

# 电路板焚烧熔炼渣煅烧改性制备氧载体及其吸释氧性能研究<sup>①</sup>

陈怡珊<sup>1,2,3</sup>, 左宗良<sup>3</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 董玉亮<sup>4</sup>, 罗思义<sup>3</sup>, 邹资生<sup>4</sup>

(1.中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2.中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031; 3.青岛理工大学, 山东 青岛 266520; 4.山东贝特环保科技有限公司, 山东 潍坊 262200)

**摘要:** 将掺杂不同比例铜精矿的电路板焚烧熔炼渣进行高温煅烧改性制备氧载体, 考察不同铜精矿掺杂比例和煅烧温度对氧载体物相组成、外观形貌的影响, 并对制备的氧载体进行吸释氧性能研究。结果表明: 氧载体的主要物相为  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ , 提高铜精矿的掺杂比例和煅烧温度有利于氧载体  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  的生成; 制备的氧载体具有优异的晶格氧转移能力, 在空气氛围中, 氧载体由于吸氧质量增加约 3%; 在氮气氛围中, 氧载体由于释氧质量减少约 4%。

**关键词:** 电路板; 焚烧熔炼渣; 化学链燃烧; 氧载体; 铜精矿; 煅烧改性; 吸氧; 释氧

中图分类号: TF803.1; TF811

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.021

文章编号: 0253-6099(2025)02-0118-05

## Preparation of Oxygen Carriers by Calcination Modification of Circuit Board Incineration Slag and Their Oxygen Absorption and Desorption Performance

CHEN Yishan<sup>1,2,3</sup>, ZUO Zongliang<sup>3</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, DONG Yuliang<sup>4</sup>, LUO Siyi<sup>3</sup>, ZOU Zisheng<sup>4</sup>

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China; 3. Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 4. Shandong Bethel Environmental Protection Technology Co., Ltd., Weifang 262200, Shandong, China)

**Abstract:** The incineration slag of circuit board was doped with different proportions of copper concentrate, and then calcined at a high temperature to prepare oxygen carrier. The effects of doping amount of copper concentrate and calcination temperatures on the phase composition and morphology, as well as the oxygen absorption and desorption performance of the prepared oxygen carrier were all explored. The results indicate that  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  is the main phase of the oxygen carrier, the formation of which can be improved by increasing the doping amount of copper concentrate and calcination temperature; the prepared oxygen carrier exhibits excellent lattice oxygen transfer capability; the mass weight of oxygen carrier in an air atmosphere increases by about 3% due to oxygen absorption, while the mass weight in a nitrogen atmosphere decreases by about 4% due to oxygen desorption.

**Key words:** circuit board; incineration slag; chemical chain combustion; oxygen carrier; copper concentrate; modification by calcination; oxygen adsorption; oxygen desorption

2024年3月,第四版《全球电子垃圾监测》指出: 2022年全球电子垃圾的产生量比2010年增长了82%,达到创纪录的6200万吨,其中仅有不到1/4的电子垃圾被回收利用<sup>[1]</sup>。电子垃圾是重要的铜、锡、

金、银等有价金属回收原料<sup>[2]</sup>。废旧电路板作为电子垃圾的重要组成部分,金属质量分数占到30%以上<sup>[3]</sup>,这些电子垃圾具有很高的回收价值,是名副其实的“城市矿山”<sup>[4]</sup>。目前,废旧电路板回收处理方法

① 收稿日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52104397)

作者简介: 陈怡珊(2001—),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事铜渣能源与资源化利用研究工作。E-mail: cheniyshan0412@163.com

通信作者: 左宗良(1990—),男,山东潍坊人,副教授,主要从事冶金渣余热回收及资源化利用、生物质清洁转换及利用。E-mail: zuozongliangneu@163.com

