

# 闪锌矿的微波干燥规律研究

朱艳丽, 彭金辉, 张世敏, 范兴祥, 张利波, 黄孟阳, 郭胜惠

(昆明理工大学 材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 研究了利用微波加热干燥闪锌矿的新工艺, 对微波干燥闪锌矿的失水特性进行了研究, 实验证实微波干燥闪锌矿全过程分为加速、恒速和降速三个阶段; 通过对试验数据的回归分析, 获得了微波干燥闪锌矿的数学模型, 采用 Boltzmann 模型拟合最佳, 同时对该模型的参数进行了分析和讨论, 结果表明干燥速率先逐渐增加; 然后逐渐减少, 与根据试验数据分析出的结果相吻合。

**关键词:** 微波加热; 闪锌矿

中图分类号: TF02

文献标识码: A

文章编号: 1007-855X(2006)02-0029-05

## Studies on Microwave Drying of Sphalerite

ZHU Yan-li PENG Jin-hui ZHANG Shim-in FAN Xing-xiang

ZHANG Li-bo HUANG Men-yang GUO Sheng-hui

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract** A study is made on the new technology of drying sphalerite by means of microwave heating. The dehydrating characteristics are obtained. The experimental results show that the whole drying process could be divided into 3 stages, e.g. initial drying stage, constant rate drying stage and reducing rate drying stage, which indicates that the regression model of microwave drying on sphalerite is in accordance with the equation: Boltzmann. At the same time, the parameters in this model are analyzed and discussed. The findings indicate drying rate increases gradually and then it decreases step by step, which matches the experimental results.

**Key words** microwave heating; sphalerite

## 0 引言

闪锌矿, 一种难熔化合物<sup>[1]</sup>, 主要成分为硫化锌, 是炼锌的主要原料. 无论是采用湿法还是火法炼锌, 首先都要进行焙烧. 为了使焙烧进行的充分彻底, 在焙烧之前需要进行造球. 造球操作对矿物的水分含量有一定的要求, 从自然界中直接开采的闪锌矿水分含量所含水分往往较高, 因此, 在造球之前必须对闪锌矿进行干燥, 以达到造球所应满足的水分含量要求. 为了脱出这部分水分, 传统方式干燥闪锌矿时温度分布不均, 引起物料干燥不均匀, 影响闪锌矿的质量. 因此, 探索新型干燥闪锌矿工艺是非常必要的.

微波是频率在  $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11}$  Hz 的电磁波, 波长范围为 1 m ~ 0.001 m. 将微波作为一种能源应用于加热干燥方面, 是由于其独特的加热干燥特点: 加热速度快; 选择性加热; 透射能力强, 微波穿透深度和波长 (微波加热所对应的波长是几米到几十厘米) 是同一数量级, 因此, 除了特大的物体外, 一般可以做到表里一起均匀加热. 另外, 微波加热干燥还有控制及时, 改善操作环境和劳动条件、场强高温、高频高温等特点, 能有效地提高产品的优质率和合格率. 微波辐射加热技术已经广泛应用于国防、材料、环境、食品、医药、农林等行业, 在其它领域的新应用正在不断拓宽, 形成新颖的交叉学科<sup>[2-5]</sup>. 有关微波干燥矿产品的应用研究报道却甚少, 微波加热干燥闪锌矿目前尚未见报道, 其规律研究还处在初级阶段. 本试验采用微波加热干燥闪锌矿, 旨在改革传统干燥方法, 探索新的干燥工艺, 其规律研究对冶金工业在节能省耗, 实现自

收稿日期: 2005-07-18

第一作者简介: 朱艳丽 (1980~), 女, 硕士研究生. 主要研究方向: 冶金新技术. E-mail: zhuyanli999@sina.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动化方面有一定的指导意义.

### 1 试验

#### 1.1 原料及设备

原料: 试验原料采用某铅锌矿厂提供的闪锌矿, 初始水分测定参照国家标准 (GB3169 3- 82) 进行.

设备: 经改装过的多模微波炉 (微波功率 700 W, 微波频率 2 450 MHz) 如图 1 所示; EX - 5000A 电子天平; 101 - 3 型电热鼓风恒温干燥箱.

#### 1.2 试验原理与方法

试验原理: 一般传统加热方法是加热周围环境, 借助热量辐射或通过热对流的空气使物体表面先被加热, 然后通过热传导传到物体内部, 这种方法效率低, 加热时间长. 微波加热干燥原理可用极性分子在外加电场作用下迅速转动, 偶极子的转动来解释. 热量是在被加热物体内部产生的, 热源来自物体内部, 加热均匀, 不会造成“外焦里不熟”的夹生现象<sup>[6]</sup>.

