

锡石多金属硫化矿微波助磨研究*

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:从微波选择性加热潜力出发,研究了锡石多金属硫化矿的微波吸收效果及其微波辅助加热预处理对磨矿结果的影响,考察了矿石微波加热预处理前后磨矿产品的粒度分布、金属分布等指标的变化,旨在探索锡石多金属硫化矿的微波加热辅助磨矿新途径。结果表明:锡石多金属硫化矿的主要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;物料加热预处理后采用水快速冷却后的磨矿效果比自然慢冷好。

关键词:微波;锡石多金属硫化矿;磨矿;预处理;吸波能力

中图分类号:TD921⁺.4 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)01-0028-07

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.01.006

Study on Microwave Assisted Grinding 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: Based on the microwave selective heating potential, the microwave absorption effect of the cassite polymetallic sulfide ore and the effect of microwave - assisted heating pretreatment on grinding were studied. The changes in indicators such as particle size distribution and metal distribution of the ore products before and after the microwave heating pretreatment were investigated to explore new ways of microwave heating - assisted grinding of cassiterite polymetallic sulphide ore. The results showed that there are significant differences in the absorbing ability of the main ore minerals of the cassiterite polymetallic sulphide ore. Among them, jamesonite has the strongest absorbing ability, followed by pyrite and cassiterite. The absorbing ability of sphalerite and gangue minerals are the worst. After the material is heated, the grinding effect of rapid cooling with water is better than that of natural cooling.

Key words: microwave; cassiterite polymetallic sulfide ore; grinding; pretreatment; absorbing ability

前言

微波是指波长在 1 ~ 1 000 mm, 频率在 0.3 ~ 300 GHz 的电磁波。在选矿领域,常利用微波辅助技术来改善矿物的分选特性,其机理主要是通过把

电磁能转化为热能,使物料得以加热。在这一过程中,加热反应效果很大程度上与极化分子有重要关联。这是因为在微波加热的情况下,在微波电磁中的极化分子随着微波电磁场的交替变化产生高频振荡,进而产生热量^[1],不同物料对微波能量的吸收

* 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,硕士生导师,主要研究方向为矿物资源化学提取与综合利用, E-mail:782180407@qq.com。

能力不同,这一特性将有利于矿物间的分选与分离。

S. W. Kingman 等^[2]研究了微波辅助磨矿对矿物分选指标的影响,指出微波辅助磨矿过程中,矿石可磨度、有用矿物的单体解离度及分选指标的提高,主要与特定类型矿种的存在、特定类型矿种的矿粒大小及其嵌布状况有关。K. E. Waters 等^[3]研究了微波辐射对硫化铁矿物磁性的影响,在 1.9 kW 的微波场下辐射 120 s,硫化铁矿物的比磁化率明显增强,原因在于矿物表面生成了具有较强磁性的新矿物组分。Vorster^[4]等对块状硫化铜矿和硫化铜锌矿分别微波辐射 90 s 后进行磨矿和浮选,结果表明,磨矿的邦德功指数可降低 70% 左右,磨矿后有用矿物的单体解离度大大提高,浮选过程中,矿物的上浮率明显提高。Omran 等^[5-6]研究微波功率、微波加热时间对高磷鲕状铁矿助磨的影响;磨矿试验结果显示,产品 -0.125 mm 含量从 46.6% 增加至 59.76%。对比试验显示,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,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异性差异,因此,本文从利用微波选择性加热潜力出发,研究了锡石多金属硫

化矿的微波吸收效果及其微波辅助加热预处理对磨矿结果的影响,考察了矿石微波加热预处理前后磨矿产品的粒度分布、金属分布和可磨度等指标的变化,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

试验原料取自广西河池车河选矿厂重选跳汰精矿仓。经烘干、混匀、筛分、分样,其粒度组成如表 1 所示。试验样各粒级中的金属品位和金属分布率如表 2 所示,试验样的化学成分分析结果如表 3 所示。