主要包括机械处理、湿法冶金、热解技术、火法冶金等<sup>[5]</sup>,采用火法冶金极为经济,但是火法冶金处理废旧电路板会产生大量的电路板焚烧熔炼渣。

化学链燃烧技术在1983年首次被提出,这种燃烧技术能以低能耗实现100%的二氧化碳捕获效率<sup>[6]</sup>。氧载体是化学链燃烧技术的关键材料,低成本的硅酸盐类材料(如铜冶炼厂产生的固体副产品铜渣)是一种极具潜力的氧载体候选材料,对降低生产成本具有重要作用<sup>[7]</sup>。

基于此,本文以废旧电路板焚烧熔炼渣为前驱体,掺杂铜精矿后高温煅烧改性制备氧载体,并对氧载体进行表征分析和吸释氧性能研究。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验所用废旧电路板焚烧熔炼渣来自国内某富氧侧吹炉热处理的电路板焚烧熔炼渣。采用X射线荧光光谱仪(XRF)分析熔炼渣中主要元素的氧化态化学组成,结果如表1所示,其中,默认铁的氧化物为最高价态<sup>[8]</sup>。熔炼渣X射线衍射(XRD)检测结果如图1所示,熔炼渣中含铁物相主要为钙铁辉石( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ )和磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。钙铁辉石( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ )是一种具有双链结构的硅酸盐矿物,属于单斜晶系,为辉石的一种<sup>[9]</sup>。

表1 熔炼渣 XRF 分析结果(质量分数)

Table 1 XRF analysis results of smelting slag %

$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	CuO
30.56	27.06	20.93	11.84	2.28	2.02

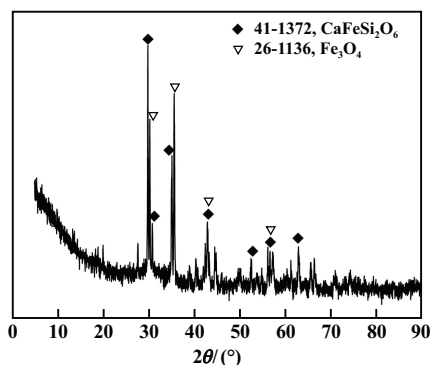


图1 熔炼渣 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of smelting slag

实验所用铜精矿为深灰色粉末状固体,主要物相为黄铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )和辉石( $\text{Cu}_2\text{S}$ ),其XRF和XRD分

析结果分别如表2和图2所示。

表2 铜精矿 XRF 分析结果(质量分数)

Table 2 XRF analysis results of copper concentrate %

$\text{SO}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	CuO	MgO	CaO
33.10	20.02	15.99	14.98	6.94	5.64

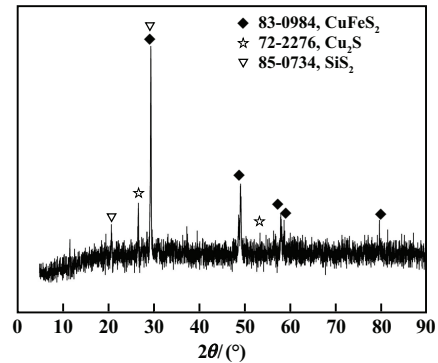


图2 铜精矿 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of copper concentrate

### 1.2 实验装置与方法

#### 1.2.1 氧载体制备与表征

采用密封式化验制样粉碎机(GJ-2DB)将熔炼渣(CS)和铜精矿(CC)破碎至粒径 $74\ \mu\text{m}$ 以内;将熔炼渣和铜精矿置于干燥箱中恒温 $105\ \text{°C}$ 干燥48 h;按照 $m(\text{CC}):m(\text{CS})$ 为1:9、2:8、3:7、4:6、5:5称取干燥后的铜精矿和熔炼渣;将两者充分搅拌均匀后置于马弗炉中煅烧,炉内煅烧气氛为空气气氛;设置马弗炉升温速率为 $10\ \text{°C}/\text{min}$ ,设置目标温度为 $800$ 、 $900$ 、 $1\ 000\ \text{°C}$ ,升温至目标温度后保温60 min;在常温下自然冷却后选取部分颗粒作为氧载体;利用X射线单晶衍射仪对氧载体进行物相分析,并考察不同铜精矿掺杂比例、煅烧温度对氧载体物相组成的影响;利用扫描电镜观察氧载体的表观形貌。