试验方法: 准确称量试样放入容器中, 记录物料重量  $W_1$ , 使用改装过的多模微波炉进行干燥, 记录微波功率和干燥时间, 在线称重, 每隔一段时间记录一次数据  $W_2$ , 根据下式计算物料相对脱水率.

$$A = \frac{W_1 - W_2}{W'_1} \times 100\%$$

其中,  $W'_1$  为物料初始含水量.

### 2 试验结果与分析

#### 2.1 闪锌矿微波干燥失水特性

##### 2.1.1 干燥曲线

试验在辐射时间为 150 s, 物料质量为 100 g 的条件下, 将微波功率设定为 700W, 490W 和 210W 分别进行试验. 试验结果见图 2

图 2 显示在不同的微波功率下闪锌矿相对脱水率随干燥时间的变化曲线. 从图中可看出, 在不同的微波功率下, 物料的相对脱水率随着微波辐射时间的延长而增加. 随着辐射时间的延长, 物料所吸收微波能增加, 相对脱水率相应增加. 在实际生产过程中, 造球所要求的物料湿基含水量在 6% ~ 8% 为最佳, 从图 2 可以看出, 微波干燥闪锌矿达到上述要求的时间仅为 80 s (700W), 100 s (490W) 和 240 s (210W). 因此, 采用微波干燥闪锌矿是可行的, 并且省时节能.

##### 2.1.2 干燥速率曲线

为了全面掌握微波干燥闪锌矿的干燥过程, 以指导实际工业化生产, 对闪锌矿的微波干燥速率曲线进行了分析和探讨. 试验条件: 物料质量为 100 g 不同的微波功率下脱水速率如图 3 从图 3 可看出, 微波干燥闪锌矿的整个过程可分为三个阶段: 加速、恒速和降速阶段. 从图中可以看出: 干燥初期呈加速阶段, 此时由于闪锌矿的水分含量多, 以及微波能加热干燥均匀性的特点, 使得物料表面和内部水分很快得到热量而迅速开始蒸发, 干燥速率很快增加到最大值而进入恒速干燥阶段; 恒速阶段其干燥速度最大, 是主要脱水区; 到干燥后期, 水分不断蒸发减少, 内部扩散阻力逐渐变大, 跟不上表面蒸发, 失水速度下降, 干燥速率进入降速阶段.

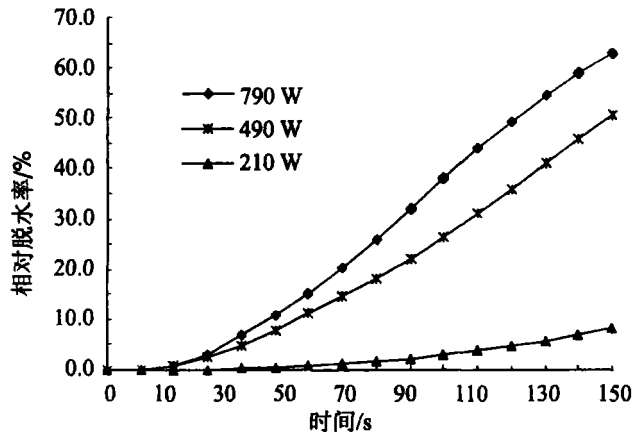
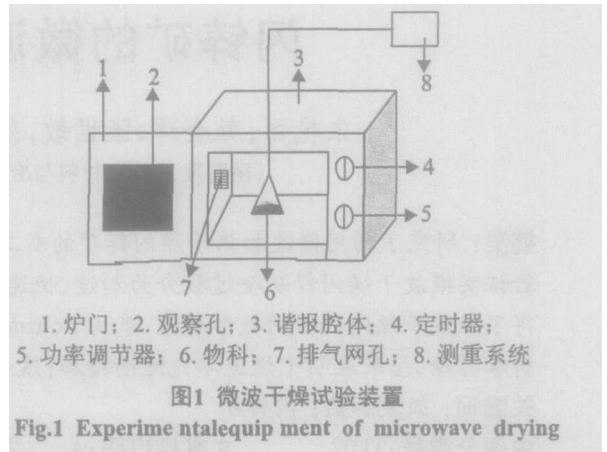


图2 闪锌矿相对脱水率随时间变化曲线  
Fig.2 varied curve of the relative removal water rate with time

## 2 2 微波干燥闪锌矿数学模型

### 2 2 1 模型拟合

对微波干燥闪锌矿的干燥过程不仅应能够分析干燥的具体过程, 在实际生产中还应该能够对干燥过程进行预测, 为此, 对微波干燥闪锌矿的数学模型进行了分析.