表 1 矿样粒度分布
Table 1 Particle size distribution of the test sample

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	-

由表 1 可知,经烘干、混匀、筛分、分样后,-3.2+3 mm 粒级的产率为 19.08%;-3+2 mm 粒级的产率为 43.12%;-2+1.5 mm 粒级的产率为 29.54%;-1+0.425 mm 粒级的产率为 8.08%;-0.425 mm 粒级的产率为 0.18%。

表 2 矿样各粒级中主要金属元素分析结果
Table 2 The analysis results of main metallic elements in each size of test 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	40.10	3.65	1.09	0.66	8.24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 3 矿样的化学成分分析

Table 3 Analysis of chemical composition of mineral samples

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样;Sn 在 -1 mm 粒级含量较大,但分布率小;Pb、Sb 分布规律相似,粗粒中含量高,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。

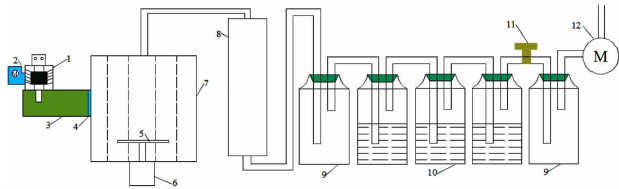
由表 3 可知,试样中金属矿物主要为黄铁矿,脉石矿物主要为石英、碳酸盐、氧化铝等。

1.2 试验设备

试验仪器设备如表 4 所示。其中,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(图 1)。磨矿为湿磨,湿磨试验球磨机为圆锥型,体积为 6.25 L,最大给矿粒度 3 mm。

表 4 试验设备及相关仪器
Table 4 The test instruments and equipment

仪器设备名称	生产厂家	型号	仪器设备用途
锥形球磨机	武汉探矿机械厂	XMQ - $\phi 240 \times 90A$	湿磨
微波炉	广州科威	QW - 6HO	加热
电阻炉	上海实验电炉厂	SXZ - 1210	加热
红外热像仪	武汉高德红外股份有限公司	TP8S	测试表面温度
电子天平	上海大和衡器有限公司	ACS - 3A	称量
振动筛	德国 FRITSCH	Analysette3	筛分
标准筛	德国 FRITSCH	- -	筛分
烘箱	上海浦东东荣科学仪器有限公司	101A - 3	烘干



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

图 1 微波焙烧设备

Fig. 1 Microwave roasting system

1.3 试验方法

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,关好炉门,开启转盘(转数为 $9.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)。设定好微波功率和微波处理时间,开启微波加热,微波停止后立即将试样取出冷却。采用自然冷却和水冷却两种冷却方式。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,马上投入室温水里冷却,后烘干制样。

探讨微波加热预处理物料后冷却方式、微波加热预处理物料质量、微波加热预处理时间对磨矿的影响。

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和水冷却,之后进行磨矿试验。微波加热预处理试样质量为 500 g ,微波功率 $P = 6 \text{ kW}$ 。

经过初步试验可知,磨矿时间过长粗粒少,磨矿产品粒级相差无几,细粒含量相近,磨矿时间过短微波助磨各粒级差异性暴露不明显,因此,初步确定湿磨磨矿的时间为 5 min (以下若无特别说明,湿磨时均采用同样的磨矿时间)。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 5 所示。

表 5 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 5 Effect of the cooling pattern on the particle size distribution after microwave pretreatment

粒级/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。

从表 5 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。

表 6 ~ 表 9 分别为未处理原矿、微波加热预处理自然冷却、微波加热预处理水冷却磨矿后各粒级中 Fe、Pb、Sn 和 Zn 的品位以及在磨矿产品中各粒级的分布率。

从表 6 ~ 表 9 可以看出:(1) - 3.2 + 2 mm 和 - 2 + 1 mm 两个粗粒级中 Fe 的品位和分布率都显著降低; - 0.15 + 0.074 mm、- 0.15 + 0.074 mm 和

- 0.038 mm 三个细粒中 Fe 品位和分布率都显著增加,说明微波加热预处理后,含 Fe 矿物在磨矿过程中发生优先破碎特征显著;(2) - 3.2 + 2 mm 和 - 2