#### 1.2.2 氧载体吸释氧性能研究

利用热重分析仪对氧载体进行程序升温吸释氧热重实验和恒温吸释氧热重实验,热重实验工况如表3所示,吸氧实验在空气氛围下进行,释氧实验在氮气氛围下进行,恒温实验均保温30 min。程序升温吸释氧热重实验结果为下一步恒温吸释氧热重实验选取适宜的恒温温度。在恒温吸氧实验中,为保证氧载体在释氧前被充分氧化,需在升温前将气体氛围设置为空气。同理,在恒温释氧实验中,为保证氧载体被充分还原,需在升温阶段将气体氛围设置为氮气。升温速率为

20 °C/min, 气体流量为 20 mL/min。

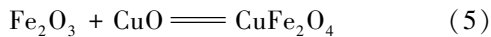
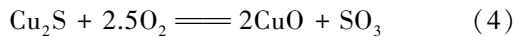
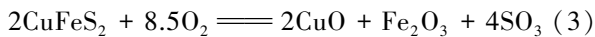
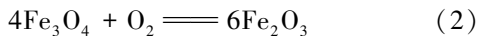
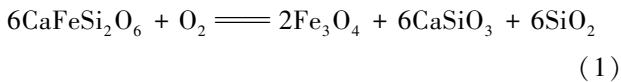
表3 热重实验工况

Table 3 Thermogravimetric test conditions

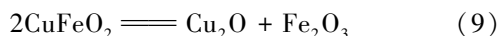
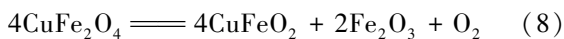
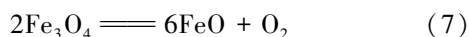
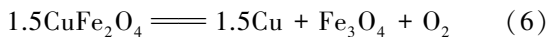
实验名称	$m(\text{CC}) : m(\text{CS})$	温度/°C
程序升温吸氧	3:7	0~1 000
程序升温释氧	3:7	0~1 000
恒温吸氧(空气)	1:9	900
	3:7	900
	5:5	900
	0:10	900
	3:7	800
恒温释氧(氮气)	3:7	1 000
	1:9	900
	3:7	900
	5:5	900
	0:10	900
	3:7	800
	3:7	1 000

### 1.3 实验原理

由上述对实验原料的表征分析可知, 熔炼渣主要含铁物相为钙铁辉石( $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ )和磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); 铜精矿主要物相为黄铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )和辉石( $\text{Cu}_2\text{S}$ )。高温煅烧过程中发生的化学反应如式(1)~(5)所示, 铁元素最后被氧化为 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 铜元素被氧化为 $\text{CuO}$ 。 $\text{CuO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 反应生成氧载体铁酸铜( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ )。 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 在化学元素组成上可认为是 $\text{CuO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 两种氧化物的共混物<sup>[10]</sup>。



具有尖晶石结构的铁酸铜( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ )可以在高温、惰性气氛下热解释氧而形成保持尖晶石结构的氧缺位体<sup>[11]</sup>。目前已证明 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 可作为氧载体的重要成分<sup>[12-13]</sup>。氧载体 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 的主要释氧路径见式(6)~(7); 温度较高时, $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 也可以直接分解为 $\text{CuFeO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{O}_2$ , 然后 $\text{CuFeO}_2$ 进一步部分分解为 $\text{Cu}_2\text{O}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 如式(8)~(9)所示<sup>[14]</sup>。



