

引用格式:张朝波,杨坤,尹为波,等.微波强化中和铅锌冶炼渣干燥机制研究[J].中国有色冶金,2024,53(1):81-87.

ZHANG Chaobo, YANG Kun, YIN Weibo, et al. Study on drying process and mechanism of microwave-enhanced neutralized lead-zinc smelting slag[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(1): 81-87.

# 微波强化中和铅锌冶炼渣干燥机制研究

张朝波<sup>1</sup>, 杨坤<sup>2</sup>, 尹为波<sup>1</sup>, 付光<sup>1</sup>, 张特<sup>1</sup>

(1. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655011;

2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

[摘要] 针对现行铅锌冶炼渣干燥周期长、过程污染大等问题,本文提出微波强化干燥新工艺,在分析原料物性状态的基础上,对中和铅锌冶炼渣高温介电及微波干燥影响因素进行分析,明确了微波强化中和铅锌冶炼渣干燥过程机制。结果表明,中和铅锌冶炼渣中含有结晶水的物相为  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ,自由水含量为 30.2%,结晶水含量为 7.2%,自由水与结晶水的吸波性能相似,且明显优于渣中其他物相;在粒径 8 cm、厚度 2.2 cm、微波功率 700 W、干燥时间 15 min 条件下,微波干燥中和铅锌冶炼渣效果最优,自由水完全去除,结晶水去除率达到 53.06%,总失水率为 34.02%;微波干燥中和铅锌冶炼渣时,会引起中和铅锌冶炼渣的破裂分层,有助于实现快速高效干燥;相较常规干燥,微波干燥 1 kg 中和铅锌冶炼渣节约能耗 16.98% (630 kJ),比常规多脱除 5.40% 的水分,干燥时间缩短 87.5%。本论文所建立中和铅锌冶炼渣干燥技术具有明显优势。

[关键词] 中和铅锌冶炼渣;微波;介电特性;干燥机制;吸波性能;脱水

[中图分类号] TF814 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)01-0081-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.01.010

过去几十年,我国铅锌产业高速发展,在取得阶段性成果的同时,也带来百万吨湿法冶炼渣的处理问题。现行最成熟处理方式是将湿法冶炼渣干燥到一定程度,再进行火法处理<sup>[1]</sup>。其中干燥是目前铅锌冶炼渣处理中能耗最高的环节,同比能耗为发达国家的 4~6 倍,寻求高效低耗干燥技术势在必行<sup>[2]</sup>。

比较典型的铅锌冶炼渣干燥工艺有锅炉烟气余热干燥<sup>[3-6]</sup>、流化床干燥<sup>[7-9]</sup>、太阳能干化<sup>[10]</sup>等,干度可达到 50% 以上,但都面临干燥效率低下、能耗高、处理成本高等问题。微波作为一种清洁能源,相比常规干燥手段有干燥速率快、效率高、干燥均匀、

能源利用率高等特点,是未来最有潜力的一种干燥技术<sup>[11-13]</sup>,但国内外利用微波处理铅锌湿法冶炼渣的研究报道较少<sup>[14]</sup>。

本文以铅锌冶炼湿法渣中产量最大的中和铅锌冶炼渣为干燥对象,通过分析中和铅锌冶炼渣矿物学性质、热重曲线,明确中和铅锌冶炼渣中水分的赋存状态;通过分析中和铅锌冶炼渣高温介电、微波干燥影响因素,明确微波干燥中和铅锌冶炼渣过程机制;同时,与常规干燥进行对比,明确微波干燥的优势。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

本试验原料中和铅锌冶炼渣来自云南某铅锌冶炼企业,采用《散装矿产品取样、制样通则水分测定方法-热干燥法》(GB/T 2007.6-87)检测标准<sup>[15]</sup>,中和铅锌冶炼渣中自由水含量为 30.2%,结晶水含量为 7.2%。

[收稿日期] 2023-08-25

[第一作者] 张朝波(1984—),男,云南昭通人,工程师,主要研究方向为湿法冶金。

[通信作者] 张特(1988—),男,云南宣威人,工程师,主要研究方向为湿法冶金。

[基金项目] 国家重点研发计划课题(2019YFC1904204)资助。

### 1.2 试验设备

试验所用常规干燥设备为烘箱;微波干燥设备为自行研制智能微波加热设备,功率为 0 ~ 1.5 kW,连续可调,主要由微波加热系统、循环水冷却系统和控温系统组成。

### 1.3 检测与分析

研究所用 X 射线衍射分析仪为 X'Pert3 Powder 多功能粉末 X 射线衍射仪;扫描电子显微镜(SEM-EDAX)采用荷兰 Philips 公司的 Nova - Nano - SEM 450 型电子显微镜;热重分析(TG - DSC)采用梅特勒 TGA/DSC/1600LF 同步热分析仪。