表 6 磨矿产品各粒级中 Fe 的品位及其分布率
Table 6 Fe grade and distribution of each size fraction in the grinding product

粒级/mm	产率/%			Fe 品位/%			Fe 分布率/%		
	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W
- 3.2 + 2	3.24	2.78	1.84	11.38	4.86	5.76	3.77	1.35	1.00
- 2 + 1	20.36	19.20	12.94	8.82	5.93	4.62	18.37	11.40	5.65
- 1 + 0.425	35.04	32.21	34.06	10.48	9.60	9.17	37.56	30.95	29.53
- 0.425 + 0.15	17.22	18.47	20.79	11.33	12.43	12.68	19.96	22.98	24.93
- 0.15 + 0.074	5.66	6.64	7.84	12.69	15.46	16.67	7.35	10.28	12.35
- 0.074 + 0.038	4.59	5.59	5.71	5.48	15.15	16.69	2.57	8.48	9.01
- 0.038	13.88	15.11	16.81	7.34	9.62	11.03	10.42	14.55	17.53
合计	100.00	100.00	100.00	-	-	-	100.00	100.00	100.00

表 7 磨矿产品各粒级中 Pb 的品位及其分布率
Table 7 Pb grade and distribution of each particle size fraction in the grinding product

粒级/mm	产率/%			Pb 品位/%			Pb 分布率/%		
	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W
- 3.2 + 2	3.24	2.78	1.84	0.15	0.041	0.11	1.46	0.46	0.72
- 2 + 1	20.36	19.20	12.94	0.41	0.053	0.049	25.02	4.11	2.26
- 1 + 0.425	35.04	32.21	34.06	0.19	0.11	0.14	19.96	14.30	16.99
- 0.425 + 0.15	17.22	18.47	20.79	0.29	0.27	0.26	14.97	20.13	19.26
- 0.15 + 0.074	5.66	6.64	7.84	0.48	0.48	0.53	8.14	12.87	14.80
- 0.074 + 0.038	4.59	5.59	5.71	0.67	0.62	0.67	9.23	13.99	13.62
- 0.038	13.88	15.11	16.81	0.51	0.56	0.54	21.22	34.15	32.34
合计	100.00	100.00	100.00	-	-	-	100.00	100.00	100.00

表 8 磨矿产品各粒级中 Sn 的品位及其分布率
Table 8 Sn grade and distribution of each size fraction in the grinding product

粒级/mm	产率/%			Sn 品位/%			Sn 分布率/%		
	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W
- 3.2 + 2	3.24	2.78	1.84	0.84	0.1	0.58	3.04	0.31	1.04
- 2 + 1	20.36	19.20	12.94	0.73	0.42	0.51	16.60	9.13	6.43
- 1 + 0.425	35.04	32.21	34.06	0.94	0.90	1.01	36.80	32.83	33.52
- 0.425 + 0.15	17.22	18.47	20.79	1.12	1.37	1.46	21.55	28.66	29.58
- 0.15 + 0.074	5.66	6.64	7.84	1.19	1.43	1.57	7.52	10.76	11.99
- 0.074 + 0.038	4.59	5.59	5.71	1.13	1.24	1.31	5.80	7.85	7.28
- 0.038	13.88	15.11	16.81	0.56	0.61	0.62	8.68	10.44	10.16
合计	100.00	100.00	100.00	-	-	-	100.00	100.00	100.00

表 9 磨矿产品中各粒级 Zn 的品位及其分布率
Table 9 Zn grade and distribution of each size fraction in the grinding product

粒级/mm	产率/%			Zn 品位/%			Zn 分布率/%		
	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W	Untreated	MW - N	MW - W
- 3.2 + 2	3.24	2.78	1.84	1.12	0.45	0.73	1.60	0.53	0.56
- 2 + 1	20.36	19.20	12.94	0.84	0.56	0.60	7.54	4.58	3.25
- 1 + 0.425	35.04	32.21	34.06	1.69	1.49	1.38	26.12	20.46	19.70
- 0.425 + 0.15	17.22	18.47	20.79	3.07	3.36	3.26	23.32	26.45	28.41
- 0.15 + 0.074	5.66	6.64	7.84	4.78	5.00	4.81	11.93	14.16	15.80
- 0.074 + 0.038	4.59	5.59	5.71	5.22	5.19	4.71	10.57	12.37	11.27
- 0.038	13.88	15.11	16.81	3.09	3.33	2.98	18.91	21.44	21.00
合计	100.00	100.00	100.00	-	-	-	100.00	100.00	100.00