## 2 实验结果与讨论

### 2.1 氧载体制备实验结果分析

图3为煅烧温度900 °C时不同铜精矿掺杂比例下氧载体的XRD衍射图谱。由于微量元素杂峰变化不明显, 本文不做进一步考察。由图3可知, 不同铜精矿掺杂比例下制备的氧载体具有相似的XRD图谱, 各图谱上特征峰峰形尖锐, 峰强度大。掺杂比例对氧载体的物相组成几乎不产生影响。随着铜精矿掺杂比例增加, 熔炼渣中 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 的衍射峰逐渐减弱, 发生反应(1);  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的衍射峰逐渐减弱直至消失, 发生反应(2);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的衍射峰强度基本不变,  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 衍射峰逐渐增强, 说明发生反应(3)~(5)。

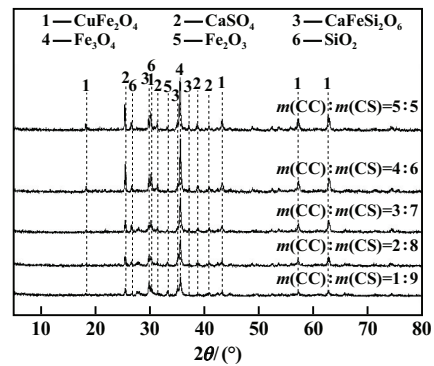


图3 不同铜精矿掺杂比例下氧载体的XRD图谱

Fig.3 XRD pattern of oxygen carriers with different copper concentrate doping ratios

图4为铜精矿掺杂比例为 $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 5 : 5$ 时不同煅烧温度下氧载体的XRD衍射图谱。如图4所示, 煅烧温度对氧载体的物相组成几乎不产生影响。随着煅烧温度升高,  $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的衍射峰逐渐减弱,  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 的衍射峰强度逐渐增强, 说明煅烧温度越高, 越有利于 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 的生成。

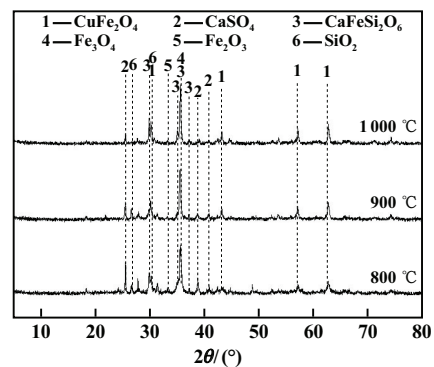
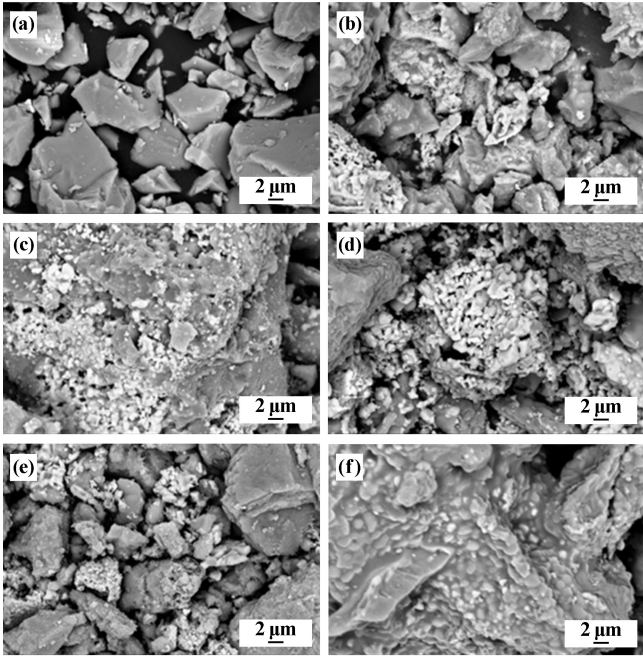


