采用微波助磨技术处理惠民铁矿的研究

付润泽[1,2,3]，朱红波[1,2,3]，彭金辉[1,2,3]，郭胜惠[1,2,3]，
代林晴[1,2,3]，巨少华[1,2,3]，曹威扬[1,2,3]
(1. 云南省复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室(培育基地)，云南　昆明　650093；
2. 昆明理工大学非常规冶金省部共建教育部重点实验室，云南　昆明　650093；
3. 昆明理工大学微波能应用及装备技术工程实验室，云南　昆明　650093)

摘要：采用微波高温箱式加热装置研究微波对惠民铁矿磨细的辅助作用。考察了该矿在微波场下的升温行为及微波加热对矿物孔隙率、内部裂隙及矿物磨细的影响。结果表明，惠民氧化铁矿在微波作用下能够在100s内被加热至600℃以上，并且微波处理后矿物孔隙率提高24.04%，相同磨矿条件下-200目产品的产率提高7.3%～11.3%，SEM微观结构物相分析显示微波处理后矿物产生大量的晶界间裂隙。

关键词：铁矿；微波加热；孔隙率；磨矿
中图分类号：TD925　**文献标识码**：A　**文章编号**：1000-6532(2012)02-0024-04

磨矿是选矿过程能耗最大的环节，投资占全厂60%以上。然而磨矿能量的利用率却很低，真正用于破碎促使矿物颗粒间的结合键断裂、产生新表面的能量仅占1%[1]。矿物的细磨主要取决于矿物本身的性质，采用一些手段对矿石进行入磨前的预处理，改变矿石机械力学性质和矿物解离的能力，可提高破碎效率[2-5]，从而达到节能降耗的目的。

微波作为一种加热方式，是通过微波能在材料内部耗散有选择性实现的。根据材料与微波的相互作用可将材料分为微波透过体、反射体、吸收体及部分吸收体[6]，因此微波在加热由多种材料构成的物质时具有选择性加热的特点。又因微波加热方式为内部加热，故利用微波加热矿石，不同矿石加热速率不同从而在矿石内部产生热应力，改变矿石机械力学性质，从而促进磨矿的进行。

惠民铁矿具有复杂的极细粒浸染结构，造成磨矿和选矿困难，影响产品质量。本研究以惠民铁矿为研究对象，通过对矿物进行微波加热预处理，研究微波加热对矿石磨细的影响，旨在探索一种复杂铁矿预处理、促进矿物磨细的有效方法。结果表明微波辐射矿物确实对矿物磨细产生了一定的辅助作用，作为一种潜在的提高磨矿效率，降低磨矿能耗的方法，其作用机理有待进一步深入研究。

1　矿石成份分析

试验所用的惠民铁矿，其矿石的主要化学成份及物相分析分别见表1和表2。由表1可知，惠民铁矿的铁品位为37.27%，其中FeO含量<0.10%，铁元素主要以三价铁的形式存在；有害杂质P的含量较高，约占1.16%。由表2可知，矿石中的铁主要以赤铁矿的形式存在，含量占矿石中总铁的87.01%，其次是以磁铁矿的形式存在，占总铁的11.13%，少量的铁以硅酸铁、硫化铁及碳酸亚铁的形式存在。

表1　矿石的主要化学成分分析/%

Table 1　Main chemical composition analysis of ore

TFe	FeO	S	P	As	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO
37.27	<0.10	0.084	1.16	0.036	18.01	4.06	1.69	0.14	8.85

收稿日期：2011-10-17；　**改回日期**：2011-11-15
基金项目：国家自然科学基金重大项目(51090385)
作者简介：付润泽(1988-)，女，硕士，主要从事微波助磨技术研究工作。

万方数据

表 2　矿石中铁的化学物相分析

Table 2　Chemical phase analysis of iron in the ore

名称	磁铁矿中铁	赤铁矿中铁	黄铁矿中铁	菱铁矿中铁	硅铁矿中铁	总量
含量/%	4.31	33.69	0.17	0.20	0.35	38.72
占有率/%	11.13	87.01	0.44	0.52	0.90	100.00

