

# 攀西钒钛磁铁矿高压辊磨的产品特性

袁致涛<sup>1</sup>, 郭小飞<sup>1</sup>, 严 洋<sup>1,2</sup>, 韩跃新<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 成都利君实业股份有限公司, 四川 成都 610045)

**摘 要:** 对攀西钒钛磁铁矿进行了高压辊磨超细粉碎, 分析了不同粉碎工艺对粉碎产品粒度特性的影响, 研究了不同粉碎方式下矿石 Bond 球磨功指数的变化以及微裂纹产生的情况. 结果表明: 辊面压力的增加使粉碎产品的破碎比增大, 粒度分布更加均匀; 边料循环量的增加, 使粉碎产品粒度变细, 但均匀性降低; - 3.2 mm 分级全闭路循环的粉碎产品与颚式破碎机产品相比细粒级含量明显增加, 而且粒度分布更加均匀; 高压辊磨机粉碎的钒钛磁铁矿石内部产生了大量的晶内裂纹和解离裂纹, 使其 Bond 球磨功指数(目标粒度 0.074 mm)比颚式破碎机的粉碎产品降低 14.05%.

**关 键 词:** 钒钛磁铁矿; 高压辊磨机; 粒度特性; Bond 球磨功指数; 微裂纹

中图分类号: TD 451

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2012)01-0124-05

## Product Characteristics of Vanadium-Titanium Magnetite from Panxi by High Pressure Grinding Roller

YUAN Zhi-tao<sup>1</sup>, GUO Xiao-fei<sup>1</sup>, YAN Yang<sup>1,2</sup>, HAN Yue-xin<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Chengdu Leejun Industrial Co., Ltd, Chendu 610045, China. Corresponding author: GUO Xiao-fei, E-mail: gxf0957@126.com)

**Abstract:** Vanadium-titanium magnetite from Panxi was superfinely crushed by high pressure grinding roller. The particle size characteristics of the crushed product from different crushing processes were analyzed, and the modification of the work index of ball mill and emerging of the micro-crack by different crushing manner were studied. The results showed that, in crushed products, the reduction ratio increases and the size distribution becomes more uniform with increasing of the pressure on roller surfaces. The particle size decreases but uniformity reduces with increasing of the edge products circulating mass. And the fine fraction content of crushing products from - 3.2 mm classification closed-circuit by HPGR increases obviously compared with that by Jaw Crusher and particle size distribution is more uniform. Large amount of intracrystalline cracks and cleavage cracks are generated in vanadium-titanium magnetite crushed by HPGR, which makes the Bond work index of ball mill (objective particle size is 0.074 mm) of vanadium-titanium magnetite 14.05% lower than that by Jaw Crusher.

**Key words:** vanadium-titanium magnetite; high pressure grinding roller; particle size characteristics; Bond work index of ball mill; micro-crack

磨矿作业能耗占整个碎磨作业能耗的 80% 以上,“多碎少磨”理论是粉碎工程中节能技术快速发展的重要标志.降低磨矿能耗最有效的途径是降低入磨矿石的粒度,目前主要的做法是用大型化、大破碎比、高能、低耗的新型破碎设备<sup>[1]</sup>.

高压辊磨机是一种新型高效的破碎设备,具有单位破碎能耗和钢耗低、处理能力大、占地面积少、设备作业率高等特点.经高压辊磨机粉碎的产品,粒度细,分布均匀,由于采用了料层粉碎的原理,粉碎产品内部可产生大量微裂纹,能够有效降

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N100401007); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0308).

作者简介: 袁致涛(1971-),男,湖北大冶人,东北大学教授; 韩跃新(1961-),男,内蒙古赤峰人,东北大学教授,博士生导师.

低 Bond 球磨功指数, 节能效果明显<sup>[2-4]</sup>.

本文对攀西钒钛磁铁矿进行了高压辊磨超细粉碎, 分析了辊面压力 and 不同粉碎工艺对产品粒度特性的影响, 研究了不同粉碎方式下矿石 Bond 球磨功指数的变化以及产生微裂纹的情况.