+1 mm 两个粗粒级中 Pb 品位和分布率显著下降, -0.15 + 0.074 mm、-0.15 + 0.074 mm 和 -0.038 mm 三个细粒中 Pb 品位变化不明显,但分布率显著增加,特别是 -0.038 mm 粒级分布率显著增加,说明粗粒级由于脆性增加,磨矿过程中细粒级中各种矿物总量大,因此,Pb 的品位变化不明显;(3)粗粒级中 Zn 的品位和分布率下降。-3.2 + 2 mm 和 -2 + 1 mm 两个粗粒级中 Sn 的品位和分布率显著下降,中间粒级和细粒中 Sn 品位有所增加,而中间粒级分布率显著增加,细粒增加幅度相对较小,说明微波加热预处理后锡石加速磨细,含 Sn 矿物发生了

优先破碎,但效果相对较弱。

总体上,微波加热预处理后,粗粒级金属分布率显著减小,中间粒级和细粒级金属分布率明显增加,含铁矿物在磨矿过程中优先破碎特征明显,而含 Sn、Pb、Zn 矿物优先破碎特征相对较弱。

2.2 微波加热物料质量的影响

试验中,微波功率为 6 kW,处理时间为 60 s,微波每次预处理质量为 250 ~ 2 000 g 不等,之后采用水冷却处理。之后将微波加热预处理后的试样混匀缩分成 500 g,将缩分好样品装入球磨机进行湿磨磨矿试验,磨矿产品粒度分布结果如表 10 所示。

表 10 微波加热预处理不同样品质量对磨矿产品粒度分布的影响
Table 10 Effect of microwave pretreating sample mass on size distribution of grinding product

粒级/mm	产率/%						
	Untreated	MW - W 250 g	MW - W 500 g	MW - W 750 g	MW - W 1 000 g	MW - W 1 500 g	MW - W 2 000 g
-3.2 + 2	3.24	1.74	1.84	1.79	2.29	2.15	2.04
-2 + 1	20.36	8.41	12.94	12.33	15.48	15.32	14.54
-1 + 0.425	35.04	35.76	34.06	35.96	36.08	36.46	37.36
-0.425 + 0.15	17.22	22.80	20.79	20.03	18.86	19.15	19.81
-0.15 + 0.074	5.66	7.52	7.84	6.97	6.58	6.32	5.27
-0.074 + 0.038	4.59	6.18	5.71	5.82	5.50	5.48	6.40
-0.038	13.88	17.59	16.81	17.10	15.22	15.12	14.59

从表 10 表可以看出,微波加热预处理矿样质量对微波助磨效果显著。当微波加热预处理量少时,粗粒减少较为明显,中间粒级和细粒级增加显著。随着微波加热预处理量的增加,微波助磨的效果开始下降,粗粒减少比例变小,中间粒级和细粒级增加不再明显。原因可能是随着微波加热预处理质量的增加,吸收微波物质的总量也随之增加,单位吸波物质获得的微波能量减少,升温速率变小,并且吸波物质与不吸波物质之间的热传传导致使吸波物质质量

损失大,致使产生的膨胀应变减小,热应力减小,最终导致矿石可磨性提高不明显。所以,想要提高微波加热预处理效果时,必须考虑微波加热预处理量与微波加热时间匹配。

2.3 微波加热时间的影响

试验中,微波处理时间为 0、10、20、40、60、80、100 s,其他条件同 2.2。水冷却和自然冷却处理后的磨矿试验结果见表 11,锡石多金属硫化矿在微波加热预处理不同时间下表面温度分布情况如图 2 所示。