物料介电特性采用实验室自制微波高温介电测试系统进行检测,基于谐振腔微扰法,通过测量、分析样品放入微波谐振腔前后的微波输出幅度的变化和共振频率的移动情况,即可测定物料的微波吸波特性。微波高温介电测试系统如图 1 所示,可同时计算获得物料介电常数( $\epsilon$ )、介电损耗( $\epsilon'$ )和损耗角正切( $\tan\theta$ )。

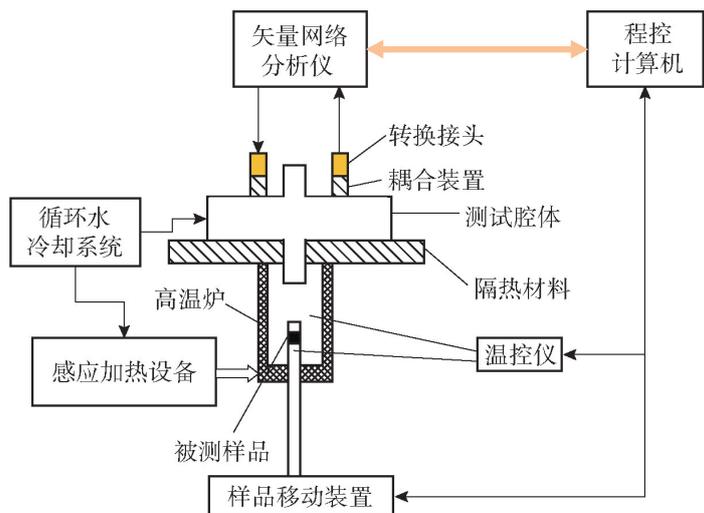


图 1 微波高温介电测试系统

Fig.1 Microwave high temperature dielectric test system

## 2 结果与讨论

### 2.1 原料性质分析

#### 2.1.1 工艺矿物学性质分析

中和铅锌冶炼渣的 XRD 图谱如图 2 所示。从图中可以看出,中和铅锌冶炼渣主要由  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{As}_4\text{O}_{11}$  和  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  组成,其中  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  为主要含结晶水物相。

中和铅锌冶炼渣的红外光谱分析如图 3 所示。

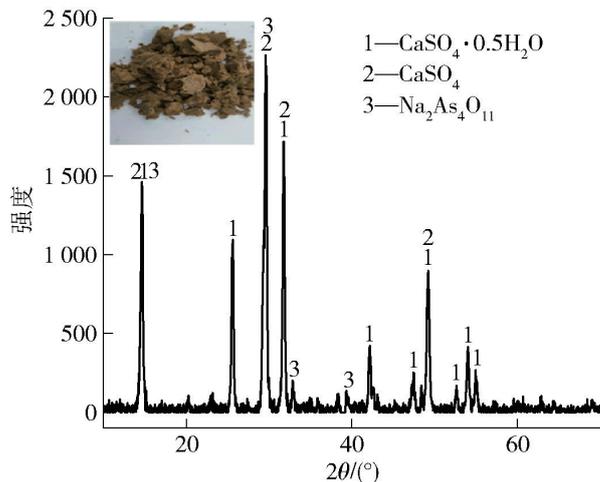


图 2 中和铅锌冶炼渣的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of neutralized lead-zinc smelting slag

从中可以看出,中和铅锌冶炼渣的红外吸收峰主要包括  $3\ 608.68\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 551.63\ \text{cm}^{-1}$ 、 $2\ 131.74\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 620.45\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 156.82\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 438.19\ \text{cm}^{-1}$ 。 $3\ 608.68\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 551.63\ \text{cm}^{-1}$ 2 个吸收峰是由游离—OH 键伸缩引起的<sup>[16]</sup>,证明了自由水的存在。 $2\ 131\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰应为  $\equiv$  键或者累积  $\equiv$  键<sup>[17]</sup>,判断为  $2\text{CaSO}_4$ , 即  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ 。强吸收峰  $1\ 620.45\ \text{cm}^{-1}$  处于—OH 键振动吸收峰范围。波数  $1\ 156.82\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 438.19\ \text{cm}^{-1}$  处于  $\text{SO}_4^{2-}$  吸收峰波数范围。中和铅锌冶炼渣的红外光谱分析结果与 XRD 分析基本一致,证明了  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  的存在。

