} 分别提高 23.12%、13.55%、13.31% 和 7.65%。可见，高压辊磨产品可磨性好、更易磨；随着磨矿细度的减小，高压辊磨机破碎产品的可磨性优势有所减小，但在控制筛孔尺寸为 -0.074 mm 时，可磨性优势仍较为明显。

此外，高压辊磨破碎产品经 Bond 功指数球磨机闭路磨矿后筛下产品的 P_{80} 均小于圆锥破碎产品，且随着筛孔尺寸的减小，二者的差别逐渐减小。筛孔尺寸为 0.28 mm、0.15 mm、0.1 mm 和 0.074 mm 时，高压辊磨产品 P_{80} 较圆锥破碎产品 P_{80} 分别减小 11 μm 、6 μm 、2 μm 和 1 μm 。这表明，在相同磨矿条件下，与圆锥破碎产品相比，高压辊磨产品的磨矿产品粒度更细，控制筛孔尺寸为 0.074 mm 时，二者的差别不大。

将表 4 中的数据带入式 (7)，可计算出的不同筛孔尺寸条件下两种破碎产品的 Bond 球磨功指数，结果如图 6 所示。

由图 6 可知，筛孔尺寸为 0.28 mm、0.15 mm、0.1 mm 和 0.074 mm 时，高压辊磨产品的 Bond 球磨功指数均相对较低，分别较圆锥破碎产品的 Bond 球磨

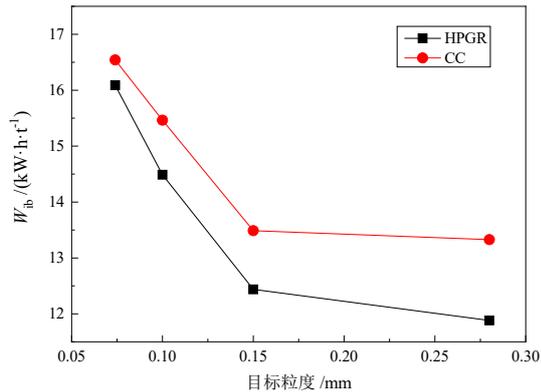


图6 不同破碎产品的 W_b
Fig. 6 The W_b of different crushing products

功指数降低 10.84%、7.78%、6.30% 和 2.74%，表明粗磨时高压辊磨产品的磨矿能耗显著低于圆锥破碎产品，即便控制筛孔尺寸为 0.074 mm 时节能效果仍较为明显。该现象的原因在于高压辊磨产品内部存在的微裂纹，使得粗磨时高压辊磨产品较圆锥破碎机破碎产品更为易磨；随着磨矿细度的降低，高压辊磨产品内部裂纹数量减少，其易磨程度有所降低。

3 结论

(1) 相同磨矿条件下，采用高压辊磨机破碎时后续磨矿产品细度更细。磨矿时间 9 min 时，与圆锥破碎—磨矿相比，高压辊磨—磨矿产品中 +0.15 mm 粒级含量减少 9.41 个百分点，-0.031 mm 粒级含量增加 6.65 个百分点。

(2) 不同磨矿细度下，两种破碎产品的磨矿技术效率有所差别。磨矿产品中 -0.074 mm 粒级含量低于 70% 时，相对于圆锥破碎产品，高压辊磨产品的磨矿技术效率有所偏低；随着磨矿细度增加到 -0.074 mm 粒级含量为 80% 及以上，高压辊磨产品的磨矿技术效率略高于圆锥破碎产品。

(3) 与圆锥破碎产品相比，高压辊磨产品的磨矿能耗更低。控制筛孔尺寸为 0.074~0.28 mm 范围内，高压辊磨产品的 Bond 球磨功指数较圆锥破碎产品低 2.74%~10.84%。

参考文献:

