

锡石多金属硫化矿微波辅助磨矿机理研究*

白立记, 苏秀娟, 何春林, 马少健

(广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004)

摘要:以锡石多金属硫化矿作为研究对象,通过微波加热预处理矿石,考察矿石预处理前后和不同冷却方式对磨矿产品可磨度等指标的影响。结果表明,经微波加热预处理后,矿石可磨度提高,邦德功指数下降。这是因为微波辐射致使锡石多金属硫化矿中的脆硫锑铅矿、黄铁矿、闪锌矿、锡石等金属矿物温度升高,而脉石矿物升温并不明显,致使金属矿物和脉石的温度梯度大,产生不均匀热膨胀,导致在矿石内部出现应力集中对矿物与脉石产生破坏,强化锡石多金属硫化矿磨矿效果。

关键词:微波;锡石;多金属硫化矿;磨矿;可磨度;邦德功指数

中图分类号:TD921⁺.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2018)06-0031-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.06.006

Study on Microwave-assisted Grinding Mechanism of Cassiterite-polymetallic Sulfide Ore

BAI Liji, SU Xiujuan, HE Chunlin, MA Shaojian

(College of Resources, Environment and Material, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Taking cassiterite polymetallic sulphide ore as the research object, the effects of preheating and different cooling methods on the grindability of grinding products were investigated after pretreatment of microwave heating. The results showed that after microwave heating, the grindability increased and the Bond work index decreased. This is mainly due to the fact that the microwave radiation increases the temperature of the metal minerals such as jamesonite, pyrite, sphalerite, cassiterite, etc. in the cassite polymetallic sulfide ore, and has less effect on the gangue minerals. The large temperature gradient between the metallic metal minerals and gangue minerals could produce uneven thermal expansion and promote the dissociation of metallic minerals and gangue minerals due to the high stress concentration inside the ore, thereby strengthening the grinding effect.

Key words: microwave; cassiterite; polymetallic sulfide ore; grinding; Bond's work index

破碎磨矿是矿物加工的重要作业,其目的是让有用矿物与脉石矿物单体解离,为后续重选、浮选、磁选等选别作业提供合适粒级。磨矿作业是整个选矿过程中消耗能量最大的作业。据报道^[1,2],用于粉磨作业的电耗约占全世界总发电量的5%,在矿物处理过程中约30%~50%能量(坚硬矿石高达70%)消耗在矿石加工中的碎矿与磨矿作业中。在巨大的能量消耗中,真正用于矿石生成新生表面的能量仅为1%,其中大部分均以发声、发热和摩擦等形式损失。为了降低磨矿能耗,提高矿物解离,微波

辅助磨矿作为一种处理手段一直备受关注。

Amankwah等^[3]采用微波功率800W预处理金矿,发现矿石破碎强度(crushing strength)减少31.2%,SEM结果显示,矿石中出现明显的裂纹、裂隙。金浸出率为95%时只需12h,相对未处理的金矿石缩短10h,在很大程度上缩短了浸出时间,提高金的回收率。付润泽等^[4,5]针对惠民含铁为37.27%的铁矿,应用微波辐射预处理,研究微波助磨的效果。结果表明,微波预处理后促进了惠民铁矿磨细,微波加热使矿物产生大量的晶界间裂隙,孔隙率提高24.04%。

* 收稿日期:2018-10-19

基金项目:国家自然科学基金(51464003)

作者简介:白立记(1991-),男,广西贺州人,博士研究生。

通信作者:苏秀娟(1977-),女,黑龙江双城人,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为矿产资源综合利用。

Schmuhl 等^[6]采用微波加热预处理低品位铜矿考察对后续浸出铜的影响。结果表明,脉冲式微波加热预处理后的铜浸出比连续式微波效果好,说明脉冲式微波比连续式微波加热预处理后所产生的助磨效果更好。Omran 等^[7,8]研究微波功率、微波加热时间对高磷鲕状铁矿助磨的影响。试验显示,微波热处理比传统热处理产生更多的裂隙、裂纹,并且微波热处理所消耗的能量也比传统热处理消耗的能量少。