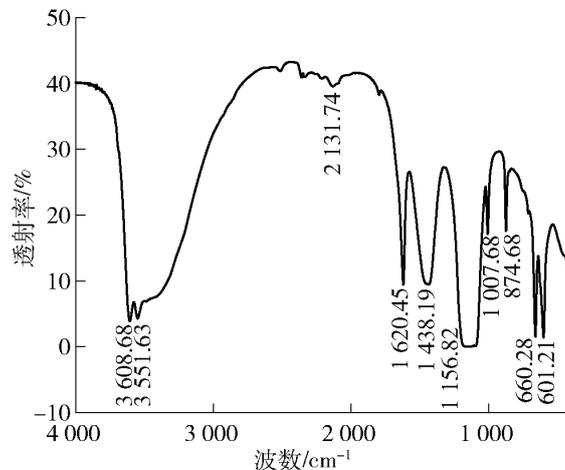


图 3 中和铅锌冶炼渣红外光谱图

Fig.3 Infrared spectrum of neutralized lead-zinc smelting slag

中和铅锌冶炼渣的 SEM-EDAX 图像如图 4 所示。可以看出,中和铅锌冶炼渣呈现碎屑堆叠状,堆

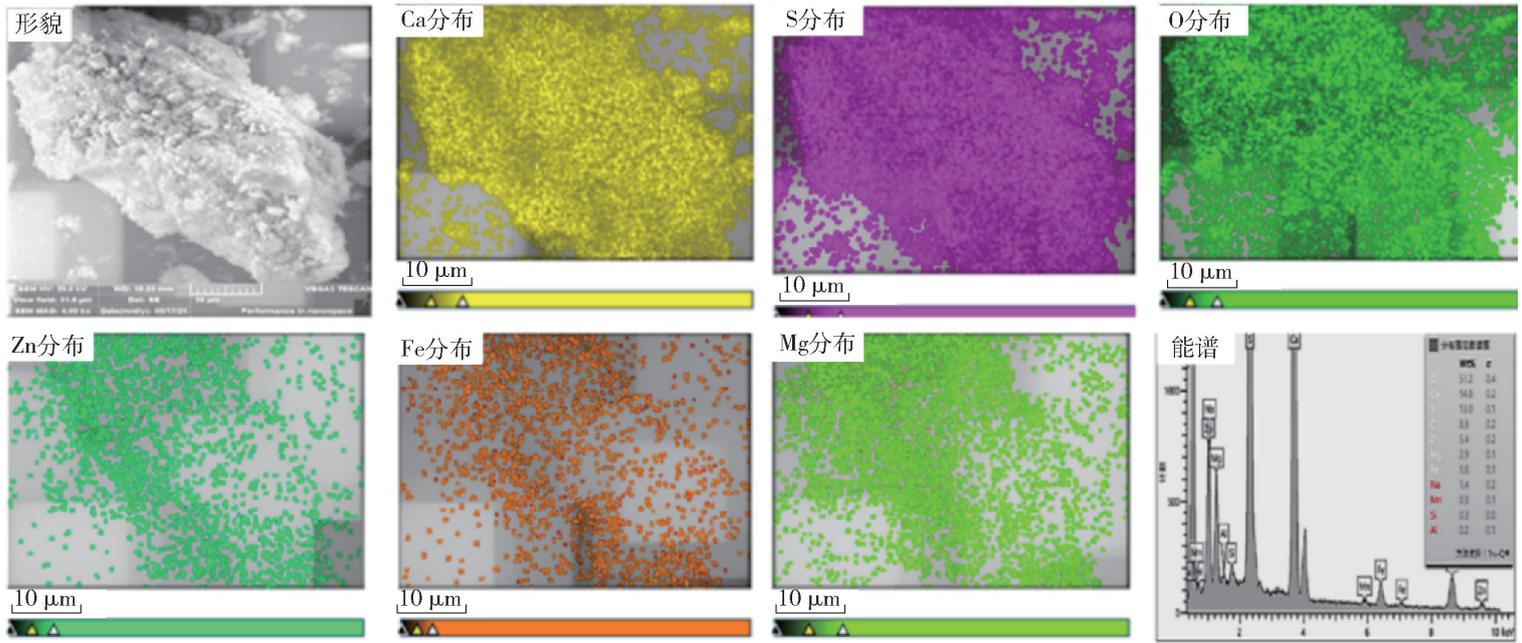


图4 中和铅锌冶炼渣的SEM-EDAX分析

Fig. 4 SEM-EDAX analysis of neutralized lead-zinc smelting slag

叠状渣形成时容易形成水的包裹,使得传统干燥困难。面扫中O、Ca、S分布一致,即证明了XRD谱中硫酸钙的存在,同时中和铅锌冶炼渣中还存在少量Zn、Mg、Fe等有价元素,与硫酸钙共同存在,当干燥中和铅锌冶炼渣水分时,也会同时加热其他元素,造成干燥能耗增加。依据中和铅锌冶炼渣EDAX谱,O元素含量是S元素含量的393.85倍,即证明了XRD中结晶水和 $\text{Na}_2\text{As}_4\text{O}_{11}$ 的存在。

