

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2020.06.020

锡石多金属硫化矿微波助磨试验研究

郭润楠¹, 杨金林^{1,2}, 马少健^{1,2}, 帅智超¹

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 南宁 530004;

2. 广西有色金属及特色材料加工重点实验室, 南宁 530004)

摘 要:以广西某选矿厂锡石多金属硫化矿矿石为原料,研究了微波预处理对矿石磨矿产物粒度组成、磨矿动力学、破碎速率及磨机生产能力的影响。结果表明,微波预处理后,矿石在不同磨矿时间下的磨矿产物粒度均变细, -0.074 mm 粒级含量提高了 4.41~12.90 个百分点;微波预处理前后该矿石磨矿均符合一级磨矿动力学模型;微波预处理使矿石的破碎速率(S_1)值提高近 57%,且磨机的生产能力得到了明显提升。因此,微波预处理可以降低矿石的强度,强化矿石的磨矿过程,是一种有效的降低磨矿能耗、提高磨矿效率的方法。

关键词:微波预处理;锡石多金属硫化矿;破碎速率;磨矿效率

中图分类号:TD921+.4

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2020)06-0108-04

Experiment Study on Microwave-assisted Grinding of Cassiterite Polymetallic Sulfide Ore

GUO Runnan¹, YANG Jinlin^{1,2}, MA Shaojian^{1,2}, SHUAI Zhichao¹

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University,

Nanning 530004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Processing for Nonferrous Metallic and Featured Materials,

Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The cassiterite polymetallic sulfide ore from a concentrator in Guangxi was used as raw material to study the effects of microwave pretreatment on particle size composition, grinding kinetics, specific rate of breakage and grinding machine capacity of ore grinding. It was shown that after microwave pretreatment, the particle size of the grinding products of the ore under different grinding time becomes finer, and the particle content of -0.074 mm increases by 4.41—12.90 percentage points. The breakages of both untreated and microwave pretreatment cassiterite polymetallic sulfide ore obey the first-order grinding kinetics. The specific rate of breakage(S_1) of microwave pretreatment ore is higher than that of untreated ore, and the S_1 increased by nearly 57%. Meanwhile, the production capacity of the mill is also obviously improved. Therefore, microwave pretreatment can reduce the strength of ore and strengthen the grinding process of ore, which is an effective method to reduce the grinding energy consumption and improve the grinding efficiency.

Key words: microwave pretreatment; cassiterite polymetallic sulfide ore; specific rate of breakage; grinding efficiency

磨矿作业在选矿厂占有十分重要的地位,其产品质量直接影响后续的选别作业^[1-2]。同时,磨矿作业能耗高,通常占选矿厂总能耗的 50%~70%,但其能量利用效率通常都比较低^[3-5],且粉碎作业每年会

消耗大量的钢材。为了降低磨矿过程的能耗及钢耗,提高能量利用效率和磨矿效率,对矿石进行入磨前的预处理是一种可行的方法。矿物细磨的难易程度取决于矿物性质本身,采用一种手段改变矿物性

收稿日期:2020-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874105);广西自然科学基金资助项目(2018GXNSFAA281204)

作者简介:郭润楠(1991-),男,硕士研究生,主要从事有色金属硫化矿的选矿试验研究工作。

通信作者:杨金林(1973-),男,博士,副教授,主要从事有色金属硫化矿的选矿试验研究及教学工作。

质以降低强度和改善矿物的解离能力^[6-7],就可以提高破碎效率,达到节能降耗的目的,其中,微波预处理是一种可行性较强的方法。

微波是频率为 300 MHz~300 GHz,波长为 1~1 000 mm 的一种电磁波^[8],微波加热是通过将电磁能转换为热能来实现的,这个过程与物料自身电导率、介电常数、磁导率等密切相关^[9],具有穿透力强、升温迅速、温度均匀、选择性强的特点。因此,利用微波选择性加热的特点,对矿石进行微波预处理,可以改变矿石内有用矿物和脉石矿物的能量吸收分配,从而改变其破碎解离能力,有效降低矿石的强度。