锡是我国优势金属资源,锡石多金属硫化矿是我国特色锡矿资源。由于锡石性脆,在选矿生产中存在锡石过磨和硫化矿欠磨的突出矛盾,影响锡的金属回收率和硫化矿精矿质量。考虑到该类矿石的矿物组成复杂,涉及硫化矿、氧化矿和脉石等众多矿物成分,且不同矿物成分存在较大的吸波特性差异,因此,本文从利用微波选择性加热潜力出发,研究传统加热与微波加热预处理对锡石多金属硫化矿助磨的差异,旨在探索锡石多金属硫化矿的微波加热辅助磨矿新途径。

1 试验

1.1 试验样品

本次试验样品取自广西河池车河选矿厂重选跳

汰精矿仓。该矿样粒度为 0.15 ~ 4 mm,考虑到试验室现有磨矿设备的最大给矿粒度为 3 mm,将矿样筛分,以 -3.2 mm 粒级作为试验样。为更好地保证试验中每一个样品的代表性,将试验样筛分成 -3.2 + 3 mm、-3 + 2 mm、-2 + 1 mm、-1 + 0.425 mm、-0.425 mm 等五个粒级,根据所取矿石各粒级质量百分数,将各个粒级按原矿粒级比例缩分、混匀配成试验样品,其粒度组成如表 1 所示。试验样品各粒级中的金属品位和金属分布率如表 2 所示,半定量分析结果如表 3 所示。

由表 2 可知,Fe 在 -2 + 1 mm 粒级含量较低,在其他粒级含量基本一致;Sn 在 -1 mm 粒级含量较大,但分布率小;Pb、Sb 分布规律相似,粗粒中含量大,细粒中含量小;Zn 在 -1 mm 粒级中含量和分布率小,在其他粒级相近。

表 1 试验样品粒度分布

粒度/mm	产率/%	筛下累积产率/%
-3.2 + 3	19.08	100.00
-3 + 2	43.12	80.92
-2 + 1.5	29.54	37.80
-1 + 0.425	8.08	8.26
-0.425	0.18	0.18
合计	100.00	-

表 2 试验样品各粒级中主要金属元素分析结果

Table 2 Analysis results of main metallic elements in each size fraction of ore sample

粒度/mm	金属品位/%					金属分布率/%				
	Fe	Sn	Pb	Sb	Zn	Fe	Sn	Pb	Sb	Zn
-3.2 + 3	10.9	0.87	0.32	0.18	2.16	21.20	19.45	22.12	20.20	19.37
-3 + 2	10.04	0.85	0.30	0.19	2.10	44.12	42.94	46.86	48.19	42.57
-2 + 1	8.56	0.76	0.22	0.14	2.26	25.77	26.30	23.54	24.32	31.38
-1	10.60	1.17	0.25	0.15	1.72	8.922	11.32	7.48	7.29	6.68
合计	-	-	-	-	-	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 3 试验样品的化学成分分析

Table 3 Chemical composition analysis of the ore sample

化学成分	SiO ₂	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Al ₂ O ₃	其他
含量/%	45.9	28.2	8.4	7.2	4.1	6.2

由此可知,试验样品中金属矿物主要为黄铁矿、脆硫锑铅矿、闪锌矿、锡石,脉石矿物主要为石英、碳酸盐等。

1.2 试验设备

试验仪器设备如图 1 所示。微波加热预处理设备为自行设计的 QW-6HO 六边形微波炉,由微波炉和吸收净化尾气装置组成。

干磨试验和邦德功指数均采用标准邦德功球磨机(长×直径:305 mm×305 mm)。传统加热预处理采用电阻炉作为传统加热的设备(功率为 12 kW)。

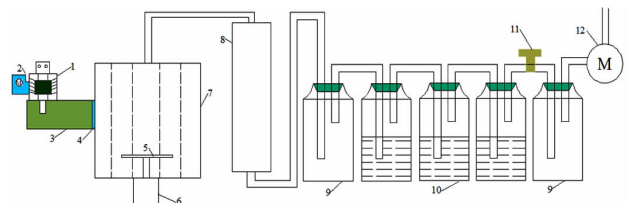


图 1 微波焙烧设备

Fig. 1 Microwave roasting system

1. 磁控管; 2. 冷却风扇; 3. 波导; 4. 挡板; 5. 转盘; 6. 电机; 7. 微波腔体;
8. 缓冲区; 9. 缓冲区; 10. 碱性液体; 11. 调节阀; 12. 抽风机