1 试验条件与试验方法

试验选用 CLM-25-10 型高压辊磨机, 压辊直径 250 mm, 压辊宽度 100 mm, 辊面压力 0~7 N/mm<sup>2</sup>, 辊面速度 0~0.52 m/s, 工作辊隙 4~7 mm. 试验原料为攀钢选厂细碎产品, 矿石硬度 (莫氏硬度) 4~7, 堆密度 2.56 × 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>, 水分含量约 1%, 最大粒度 20 mm ( $d_{80}$  = 15.5 mm), -0.074 mm 粒级含量 3.23%.

辊面压力是高压辊磨机粉碎物料最主要的工作参数, 本文选择辊面压力分别为 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4 N/mm<sup>2</sup> 时进行粉碎试验. 设置高压辊磨机的工作参数后, 无压启动设备, 将物料堆满料仓, 加压后迅速打开下料口使物料落入两压辊之间, 试验完成后对粉碎产品进行打散、混匀、缩分取样、粒度筛析. 对采用不同边料循环工艺和分级全闭路工艺的高压辊磨粉碎产品进行同样的试验和分析. 对全闭路试验的产品进行 Bond 球磨功指数测定, 使用偏光显微镜对其内部的微裂纹进行研究, 并与颞式破碎机产品进行比较.

2 高压辊磨产品粒度特性研究

通常采用破碎比对产品的粒度特性进行表征. 破碎比 ( $F_X/P_X$ ) 为给料中  $X\%$  通过的粒度与产品中  $X\%$  通过的粒度的比值<sup>[5]</sup>. 高压辊磨机的粉碎产品较细, 运用罗辛-拉姆勒 (Rosin-Rammler) R-R 分布<sup>[6-7]</sup> 对其粒度特性进行描述, R-R 方程为

$$R = 100\exp(-bx^n) \times 100\% . \tag{1}$$

式中:  $R$  为粒度大于  $x$  的正累计产率, %;  $x$  为颗粒直径或筛孔宽;  $b$  为与产物粒度相关的参数;  $n$  为均匀性系数, 表示粒度分布范围的宽窄程度,  $n$  越小, 粒度分布越均匀.

2.1 开路粉碎产品的粒度特性研究

试验设定辊面速度为 0.20 m/s, 辊面压力分别取 3.2, 4.0, 4.8, 5.6, 6.4 N/mm<sup>2</sup>, 破碎比如图 1 所示.

由于高压辊磨机的料层粉碎在纯压应力作用下进行, 其能量传递效率要高于颞式破碎机单纯的压力、冲击力和剪切力, 料层粉碎也就比压碎、磨碎、劈碎、折碎和击碎等外力作用造成的粉碎效

果好.

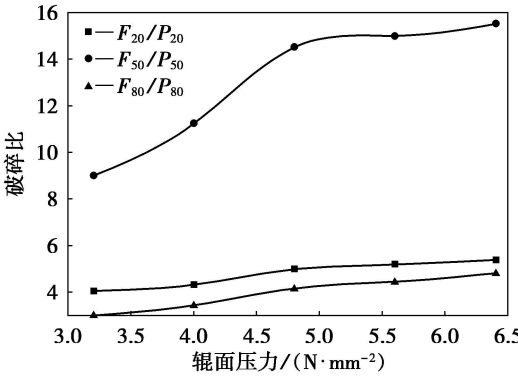


图 1 不同辊面压力对破碎比的影响  
Fig. 1 Effect of different roller surface pressure on reduction ratio

由图 1 可以看出, 随着辊面压力的增加, 粉碎产品中的粗粒级产物减少, 细粒级产物增加. 这是由于粗颗粒之间的相互作用力变大, 被优先粉碎, 而较细颗粒由于颗粒强度的“尺寸效应”(颗粒的名义强度会随着粒度的减小而明显增加)使得粉碎程度略差于粗颗粒, 最终导致了中间粒级产品的积累, 使破碎比  $F_{50}/P_{50}$  大于  $F_{20}/P_{20}$  和  $F_{80}/P_{80}$ .

粉碎产品的正累计粒度特性曲线如图 2 所示, 其 R-R 方程拟合回归结果如表 1 所示.