### 2.1.2 水分赋存形式分析

对中和铅锌冶炼渣进行热重分析,结果如图5所示。

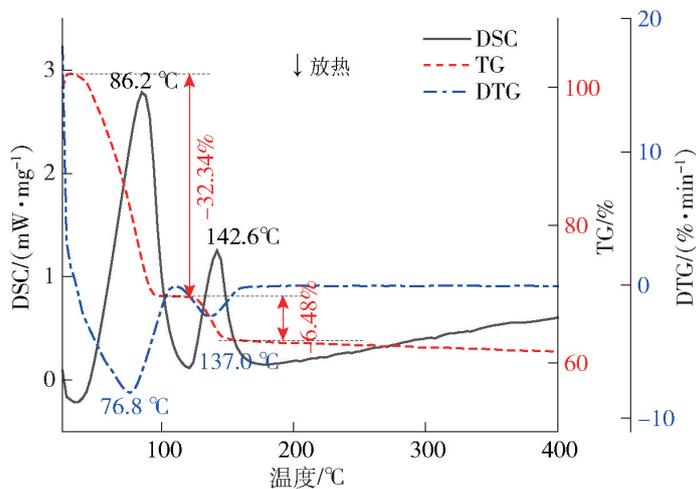


图5 中和铅锌冶炼渣的热重曲线图

Fig. 5 Thermogravimetric curve of neutralized lead-zinc smelting slag

从图5中可以看出,随着温度升高,中和铅锌冶炼渣的TG曲线出现2个较平滑阶段,这2个阶段物料性质基本保持不变,质量相对无明显变化。在25~100℃时,随着温度升高,其质量快速下降,这一过程主要发生的是自由水的蒸发反应。图中DSC曲线(黑色曲线)为吸放热曲线,在高于零的位置表示吸热,低于零的部分表示放热,在86℃左右时出现最大峰值,此时物料吸热,与上述分析的自由水蒸发对应吻合。图中DTG曲线(蓝色曲线)为TG曲线一次微分,其大小表示物料失重速率,在76℃左右出现其最小值,此时中和铅锌冶炼渣失重最快,间接表明在 $76 \pm 6$ ℃中和铅锌冶炼渣自由水脱除速率最快,干燥效率较好。在140℃左右时,第一个平台开始消失,物料质量下降,结合DSC曲线分析可知该过程为一个吸热过程,主要为结晶水的热分解过程。中和铅锌冶炼渣干燥后的残余质量为65.15%,大致可推测自由水与结晶水占总量的40%;从常温加热到第一个平滑台阶出现的过程中,中和铅锌冶炼渣质量减少了32.24%,即自由水含量在32%左右,与原料成分分析结果一致。

### 2.2 中和铅锌冶炼渣高温介电特性

为了明确中和铅锌冶炼渣的微波加热机制,对中和铅锌冶炼渣的高温介电性质进行检测,结果如图6所示。

从图6中可以看出,在20~100℃自由水干燥阶段内,中和铅锌冶炼渣的介电常数由4.95增加到

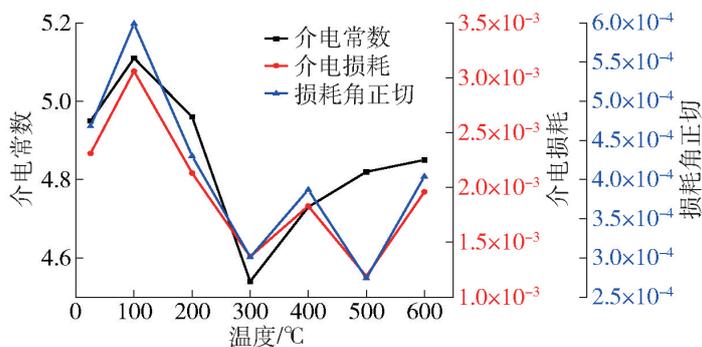


图6 中和铅锌冶炼渣高温介电性质

Fig.6 High temperature dielectric properties of neutralized lead-zinc smelting slag

5.11,均值为5.03,介电损耗和损耗角正切均有所增加;在100~200℃结晶水干燥阶段内,中和铅锌冶炼渣的介电常数由5.11降低到4.96,均值为5.04,介电损耗和损耗角正切呈现下降的趋势;在200~300℃内中和铅锌冶炼渣介电常数由4.96降低为4.54,介电损耗和损耗角正切呈现下降的趋势;在300~600℃内中和铅锌冶炼渣介电常数由4.54升高至4.85,可能为中和渣中的部分物质发生物相转变,生成吸波物质,此阶段内介电损耗和损耗角正切波动变化,主要由物相转变过程中渣体积变化引起的。综合中和铅锌冶炼渣热重分析可知,200℃内中和铅锌冶炼渣介电特性变化不大,即自由水与结晶水的吸波性能相差不大,200℃后中和铅锌冶炼渣介电特性开始逐渐降低,即渣中水分的吸波性能要优于其他组分。因此,微波干燥中和铅锌冶炼渣明显具有优势。