- [1] 肖庆飞, 段希祥. 磨矿过程中应注意的问题分析及对策研讨[J]. 矿产综合利用, 2006(4): 30-33.
XIAO Q F, DUAN X X. The analysis of some problems existed in the grinding process and their countermeasure[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2006(4): 30-33.
- [2] 刘磊. 贫赤铁矿石高压辊磨机粉碎—高效分选技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
LIU L. High efficient separation of lean hematite ore comminuted by high-pressure grinding roller[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [3] BENZER H, AYDOĞN N A, DUNDAR H. Investigation of the breakage of hard and soft components under high compression: HPGR application[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24: 303-307.
- [4] 陈运双, 李丽匣, 袁致涛, 等. 高压辊磨机在金属矿选矿与球团预处理领域的工艺和操作参数[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 164-170.
CHEN Y S, LI L X, YUAN Z T, et al. Comparison on process and operational parameters of HPGR in the field of pellet pretreatment and metal ore beneficiation[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(6): 164-170.
- [5] 谭欣, 刘书杰, 肖巧斌. 预抛—分级回收工艺预选磁鲁某金铜铁多金属矿深部矿石[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(6): 102-108.
TAN X, LIU S J, AND XIAO Q B. Pre-concentration process of pre-throw—classification recovery of pre-thrown tailings on deep ore in a Au—Cu—Fe polymetallic deposit in Peru[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020, 40(6): 102-108.
- [6] 袁满, 卢冀伟, 张俊飞, 等. 高压辊磨机在有色金属矿山的应用进展与展望[J]. 中国矿业, 2023, 32(2): 90-96.
YUAN M, LU J W, ZHANG J F, et al. Research progress and prospect of high pressure grinding rolls used in non-ferrous metal mines[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(2): 90-96.
- [7] 肖启飞, 李庚辉. 南芬选矿厂北山部位矿石高压辊磨产品抛尾试验[J]. 现代矿业, 2023(3): 130-132.
XIAO Q F AND LI G H. Tailings discarding test of ore high pressure roller grinding products in Beishan part of Nanfen concentrator[J]. *Modern Mining*, 2023(3): 130-132.
- [8] HAN Y X, LIU L, YUAN Z T, et al. Comparison of low-grade hematite product characteristics in a high-pressure grinding roller and jaw crusher[J]. *Minerals and Metallurgical Processing*, 2012, 29(2): 75-80.
- [9] 刘磊, 袁致涛, 韩跃新, 等. 贫赤铁矿高压辊磨产品湿式预选研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 128-132.
LIU L, YUAN Z T, HAN Y X, et al. Wet pre-concentration of comminuted products by high-pressure grinding roller for lean hematite[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(1): 128-132.
- [10] 韩跃新, 刘磊, 袁致涛. 贫赤铁矿高压辊磨机产品强磁预选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2013(1): 14-18.
HAN Y X, LIU L, AND YUAN Z T. High intensity magnetic pre-concentration of hematite ore comminuted by high-pressure grinding roller[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2013(1): 14-18.
- [11] 高航, 屈利刚, 赵超. 高压辊磨机粉碎铁矿石的试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 49-52.
GAO H, QU L G, AND ZHAO C. Experimental study of new high-pressure grinding roller crushing iron stone[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2002, 23(1): 49-52.
- [12] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
DUAN X X. Ore crushing and grinding[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [13] OZKAN A, YEKELER M, CALKAYA M. Kinetics of fine wet grinding of zeolite in a steel ball mill in comparison to dry grinding[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2009, 90(1): 67-73.
- [14] CAO J C, LIU L, HAN Y X, et al. Comminution behavior and mineral liberation characteristics of low-grade hematite ore in high pressure grinding roll[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, 55(2): 575-585.

Effect of Crushing Modes on Grinding Performance of Lean Hematite Iron Ore from Qidashan

CAO Jincheng^{1,2}, HAN Yuexin³, LIU lei^{1,2}, CAO Fei^{1,2}

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, China Geological Survey, Zhengzhou 450006, Henan, China;

2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, Henan, China;

3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China

Abstract: Compared with the traditional crushing equipments, the high-pressure roller mill (HPGR) has the advantages of high crushing efficiency, low unit energy consumption, and directly discarding tailings for grinding products. Taking the Qidashan lean hematite ore as the raw materials, the particle size distribution of grinding products, grinding technical efficiency, and Bond work index of ball mill of HPGR products and cone crushing (CC) products were investigated to compare the grinding performance of different crushing products. The results showed that compared with CC, the content of coarse particles in the follow-up grinding products decreased and the content of fine particles increased using HPGR under the same grinding conditions. The +0.15 mm size fraction decreased 9.41 percentage points after 9 min grinding, while the -0.031 mm increased 6.45 percentage points. When the content of -0.074 mm particles in grinding products was lower than 70%, the grinding technical efficiency of HPGR products was lower than that of CC products. When the content of -0.074 mm particles in grinding products reached 80% or above, the grinding technical efficiency of HPGR products was slightly higher than that of CC products. The energy consumption of HPGR products was obviously lower than that of CC products. The Bond work index of ball mill of HPGR products was 2.74 to 10.84 percentage lower than that of CC products under different control sieve size conditions. This study provides a guidance for the HPGR application in ore comminution.

Keywords: lean hematite iron ore; high-pressure roller mill; cone crushing; grinding technical efficiency; bond work index of ball mill

引用格式: 曹进成, 韩跃新, 刘磊, 曹飞. 破碎方式对齐大山贫赤铁矿石磨矿性能的影响[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 105-111.

CAO Jincheng, HAN Yuexin, LIU lei, CAO Fei. Effect of crushing modes on grinding performance of lean hematite iron ore from Qidashan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(3): 105-111.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



作者简介:

曹进成(1980—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 任职于中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所。发展循环经济工作部际联席会议专家咨询委员会成员。主要从事矿产综合利用技术及标准研究、矿产资源开发利用规划研究及绿色矿山建设等方面的工作, 获得国土资源科技进步二等奖 1 项。主持(参与)编写综合利用标准 10 项、绿色矿山标准 9 项。