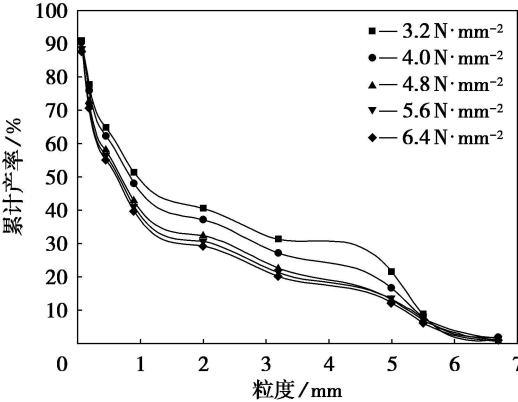


图 2 不同辊面压力下开路粉碎产品的粒度分布  
Fig. 2 Size distribution of products in different roller surface pressure

表 1 不同辊面压力下粉碎产品正累计曲线 R-R 方程回归结果

Table 1 Results of cumulative R-R curve fitting of size distribution for crushed products in different roller surface pressure

辊面压力/(N·mm <sup>-2</sup> )	<i>n</i>	<i>b</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
3.2	0.668 0	0.707 7	0.909 2
4.0	0.665 1	0.769 0	0.940 2
4.8	0.636 5	0.880 9	0.936 9
5.6	0.611 9	0.906 7	0.946 0
6.4	0.607 4	0.940 1	0.942 8

在粉碎过程中发现, 随着辊面压力的增加, 生

成料饼的数量增加, 密实度增大, 说明颗粒间的相互作用力增大, 料层破碎的效果更好. 由表 2 可以看出, 粉碎产品的均匀性系数  $n$  随辊面压力的增加而减小, 说明粉碎产品的粒度分布更加均匀. 但当辊面压力大于  $5.6\text{ N/mm}^2$  时, 均匀性系数的减大幅度明显变小, 说明辊面压力的持续增加并不利于细颗粒物料的破碎.

2.2 闭路粉碎产品的粒度特性研究

目前应用于铁矿石粉碎的高压辊磨机主要采用大辊径小辊宽的压辊结构, 这种设备可处理较大粒度的硬质物料, 但因“边缘效应”(辊面压力在辊面轴向上的分布不均造成辊面两端的物料被粉碎的程度较轻)比较严重, 导致粉碎产品中边料的比例偏高. 试验证明, 粉碎产品中的大颗粒基本上都是从辊两端逃逸的, 因此生产现场的高压辊磨流程一般采用闭路流程, 主要包括边料循环闭路流程和分级全闭路循环流程.

2.2.1 边料循环闭路粉碎

辊面压力  $5.6\text{ N/mm}^2$ , 辊面速度  $0.20\text{ m/s}$  时, 边料循环量设定为 30%, 40%, 粉碎产品粒度稳定后中料的正累计粒度特性曲线如图 3 所示, 其 R-R 方程拟合回归结果如表 2 所示.

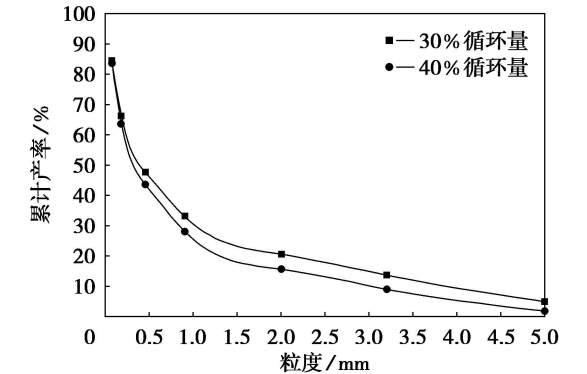


图 3 不同边料循环量下粉碎产品粒度分布  
Fig. 3 Size distribution of crushed products in different edge products circulating mass

表 2 不同边料循环量下粉碎产品正累计 R-R 方程回归结果  
Table 2 Results of cumulative R-R curve fitting of size distribution for crushed products in different edge products circulating mass

边料循环量/%	$n$	$b$	$r^2$
30	0.636 8	1.075 3	0.982 5
40	0.678 9	1.261 5	0.984 5

由图 3 和表 2 可以看出, 经过一次辊压后, 边料的细度和强度降低, 与新給料混合后, 密实度增加, 颗粒之间的料层粉碎增多, 从而使最终的粉碎产品粒度更细. 随着边料循环量的增加, 粉碎产品的均匀性系数  $n$  增大, 产品粒度分布的均匀性降

低. 边料循环能够减少粉碎产品中的粗粒级含量, 但边料循环量过大会导致粉碎产品均匀性降低, 同时造成高压辊磨机粉碎效率降低.