### 2.3 中和铅锌冶炼渣微波加热影响因素

#### 2.3.1 中和铅锌冶炼渣粒径对微波干燥的影响

固定渣厚度3cm、微波加热功率900W条件下,考察中和铅锌冶炼渣粒径对微波干燥的影响结果如图7所示。

从图7中可知,当渣厚度为3cm、微波功率为900W时,不同粒径中和铅锌冶炼渣随着微波时间延长失水率逐渐增加;在前5min,中和渣分子吸附强自由水和结晶水大量干燥,失水速率最快;5~8min时,中和渣分子吸附强的自由水和结晶水逐渐干燥,失水速率开始变缓;8min后,自由水和结晶水已基本干燥完成,失水速率进一步变缓。

随着粒径增加,失水速率整体呈现逐渐下降的趋势,由于单位时间内微波能干燥水量为固定值,8cm时中和铅锌冶炼渣干燥效果最佳,即在8cm粒

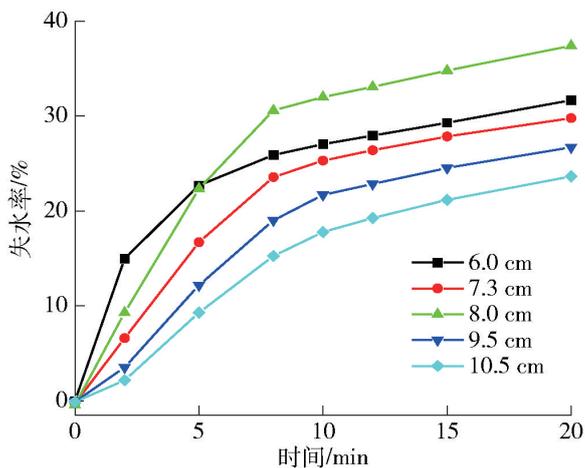


图7 不同粒径下中和铅锌冶炼渣失水率曲线

Fig.7 Water loss curve of neutralized lead-zinc smelting under different particle sizes

径下,微波场中中和铅锌冶炼渣有效干燥粒径最优。

#### 2.3.2 中和铅锌冶炼渣厚度对微波干燥的影响

固定微波加热功率900W、粒径8cm条件下,考察中和铅锌冶炼渣厚度对微波干燥的影响,结果如图8所示。

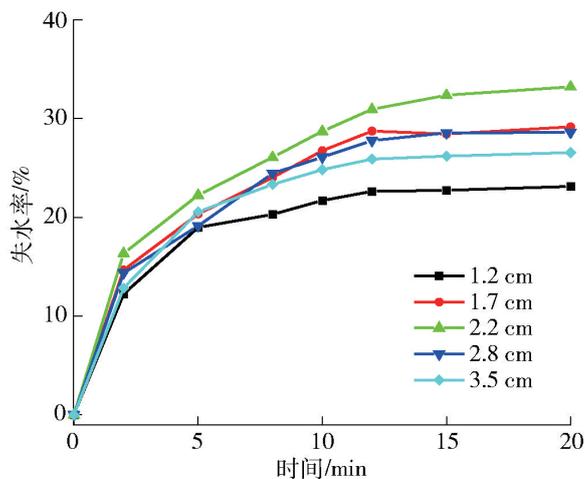


图8 不同厚度下中和铅锌冶炼渣失水率曲线

Fig.8 Water loss curve of neutralized lead-zinc smelting under different thickness

从图8中可以看出,不同厚度下中和铅锌冶炼渣的失水率随着微波解热时间的增加而逐渐增加。在前2min,失水率增加较快;2~5min,失水速率逐渐变缓;5min后失水速率进一步变缓。

当厚度小于2.2cm时,随着厚度增加,中和铅锌冶炼渣失水率出现逐渐增加的趋势,在一定频率微波场中如果料层过薄,处于微波场区域的有效体积小,影响物料失水率;厚度大于2.2cm时,随着厚度增加,中和铅锌冶炼渣失水率出现逐渐降低的趋势,主要是渣层过厚,微波无法穿透料层,影响中和