我国的锡资源主要集中在云南、广西等地^[10],矿石类型以锡石多金属硫化矿为主。试验所用原料取自广西某选矿厂的锡石多金属硫化矿矿石,其有用矿物主要有锡石、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等,脉石矿物主要有石英和方解石。由于锡石、硫化矿的选别粒度要求和选别方法有所不同,所以该类型矿石在磨矿生产实践中存在硫化矿欠磨和锡石过磨的矛盾。为改善这一矛盾,考虑到该类矿石的矿物组成复杂且不同矿物成分吸波特性存在较大差异,因此,对该类型矿石进行微波预处理,通过对比研究微波预处理前后矿石的磨矿产物粒度组成、磨矿动力学行为、破碎速率以及对磨机生产能力的影响,为后续微波辅助磨矿研究提供基础数据。

1 试验原料、设备及方法

1.1 试验原料、设备

本次试验原料取自广西某选矿厂的锡石多金属硫化矿矿石,对原矿进行破碎、筛分、混匀、缩分等处理,制备出-3.35+2.36 mm 的矿石样品备用。试验所用磨矿设备选用 XMQ-Φ240×90 锥形球磨机,微波加热装置采用 CY-PY1100C-M 型微波热解仪。

1.2 试验方法

微波预处理试验中,称取制备的每份 350 g 的试验样品若干份,稳定微波输出功率 2 000 W,在微波热解仪中加热 10 min,加热结束后取出矿石在空气中自然冷却至室温。

磨矿试验在锥形球磨机中进行,球磨机的有效容积为 6.25 L、充填率为 40%、装球总质量为 9.1 kg,不同直径钢球的质量比 3:2:1,筒体转速 96 r/min。对微波预处理前后的矿石进行球磨,每次矿石的处理量为 200 g,磨矿浓度为 75%,磨矿时间分别为 1、2、3、4、5 min,磨矿结束后,将磨矿产物放入标准振

动筛中进行筛分,分析其粒度组成特性,研究微波预处理对矿石磨矿性能的影响。

2 试验结果及分析

2.1 矿石升温特性曲线

锡石多金属硫化矿矿石在微波场中的加热时间与温度变化关系曲线如图 1 所示。结果表明,微波稳定功率为 2 000 W,350 g 该矿石样品能够在 10 min 的时间内被加热至 290 ℃,在 20 min 内可被加热至 420 ℃。由图 1 可以看出,矿石温度随微波加热时间的延长而升高,微波加热初期,矿石升温速率逐渐增大;当样品加热到 8 min 后,升温速率开始逐渐减小,10 min 后升温速率减小较为明显,故本次磨矿试验采用微波预处理时间为 10 min 的矿石。

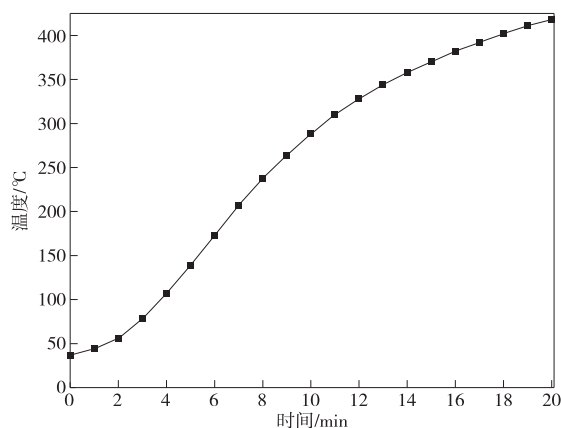


图 1 矿石微波加热升温特性曲线

Fig. 1 Temperature rise characteristic curve of ore heated by microwave

2.2 微波对矿石磨矿产物粒度的影响

对微波未处理和微波预处理的矿石样品进行磨矿后,采用德国 FRITSCH 生产的标准振动筛进行筛分,分析-0.074 mm 粒级含量的变化情况,其结果如图 2 所示。