1.3 试验步骤

试验步骤如下:

(1) 微波加热预处理试验

将一定质量试样装入圆形刚玉莫来石坩埚中,放入微波炉内。开启微波加热,微波停止后立即将试样取出冷却。样品冷却采用两种方式,分别为自然冷却和水冷却。自然冷却是指直接取出试样置于微波腔体外,自然冷却至室温;水冷却为试样取出后,马上投入室温水水中冷却,之后烘干制样。

(2) 磨矿试验

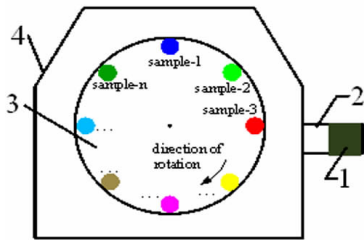
干磨:将未经过任何热处理的原矿样、微波处理过矿样(水冷却、自然冷却)进行干磨试验,磨机采用邦德功球磨机。

(3) 邦德球磨功指数对比试验

将未经微波处理的试样和微波加热预处理后水冷却的试样按照邦德功指数试验步骤进行试验。

(4) 多物料分立共存吸波升温测试试验

自主研发的多种物料分立共存吸波升温新方法采用如图 2 中的微波设备,将多种物料独立分装,均匀放置于转盘四周,开启微波辐射一定时间后,使用红外成像仪一步测试全部物料的表面温度。



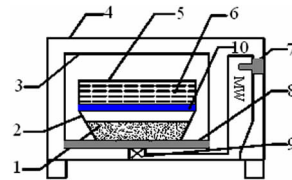
1. 磁控管;2. 波导;3. 转盘;4. 微波炉腔体

图 2 多种物料分立共存吸波升温测试图

Fig. 2 Schematic illustration of multiple materials discretely coexisted

(5) 同步暴露竞争吸收微波能力试验

同步暴露竞争吸波测试设备如图 3 所示,该设备也称为中介质量热法测试设备。



1. 物料;2. 石英容器;3. 内腔体;4. 外壳;5. 塑料容器;6. 水;7. 磁控管;8. 陶瓷板;9. 微波馈入口;10. 隔热材料

图 3 同步暴露竞争吸波测试装置

Fig. 3 The apparatus of measuring competitive microwave absorption under test materials and water coexisting

2 试验结果与讨论

2.1 预处理物料冷却方式的影响

微波加热预处理后的试样采用自然冷却或水冷却后进行磨矿试验。未处理样品、微波加热预处理后自然冷却的样品、微波加热预处理后水冷却的样品的磨矿试验结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,总体上微波加热预处理后,磨矿产品粗粒级含量显著下降,中级粒级和细粒级含量明显增加,且水冷却后磨矿产品粒度变化更为显著,说明微波加热预处理水冷却后更有利于促进矿石硬度降低,使粗粒减小比自然冷却更加明显,细粒级增加也比较明显。

2.2 微波加热预处理对磨矿邦德功指数的影响

未经任何处理的原矿邦德功磨矿数据如表 4 所示,微波功率 6 kW 预处理矿样 500 g、辐射时间 60 s、水冷却后的邦德功磨矿数据如表 5 所示。

表 4 微波加热预处理后冷却方式对磨矿产品粒度分布的影响

Table 4 Effect of the cooling pattern on the particle size distribution after microwave pretreatment