表 11 在不同微波加热预处理时间下水冷却和自然冷却后对磨矿产品粒度分布的影响
Table 11 Effect of microwave heating time with water cooling and air cooling on size distribution of grinding product /%

粒级/mm	水冷却							自然冷却						
	0 s	10 s	20 s	40 s	60 s	80 s	100 s	0 s	10 s	20 s	40 s	60 s	80 s	
-3.2 + 2	3.24	3.61	2.96	2.44	1.84	2.24	1.60	3.24	2.85	3.11	2.42	2.78	2.81	
-2 + 1	20.36	21.17	21.94	16.88	12.94	11.58	6.79	20.36	21.10	19.99	17.97	19.20	18.62	
-1 + 0.425	35.04	34.41	34.01	33.72	34.06	35.33	36.15	35.04	34.60	33.11	33.36	32.21	31.74	
-0.425 + 0.15	17.22	17.05	16.69	18.78	20.79	20.91	24.00	17.22	17.51	17.92	18.63	18.47	18.73	
-0.15 + 0.074	5.66	5.68	5.82	6.58	7.84	7.40	8.30	5.66	6.18	6.27	6.89	6.64	7.06	
-0.074 + 0.038	4.59	4.33	4.50	5.42	5.71	5.77	6.14	4.59	4.07	4.76	5.41	5.59	5.72	
-0.038	13.88	13.74	14.08	16.18	16.81	16.77	17.02	13.88	13.69	14.84	15.32	15.11	15.33	

从表 11 和图 2 可以看出:(1)微波加热预处理时间越长,物料加热的终点温度越高,微波加热预处理

后磨矿的效果越好;(2)水冷却处理对矿石可磨性提高效果比自然冷却效果好,随着微波加热预处理时间的

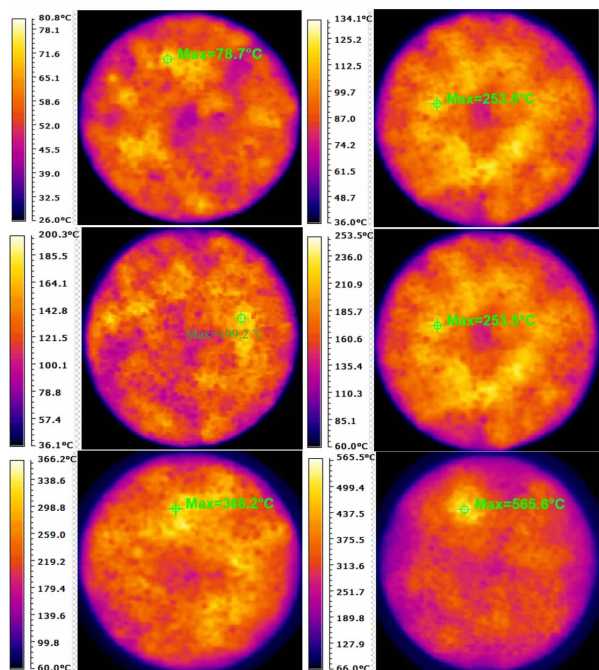


图 2 微波辐射不同时间下矿样表面温度分布

Fig.2 Effect of microwave heating time on the surface temperature distribution of the ore sample

增加,水冷却和自然冷却磨矿产品中的粗粒级均明显减少,细粒级明显增加;(3) 随着微波加热预处理时间的增加,粒级 -1 +0.425 mm 产率保持不变,说明新生成 -1 +0.425 mm 粒级的量和 -1 +0.425 mm 粒级被破碎产生下一粒级的量一样。微波加热预处理时间越长越有利于提高矿石的可磨性。

从图 2 还可以看出,微波加热预处理后样品温度存在明显不均匀性,温度差异大,出现很多的高温热斑点和低温区域,亮斑的增大预示着样品中金属矿物逐步吸收微波升温,这说明微波选择性加热矿石中的矿物;而脉石矿物等则不吸收微波,不被微波加热,但由于热传导作用使其温度有所升高。随着微波加热时间增加,表面温度出现亮斑数逐渐增多,表面温度差异逐渐变大,当微波加热时间为 80 s 时,样品中出现局部烧结,但磨矿效果依然好于短时间微波加热预处理的磨矿效果。