从图 2 结果可以看出,随磨矿时间的增加,磨矿产物中-0.074 mm 粒级含量均不断升高,但提高幅度有所差别。在磨矿时间分别为 1、2、3、4、5 min 时,经微波预处理矿石的磨矿产物中,-0.074 mm 粒级含量分别为 23.53%、45.94%、66.52%、80.15%、91.27%,相对于原矿的 13.23%、35.70%、53.62%、69.23%、86.86% 分别提高了 10.30、10.24、12.90、10.92、4.41 个百分点。这说明微波预处理可以强化矿石的磨矿过程,使矿石更容易被磨细。这也意味着在相同磨矿条件下,经微波处理的矿石磨矿产物粒度更细,更易达到选别作业的粒度要求。

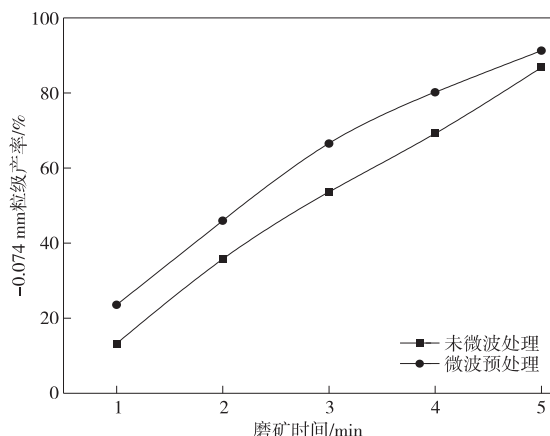


图2 微波预处理前后磨矿产物
-0.074 mm 粒级的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of -0.074 mm size fraction of grinding product before and after microwave pretreatment

2.3 微波对矿石磨矿动力学及破碎速率的影响

磨矿动力学理论可以描述物料的破碎速率和产物粒度组成, Sedlatsschek 与 Bass 运用统计学原理推导出磨矿动力学理论公式, 它的基本形式是^[11]:

$$R_t = R_0 \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

式中, t 为磨矿时间; R_0 为入料中所含大于指定粒度的颗粒产率, %; R_t 为经过 t 时间磨矿产品中大于指定粒度的颗粒产率, %。

其基本形式经过后人不断探索研究^[12-13], 可以描述为:

$$\lg(R_t/R_0) = -S_1 \cdot t/2.3 \quad (2)$$

式中, S_1 为矿石的破碎速率。可以将公式(2)转化为线性关系式:

$$y_t = k \cdot t + b \quad (3)$$

基于上述分析, 结合式(2)、(3), 利用软件对微波处理前后矿石在不同磨矿时间下磨矿产物数据进行处理分析, 其结果如表1和图3所示。

由图3和表1结果可知, 微波处理前后锡石多金属硫化矿矿石在不同磨矿时间条件下磨矿后, 磨矿产物粒度分布特征用动力学线性模型公式拟合, 表现出很好的收敛性。这说明两者均可用一级磨矿动力学方程描述。从表1和公式(2)可以得出, 破碎速率 $S_{\text{未处理}} = 0.7107$, $S_{\text{预处理}} = 1.1155$, 经过微波处理, 矿石破碎速率 S_1 相对增加了 56.96%。这是因为在微波预处理过程中, 矿石内部有用矿物(锡石、硫化矿)与脉石矿物(石英、方解石)对微波的吸收能力存在差异, 导致矿石内部升温不均匀, 出现不均匀膨胀, 使得矿石内部的细小裂纹不断扩大, 产生大量裂