2.2.2 分级全闭路循环粉碎

对于品位较低的磁铁矿石, 高压辊磨之后可实现预选抛尾, 在设计中要保证粗选作业率和回收率, 因此对粉碎产品的粒度上限要求较严, 采用分级全闭路循环的高压辊磨工艺能够很好地满足这个要求. 本文中将高压辊磨粉碎钕钛磁铁矿的边料和中料进行  $3.2\text{ mm}$  筛分, 筛上产品与新給料混合后再压, 稳定后与颚式破碎机  $3.2\text{ mm}$  全闭路粉碎产品的粒度特性进行比较, 其正累计粒度特性曲线如图 4 所示, 其 R-R 方程拟合回归结果如表 3 所示.

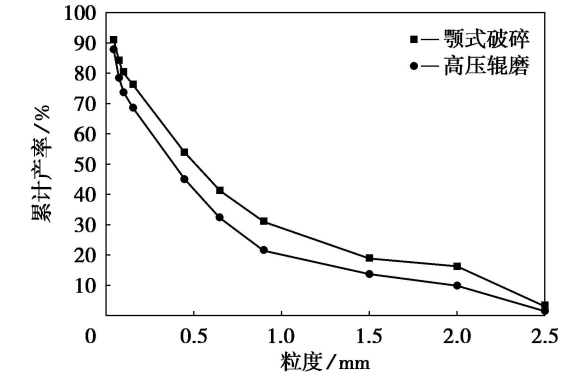


图 4 不同粉碎方式下粉碎产品粒度分布  
Fig. 4 Size distribution of crushed products in different crushing modes

表 3 不同粉碎方式下粉碎产品正累计 R-R 方程回归结果  
Table 3 Results of cumulative R-R curve fitting of size distribution for crushed products in different crushing modes

粉碎方式	$n$	$b$	$r^2$
颚式破碎	0.808 8	1.264 6	0.988 0
高压辊磨	0.774 3	1.608 6	0.985 8

由图 4 和表 3 可以看出, 高压辊磨机粉碎产品较颚式破碎机产品的粒度更细, 细粒级含量更高( $-0.074\text{ mm}$  粒级含量高 5.56 个百分点), 均匀性系数  $n$  降低, 粒度分布更加均匀, 这种粒度分布的钕钛磁铁矿更加有利于预选抛尾.

3 高压辊磨产品 Bond 球磨功指数研究

对高压辊磨机和颚式破碎机全闭路粉碎的  $-3.2\text{ mm}$  钕钛磁铁矿进行邦德(Bond)球磨功指数试验(目标粒度为  $0.074\text{ mm}$ ), 按照式(2)进行计算<sup>[8]</sup>, 结果如表 4 所示.

$$W_{ib}=49.04\sqrt[p_1^{0.23}\cdot G_{bp}^{0.82}\cdot\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}}-\frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)]\quad (2)$$

式中： $W_{ib}$ 为 Bond 球磨功指数， $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ ； $p_1$ 为

试验筛孔尺寸， $\mu\text{m}$ ； $G_{bp}$ 为磨矿平衡时球磨机每一转新生成的试验筛孔以下粒级物料的质量， $\text{g}\cdot\text{r}^{-1}$ ； $P_{80}$ 为产品中 80% 物料通过的粒度， $\mu\text{m}$ ； $F_{80}$ 为给料中 80% 物料通过的粒度， $\mu\text{m}$ 。

表 4 Bond 球磨功指数试验结果  
Table 4 Test results of Bond work index of ball mill

矿样	试验筛孔 $P_1/\text{mm}$	可磨度 $G_{bp}/(\text{g}\cdot\text{r}^{-1})$	产品粒度 $P_{80}/\mu\text{m}$	给料粒度 $F_{80}/\mu\text{m}$	功指数 $W_{ib}/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1})$
颚破产品	0.074	0.721 0	66.8	1 500	24.77
辊压产品		0.841 5	59.0	1 000	21.29

结果表明，经过高压辊磨机粉碎的钒钛磁铁矿石的磨矿功指数为  $21.29\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ ，经过颚式破碎机粉碎的为  $24.77\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ ，前者比后者降低 14.05%，说明采用高压辊磨机粉碎的钒钛磁铁矿在磨矿中所需的能耗比使用传统颚式破碎机大幅降低，有利于后续的进一步磨选。一方面这是由于高压辊磨机粉碎产品的粒度更细，分布更加