图4 不同煅烧温度下氧载体的XRD图谱

Fig.4 XRD pattern of oxygen carriers at different calcination temperatures

### 2.2 氧载体表现形貌分析

熔炼渣及不同铜精矿掺杂比例和煅烧温度条件下制备的氧载体表现形貌如图 5 所示。从图 5 可以看出,制备的氧载体表面呈疏松多孔状,有利于气体的吸附。随着铜精矿掺杂比例增加,氧载体表面孔增多;煅烧温度 1 000 ℃ 时,制备的氧载体会发生烧结。因此,高温煅烧改性温度应在 1 000 ℃ 以下。



(a) 熔炼渣; (b) 900 ℃,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 1 : 9$ , 氧载体;  
 (c) 900 ℃,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 3 : 7$ , 氧载体;  
 (d) 900 ℃,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 5 : 5$ , 氧载体;  
 (e) 800 ℃,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 3 : 7$ , 氧载体;  
 (f) 1 000 ℃,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 3 : 7$ , 氧载体

图 5 熔炼渣及氧载体表现形貌

Fig.5 Apparent morphology of smelting slag and oxygen carriers

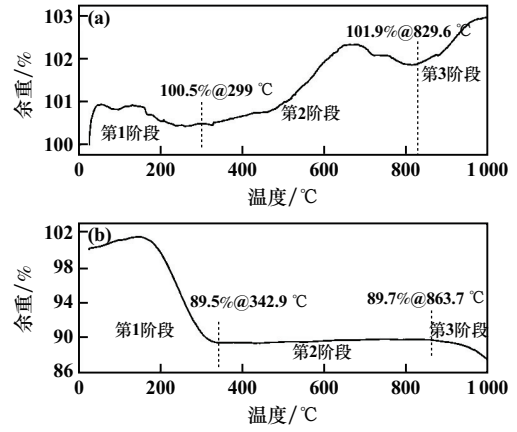
### 2.3 氧载体吸释氧性能研究

#### 2.3.1 程序升温吸释氧热重实验

氧载体程序升温吸释氧热重曲线如图 6 所示。由图 6(a) 可见,程序升温吸氧热重曲线整体上呈现 3 个阶段:在第 1 阶段,制备的氧载体呈多孔状,所以会先吸附气体,随着温度升高,发生脱附;在相同吸氧量条件下, CuO 的升重速率明显高于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [10], 第 2 阶段的升重是 Cu 和  $\text{Cu}^+$  向  $\text{Cu}^{2+}$  转化产生吸氧现象造成;第 3 阶段的升重是  $\text{Fe}^{2+}$  向  $\text{Fe}^{3+}$  转化时产生吸氧现象造成。当热重分析仪升温至 900 ℃ 时,氧载体的吸氧速率明显最大,因此,恒温吸氧热重实验的温度确定为 900 ℃。

由图 6(b) 可见,氧载体的程序升温释氧热重曲线分为 3 个阶段:第 1 阶段的峰值发生在 150 ℃ 左右,达到峰值后迅速下降,是因为热重实验前未对样品进行

干燥,在温度升高过程中水分蒸发,并且随着温度升高,氧载体表面附着的气体脱附;第 2 阶段样品质量基本不发生变化;在第 3 阶段,温度约为 900 ℃ 时,样品开始由于释氧失重。随着温度升高,释氧速率增加,是因为  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  在温度较高的情况下有两条释氧路径,如式(6)~(9)所示。因此,恒温释氧热重实验的温度确定为 1 000 ℃。



(a) 吸氧热重曲线; (b) 释氧热重曲线

图 6 氧载体程序升温吸释氧热重曲线

Fig.6 Thermogravimetric curves of oxygen carriers in oxygen absorption and release by programmed heating

#### 2.3.2 恒温吸氧热重实验

氧载体的恒温吸氧热重曲线如图 7 所示。热重曲线分为 2 个阶段:在 0~10 min 内氧载体被充分氧化,质量发生明显增加;在 10~30 min,氧载体质量基本不变。当  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 3 : 7$  时,随着煅烧温度升高,氧载体吸氧量增加,煅烧温度 1 000 ℃ 时氧载体吸氧量最大,约 2.75%;煅烧温度 800 ℃ 时氧载体吸氧量最小,约 1.05%。在相同煅烧温度(900 ℃)下,  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 3 : 7$  时,氧载体质量增加最小,约 2.45%;  $m(\text{CC}) : m(\text{CS}) = 5 : 5$  时,氧载体质量增加最大,约 3%。