缝, 增加了矿石的可磨性, 提高了矿石的破碎速率 S_1 。

表1 拟合函数非线性拟合结果

Table 1 Nonlinear fitting results
of fitting function

矿石种类	拟合方程	拟合 k 值	拟合 b 值	拟合优度 R^2
未处理	$y = -0.130 - 0.309x$	-0.309	-0.130	0.997
微波处理	$y = -0.100 - 0.485x$	-0.485	-0.100	0.996

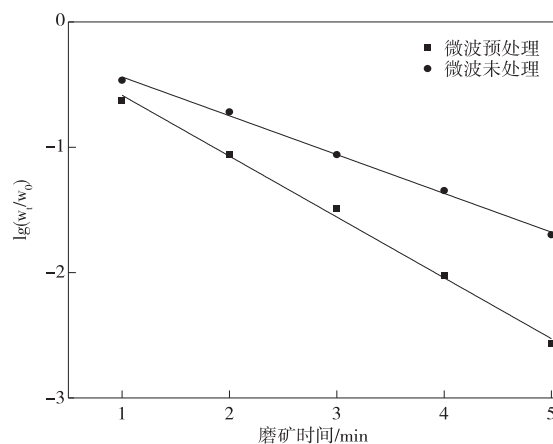


图3 微波预处理前后一级磨矿动力学曲线

Fig. 3 Kinetic curves of primary grinding before and after microwave pretreatment

2.4 微波对磨机生产能力的影响

锡石多金属硫化矿矿石经过微波处理后, 磨机对该矿石的生产能力有所变化。试验以单位时间内经过磨矿过程所获得的 -0.074 mm 粒度含量来表示磨机的生产能力, 以 $t/m^3 \cdot h$ 表示。其计算公式为^[14]:

$$q_{-0.074 \text{ mm}} = Q(\beta_2 - \beta_1)/V \quad (4)$$

式中, $q_{-0.074 \text{ mm}}$ 为按矿石磨矿产物新生成的 -0.074 mm 粒级的含量来计算球磨机的生产能力, $t/m^3 \cdot h$; Q 为球磨机的处理量, t/h ; β_2 为磨矿产物中 -0.074 mm 含量, %; β_1 为入磨物料中 -0.074 mm 含量, %; V 为球磨机的有效容积, m^3 。

实验室磨机处理量为 200 g, 球磨机有效容积为 0.006 25 m^3 。分析微波处理该矿石后, 经过不同的磨矿时间, 磨机对该矿石的生产能力影响, 试验结果如表2所示。

由表2结果可知, 微波预处理的矿石相较于未处理原矿石, 随着磨矿时间的延长, 使磨机生产能力的相对增加量呈逐渐减小的趋势, 在磨矿时间为 1 min 时, 磨机生产能力增加量最大, 比原矿时提高了近 78%。这是因为随着磨矿时间的增加, 矿石得到充分破碎, +0.074 mm 粒级逐渐减少, 磨机内单位时间内新生成的 -0.074 mm 粒级就会逐渐降低。

因此,矿石经过微波预处理,磨机生产能力得到提升。这说明微波处理后,矿石内部经选择性加热产生大量裂纹,使得矿石的抗压强度变弱,从而使矿石更易被磨细,提高磨矿效率。

表2 磨机生产能力对比

Table 2 Comparison of mill production capacity

磨矿时间/ min	未处理矿石生产能力/ ($t \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$)	微波处理矿石生产能力/ ($t \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$)	相对增量/ %
1	0.254	0.452	77.92
2	0.685	0.882	28.68
3	1.029	1.277	24.07
4	1.329	1.539	15.78
5	1.668	1.752	5.08