均匀，另外一个重要的原因则是高压辊磨机的料层粉碎作用使矿石颗粒内部产生了大量对磨矿过程有利的微裂纹。

采用偏光显微镜分别对高压辊磨机和颚式破碎机粉碎的钒钛磁铁矿石的微观结构进行观察，如图 5 所示。

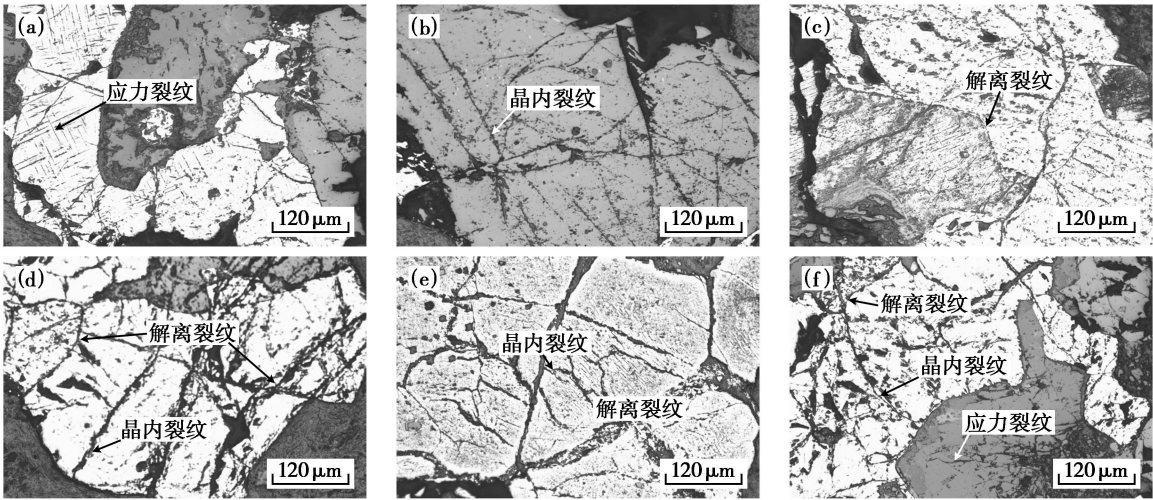


图 5 不同粉碎方式下- 3.2 mm 钒钛磁铁矿石微观结构  
Fig. 5 Microstructure of - 3.2 mm vanadium-titanium magnetite in different crushing modes  
(a), (b), (c) 颚式破碎机粉碎产品；(d), (e), (f) 一高压辊磨机粉碎产品。

经过粉碎的钒钛磁铁矿石中产生的微裂纹大致可以分为 3 种：矿石发育过程中的应力裂纹、破碎过程中产生的晶内裂纹（矿物颗粒内部的裂纹）和解离裂纹（矿石颗粒中不同矿物间的裂纹）<sup>[9]</sup>，这些微裂纹的存在对后续粉磨工艺能耗的降低非常有利。由图 5 可以看出，颚式破碎机粉碎产品内部的微裂纹以应力裂纹为主和少量的晶内裂纹、解离裂纹，而经过高压辊磨机粉碎的钒钛磁铁矿石内的晶内裂纹和解离裂纹明显增多，这两种微裂纹对矿石磨矿过程能耗的降低是最重要的。

4 结 论

1) 高压辊磨机粉碎攀西钒钛磁铁矿石的粒

度变化与辊面压力密切相关。随着辊面压力的增大，较粗颗粒被优先粉碎，粉碎产品的破碎比增大，均匀性系数减小，粒度分布更加均匀。

2) 边料循环闭路粉碎试验表明，边料循环量的增加使粉碎产品的粒度更细，但是均匀性降低；- 3.2 mm 分级全闭路循环试验表明，高压辊磨机粉碎产品的细粒级含量比颚式破碎机产品明显增加，粒度分布更加均匀。

3) 高压辊磨机粉碎攀西钒钛磁铁矿的 Bond 球磨功指数（目标粒度为 0.074 mm）比颚式破碎机的降低 14.05%，主要原因在于辊压过程中产生了大量有助于磨矿能耗降低的晶内裂纹和解离裂纹。

（下转第 132 页）

2) 弱磁性矿物所受的磁力  $F_m$  与比磁化率  $\chi_0$  和背景磁场强度的平方  $H_0^2$  成正比. 在同一背景磁场强度下, 对于纯矿物颗粒, 增加介质棒直径有利于粗颗粒的捕收, 减小介质棒直径有利于细颗粒的捕收; 对于实际连生体矿粒, 考虑到颗粒重力和黏滞阻力的影响, 大直径介质棒有利于粗矿粒的捕收但不影响细矿粒的捕收; 小直径介质棒有利于细矿粒的捕收, 但对粗贫连生体矿粒的捕收能力下降.