铅锌冶炼渣干燥效果。因此,干燥厚度以 2.2 cm 为宜。

### 2.3.3 微波功率的影响

在粒径 8 cm、厚度 2.2 cm 条件下,考察不同微波功率对中和铅锌冶炼渣微波失水率的影响,结果如图 9 所示。

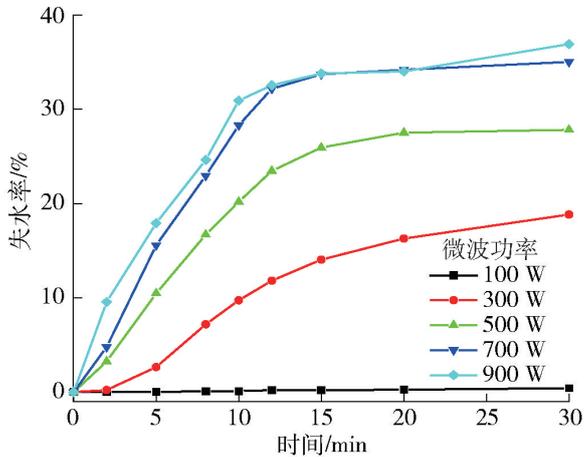


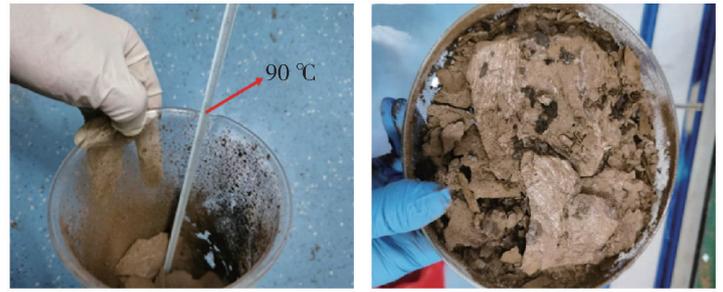
图 9 不同微波功率下中和铅锌冶炼渣失水率曲线

Fig. 9 Water loss curve of neutralized lead-zinc smelting under different microwave power

从图 9 中可知,100 W 的微波功率对于中和铅锌冶炼渣干燥基本没用;在 300 ~ 900 W 范围内,随着微波功率的增加,中和铅锌冶炼渣失水率逐渐增加,尤其在 700 W 和 900 W 微波下,中和铅锌冶炼渣失水率可以达到 35% 以上。不同微波功率下,中和铅锌冶炼渣的失水率随着时间增加会出现先增加较快而后变缓的趋势,0 ~ 15 min 的失水率增长明显要高于 15 ~ 30 min 的失水率增长;15 min 时,300 W、500 W、700 W、900 W 微波加热条件下,中和铅锌冶炼渣失水率分别为 16.29%、27.52%、34.18%、34.02%,因此在粒径为 8 cm、中和铅锌冶炼渣厚度为 2.2 cm 条件下,以 700 W 干燥 15 min 为宜,失水率达到 34.02%。

此时,中和铅锌冶炼渣中的自由水完全去除,结晶水去除率达到 53.06%,这主要是结晶水与渣中其他组分共生,部分吸收的微波以热能形式传导,使得结晶水的去除难度高于自由水。微波干燥中和铅锌冶炼渣温度为 90 °C (图 10(a)),证明微波干燥过程优先与水分作用,从而降低干燥能耗。中和铅锌冶炼渣微波干燥状态如图 10(b) 所示,可以看出微波干燥时中和铅锌冶炼渣出现破裂分层,分层后加热面积大幅度增加,且内部水的脱除路径大幅缩短,

有利于水的快速高效脱除。



(a) 微波干燥中和铅锌冶炼渣温度 (b) 中和铅锌冶炼渣微波干燥状态

图 10 微波干燥中和铅锌冶炼渣实物图

Fig. 10 Microwave drying neutralized lead-zinc smelting

### 2.3.4 常规干燥与微波干燥对比

在 90 °C 下进行常规干燥,中和铅锌冶炼渣的失水率如图 11 所示,可以看出随着时间的增加,常规失水速率出现逐渐变缓的趋势,120 min 时,中和铅锌冶炼渣的失水率仅能达到 28.62%,仅为自由水的去除,干燥时间是微波干燥的 8 倍以上。常规干燥中和铅锌冶炼渣呈现紧实压缩状,即常规干燥主要依靠热传导由表及里进行,表层温度高,表层微孔的收缩阻碍热传导的进行,降低干燥速率。

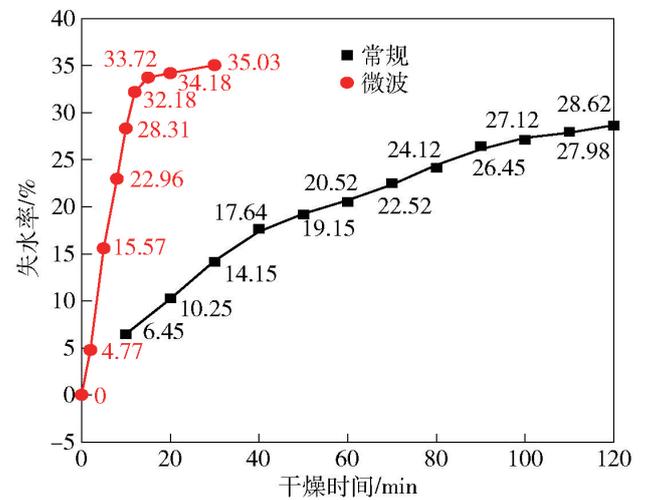


图 11 常规和微波干燥中和铅锌冶炼渣失水率曲线

Fig. 11 The water loss curve and drying state of conventional drying neutralized lead-zinc smelting slag