大量的文献资料表明, 传统干燥典型的  $MR-t$  曲线图如图 4 所示<sup>[7]</sup>.

对应的数学模型为:

$$MR = A \exp(-Kt) \quad (1)$$

式中: 水分比  $MR = (M_t - M_e) / (M_o - M_e)$ ;  $M_t$  为  $t$  时刻物料干基含湿量 (d. b%);  $M_o$  为物料原始含湿量 (d. b%);  $M_e$  为物料平衡含湿量 (d. b%);  $t$  为物料干燥时间 (s);  $A$  为待定常数.

微波干燥闪锌矿是否符合这个模

型, 需要对试验数据进行处理. 试验所采用的物料质量为 100 g 微波功率分别为 700W, 490W 和 210W. 由于微波干燥物料的平衡含湿量的资料很少, 而且在试验中获得该数值存在很大的困难, 所以, 将  $MR$  简化为  $M_t / M_o$ <sup>[8]</sup>. 试验所得到的结果如 5~ 7 图散点图所示.

综合考虑传统干燥典型的数学模型, 运用 origin7. 0 对图 5~ 7 中的点进行回归, 其回归曲线如图 5~ 7 中的平滑曲线, 满足的干燥的方程均为 Boltzmann 模型:

$$MR = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + \exp(\frac{t - t_0}{dt})} \quad (2)$$

回归参数值见图 5~ 7 上述回归后  $R^2$  值分别为 0.999 17, 0.999 87 和 0.999 34 回归曲线与实测值相当吻合.

### 2 2 2 模型参数分析

Boltzmann 函数  $MR = A_2 + \frac{(A_1 - A_2)}{1 + \exp(\frac{t - t_0}{dt})}$  中参数有如下

4 个:

1)  $A_1$ : 初始值, 即  $t = 0$  时, 闪锌矿  $MR$  值, 由  $MR = M_t / M_o$  得,  $A_1$  初始值为 1

2)  $A_2$ : 终止值, 即试验结束时, 闪锌矿  $MR$  值. 在本试验范围内, 当  $t = 0$  时, 试验开始与结束在同一时间,  $A_1 = A_2$ ,  $MR = A_2 = A_1 = 1$ ; 当  $t \rightarrow \infty$  时, 由 (2) 式得  $MR = A_2$ , 从上述回归参数可知,  $A_2 = 0$  所以在微波加热干燥的时间无限长时, 物料最终的含水量为  $A_2 = 0$ . 在有限的干燥时间内, 微波加热干燥的终点的含水率不可能为零.

3)  $t_0$ : 中间值, 即当  $MR = (A_1 + A_2) / 2$  时所对应的时间. 当  $t = t_0$  时, 由式 (2) 可得  $MR = (A_1 + A_2) / 2$

4)  $dt$  时间常数. 由方程 (2) 式可得:

