

# 基于高压电脉冲的磁铁石英岩预处理

高 鹏<sup>1,2</sup>, 韩力仁<sup>1</sup>, 袁 帅<sup>1</sup>, 陈洪运<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山东招金集团有限公司, 山东 招远 265400)

**摘 要:** 采用一种新型实验室高压电脉冲矿石预处理技术及“预处理—破碎—磨矿—弱磁选”流程, 考察了高压电脉冲预处理技术对大孤山磁铁石英岩的粉碎产品及磁选精矿品位的影响。试验结果表明, 在磨矿浓度为 70%, 磨矿时间为 3 min, 磁场强度为 111.4 kA/m, 磁选时间为 3 min 的条件下, 预处理磁选精矿品位提高 7.26%。单体解离度分析表明, 预处理产品的粒级分布更均匀, 有用矿物的单体解离度提高 17.78% (-0.50 mm 粒级)。采用 SEM 观察其微观结构, 预处理破碎产品内部的裂纹主要在相邻的不同矿物界面之间产生并发展。高压电脉冲预处理技术通过促进矿石内部不同矿物晶界处微裂纹的产生和发展, 减少磨矿时间, 从而降低能耗。

**关 键 词:** 高压电脉冲; 矿石预处理; 磨矿; 单体解离; 微观形貌

**中图分类号:** TD 921 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)04-0563-06

## Magnetite Quartz Pre-treatment Using High Voltage Pulse

GAO Peng<sup>1,2</sup>, HAN Li-ren<sup>1</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>, CHEN Hong-yun<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shandong Zhaojin Group Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, China. Corresponding author: HAN Li-ren, E-mail: hlr951218@foxmail.com)

**Abstract:** A new type of laboratory high-voltage pulse (HVP) pretreatment technology and a pretreatment-crushing-grinding-weak magnetic separation process were used to investigate the effect of HVP pretreatment technology on the pulverized products of Dagushan magnetite quartzite and on the grade of magnetic separation concentrate. The test results showed that the grade of pretreatment concentrate increases by 7.26% when the grinding concentration, the grinding time, the magnetic field strength and the magnetic separation time are 70%, 3 min, 111.4 kA/m and 3 min respectively. The analysis of liberation degree showed that the particle size distribution of the pretreated products is more uniform, and the liberation degree of the useful mineral is increased by 17.78% (-0.50 mm grain size). The microstructure observed by SEM showed that the cracks inside the pretreated crushed product mainly generate and develop between the adjacent mineral interfaces. The HVP pretreatment technology can reduce the grinding time thus decreasing the energy consumption by promoting the generation and development of microcracks along different mineral grain boundaries within the ore.

**Key words:** high voltage pulse; ore pre-treatment; grinding; mineral liberation; microstructure

高压电脉冲破碎<sup>[1-4]</sup>是基于绝缘液中高压放电破碎固体材料的新技术。利用金属矿石中矿物与脉石矿物的介电常数、电导率等电学性质差异较大的特点, 采用高压电脉冲预处理金属矿石时, 放电通道易沿矿物界面发展, 在矿物界面产

生等离子体爆炸、热应力膨胀等, 进而形成冲击波和破坏力场导致裂纹产生及扩展, 最终造成矿石的宏观破裂。高压电脉冲破碎是最理想的沿晶界破裂方式, 不仅可使矿石破碎, 而且在矿石内部矿物界面上产生扩展裂纹和裂缝, 进而改善矿物解

理和分选特性<sup>[5-8]</sup>. 目前,关于高压电脉冲破碎技术在矿物加工过程的研究主要集中在金属矿石破碎和煤层增透的工艺优化研究<sup>[9-12]</sup>,但对高压电脉冲破碎金属矿石机理研究,尤其在将其作为预处理技术研究助磨降耗的机理研究鲜有报道. 本研究采用“预处理—破碎—磨矿—弱磁选”试验流程<sup>[13]</sup>,对破碎和磨矿产品进行单体解离度测定和 SEM 分析,研究了高压电脉冲选择性破碎机理,通过磨矿时间试验分析了预处理技术的助磨效果及其降耗的可能性,以期丰富高压电脉冲预处理的助磨降耗机理,为助磨降耗领域提供新的技术及其理论支撑<sup>[14]</sup>.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验所用矿样为大孤山磁铁矿石岩,其化学成分(质量分数,%)为 TFe 30.61, FeO 17.49, SiO<sub>2</sub> 45.77, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.12, MgO 2.75, CaO 1.27, 主要有毒元素 S, P 的质量分数分别为 0.035% 和 0.18%. 矿石中主要回收矿物为磁铁矿,其质量分数为 35.42%,主要脉石矿物为石英,其质量分数为 48.71%.