2　试验设备及试验流程

试验采用非常规冶金省部共建教育部重点实验室研制的 HM 型微波高温箱式加热装置，其功率为 0 ~ 3kW 连续可调，频率为 2450MHz。

微波助磨惠民铁矿工艺流程见图 1。通过条件试验探索，得出 10 ~ 20mm 矿块在微波辐射下升温效果最好。并对该块度下矿料进行微波处理，对处理前后的矿块进行细碎、球磨、筛分和比对，研究微波辐射对矿物磨细的影响。

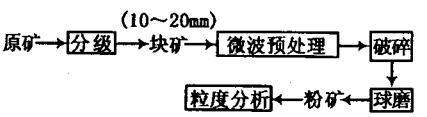

图 1　微波助磨惠民铁矿工艺流程

Fig. 1　Technical flowsheet of microwave - assisted grinding of Huimin iron ore

3　试验及结果讨论

3.1　矿物升温曲线

采用 HM 型微波高温箱式加热装置探索矿物的升温情况（输入功率为 1.5kw，物料量 150g）。经多次重复试验得出，较佳的物料粒度为 10 ~ 20mm，升温曲线见图 2。

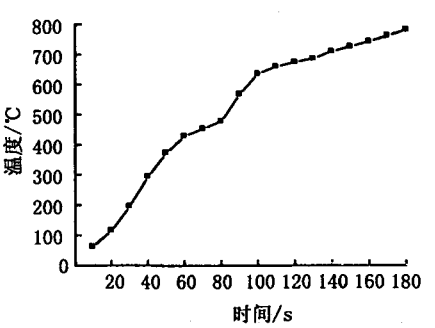

图 2　矿物的升温曲线

Fig. 2　Heating curve of minerals

由图 2 可知，矿物的温度随着微波加热时间的延长而升高，升温速率随着时间的延长呈现阶梯性变化。这是由矿物与空气间的热传递及矿物介电常数随温度的变化而变化引起的，随着温度的升高，介电常数变小，热量向空气中的耗散增多，从而使得升温速率降低。

3.2　矿物孔隙率

根据公式按照冶标 YB - 373 - 75，测定矿物的视密度，比重瓶法测定矿物的真密度，得出矿石的孔隙率 $\varepsilon = (1 - \frac{\rho_c}{\rho_o}) \times 100$　(1)

式中：ρ_c - 真密度，g/cm^3；ρ_c - 视密度，g/cm^3；ε - 孔隙率。

试验测得经微波处理与未被微波处理矿物的孔隙率分别为 4.984% 与 4.018% 见图 3，即经微波处理后矿物孔隙率升高 24.04%，矿物内部缺陷明显增多，矿物强度降低，有利于磨矿行为的进行。

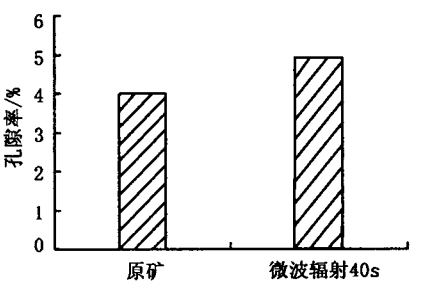

图 3　微波辐照后矿物孔隙率的变化

Fig. 3　Change of mineral porosity irradiated by microwave

3.3　EDS、SEM 微观结构物相分析

利用 EDS、SEM 分析惠民铁矿矿物物相组成，分析结果见图 4。由图 4 可以看出，区域 1 代表的深灰色区域为脉石，主要为硅元素和氧元素，有少量的铁、磷、铝及碳元素存在，区域 2 所代表的浅色矿物为有用矿物，主要含铁、硅、氧元素，及少量的磷、铝、碳元素存在，EDS 图像显示有用矿物中有大量的硅、氧元素杂质。

对微波前后矿物进行切割、抛光，进行 SEM 观察，可以明显看出，微波处理前深色的脉石矿物与浅色的有用矿物紧密相连，微波辐照处理后脉石与有用矿物间存在明显的晶界裂隙。