粒度/mm	产率/%			筛下累计产率/%		
	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W
-3.2 +2	3.24	2.78	1.84	100.00	100.00	100.00
-2 +1	20.36	19.20	12.94	96.76	97.22	98.16
-1 +0.425	35.04	32.21	34.06	76.40	78.02	85.22
-0.425 +0.15	17.22	18.47	20.79	41.36	45.81	51.15
-0.15 +0.074	5.66	6.64	7.84	24.13	27.34	30.36
-0.074 +0.038	4.59	5.59	5.71	18.47	20.70	22.52
-0.038	13.88	15.11	16.81	13.88	15.11	16.81

注:Untreated 未经微波加热预处理;MW - N 微波辐射后,经自然冷却处理;MW - W 微波辐射后,经水冷却处理,以下各表均相同。

表 5 原矿的邦德功球磨试验数据

Table 5 Experiment data of Bond ball mill of raw ore

次序	新给料 F_i/g	转数 N_i/r	新生成合格产品量 q_i/g	循环负荷 $C_i/\%$	可磨度 $G_{rpi} / (G/r)$
1	1 173.00	100	109.97	3.17	1.100
2	109.97	305	345.19	2.47	1.132
3	345.19	296	355.01	2.44	1.199
4	355.01	279	387.83	2.34	1.390
5	387.83	242	333.77	2.50	1.379
6	333.77	249	314.78	2.56	1.264
7	314.78	246	342.43	2.48	1.392
8	342.43	241	322.15	2.54	1.337
9	322.15	244	323.87	2.53	1.327

表 6 微波处理后矿样邦德功球磨试验数据

Table 6 The experiment data of Bond ball mill after microwave pretreatment

次序	新给料 F_i/g	转数 N_i/r	新生成合格产品量 q_i/g	循环负荷 $C_i/\%$	可磨度 $G_{rpi} / (G/r)$
1	1173.00	100	163.18	3.01	1.632
2	163.18	205	191.16	2.93	0.932
3	191.16	236	321.63	2.54	1.363
4	321.63	246	338.80	2.49	1.377
5	338.80	243	338.67	2.49	1.394
6	338.67	240	346.60	2.47	1.444
7	346.6	232	340.38	2.48	1.467

从表 5 和表 6 可以看出,微波加热预处理后锡石多金属硫化矿的可磨度为 $G_{rpi} = 1.467$ g/r,而未经微波处理的可磨度为 $G_{rpi} = 1.327$ g/r,说明矿石经微波加热预处理后其可磨度得到了提高。

由表 5 和表 6 中数据计算出原矿石的邦德功指数为 $W_i = 15.32$ kWh/t,微波处理后矿石的邦德功指数为 $W_i = 14.07$ kWh/t,可以看出微波处理后邦德功指数减小 8.2%。

2.3 微波辅助磨矿机理

2.3.1 矿石矿物的吸波能力差异

锡石多金属硫化矿中主要含有脆硫锑铅矿、黄铁矿、闪锌矿、锡石等金属矿物以及石英、方解石等脉石矿物。采用同步暴露竞争吸波设备考察其吸波能力,得到了锡石多金属硫化矿中各金属矿物和脉石矿物的相对微波能量值 RE (RE 值为被测物料吸收的微波能量与中间介质水所吸收的微波能量的比值)。 REc 结果如表 7 所示。

表 7 金属矿物和脉石矿物的吸波能力

Table 7 Microwave absorption ability of metallic minerals and gangue minerals

名称	脆硫锑铅矿	黄铁矿	锡石	闪锌矿	石英	碳酸钙
$REc/\%$	33.96	28.04	18.87	2.44	0	2.12

从表 7 可以看出,锡石多金属硫化矿主要矿石矿物的吸波能力存在显著差异,其中,脆硫锑铅矿的吸波能力最强,其次是黄铁矿,再次是锡石,闪锌矿和脉石矿物的吸波能力最差。因此,锡石多金属硫化矿主要矿石矿物的吸波能力差异奠定了锡石多金属硫化矿的微波选择性加热的基础。

2.3.2 矿石矿物选择性加热及其强化助磨机理

基于锡石多金属硫化矿主要矿石矿物的吸波能力差异,通过几种主要矿石矿物的吸波升温效果测试,首先验证了锡石多金属硫化矿的微波选择性加热事实,在此基础上,分析了主要矿石矿物因选择性加热而导致矿石内部出现集中应力强化磨矿效果的机理。