参考文献:

[ 1 ] 刘建远, 黄瑛彩. 高压辊磨机在矿物加工领域的应用[ J ]. 金属矿山, 2010( 6 ): 1- 8 .  
( Liu Jian-yuan, Huang Ying-cai. Applications of high pressure grinding rolls in mineral processing[ J ]. *Metal Mine*, 2010 ( 6 ): 1- 8. )

[ 2 ] Wasmuth H D, Unkelbach K H. Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals[ J ]. *Minerals Engineering*, 1991, 4( 7/ 8/ 9/ 10/ 11 ): 825- 837.

[ 3 ] Arvidson B R, Henderson D. Raw-earth magnetic separation equipment and application developments [ J ]. *Minerals Engineering*, 1997, 10( 2 ): 127- 137.

[ 4 ] Marinescu M. New permanent magnetic separator with Nd-Fe-B meets theoretical predictions[ J ]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, 25( 3 ): 2732- 2735.

[ 5 ] Read A D, Whitehead A. Pre-treatment of feed for dry magnetic separation of fine metarials [ J ]. *International Journal of Mineral Processing*, 1976, 12: 343- 355.

[ 6 ] 刘树贻. 磁电选矿学[ M ]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 118- 120 .  
( Liu Shu-yi. Magnetic and electrostatic separation [ M ]. Changsha: Central South Industrial University Press, 1994: 118- 120. )

[ 7 ] Sun Z Y, Li Z N. A study of vibration high gradient magnetic separation[ J ]. *Journal CSIMM*, 1985, 44( 2 ): 1- 10.

[ 8 ] Xiong D, Liu S, Chen J. New technology of pulsating high gradient magnetic separation [ J ]. *International Journal of Mineral Processing*, 1998, 54: 111- 127.

( 上接第 127 页 )

参考文献:

[ 1 ] Wills B A, Napier-Munn T. Grinding mills[ M ]. 7th ed. Oxford: Wills' Mineral Processing Technology, 2005.

[ 2 ] Torres M, Casali A. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls [ J ]. *Minerals Engineering*, 2009, 22: 1137- 1146.

[ 3 ] Namik A A, Levent E, Hakan B. High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry[ J ]. *Minerals Engineering*, 2006, 19: 130- 139.

[ 4 ] 刘建远, 黄瑛彩. 高压辊磨机在矿物加工领域的应用[ J ]. 金属矿山, 2010( 6 ): 1- 8 .  
( Liu Jian-yuan, Huang Ying-cai. Application of high pressure grinding rolls in mineral processing[ J ]. *Metal Mine*, 2010 ( 6 ): 1- 8. )

[ 5 ] Hilden M, Suthers S. Comparing energy efficiency of multi-pass high pressure grinding roll (HPGR) circuits[ C ] // XXV IMPC. Brisbane, 2010: 801- 811.

[ 6 ] Fuerstenau D W, Kapur P C. Comminution of minerals in a laboratory-size, choke fed high-pressure roll mills [ C ] // Proceedings of the 18th International Mineral Processing Congress. Sydney, 1993: 175- 180.

[ 7 ] Lim I L, Voigt W, Weller K R. Product size distribution and energy expenditure in grinding minerals and ores in high pressure rolls [ J ]. *International Journal of Mineral Processing*, 1996, 44/ 45: 539- 559.

[ 8 ] 魏德州. 固体物料分选学[ M ]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 26- 29 .  
( Wei De-zhou. Separation of solid materials [ M ]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 26- 29. )

[ 9 ] 陈友晴. Westerly 花岗岩试样单轴压缩破坏瞬时微裂纹观察[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27( 12 ): 2440- 2448 .  
( Chen You-qing. Observation of microcracks patterns in Westerly granite specimens stressed immediately before failure by uniaxial compressive loading[ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27( 12 ): 2440- 2448. )