含铁矿物与脉石间"耗散系数"不同，存在吸波性能的差异[7]，含铁矿物属微波吸收体，为高活性

万方数据

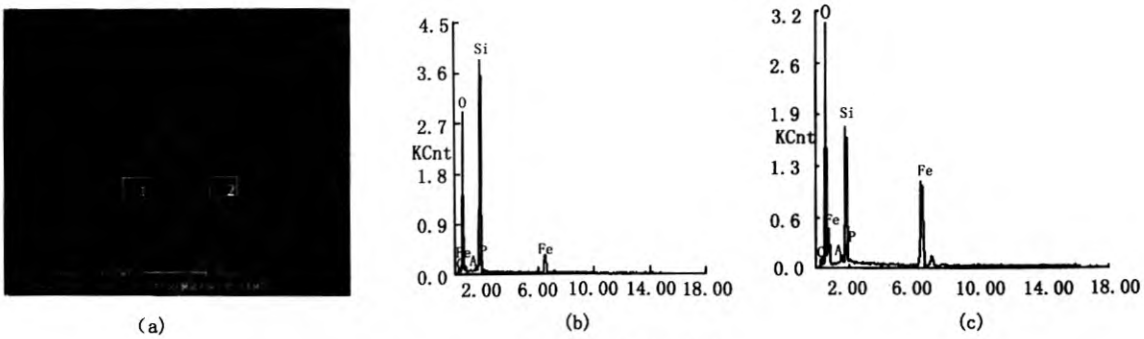

图 4　原矿微观结构、物相

Table 4　Microstructure and phase of raw ore

(a 为原矿 20.0KV 2000 × 下的扫描电镜背散射图像;b、c 为分别为区域 1、区域 2 内元素 EDS 图像。)

(a. Backscatter image under the scanning electron microcope in 20.0kV 2000 × of raw ore;

b. EDS image of the elements in area 1;c. EDS image of the elements in area 2.)

材料,在微波的作用下被快速的加热;脉石矿物为微波透过体,不能被微波加热[8]。因此在铁矿物和脉石间产生很大的温度梯度,产生不同程度的膨胀,从而在矿物晶界间产生热应力,应力超出矿物的承受极限,晶界间的断裂即产生。在微波的持续作用下,随着时间的延长,晶界间的微裂隙不断扩展。

3.4　磨矿试验

采用湖北探矿机械厂生产的 XMQ - 240mm × 90mm 锥形球磨机,在矿浆浓度 60%,处理量 500g/次的条件下对原矿及微波(MW)处理后的矿物球磨 4min,后将磨矿产品采用浙江上虞市五四仪器厂生产的标准分样筛进行筛分,以 - 200 目产品产率作为评价指标。结果表明:微波处理过的矿石 - 200 目磨矿产品产率提高了 7.3% ~ 11.3%(图 5),40s 的微波处理即可使 - 200 目磨矿产品产率提高 7.3%。这是由于磨矿速率的快慢与矿粒中存在的缺陷直接相关,矿物内部缺陷越多,碎裂越容易发生[9]。微波处理后,矿物内部产生大量的晶界断裂,内部缺陷明显增多,强化了选择性磨细作用,从而使得矿石在磨矿过程中容易碎裂。

3.5　能耗分析

3.5.1　微波预处理的能耗

以微波功率 2000W 对矿物进行预处理,以电能转化为微波能的转化率为 70% 计算,处理量为 150g/批次,微波处理时间 40s,则微波处理物料量 500g(球磨所需物料量)耗电量为:

$$2000 \div 0.7 \times 10 \div 3600 \div 1000 \times 500 \div 150 = 0.027\ \text{kW/h}$$

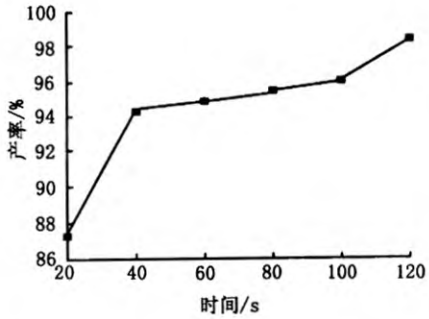

图 5　经微波预处理不同时间后球磨 4min - 200 目的产率

Fig. 5　Yield on the condition of ball milling for 4 minutes and below 200 mesh pretreated by microwave in different time