表 1 矿石中矿物组成(质量分数)

Table 1 Mineral compositions in ore (mass fraction)

%

| 磁铁矿   | 赤铁矿  | 黄铁矿  | 石英    | 黄铜矿  | 碳酸盐矿物 | 绿泥石  | 绢云母  | 其他   |
|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| 35.42 | 1.44 | 0.54 | 48.71 | 0.03 | 9.37  | 1.26 | 1.87 | 1.36 |

1.2 试验装置

图 1 为高压电脉冲预处理设备示意图,由脉冲发生装置和负载装置两部分组成. 输入电压为 0~220 V 的交流电,输出电压为 0~60 kV 高压直流电. 取磁铁矿石(-7+5 mm) 12 g 放入破碎腔,然后注入去离子水直至完全浸没矿石,最后盖上负极盖板,接通电源,进行预处理.

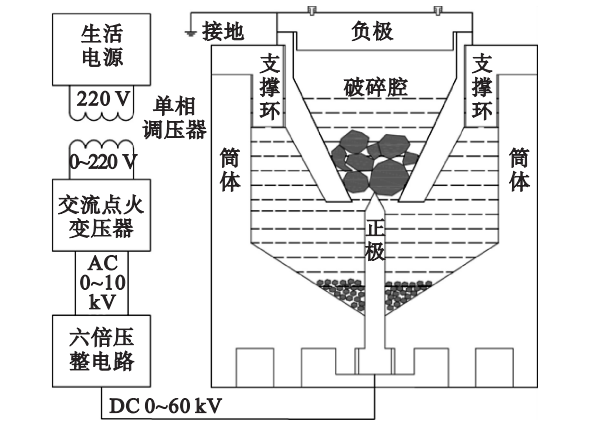


图 1 高压电脉冲预处理设备示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of high voltage pulse pretreatment equipment

1.3 试验方法

本研究采用的试验流程是“预处理—破碎—磨矿—弱磁选”,见图 2. 对样品进行高压电脉冲预处理试验,得到预处理样品. 将原矿和预处理矿样分别用圆盘破碎机进行破碎试验,分别将得到的未处理破碎产品和预处理破碎产品用筒式棒磨机进行磨矿试验. 将磨矿产品进行弱磁选试验,得到磁选精矿. 为了探明高压电脉冲预处理矿石对

磨矿的影响,对粉碎产品粒度分布及 TFe 进行分析. 采用 BX41M 光学显微镜对破碎产品和磨矿产品进行单体解离度分析,考查电脉冲预处理对矿物单体解离的影响. 采用 SSX-550 扫描电子显微镜(SEM)对粉碎产品进行微观结构分析,考查电脉冲预处理对矿石微观结构的影响.

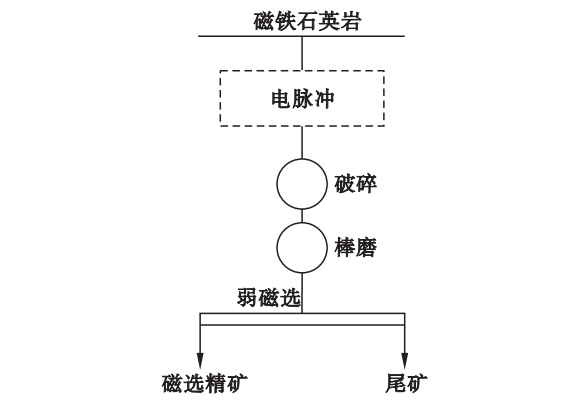


图 2 预处理原则流程图  
Fig. 2 Flow chart of the pre-processing principle

2 结果与讨论

2.1 高压电脉冲预处理对磨矿效果的影响

设定高压电脉冲预处理设备参数:球隙间距为 25 mm,初级充电电源的一级输入电压为 75 V,电极间距为 5 mm,脉冲个数为 60, 80, 100, 120 个. 另外,设定高压电脉冲预处理设备参数:球隙间距为 25 mm,初级充电电源的一级输入电压为 75 V,脉冲个数为 120 个,电极间距为 3, 5, 7, 9 mm. 采用筒式棒磨机对预处理破碎产品和未处

理破碎产品进行磨矿试验,磨矿浓度均为 70%,磨矿时间对  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率的影响见图 3。