采用多物料分立共存吸波升温测试方法验证锡石多金属硫化矿中金属矿物与脉石矿物共存时的选择性吸波差异。微波加热 1 min,结果如图 4 所示。

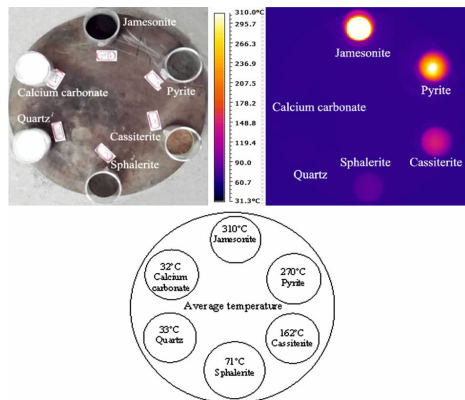


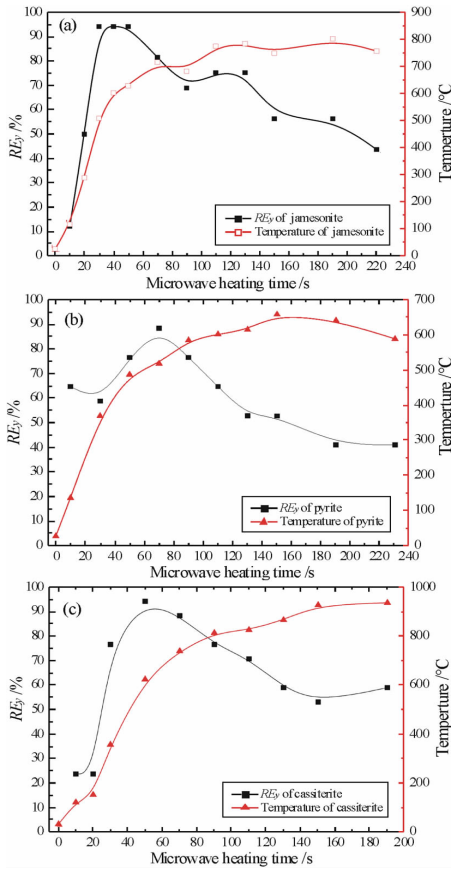
图 4 金属矿物和脉石矿物分立共存时吸收微波后的表面温度

Fig. 4 Surface temperature of discretely coexisted metallic and gangue minerals after absorbing microwave

从图 4 可以看出,多种矿物分立共存于微波场中时,金属矿物和脉石矿竞争吸收微波能量后温度高低差异明显,其中,脆硫锑铅矿温度最高,其次是黄铁矿,再次是锡石,之后是闪锌矿、石英和碳酸钙温度最低。作者所在课题组前期研究^[9-10]及文献资料^[11-14]都证明了闪锌矿、脉石矿物(石英、碳酸钙)等基本吸波能力极差,且在微波场升温极其缓慢。这验证了锡石多金属硫化矿置于微波场中加热时,微波就会选择性或优先加热黄铁矿、脆硫锑铅矿、锡石,而脉石矿物不能被微波加热。

采用顺序辐射优先吸波法测试了脆硫锑铅矿、黄铁矿、锡石三种矿物微波加热升温差异及其吸波

能力随温度的变化,结果如图 5 所示。



(a) 脆硫锑铅矿; (b) 黄铁矿; (c) 锡石

图 5 单模波导中微波加热温度变化对吸波特性的影响
Fig. 5 Effect of microwave heating temperature on microwave absorption characteristics in single mode

从图 5 可以看出,在微波加热 50 s 前,脆硫锑铅矿、黄铁矿、锡石等微波加热升温速率大,吸波能力均随温度升高而增强,达到一定温度后有所下降。说明在一定温度范围内,随着微波加热时间的增加,微波加热预处理锡石多金属硫化矿时将强化脆硫锑铅矿、黄铁矿、锡石等矿物的吸波性能。