3.5.2　改善磨矿效果降低的能耗

微波处理 40s 后球磨 4min,磨矿产品 - 200 目产率 95.44%,略高于原矿球磨 6min 磨矿产品 - 200 目产率。球磨机动力 0.6kW,微波处理后改善磨矿效果降低的电耗耗为:

$$0.6 \div 60 \times 2 = 0.02\text{kW/h}$$

另外,微波预处理改善磨矿效果降低的能耗还包括:微波处理后矿物块度降低、变脆,减少了细碎工序消耗的能量;热处理后矿块较脆,磨机的衬板、介质及其他配件的磨损较少;微波预处理水淬后的热水可以作为能够利用的余热。

万方数据

微波预处理的能耗会随着试验的扩大而有所降低，可以有效的提高磨矿效率。作为一种潜在的降低磨矿的方法，仍需进一步深入研究，优化试验参数，以实现经济效益。

4 结　　论

通过研究发现微波辐射对惠民铁矿矿石的磨矿过程确实产生了一定的辅助作用，作为一种潜在的提高磨矿效率，降低磨矿能耗的方法，其作用机理有待进一步深入研究。综合试验结果及仪器分析得到以下结论：

1. 惠民铁矿能够被微波迅速加热，100s 即可加热至 600℃以上，180s 加热至 1000℃。

2. 微波处理后矿物内部孔隙率提高达 24.04%，SEM 图像显示微波处理后矿物产生大量的晶界间裂隙。

3. 微波处理后的矿石 -200 目产品产率比未处理前提高 7.3% ~11.3%。说明微波预处理的确起到了一定助磨作用。

参考文献：

[1] Fuerstenau, D. W, Abouzeid, A. - Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution [J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67(1 - 4), 161 - 185.

[2] Kingman S. W. et al. International Journal of Mineral Processing, 2004 (1 - 4): 71 - 83.

[3] Kingman S W, Vorster Rowson N A. The Influence of Mineralogy on Microwave Assisted Grinding[J]. Miller. Eng., 2000, 13(3): 313 - 327.

[4] Kingman S W, Vorster Rowson N A. The Effect of Microwave Radiation on the Magnetic Properties of Minerals[J]. Microwave Power Electromagnet Energy, 2003, 35(2): 141 - 150.

[5] A. Y. Ali, S. M. Bradshaw. Quantifying damage around grain boundaries in microwave treated ores [J]. Chemical Engineering and Processing, 2009(48): 1566 - 1573.

[6] Clark D. E, Folz D. C, West J. K. Processing Materials with Microwave Energy[J]. Mat. Sci. Eng. A - Struct., 2000, 287(2): 153 - 158.

[7] 刘全军，陈景河. 微波助磨与微波助浸技术[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.

[8] 蔡卫权，李会泉，张懿. 微波技术在冶金中的应用[J]. 过程工程学报，2005，5(2)：228 - 232.

[9] 段希祥. 碎矿与磨矿[M]. 北京：冶金工业出版社，2006.

Microwave-assisted Grinding of Huimin Iron Ore

FU Run-ze[1,2,3], ZHU Hong-bo[1,2,3], PENG Jin-hui[1,2,3], GUO Sheng-hui[1,2,3], DAI Lin-qing[1,2,3], JU Shao-hua[1,2,3], CAO Wei-yang[1,2,3]

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Complex Nonferrous Metal Resources Cleaning Utilization in Yunnan Province, Kunming, Yunnan, China;

2. Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, National Ministry of Education, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China;

3. Engineering Lab of Microwave Energy Application and Equipment Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China)

Abstract: The auxiliary function of microwave on the grinding of Huimin iron ore by microwave high-temperature heating device box was studied in the present paper. The temperature behavior of the iron ore in microwave field, the influence of microwave heating on the porosity, inherent vice and grinding of the iron ore were investigated. The results showed that the iron ore could be heated to above 600℃ quickly by microwave within 100s, and the porosity of the ore could be increased by 24.04% after microwave treatment. The yield of the sample below -200 mesh is increasing by 7.3% ~11.3% at the same grinding condition. There was a large amount of crack generated between the grain boundary after the treatment as shown in the SEM image.

Key words: Huimin iron ore; Microwave heating; Porosity; Grinding

万方数据