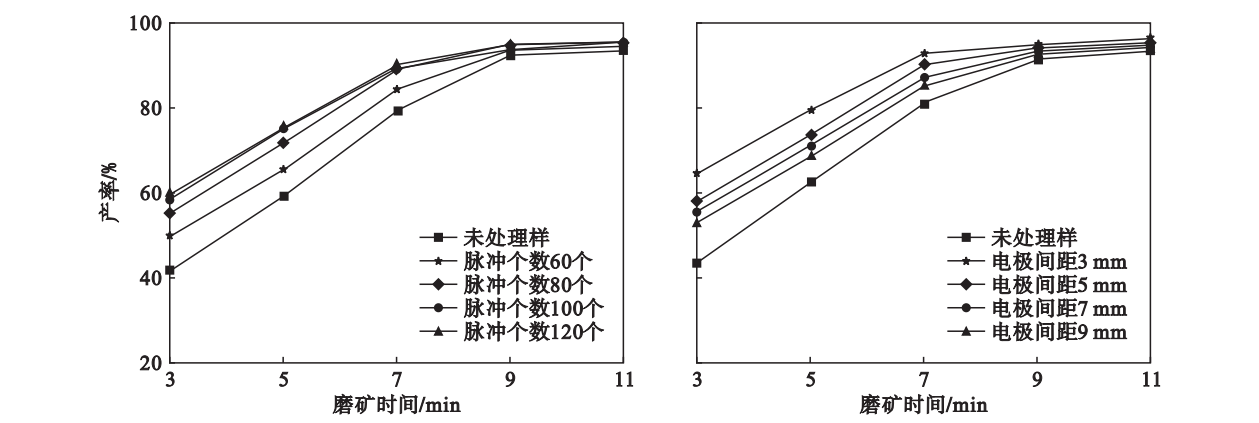
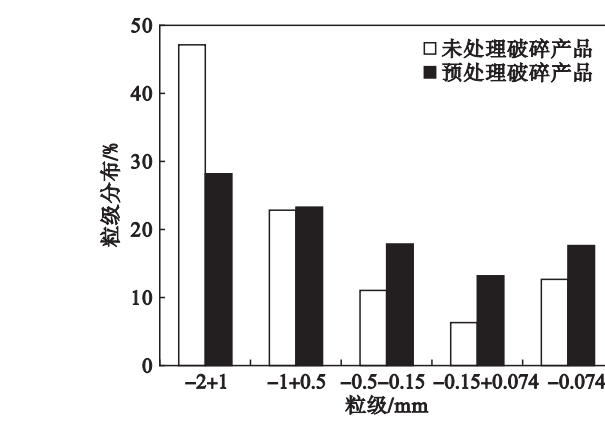


图 3 磨矿时间对  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率的影响  
Fig. 3 Effect of grinding time on yield for  $-0.074\text{ mm}$

由图 3 可知,经电脉冲预处理后的磨矿产品中  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率均较未处理磨矿产品更高,这说明高压电脉冲预处理提高矿样的可磨度.随着脉冲个数的增加和电极间距的减小,经电脉冲预处理后的磨矿产品中  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率均有所提高.当磨矿时间为  $3\text{ min}$  时,电脉冲预处理样品的细度较未处理样品最高提高  $21.13\%$ .随着磨矿时间增加,二者差值逐渐减小.这可能是因为随着磨矿时间的延长,削弱了高压电脉冲预处理的效果,进而  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率的差值变小.

## 2.2 高压电脉冲预处理对矿物单体解离度的影响

### 2.2.1 破碎产品的粒级分布和单体解离度分析



为了探究高压电脉冲预处理矿石的机理,首先分析了破碎产品的粒级分布,进行筛分试验,破碎产品粒级分布及各粒级 TFe 产率见图 4. 预处理破碎产品  $-0.5\text{ mm}$  粒级产率均较未处理破碎产品高,且粒度更加均匀. 这说明,高压电脉冲预处理技术能够强化破碎过程,提高细粒级的产率. 预处理破碎产品  $-0.5\text{ mm}$  粒级的 TFe 产率较未处理破碎产品明显增加,且  $-0.15+0.074$ ,  $-0.074\text{ mm}$  粒级 TFe 产率较未处理破碎产品分别提高  $9.02\%$  和  $10.51\%$ . 由此可见,高压电脉冲预处理技术能够明显提高细粒级破碎产物的产率.