常规干燥能耗主要由水的加热能耗、硫酸钙的加热能耗和水分汽化潜热组成,如式(1)所示;微波干燥主要由电耗组成,如式(2)所示。

$$Q_{\text{常规}} = C_{\text{水}} \times (T_{\text{终}} - T_{\text{始}}) \times m_{\text{水}} + C_{\text{CaSO}_4} \times (T_{\text{终}} - T_{\text{始}}) \times m_{\text{CaSO}_4} + r_{\text{水}} \times m_{\text{水汽}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{微波}} = W_{\text{微波}} \times t_{\text{微波}} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{常规}}$ 为常规干燥能耗,kJ; $C_{\text{水}}$ 为水的比热容,4.2 kJ/(kg·°C); $T_{\text{终}}$ 为干燥终温,90 °C; $T_{\text{始}}$ 为干燥始温,25 °C; $m_{\text{水}}$ 为干燥水的质量,kg; $C_{\text{CaSO}_4}$ 为CaSO<sub>4</sub>的比热容,0.261 8 kJ/(kg·°C); $m_{\text{CaSO}_4}$ 为CaSO<sub>4</sub>的质量,kg; $r_{\text{水}}$ 为水的汽化潜热,2 257.6 kJ/kg; $m_{\text{水汽}}$ 为水蒸气的质量,kg; $Q_{\text{微波}}$ 为微波干燥能耗,kW·h; $W_{\text{微波}}$ 为微波干燥功率,kW; $t_{\text{微波}}$ 为微波干燥时间,h。

根据式(1)和(2)计算,常规干燥1 kg中和铅锌冶炼渣能耗为758.88 kJ,微波干燥1 kg中和铅锌冶炼渣能耗为630 kJ,即微波干燥比常规干燥节约能耗16.98%,且低能耗下微波比常规多脱除5.40%的水分,干燥时间缩短87.5%。

### 3 结论

本研究在对中和铅锌冶炼渣物相分析的基础上,利用热重分析和热干燥分析,明确了中和铅锌冶炼渣中自由水与结晶水分布,并进行了微波干燥与常规干燥试验,得到以下主要结论。

1) 中和铅锌冶炼渣中含有结晶水相CaSO<sub>4</sub>·0.5H<sub>2</sub>O,自由水含量为30.2%,结晶水含量为7.2%。通过分析中和铅锌冶炼渣的高温介电特性及微波加热影响因素,明确了微波强化中和铅锌冶炼渣干燥机制,中和铅锌冶炼渣中自由水与结晶水的吸波性能相似,且明显优于渣中其他物相。

2) 在粒径8 cm、厚度2.2 cm、微波功率700 W、干燥时间15 min条件下,中和铅锌冶炼渣自由水完全去除,结晶水去除率达到53.06%,总失水率为34.02%。微波干燥条件下,中和铅锌冶炼渣出现破裂分层现象,能有效缩短水的干燥途径,实现水的快速高效干燥。

3) 微波干燥1 kg中和铅锌冶炼渣能耗为630 kJ,比常规干燥节约能耗16.98%,且低能耗下微波干燥比常规干燥多脱除5.40%的水分,干燥时间缩短87.5%。

本文所建立中和铅锌冶炼渣干燥技术能有效缩短干燥周期,降低能耗,具有明显产业化优势。

#### [参考文献]

[1] “十四五”中国节能环保产业发展趋势[J]. 能源与节能, 2021(3):1.

The development trend of China's energy conservation and environmental protection industry during the 14th Five-Year Plan

[J]. Energy and Conservation, 2021(3):1.