上述研究结果表明了微波选择性加热的事实,对于锡石多金属硫化矿而言,由于矿石矿物存在选择性加热,因此,采用微波加热处理后可能导致矿石内部出现应力集中现象,从而强化磨矿效果。

考虑到锡石多金属硫化矿中黄铁矿含量较高,下面以黄铁矿与脉石为例分析微波加热预处理微波选择性加热过程应力的产生机理,以及如何对微波助磨产生影响。

微波选择性加热过程热应力的产生与矿石矿物始末温差及热膨胀性能相关^[15-17],如式(1)和式(2)所示:

$$\varepsilon_{i,j} = -\alpha_{(i,j)} (T_{n(i,j)} - T_{1(i,j)}) \quad (1)$$

$$\sigma_{(i,j)} = \frac{\varepsilon_{(i,j)} E_{(i,j)}}{1 - 2\nu_{(i,j)}} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_{(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)应变, $\alpha_{(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)的热膨胀系数, $T_{n(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)末温(与比热容相关), $T_{1(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)初始温度, $\sigma_{(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)热应力, $E_{(i,j)}$ 为矿石某区域杨氏模量, $\nu_{(i,j)}$ 为矿石某区域(i,j)的泊松比。

由式(1)可知,微波选择性加热矿石矿物时,矿石矿物吸收一定的微波能后,其始末温差与其比热容和热胀系数相关,表 8 和表 9 列出了黄铁矿和脉石矿物的比热容和热膨胀系数^[17]。

表 8 矿物密度及比热容

Table 8 Density and specific heating capacity of minerals

矿物	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		
		298 K	500 K	1000 K
黄铁矿	5 016	517.08	600.42	683.83
石英	2 648	740.50	991.17	1167.17
方解石	2 712	817.70	1051	1 238.5

表 9 矿物热膨胀系数

Table 9 Thermal expansion coefficients of minerals

矿物	热膨胀系数(α): ($1/\text{K}$) (10^{-6})			
	373K	473 K	673 K	873 K
黄铁矿	27.3	29.3	33.9	--
石英	45.0	43.3	49.7	77.9
方解石	13.1	15.8	20.1	24

从表 8 和表 9 可以看出:(1) 黄铁矿和脉石矿物的比热容存在一定差异,黄铁矿比热容小,脉石(SiO_2)比热容大;(2) 黄铁矿和脉石的热膨胀系数存在明显差异,但均随着温度升高而增大。当微波选择性加热黄铁矿时,其与脉石之间的温度差异大,黄铁矿的温度高,其所产生的热膨胀大,而脉石矿物不吸收微波,其脉石的温度低,所产生的热膨胀小,因此,黄铁矿和脉石矿物之间由于热膨胀差异显著容易产生应力集中,并对矿石矿物产生破坏,形成微裂隙降低整体矿石矿物强度。

根据锡石多金属硫化矿中矿石矿物吸波能力差异显著的特性,可推测出微波助磨的主要机理过程为:首先微波对矿石矿物产生选择性加热,致使其中的矿物和脉石温度差异更明显,即矿物和脉石的温度梯度大,以致产生不均匀热膨胀,导致在矿石内部出现应力集中对矿物与脉石产生破坏,强化微波助磨过程。关于微波加热处理后采用水冷却后助磨效

果更显著的原因是:水冷却后矿物与脉石温度骤降,产生急剧收缩,收缩产生的应力也具有不均匀性,由此引发的应力对矿石进行二次破坏,并且使得热膨胀应力集中产生的裂隙进一步扩展,使得整体上降低矿石强度,提高矿石可磨度。

3 结论

以锡石多金属硫化矿作为研究对象,经微波加热预处理后,磨矿产品粗粒级含量显著下降,中级粒级和细粒级含量明显增加。未经任何热处理的原矿邦德功指数 $W_i = 15.32$ kWh/t,可磨度 $G_{rpi} = 1.327$ g/r;矿石经微波加热预处理水冷却后邦德功指数 $W_i = 14.07$ kWh/t,可磨度 $G_{rpi} = 1.467$ g/r,微波加热预处理后邦德功指数减小 8.2%。