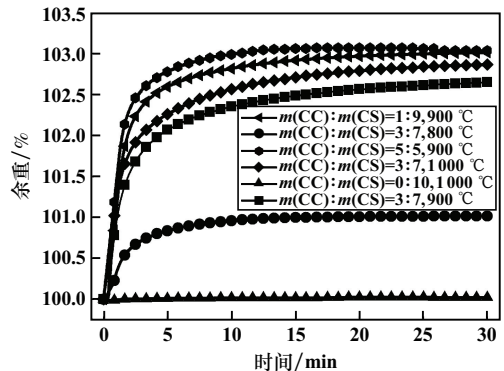


图 7 氧载体恒温吸氧热重曲线

Fig.7 Thermogravimetric curve of oxygen carriers in oxygen absorption at constant temperature

铜精矿掺杂比例与制备的氧载体吸氧性能没有明显的线性关系;未达到烧结温度时,煅烧温度越高,制备的氧载体吸氧性能越好。无铜精矿掺杂时,样品无质量变化,说明熔炼渣没有吸收氧气。因此,通过熔炼渣掺杂铜精矿煅烧改性制备氧载体是可行的。

### 2.3.3 恒温释氧热重实验

氧载体的恒温释氧热重曲线如图8所示。可以看到,在不同煅烧温度和铜精矿掺杂比例下,释氧行为具有一定相似之处,整体释氧过程包括2个部分:动力学控制的快速释氧阶段和扩散控制的释氧阶段。在相同的煅烧温度(900℃)下,随着铜精矿掺杂比例增加,氧载体释氧量也增加。 $m(\text{CC}):m(\text{CS})=5:5$ 时,氧载体释氧量最大,约4.34%; $m(\text{CC}):m(\text{CS})=1:9$ 时,氧载体释氧量最小,约0.80%。当 $m(\text{CC}):m(\text{CS})=3:7$ 时,煅烧温度900℃的氧载体释氧量最大,约2.82%,煅烧温度1000℃的氧载体释氧量最小,约1.51%。这是因为在制备氧载体的过程中,颗粒之间因为烧结作用黏合在一起,大大降低了氧气的析出率。

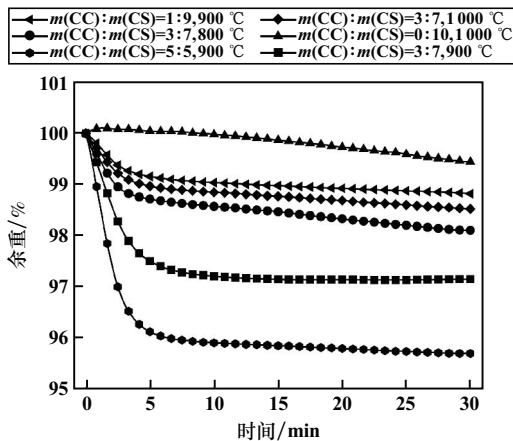


图8 氧载体恒温释氧热重曲线

Fig. 8 Thermogravimetric curve of oxygen carriers in oxygen release at constant temperature

铜精矿掺杂比例越高,制备的氧载体释氧性能越好;未达到烧结温度时,煅烧温度越高,制备的氧载体释氧性能越好。

## 3 结论

1) 熔炼渣掺杂铜精矿后高温煅烧改性得到具有尖晶石结构的铁酸铜( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ),铁酸铜( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ )作为氧载体的反应活性和催化活性良好。