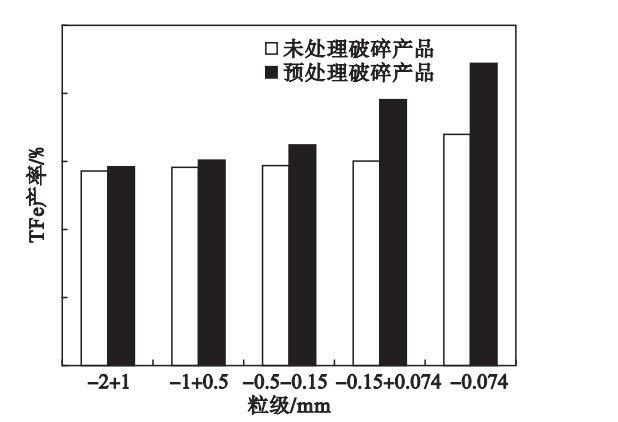


图 4 高压电脉冲预处理对破碎产品粒级分布及各粒级 TFe 产率的影响  
Fig. 4 Effect of high-voltage pulse pretreatment on particle size distribution and TFe yield

为了查明上述预处理破碎产品  $-0.5\text{ mm}$  粒级的 TFe 产率提高的原因,本研究进一步分析了  $-0.5\text{ mm}$  粒级破碎产品中有用矿物的解离特性. 预处理破碎产品中  $-0.15+0.074\text{ mm}$  和  $-0.074\text{ mm}$  粒级产品有用矿物单体解离度较未处理破碎产品分别提升  $15.76\%$  和  $21.22\%$ ,与相应粒级的 TFe 产率提升趋势是吻合的. 这说明高压电脉冲预处理磁铁石英岩时,微裂纹的产生及扩展不仅提高

后续流程的破碎效率,而且促进了有用矿物的单体解离.

### 2.2.2 磨矿产品的粒级分布和单体解离度分析

为了探究高压电脉冲预处理对磨矿指标的影响,分析了磨矿产品的粒级分布及其单体解离度. 由图 5a 可知,在预处理磨矿产品中,  $-0.074\text{ mm}$  粒级产率均较未处理破碎产品的高,  $+0.074\text{ mm}$  粒级的产率较未处理破碎产品的低,粒度更加均

匀. 这说明, 高压电脉冲预处理技术亦能够改善磨矿效果, 提高细粒级的产率. 由图 5b 可知, 预处理磨矿产品的单体解离度较未处理磨矿产品明显增

加, 且  $-0.043 + 0.038$ ,  $-0.038$  mm 粒级单体解离度分别提高了 25.82% 和 18.07%.

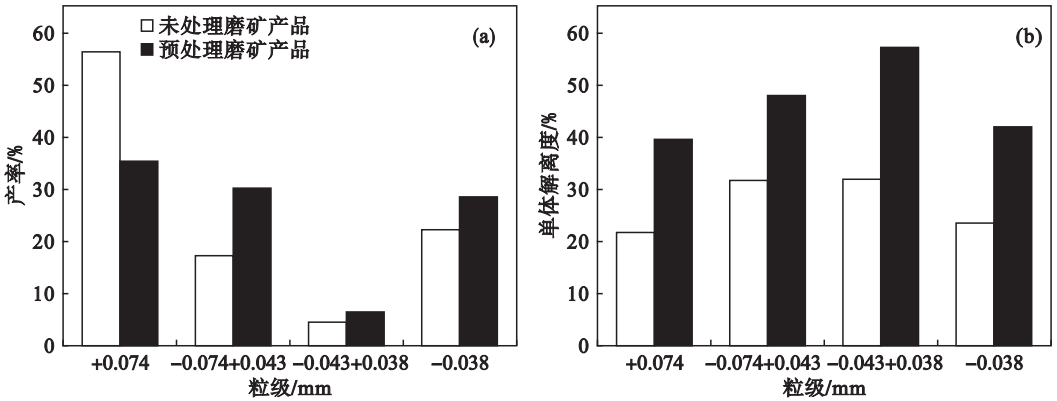


图 5 粒级对产率及单体解离度的影响  
Fig. 5 Effect of particle size on yield and mineral liberation

2.3 高压电脉冲预处理对分选效果的影响

为了探究高压电脉冲预处理对选别效果的影响, 在磁场强度为 111.4 kA/m, 磁选时间为 3 min 的条件下进行弱磁选试验. 由图 6 可知, 在相同破碎—磨矿—弱磁选工艺流程条件下, 预处理矿样的分选指标及单体解离度亦均优于未处理磨矿产品. 在磨矿时间为 3 min 时, 预处理精矿产率和磨矿产品单体解离度分别提升 7.26% 和 19.4%. 这是由于高压电脉中预处理磁铁矿石岩时, 放电通道在磁铁矿和石英等主要矿物的界面发展, 产生