水冷却后磨矿产品的粒度变化比自然冷却更为显著,说明微波加热预处理水冷却后更有利于促进矿石硬度降低。

锡石多金属硫化矿中矿石矿物吸波能力存在显著差异,因此微波对矿石矿物产生选择性加热,致使其中的矿物和脉石温度差异更明显,即矿物和脉石的温度梯度大,以致产生不均匀热膨胀,导致在矿石内部出现应力集中对矿物与脉石产生破坏。其次,水冷却后矿物与脉石温度骤降,产生急剧收缩,收缩产生的应力也具有不均匀性,由此引发的应力对矿石进行二次破坏,并且使得热膨胀应力集中产生的裂隙进一步扩展,使得整体上降低矿石强度,提高矿石可磨度。

参考文献:

- [1] 石政威. 锡石多金属硫化矿球介质磨矿规律试验研究[J]. 南宁:广西大学,2009.
- [2] Napier - Munn T. J. , Morrell S. , Morrison R. D. , et al. Mineral comminution circuits: their operation and optimization[M]. Julius kruttschnitt mineral research centre, University of Queensland, 2005:1 - 2.
- [3] Amankwah R. K. , Ofori - Sarpong G. Microwave heating of gold ores for enhanced grindability and cyanide amenability[J]. Minerals engineering, 2011, 24(6):541 - 544.
- [4] 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.
- [5] 付润泽. 微波辅助磨细惠民铁矿实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
- [6] Schmuhl R. , Smit J. T. , Marsh J. H. The influence of microwave pre - treatment of the leach behaviour of disseminated sulphide ore[J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(3):157 - 164.
- [7] Omran M. , Fabritius T. , Abdel - Khalek N. , et al. Microwave assisted liberation of high phosphorus oolitic iron ore[J]. Journal of minerals and materials characterization and engineering, 2014, 2(5):414 - 427.
- [8] Omran M. , Fabritius T. , Mattila R. Thermally assisted liberation of high phosphorus oolitic iron ore: a comparison between microwave and conventional furnaces[J]. Powder technology, 2015, 269:7 - 14.
- [9] Lester E. , Kingman S. , Dodds C. , et al. The potential for rapid coke making using microwave energy[J]. Fuel, 2006, 85(14):2057 - 2063.
- [10] Han L. C. , Li E. , Guo, G. F. , et al. Application of transmission/reflection method for permittivity measurement in coal desulfurization[J]. Progress in electromagnetics research letters, 2013, 37:177 - 187.
- [11] Walkiewicz J W, Kazonich G, McGill S L. Microwave heating characteristics of selected minerals and components[J]. Mineral and metallurgical processing, 1988, 5(1):39 - 42.
- [12] McGill S L, Walkiewicz J W, Smyres G A. The effect of power level on microwave heating of selected chemicals and minerals[J]. Materials research society proceedings, 1988, 124:247 - 252.
- [13] Connell L H, Moe L A. Apparatus for treatment of ore US: 3261959[P]. 1966 - 04 - 24.
- [14] Ford J D, T Pei D C. High temperature chemical process via microwave absorption[J]. Microwave power, 1967, 2(2):61 - 64.
- [15] Whittles D N, Kingman S W, Reddish D J. Application of numerical modelling for prediction of the influence of power density on microwave - assisted breakage[J]. International journal of mineral processing, 2003, 68(1):71 - 91.
- [16] Jones D A, Kingman S W, Whittles D N, et al. Understanding microwave assisted breakage[J]. Minerals engineering, 2005, 18(7):659 - 669.
- [17] Ali A Y. Understanding the effects of mineralogy, ore texture and microwave power delivery on microwave treatment of ores[J]. Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2010.

引用格式:白立记,苏秀娟,何春林,等. 锡石多金属硫化矿微波辅助磨矿机理研究[J]. 矿产保护与利用,2018(6):31 - 36.

BAI Liji, SU Xiujuan, HE Chunlin, et al. Study on microwave - assisted grinding mechanism of cassiterite - polymetallic sulfide ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2018(6):31 - 36.