2) 根据程序升温吸氧热重实验,确定恒温吸氧热重实验温度为900℃;根据程序升温释氧热重实验,确定恒温释氧热重实验的温度为1000℃。

3) 制备的氧载体最大吸氧量约3%,最大释氧量约4.34%,说明熔炼渣掺杂铜精矿后高温煅烧改性制备氧载体是可行的。

## 参考文献(References):

- [1] UNITAR, ITU. The global e-waste monitor 2024[EB/OL]. <https://api.globalewaste.org/publications/file/297/Global-E-waste-Monitor-2024.pdf>
- [2] 杨必文,李强,章小兵,等.基于共存理论的废线路板火法熔炼渣-铜平衡研究[J].矿冶工程,2021,41(6):153-160.  
YANG Biwen, LI Qiang, ZHANG Xiaobing, et al. Research on slag-copper equilibrium in smelting of waste circuit board based on coexistence theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):153-160.
- [3] 彭浩,朱军,王斌,等.废旧电路板中有价金属回收试验研究[J].矿冶工程,2021,41(5):99-102.  
PENG Hao, ZHU Jun, WANG Bin, et al. Experimental research on recovery of valuable metals in waste circuit boards[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):99-102.
- [4] 章睿.废弃电子产品是一座“富矿”[J].上海企业,2020(7):40-41.  
ZHANG Rui. Waste electronics is a “bonanza”[J]. Shanghai Enterprise, 2020(7):40-41.
- [5] 汪泰,叶小璐.从铜渣中综合回收铜、银的浮选试验研究[J].矿冶工程,2017,37(1):39-41.  
WANG Tai, YE Xiaolu. Comprehensive reclaiming of copper and silver from copper slag[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(1):39-41.
- [6] ABUELGASIM S, WANG W, ABDALAZEEZ A. A brief review for chemical looping combustion as a promising  $\text{CO}_2$  capture technology: Fundamentals and progress[J]. Science of The Total Environment, 2021,764:142892.
- [7] 陈世豪,郭雪岩.化学链过程铁基载氧体的研究进展[J].能源研究与信息,2024,40(2):104-115.  
CHEN Shihao, GUO Xueyan. Research progress on iron-based oxygen carriers in chemical looping process[J]. Energy Research and Information, 2024,40(2):104-115.
- [8] 董鑫江,左宗良,杨涵奇,等.铜渣氧载体煅烧改性及氧化还原特性研究[J].矿冶工程,2023,43(6):107-111.  
DONG Xinjiang, ZUO Zongliang, YANG Hanqi, et al. Calcination modification and redox characteristics of copper slag-based oxygen carrier[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):107-111.
- [9] 赵斌.钙铁辉石、透辉石和钙铁榴石变化的实验研究[J].地球化学,1975(1):63-74.  
ZHAO Bin. Experimental studies of changes in calcite pyroxene, diopside and gromorradine[J]. Geochemistry, 1975(1):63-74.
- [10] 张将,沈来宏,冯璇,等. $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 载氧体的释氧特性及其对煤化学链气化的影响[J].燃烧科学与技术,2019,25(3):220-228.  
ZHANG Jiang, SHEN Laihong, FENG Xuan, et al. Oxygen release properties of  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  oxygen carrier and its effect on chemical looping gasification of coal[J]. Combustion Science and Technology, 2019,25(3):220-228.

(下转第129页)