等离子体爆炸、热应力膨胀等, 进而形成冲击波和破坏力场, 促进微裂纹的产生及扩展, 降低了预处理矿石整体抗压性能. 随着磨矿时间增加, 磁选精矿的 TFe 产率差值变小, 同时, 有用矿物的单体解离度趋于相同. 这与上述磨矿时间对  $-0.074$  mm 的粒级产率影响的变化趋势是一致的, 高压电脉冲预处理作用被减弱. 这说明高压电脉冲处理技术可以通过提高磨矿产品的细粒级的产率, 进而促进有用矿物的单体解离, 以提高磁选的分选指标.

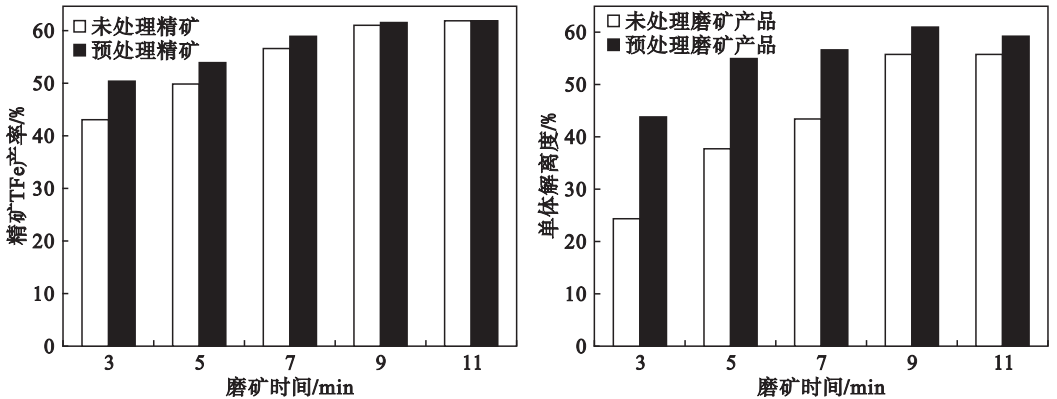


图 6 磨矿时间对有用矿物单体解离度和精矿 TFe 产率的影响  
Fig. 6 Effect of grinding time on valuable mineral liberation and concentrate TFe yield

2.4 高压电脉冲预处理对矿样微观形貌的影响

图 7 为两种破碎产品微观形貌的 SEM 图像. 由图 7a 可知, 未处理破碎产品表面较光滑. 由图 7b 可知, 预处理破碎产品的表面形貌存在气孔, 并且伴随在裂纹附近. 初步推测这些气孔是在高压电脉冲预处理时留下的痕迹; 同时, 根据高压电脉冲破碎的特性, 出现这种现象的原因是高压电脉冲处理磁铁矿石岩时, 放电通道中的高温环境

导致了矿物表面的金属矿物发生熔融, 再冷却凝固的断口界面出现这种气孔结构. 由图 7c 可知, 未处理破碎产品内部的晶体内部微裂纹是颗粒裂纹的主要存在形式. 由图 7d 可知, 预处理破碎产品内部裂纹主要在相邻的矿物界面之间产生并发展, 矿物的界面分离明显, 即晶界微裂纹的产生和发展. 与机械破碎相比, 不同矿物界面之间的解离在高压电脉冲破碎过程中享有一定程度的优先



性. 这说明高压电脉冲预处理技术能够显著促进

矿石内部不同矿物晶界处微裂纹的产生和发展,

提高有用矿物的解离特性.