2.5 微波对磨机能耗的影响

以微波输出功率2 kW对矿石进行预处理,每次处理量为350 g,微波处理时间10 min,则微波处理物料量200 g(本次试验入磨物料量)的耗电量为:0.14 kW/h。微波处理10 min后球磨3 min,磨矿产品—0.074 mm粒级产率为66.52%,与原矿球磨4 min磨矿产品—0.074 mm粒级产率基本相同,球磨机功率0.6 kW,微波处理后改善磨矿效果降低的电耗为0.01 kW/h。从上述计算结果中可以看出,虽然矿石经过微波预处理后,球磨机降低的能耗未能抵消微波消耗的能耗,但矿石经微波预处理后,改善磨矿效果降低的能耗还应该包括:1)微波预处理后;2)矿石变脆,可以减少碎磨等其它工序的能量消耗;微波预处理后,由于矿石中不同矿物的吸波能力不同,可提高矿石的选择性磨矿;3)微波预处理后,矿块较脆,磨机的衬板、磨矿介质及其它配件的磨损也将减小;4)微波预处理后,矿石的热量也可以作为能够利用的余热。微波预处理的能耗会随着试验的扩大而有所降低,如何降低能耗实现经济效益,仍需进一步深入研究。

3 结论

研究发现微波预处理对锡石多金属硫化矿矿石的磨矿会产生积极作用,具体结论如下:

1)微波预处理时间越长,矿石的温度提升越高,但随着微波加热时间的延长,矿石温度的提升速率减小。

2)微波预处理后,矿石磨矿产物中—0.074 mm粒级含量较原矿提高了4.41~12.90个百分点,这说明微波预处理对矿石有助磨作用。

3)微波预处理前后,锡石多金属硫化矿矿石磨矿后均可用一级磨矿动力学方程进行描述,且微波

预处理后矿石的 S_1 值得到提升,破碎速率变大,提升了近57%。

4)经过微波预处理后,提高了该矿石的磨机生产能力,也提高了磨矿效率。因此,微波预处理可以作为一种潜在的降低磨矿能耗的方法,其作用机理、经济评价有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 3版. 北京:冶金工业出版社, 2012:134-178.
DUAN Xixiang. Crushing and grinding[M]. 3rd ed. Beijing:Metallurgical Industry Press,2012:134-178.
- [2] 陈炳辰. 磨矿原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1989:35-83.
CHEN Bingchen. Grinding principle [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1989:35-83.
- [3] 杨金林,周文涛,马少健,等. 不同破碎方法下锡石多金属硫化矿磨矿能耗研究[J]. 矿业研究与开发,2017,37(1):64-68.
YANG Jinlin, ZHOU Wentao, MA Shaojian, et al. Study on the grinding energy consumption of cassiterite polymetallic sulfide ore under different broken modes[J]. Mining Research and Development,2017,37(1):64-68.
- [4] WALKIEWICZ J W, CLARK A E, MCGILL S L. Microwave-assisted grinding[J]. Industry Applications, 1991,27(2):239-243.
- [5] FUERSTENAU D W, ABOUZEID A Z M. The energy efficiency of ball milling in comminution[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67 (1/2/3/4): 161-185.
- [6] 付润泽,朱红波,彭金辉,等. 采用微波助磨技术处理惠民铁矿的研究[J]. 矿产综合利用,2012(2):24-27.
FU Runze, ZHU Hongbo, PENG Jinhui, et al. Microwave-assisted grinding of Huimin iron ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(2): 24-27.
- [7] 李军,彭金辉,郭胜惠,等. 钛铁矿的微波辅助磨细试验研究[J]. 轻金属,2009(11):50-53.
LI Jun, PENG Jinhui, GUO Shenghui, et al. The testing investigation on microwave assisted grinding of ilmenite[J]. Light Metals, 2009(11): 50-53.
- [8] 魏延涛,刘亮. 微波在碎矿磨矿中的应用[J]. 矿业快报,2008(10):69-71.
WEI Yantao, LIU Liang. Application of microwave in crushing and grinding[J]. Express Information of Mining Industry, 2008(10): 69-71.
- [9] 何春林. 典型冶金原辅料的微波吸收特性及其应用研究[D]. 南宁:广西大学,2016.