- [2] 张梅, 罗永光. 锌浸出渣的微波干燥与常规干燥对比实验研究[J]. 企业技术开发, 2010(13): 91-92.  
ZHANG Mei, LUO Yongguang. Experimental comparative study of microwave irradiation and conventional drying of zinc leached residues [J]. Technological Development of Enterprise, 2010(13): 91-92.
- [3] RAO Zhonghao, ZHAO Yuemin, HUANG Congliang, et al. Recent developments in drying and dewatering for low rank coals [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015(46): 1-11.
- [4] HU Shangjian, MAN Chengbo, GAO Xuezhong, et al. Energy analysis of low-rank coal pre-drying power generation systems[J]. Drying Technology, 2013(31): 1194-1205.
- [5] GUO Xiaoke, LIU Ming, LAI Fen, et al. Theoretical study and case analysis of a predried lignite-fired power plant with the waste heat recovery system[J]. Drying Technology, 2012(30): 425-434.
- [6] LIU Ming, YAN Junjie, BAI Bofeng, et al. Theoretical study and case analysis for a predried lignite-fired power system[J]. Drying Technology, 2011(29): 1219-1229.
- [7] CHEN Z, AGARWAL P K, AGNEW J B. Steam drying of coal. Part 2. Modeling the operation of a fluidized bed drying unit[J]. Fuel, 2001(80): 209-223.
- [8] HOEHNE Olaf, LECHNER Stefan, SCHREIBER Matthias, et al. Drying of lignite in a pressurized steam fluidized bed—theory and experiments[J]. Drying Technology, 2009(28): 5-19.
- [9] KIM Hyun-Seok, MATSUSHITA Yohsuke, OOMORI Motohira, et al. Fluidized bed drying of Loy Yang brown coal with variation of temperature, relative humidity, fluidization velocity and formulation of its drying rate[J]. Fuel, 2013(105): 415-424.
- [10] LUO Luolin, LIU Jianzhong, CHENG Jing, et al. Experimental Study on solar drying of lignite [C] // 2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE, 2010(1): 714-718.
- [11] 周国莉. 基于不同能量作用形式的胜利褐煤失水机理及过程动力学研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
ZHOU Guoli. Study on the dehydration mechanism and dynamics of sheng li lignite dried by different energy forms[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [12] ARASH Tahmasebi, YU Jianglong, LI Xianchun, et al. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals [J]. Fuel Processing Technology, 2011(92): 1821-1829.
- [13] 徐志强, 辛凡文, 涂亚楠. 褐煤微波脱水过程中水分的迁移规律和界面改性研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 147-153.  
XU Zhiqiang, XIN Fanwen, TU Yanan. Moisture migration and interfacial modification of lignite in microwave dehydration process [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1):

- 147 - 153.
- [14] 李健, 张利波, 彭金辉, 等. 响应曲面优化微波干燥铅渣的工艺研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(12): 5 - 7, 12.  
LI Jian, ZHANG Libo, PENG Jinhui, et al. Optimization of microwave drying of lead slag with response surface methodology [J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2012(12): 5 - 7, 12.
- [15] 蒋晓光, 宋承钢, 褚宁, 等. 热干燥法测定红土镍矿交货批水分含量[J]. 检验检疫学刊, 2013, (5): 10 - 14.  
JIANG Xiaoguang, SONG Chenggang, ZHE Ning, et al. Determination of moisture content of a lot of laterite nickel ores by heat drying method [J]. Journal of Inspection and Quarantine, 2013 (5): 10 - 14.
- [16] 郭文珪, 梁娟, 应慕良, 等. 甲醇在 HSW 与 PHZSM-5 上转化为低碳烯烃的红外光谱研究 [J]. 燃料化学学报, 1988, 3(16): 220 - 227.  
GUO Wengui, LIANG Juan, YING Muliang, et al. IR study of methanol conversion to low olefins on HSW and PHZSM - 5 zeolites [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1988, 3(16): 220 - 227.
- [17] CAUGHEY W S, DONG A, SAMPATH V, et al. Probing heart cytochrome c oxidase structure and function by infrared spectroscopy [J]. Journal of Bioenergetics and Biomembranes, 1993(25): 81 - 91.

## Study on drying mechanism of microwave-enhanced neutralized lead-zinc smelting slag

ZHANG Chaobo<sup>1</sup>, YANG Kun<sup>2</sup>, YIN Weibo<sup>1</sup>, FU Guang<sup>1</sup>, ZHANG Te<sup>1</sup>

(1. Yunnan Chihong Zn&Ge Co., Ltd, Qujing 655011, China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of long drying cycle and large process pollution of the current lead-zinc smelting slag, this paper proposes a new technology of microwave enhanced drying. On the basis of analyzing the physical properties of the raw materials, the high temperature dielectric and microwave drying factors of the neutralized lead-zinc smelting slag were analyzed, and the drying process mechanism of the microwave-enhanced neutralized lead-zinc smelting slag was clarified. The results show that the phase containing crystal water in the neutralized slag is  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ , the content of free water is 30.2%, and the content of crystal water is 7.2%. The wave-absorbing properties of free water and crystal water are similar, and obviously superior to other phases in slag. Under the conditions of particle size 8 cm, thickness 2.2 cm, microwave power 700 W, and drying time 15 min, microwave drying has the best effect of neutralized lead-zinc smelting slag, free water is completely removed, the removal rate of crystal water reaches 53.06%, and the total water loss rate is 34.02%. When the neutralized lead-zinc smelting slag is dried by microwave, it will cause cracking and stratification of the neutralized slag, which helps to achieve fast and efficient drying. Compared with conventional drying, microwave drying 1 kg neutralized lead-zinc smelting slag saves energy by 16.98% (630 kJ), removes 5.40% more water than conventional drying, and shortens drying time by 87.5%. The drying technology of neutralizing lead-zinc smelting slag established in this paper has obvious advantages.

**Key words:** neutralized lead-zinc smelting slag; microwave; dielectric properties; drying mechanism; wave absorbing property; water removal