- GENG Zhiqiang, HUANG Hongjun, SUN Wei. Reclaiming of beryllium minerals from bertrandite ore by flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(4):54-56.
- [3] 刘劲松,高丽丽. 美国铍矿产业供需格局及产业政策分析[J]. 中国矿业, 2022,31(3):31-36.
- LIU Jinsong, GAO Lili. Analysis on the supply and demand pattern and industrial policy of beryllium mine industry in the United States[J]. China Mining Magazine, 2022,31(3):31-36.
- [4] 王清良,李中,李乾,等. 低品位铍矿浸出工艺探索试验[J]. 矿冶工程, 2016,36(2):88-90.
- WANG Qingliang, LI Zhong, LI Qian, et al. Exploratory experiment on leaching method for low-grade beryllium ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016,36(2):88-90.
- [5] 王俊,王清良,胡鄂明. 新疆某低品位铍矿微波预处理浸出工艺研究[J]. 矿冶工程, 2017(3):108-110.
- WANG Jun, WANG Qingliang, HU Eming. Leaching of low-grade beryllium ore from Xinjiang after microwave pretreatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017(3):108-110.
- [6] 邵伟华,曾永杰,常学勇,等. 某含萤石铍矿综合回收铍和萤石的实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(1):98-104.
- SHAO Weihua, ZENG Yongjie, CHANG Xueyong, et al. Experimental study on comprehensive recovery of beryllium and fluorite from a fluorite-beryllium ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(1):98-104.
- [7] 王培闻. 某铍矿中铀和铍的浸出和提取工艺研究[D]. 衡阳:南华大学, 2020.
- WANG Peiwen. Study on leaching and extraction process of uranium and beryllium in aurantium-beryllium mine[D]. Hengyang: University of South China, 2020.
- [8] 张志峰. 滇西某选钨尾矿中回收绿柱石的研究[J]. 矿产综合利用, 2014(4):56-59.
- ZHANG Zhifeng. Research on beryl recovery from wolfram tailings in Western Yunnan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(4):56-59.
- [9] 李中. 铍矿石的浸出及回收工艺实验研究[D]. 衡阳:南华大学, 2015.
- LI Zhong. Study on the experimental of beryllium ore leaching and recovery process[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [10] QIU T S, YAN H S, LI J F, et al. Response surface method for optimization of leaching of a low-grade ionic rare earth ore[J]. Powder Technology, 2018,330:330-338.
- [11] YU B Q, ZHANG D G, LIU J Z, et al. Response surface method optimization to improve copper extraction from refractory copper oxide ore[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2022,39(5):2221-2228.
- [12] 莫鼎成. 冶金动力学[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1987.
- MO Dingcheng. Metallurgical kinetics[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1987.
- 引用本文:**庞丹丹,姜琴,崔传发,等. 响应曲面法优化金绿宝石型铍矿中铍浸出率实验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):123-129.
- PANG Dandan, JIANG Qin, CUI Chuanfa, et al. Experimental study on improving leaching rate of beryllium from chrysoberyl by response surface methodology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):123-129.

(上接第122页)

- [11] 张平,于波,张磊. 铁酸铜在形成氧缺位体过程中的失氧机理[J]. 中国科学(B辑:化学), 2008(7):624-630.
- ZHANG Ping, YU Bo, ZHANG Lei. Mechanism of oxygen loss of copper ferrite in the formation of oxygen deficiency bodies[J]. Science in China (Series B: Chemistry), 2008(7):624-630.
- [12] ZHONG W, DONG X, FENG Y, et al. Phase reconstitution and reaction performance of oxygen carrier prepared from copper slag[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2023,149(1):63-74.
- [13] 李旭刚,王维,李君,等. 脱硫渣-CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>混合载氧体煤化学链燃烧性能[J]. 洁净煤技术, 2023,29(6):105-114.
- LI Xugang, WANG Wei, LI Jun, et al. Combustion performance of desulfurized slag-CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> mixed oxygen carrier in coal chemical chain[J]. Clean Coal Technology Programme, 2023,29(6):105-114.
- [14] WANG B, YAN R, ZHAO H, et al. Investigation of chemical looping combustion of coal with CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> oxygen carrier[J]. Energy & Fuels, 2011,25(7):3344-3354.
- 引用本文:**陈怡珊,左宗良,高鹏,等. 电路板焚烧熔渣煅烧改性制备氧载体及其吸释氧性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):118-122.
- CHEN Yishan, ZUO Zongliang, GAO Peng, et al. Preparation of oxygen carriers by calcination modification of circuit board incineration slag and their oxygen absorption and desorption performance[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):118-122.