表 12 ~ 表 15 分别为微波加热预处理不同时间后水冷却磨矿产品中各粒级 Fe、Pb、Zn 和 Sn 的品位和分布率。

表 12 微波加热预处理不同时间水冷却对磨矿产品中各粒级 Fe 品位及其分布率的影响

Table 12 Effect of microwave heating time with water cooling on Fe grade and distribution of each particle size in grinding product

粒级/mm	Fe 品位/%					Fe 金属分布率/%				
	0	20 s	40 s	60 s	80 s	0	20 s	40 s	60 s	80 s
-3.2 +2	11.38	8.15	6.47	5.76	6.25	3.77	2.36	1.46	1.00	1.30
-2 +1	8.82	7.26	6.68	4.62	5.16	18.37	15.59	10.38	5.65	5.56
-1 +0.425	10.48	10.08	10.12	9.17	8.90	37.56	33.54	31.43	29.53	29.27
-0.425 +0.15	11.33	12.62	13.22	12.68	12.23	19.96	20.61	22.86	24.93	23.81
-0.15 +0.074	12.69	15.23	16.35	16.67	16.16	7.35	8.68	9.91	12.35	11.13
-0.074 +0.038	5.48	14.60	15.94	16.69	16.60	2.57	6.43	7.95	9.01	8.92
-0.038	7.34	9.28	10.75	11.03	12.82	10.42	12.78	16.02	17.53	20.01

表 13 微波加热预处理不同时间水冷却对磨矿产品中各粒级 Pb 品位及其分布率的影响

Table 13 Effect of microwave heating time with water cooling on Pb grade and distribution of each size fraction in grinding product

粒级/mm	Pb 品位/%					Pb 金属分布率/%				
	0	20 s	40 s	60 s	80 s	0	20 s	40 s	60 s	80 s
-3.2 +2	0.15	0.13	0.06	0.11	0.09	1.46	1.54	0.52	0.72	0.80
-2 +1	0.41	0.09	0.08	0.05	0.05	25.02	8.25	4.75	2.26	2.19
-1 +0.425	0.19	0.17	0.14	0.14	0.12	19.96	23.12	17.73	16.99	16.74
-0.425 +0.15	0.29	0.25	0.28	0.26	0.27	14.97	16.69	19.75	19.26	22.30
-0.15 +0.074	0.48	0.46	0.51	0.53	0.46	8.14	10.71	12.61	14.80	13.44
-0.074 +0.038	0.67	0.61	0.64	0.67	0.53	9.23	10.99	13.02	13.62	12.09
-0.038	0.51	0.51	0.52	0.54	0.49	21.22	28.71	31.61	32.34	32.44

从表 12 ~ 表 15 可以看出,微波加热预处理后水冷却磨矿产品粗粒级中金属品位和分布率都随着微波加热预处理时间增加而减小,在细粒级中的 Fe、Sn 品位和分布率则随着微波加热预处理时间增加而增大,而 Pb 和 Zn 在细粒中的品位基本不变,仅在细粒

级金属分布率增加。细粒级中 Pb、Zn 的品位和分布率随微波加热时间变化不一致的原因可能是:脆硫锑铅矿含量小,细粒级中矿物总量大,Pb 品位贡献不大,但随着细粒级产率增加金属分布率也增加;闪锌矿含量虽然比锡石大,但其吸波能力差,不会发生吸

表 14 微波加热预处理不同时间水冷却对磨矿产品中各粒级 Zn 含量及其分布率的影响

Table 14 Effect of microwave heating time with water cooling on Zn grade and distribution of each size fraction in grinding product