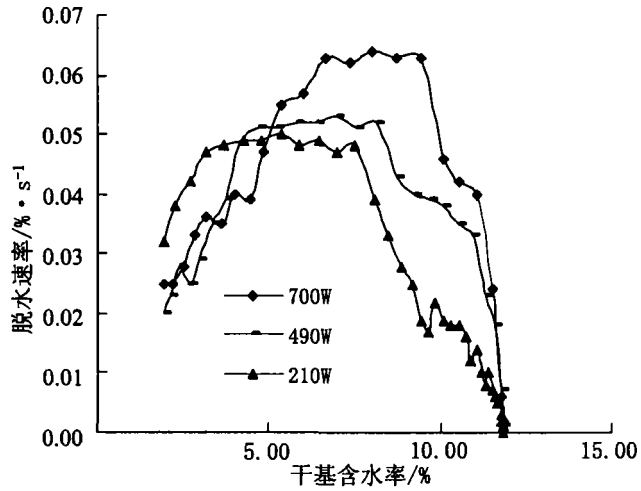


图3 干燥速率曲线  
Fig.3 Drring rate curve

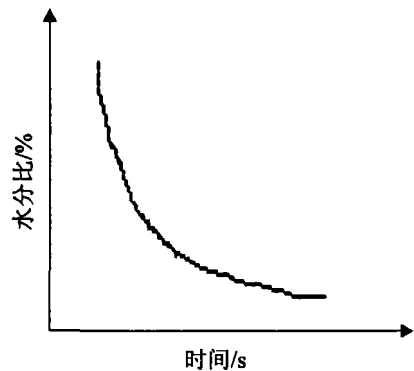


图4 传统  $MR-t$  曲线图  
Fig.4 chart of conventional  $MR-t$  curve

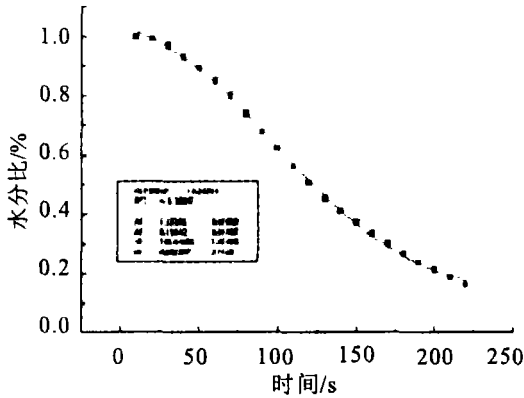


图5 MR-t曲线图 (700W)  
Fig.5 chart of MR-t curve (700W)

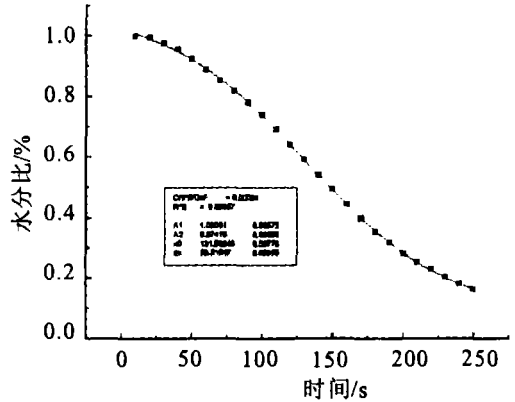


图6 MR-t曲线图 (490W)  
Fig.6 chart of MR-t curve (490W)

$$MR^{(1)} = \frac{dMR}{dt} = \frac{(A_1 - A_2)}{dt} \cdot \frac{\exp(\frac{t-t_0}{dt})}{[1 + \exp(\frac{t-t_0}{dt})]^2} \quad (3)$$

当  $t = t_0$  时,  $MR^{(1)} = \frac{(A_2 - A_1)}{4dt}$ , 那么  $dt = \frac{(A_2 - A_1)}{4MR^{(1)}}$ .

在本试验范围内, 从实际出发, 当  $t > 0$  时,  $A_1$  始终大于  $A_2$ , 根据 (3) 式可得  $MR^{(1)} = \frac{dMR}{dt} < 0$  也就是说随着时间的推移, 物料的含水率在逐渐下降, 这与试验所得结果完全吻合。

从实际意义上来说, (3) 式表示物料的瞬时干燥速率, 对 (3) 式进一步求导, 得:

$$\frac{d^2MR}{dt^2} = - \frac{(A_1 - A_2)}{(dt)^2} \cdot \frac{1 - \exp(\frac{t-t_0}{dt})}{[1 + \exp(\frac{t-t_0}{dt})]^3} \cdot \exp(\frac{t-t_0}{dt}) \quad (4)$$

式子 (4) 表示了物料瞬时干燥速率的变化趋势。当  $\frac{d^2MR}{dt^2} = 0$  时, 计算得拐点有:  $A_1 = A_2; t = t_0$ , 当  $t > 0$  时, 得到一个拐点即  $t = t_0$  当  $0 < t < t_0$  时,  $\frac{d^2MR}{dt^2} < 0$  干燥速率逐渐增加; 当  $t > t_0$  时,  $\frac{d^2MR}{dt^2} > 0$  干燥速率逐渐减少, 这与上述根据试验数据分析出的干燥过程的初始阶段干燥速率呈上升趋势, 干燥后期干燥速率逐渐下降相吻合。当  $t = t_0$  时, 为极大值点, 即干燥速率达到最大的时刻。从实际情况来看, 干燥速率具有最大值并非在一个时刻, 而是一个时间段。

### 3 结论

- 1) 微波干燥闪锌矿是可行的, 原矿水分含量达到造球所要求的水分含量时所花费的时间短;
- 2) 根据干燥速率曲线分析得出, 微波干燥闪锌矿全过程可分为加速、恒速和降速三个阶段;