(下转第126页)

- utilization of copper tailings from a copper smelting slag[J]. Mining Research and Development, 2015, 35(6): 27-29.
- [2] 陈淑萍, 伍赠玲, 蓝碧波, 等. 火法炼铜技术综述[J]. 铜业工程, 2010(4): 44-49.
- CHEN Shuping, WU Zengling, LAN Bibo, et al. Summarize on the technology of copper pyrometallurgy[J]. Copper Engineering, 2010(4): 44-49.
- [3] 吕旭龙, 袁水平, 印万忠, 等. 某铜冶炼企业冶炼炉渣配矿浮选试验研究[J]. 矿产综合利用, 2015(1): 119-123.
- LYU Xulong, ZHONG Shuiping, YIN Wanzhong, et al. Experimental study on flotation of different proportion smelter slag in a copper smelting enterprise [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2015(1): 119-123.
- [4] 李博, 王华, 胡建杭, 等. 从铜渣中回收有价金属技术的研究进展[J]. 矿冶, 2009, 18(1): 44-48.
- LI Bo, WANG Hua, HU Jianhang, et al. Progress in recovery technology of valuable metals from copper slag[J]. Mining and Metallurgy, 2009, 18(1): 44-48.
- [5] 吕旭龙, 袁水平, 印万忠, 等. 某缓冷渣包中不同区域铜渣的浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(6): 83-88.
- LYU Xulong, ZHONG Shuiping, YIN Wanzhong, et al. Study on flotation test about slag in different locations of slow cooling ladle[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(6): 83-88.
- [6] 王鹏, 高利坤, 董方, 等. 铜冶炼渣浮选回收铜的研究现状[J]. 矿产综合利用, 2017(1): 16-20.
- WANG Peng, GAO Likun, DONG Fang, et al. Status of copper recovery from copper smelting slag by flotation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(1): 16-20.
- [7] 吕旭龙, 袁水平, 印万忠, 等. 某铜冶炼炉渣缓冷时间对浮选性能的影响[J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38(6): 6-12.
- LYU Xulong, ZHONG Shuiping, YIN Wanzhong, et al. Effect of time of slag gradual cooling on flotation performance in a certain copper smelter[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017, 38(6): 6-12.
- [8] 吕兵超, 廖银英, 方炯, 等. 某铜渣浮选药剂优化试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(6): 7-11.
- LYU Bingchao, LIAO Yinying, FANG Xian, et al. Optimization of flotation reagent for some copper slag[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(6): 7-11.
- [9] 吴健辉. 某铜冶炼高品位混合铜渣选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(1): 67-71.
- WU Jianhui. Experimental study on mineral processing of some copper smelting mixed slag [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(1): 67-71.

(上接第 111 页)

- HE Chunlin. Study on microwave absorption characteristics of typical metallurgical raw materials and its application[D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [10] 杨金林, 周文涛, 马少健, 等. 基于磨矿技术效率锡石多金属硫化矿磨矿优化研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(5): 18-22.
- YANG Jinlin, ZHOU Wentao, MA Shaojian, et al. Study on cassiterite polymetallic sulfide ore grinding optimization based on the grinding technical efficiency[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(5): 18-22.
- [11] AUSTIN L G. Introduction to the mathematical description of grinding as a rate process[J]. Powder Technology, 1971(5): 1-17.
- [12] 王俊鹏, 姜涛, 刘亚静, 等. 微波预处理对钽钛铁矿磨矿动力学的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 663-667.
- WANG Junpeng, JIANG Tao, LIU Yajing, et al. Effects of microwave pretreatment on the grinding kinetics of vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 663-667.
- [13] SAMANLI S. A comparison of the results obtained from grinding in a stirred media mill lignite coal samples treated with microwave and untreated samples[J]. Fuel, 2010, 90(2): 659-664.
- [14] 张强. 选矿概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 61-63.
- ZHANG Qiang. Introduction to mineral processing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 61-63.