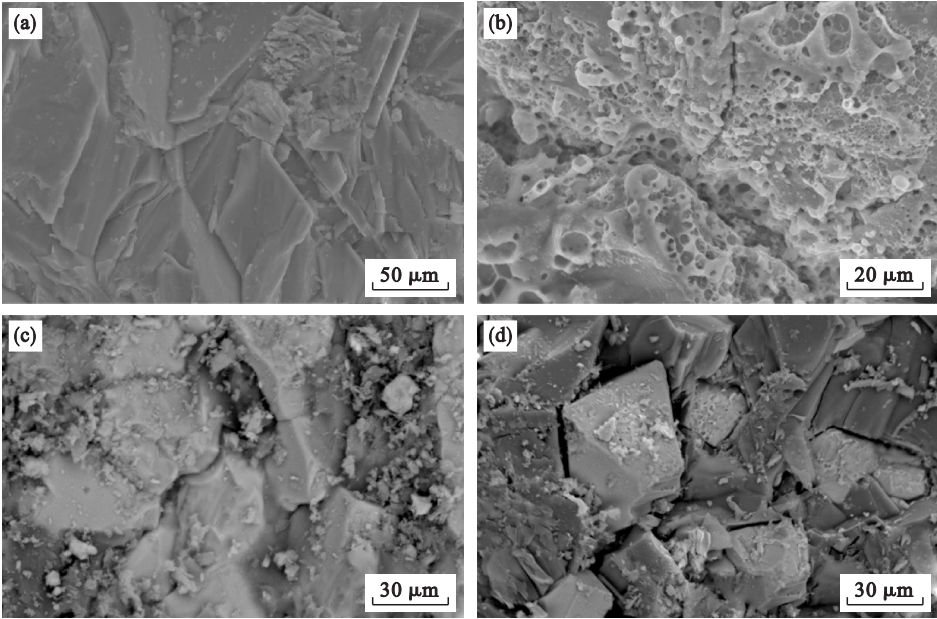


图 7 破碎产品 SEM 图  
Fig. 7 SEM image of crushed products  
(a),(c)—未处理破碎产品;(b),(d)—预处理破碎产品.

### 3 结 论

1) 采用“预处理—破碎—磨矿—弱磁选”工艺流程处理大孤山磁铁石英岩,在磨矿浓度为 70%,磨矿时间为 3 min 时,电脉冲预处理样品 -0.074 mm 粒级产率较未处理工艺产品提高 21.13%;在磁场强度为 111.4 kA/m,磁选时间为 3 min 的条件下,电脉冲预处理工艺的磁选精矿产率较未处理精矿产品提高 7.26%.

2) 高压电脉冲预处理技术能够强化粉碎过程,改善单体解离特性,提高细粒级的产率. 预处理破碎产品中 -0.15 + 0.074 mm 和 -0.074 mm 粒级产品有用矿物单体解离度较未处理破碎分别提升 15.76% 和 21.22%,预处理磨矿产品中 -0.043 + 0.038, -0.038 mm 粒级的单体解离度较未处理磨矿分别提高了 25.82% 和 18.07%.

3) SEM 分析表明,高压电脉冲预处理技术能够促进矿石内部晶界处微裂纹的产生和发展. 放电通道在磁铁矿和石英等主要矿物的界面发展,产生等离子体爆炸、热应力膨胀等,进而形成冲击波和破坏力场,促进微裂纹的产生及扩展,降低了预处理矿石整体抗压性能,进而减少磨矿时间,降低能耗.

### 参考文献:

[ 1 ] Andres U, Jirestig J, Timoshkin I. Liberation of minerals by high-voltage electrical pulses[J]. *Powder Technology*, 1999, 104(1):37-49.

[ 2 ] Zuo W, Shi F, Van Der Wielen K P, et al. Ore particle breakage behaviour in a pilot scale high voltage pulse machine[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 84:64-73.

[ 3 ] Gao P, Yuan S, Han Y X, et al. Experimental study on the effect of pretreatment with high-voltage electrical pulses on mineral liberation and separation of magnetite ore [ J ]. *Minerals-Basel*, 2017, 7(9):153-159.

[ 4 ] Wang E, Shi F N, Manlapig E. Experimental and numerical studies of selective fragmentation of mineral ores in electrical comminution [ J ]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 112:30-36.

[ 5 ] 刁智俊,赵跃民,段晨龙,等. 高压电脉冲破碎电路板的基础研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5):817-823.  
(Diao Zhi-jun, Zhao Yue-min, Duan Chen-long, et al. Basic research on high-voltage electric pulse crushing circuit boards [ J ]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2013, 42(5):817-823. )

[ 6 ] 许飞,赵跃民,张博,等. 基于高压电脉冲破碎废弃电路板粒度分形特性[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(2):139-145.  
(Xu Fei, Zhao Yue-min, Zhang Bo, et al. Particle size fractal characteristics of waste circuit board based on high voltage electric pulse breaking [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(2):139-145. )

[ 7 ] Zuo W, Shi F, Manlapig E. Pre-concentration of copper ores by high voltage pulses. Part 1: principle and major findings [ J ]. *Minerals Engineering*, 2015, 79:306-314.

(下转第 586 页)