粒级/mm	Zn 品位/%					Zn 金属分布率/%				
	0	20 s	40 s	60 s	80 s	0	20 s	40 s	60 s	80 s
-3.2+2	1.12	0.55	0.55	0.73	0.48	1.60	0.73	0.59	0.56	0.46
-2+1	0.84	0.69	0.51	0.60	0.49	7.54	6.79	3.75	3.25	2.41
-1+0.425	1.69	1.59	1.42	1.38	1.38	26.12	24.25	20.88	19.70	20.70
-0.425+0.15	3.07	3.21	3.35	3.26	3.31	23.32	24.03	27.43	28.41	29.39
-0.15+0.074	4.78	5.26	5.01	4.81	4.89	11.93	13.74	14.37	15.80	15.35
-0.074+0.038	5.22	5.48	5.21	4.71	4.77	10.57	11.07	12.30	11.27	11.69
-0.038	3.09	3.07	2.93	2.98	2.81	18.91	19.38	20.68	21.00	20.00

表 15 微波加热预处理不同时间水冷却对磨矿产品中各粒级 Sn 含量及其分布率的影响

Table 15 Effect of microwave heating time with water cooling on Sn grade and distribution of each size fraction in grinding product

粒级/mm	Sn 品位/%					Sn 金属分布率/%				
	0	20 s	40 s	60 s	80 s	0	20 s	40 s	60 s	80 s
-3.2+2	0.84	0.55	0.35	0.58	0.16	3.04	2.20	0.88	1.04	0.43
-2+1	0.73	0.51	0.42	0.51	0.24	16.6	15.12	7.29	6.43	3.34
-1+0.425	0.94	0.8	0.95	1.01	0.72	36.8	36.75	32.95	33.52	30.61
-0.425+0.15	1.12	0.98	1.48	1.46	1.25	21.55	22.10	28.58	29.58	31.45
-0.15+0.074	1.19	1.16	1.62	1.57	1.39	7.52	9.13	10.96	11.99	12.37
-0.074+0.038	1.13	1.01	1.44	1.31	1.25	5.80	6.15	8.02	7.28	8.68
-0.038	0.56	0.45	0.68	0.62	0.65	8.68	8.56	11.32	10.16	13.11

波变脆,而是随着矿石强度降低,发生相对弱的优先破碎,因此,Zn 品位在细粒级基本不变,仅金属分布率增加。说明在试验的时间范围内,微波加热预处理时间长有利于增加细粒级中的金属分布率。

3 结论

锡石多金属硫化矿的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,再其次是锡石,闪锌矿和脉石矿物的吸波能力最差。微波加热预处理后,使磨矿产品的粗粒级含量显著下降,中间粒级含量略有增加,细粒级含量明显增加,中间粒级和细粒级中的有价金属分布率增加。在试验范围内,微波加热处理物料的质量越少,微波加热预处理时间越长,物料加热的终点温度越高,微波加热预处理助磨效果越好。物料加热预处理后采用水快速冷却后的磨矿效果比自然慢冷好。微波加热预处理后,含 Fe 矿物在磨矿过程中优先破碎特征最显著,而含 Sn、Pb、Zn 矿物优先破碎特征相对较弱。

参考文献:

- [1] 崔礼生,谢文清. 矿物的微波处理[J]. 中国粉体工业,2008,6(6):20-23.
- [2] Kingman S W, Vorster W, Rowson N A. The influence of mineralogy on microwave assisted grinding[J]. Minerals engineering, 2000, 63(2):313-327.
- [3] Waters K E, Rowson N A, Greenwood R W. Characterising the effect of microwave radiation on the magnetic properties of pyrite[J]. Separation purification technology, 2007, 56(2):9-17.
- [4] Vorster W, Rowson N A, Kingman S W. The effect of microwave radiation upon the processing of neves corvo copper ore [J]. International journal of mineral processing, 2001, 63(3):29-44.
- [5] 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.
- [6] 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.

引用格式:白立记,苏秀娟,何春林,等. 锡石多金属硫化矿微波助磨研究[J]. 矿产保护与利用,2019,39(1):28-34.

BAI Liji, SU Xiujuan, HE Chunlin, et al. Study on microwave assisted grinding of cassiterite-polymetallic sulfide ore[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(1):28-34.