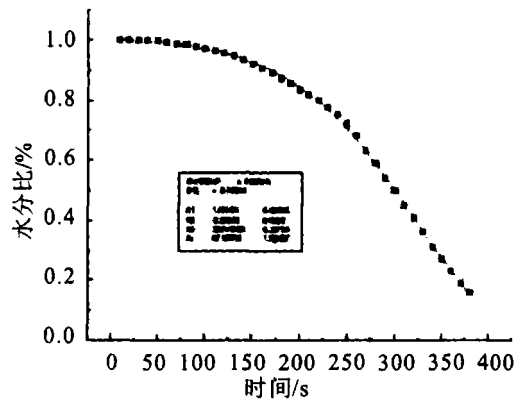


图7 MR-t曲线图 (210W)  
Fig.7 chart of MR-t curve (210W)

3) 在本试验范围内, 通过回归分析, 微波干燥闪锌矿符合 Boltzmann 模型, 根据模型进行理论分析得出, 微波干燥闪锌矿干燥全过程分为加速、恒速和降速三个阶段, 与试验所得到的结果相吻合。

### 参考文献:

- [1] 翟玉春, 刘喜海, 徐家振. 现代冶金学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000 371.
- [2] 夏湘, 陈祖兴. 微波能在工业上的应用前景 [J]. 海南矿冶, 2001, (2): 47.
- [3] 冯士明, 钱茹. 微波加热技术在材料工业中的应用前景 [J]. 热固性树脂, 1999, (4): 118.
- [4] 彭金辉, 杨显万. 微波能技术应用 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1997: 81-113.
- [5] 王金成, 熊力. 微波在环境化学中的应用 [J]. 气象水文海洋仪器, 2001, (2): 44-46.
- [6] 潘永康. 现代干燥技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998 329.
- [7] 郭胜利. 复合肥料的微波干燥研究: [硕士论文] [D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
- [8] 王俊, 许乃章. 热风, 远红外和微波干燥香菇方程研究 [J]. 农业机械学报, 1994, 25(2): 48-52.

(上接第 28 页)

### 3 结论

结合翡翠热处理样品的外观变化和红外光谱、X-ray 衍射分析结果, 可以获得以下一些初步结论:

- 1) 热处理后样品出现红褐色斑点佐证了翡翠绿色的产生有铁离子致色因素;
- 2) 高温可以使注铬样品获得鲜艳的翠绿色, 但热处理温度在 600 °C 以上严重破坏晶体结构和排列, 导致水头损失较大, 透明度明显降低;
- 3) 大多数翡翠的热处理上限温度约为 500 °C, 若要对翡翠进行热处理, 温度最好选择在 500 °C 以下, 升降温速率在 5 °C /min 以下;
- 4) 铬元素注入后的样品热处理在通常氧化条件下的温度不能低于 450 °C, 恒温时间不能低于 24 h

### 参考文献:

- [1] 吴瑞华. 天然宝石的改善及鉴定方案 [M]. 北京: 地质出版社, 1994 157-164.
- [2] 施加辛. 翡翠的概念、分类及 ABC 货鉴定有关问题的讨论 [J]. 云南地质, 1998, 3-4.
- [3] 申科娅. 红外光谱技术在翡翠鉴定中的应用 [J]. 光谱实验室, 2000 17(3): 347-349.
- [4] 袁奎荣, 邓燕华. 优质翡翠与显微构造的成因关系 [J]. 桂林工学院学报, 2001, 21(1): 1-7.

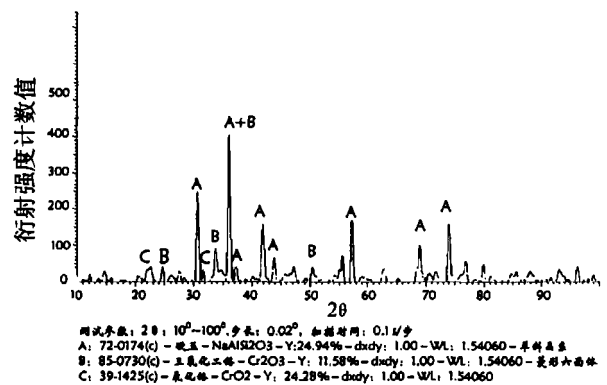


图6 f-7样品X-ray衍射图谱  
Fig.6 f-7 Sample X-ray diffraction figure