

含铅锌难选赤褐铁矿还原焙烧及动力学^①

罗立群^{1,2}, 雷严明^{1,2}, 魏晨曦^{1,2}, 叶远林^{1,2}

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对含铅 0.39%、含锌 0.30%、全铁(TFe)含量 47.04%的含铅锌难选赤褐铁矿,通过碳热还原焙烧实验,考察了还原焙烧过程中赤褐铁矿的还原效果和铅、锌杂质的脱除率;借助恒温热重分析,研究了还原焙烧过程反应分数、反应速率及动力学参数,探讨了难选赤褐铁矿碳热还原焙烧动力学。结果表明,在焙烧温度 1 200 °C、还原剂碳氧比 2.25、焙烧时间 60 min 条件下碳热还原焙烧,所得焙烧矿经弱磁选,可获得全铁品位 89.63%、铁回收率 86.09%的铁精矿,铅、锌杂质脱除率分别为 98.97%、91.19%。含铁矿物主要转变为类球状金属铁颗粒,微区点含铁纯度可达 99.4%以上。铁矿还原焙烧过程符合收缩边界控制反应机理和收缩球体模型,表观活化能为 91.37 kJ/mol,指前因子为 18.09 min⁻¹,表明反应速率限制环节为固相扩散。研究结果可为类似矿石还原焙烧脱除有害杂质提供借鉴。

关键词: 赤褐铁矿; 还原焙烧; 动力学; 铅; 锌; 杂质; 铁精矿

中图分类号: TD981; TD982

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.020

文章编号: 0253-6099(2023)02-0086-05

Reduction Roasting of Refractory Hematite-Limonite Ore Containing Lead and Zinc Impurities and Its Kinetics Research

LUO Liqun^{1,2}, LEI Yanming^{1,2}, WEI Chenxi^{1,2}, YE Yuanlin^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: A kind of refractory hematite-limonite ore containing 0.39% lead, 0.30% zinc and 47.04% TFe was taken to perform carbothermic reduction roasting experiment, and the reduction effect of hematite-limonite ore and the removal rate of lead and zinc in the reduction roasting process were all investigated. The reaction fraction, reaction rate and kinetic parameters of the reduction roasting process were studied by means of thermogravimetric analysis at a constant temperature, and the kinetics of carbothermic reduction roasting of refractory hematite-limonite ore was also discussed. After 60-min roasting at 1 200 °C with the reducing agents of carbon and oxygen at a ratio of 2.25, the obtained roasted ore was subjected to low intensity magnetic separation, resulting in the yielded iron concentrate grading 89.63% TFe at 86.09% recovery and the removal rates of lead and zinc up to 98.97% and 91.19%, respectively. The iron minerals are mainly transformed into spherical metallic iron particles with iron purity over 99.4% in micro-zone. The reduction roasting process of iron ore follows the shrinkage boundary control reaction mechanism and shrinkage core model. The apparent activation energy is calculated to be 91.37 kJ/mol, and the pre-exponential factor is calculated to be 18.09 min⁻¹, indicating that the rate-limiting reaction step is solid-state diffusion. This research can provide reference for removing harmful impurities from similar ores by reduction roasting process.

Key words: hematite-limonite ore; reduction roasting; kinetics; lead; zinc; impurity; iron concentrate

钢铁是国民经济建设的基础工业原料,被誉为工业的粮食;作为我国钢铁原料的铁矿石禀赋差、资源丰富而不富、嵌布粒度细、有害杂质含量高^[1]。我国赤褐

铁矿储量虽然有 30 多亿吨,但部分铁矿石中含有少量铅锌杂质,难以开发利用^[2]。难选赤褐铁矿的分选与加工技术主要分为:磨矿-磁选-反浮选工艺^[3]、还原焙

① 收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(51874219)

作者简介: 罗立群(1968—),男,湖南长沙人,高级工程师,博士研究生导师,主要研究方向为难选复杂矿的分选与加工。

烧-弱磁选工艺^[4]、深度还原-磁选工艺^[5]。其中还原焙烧-弱磁选因为流程简单、选别指标优良、产出效率高,是处理难选赤褐铁矿的有效方法^[6]。

研究还原焙烧动力学可以确定焙烧过程铁矿物的高温反应速率,了解矿物结构与还原速率之间的关系及反应过程的限制性环节,进而能够控制焙烧过程。现有动力学研究主要针对菱铁矿、赤铁矿纯矿物磁化焙烧进行^[7],其结论并不完全适用于矿物组成及结构复杂的铁矿物还原焙烧过程,且对含铅锌杂质的难选赤褐铁矿涉及较少。本文针对新疆和静地区含铅锌难选赤褐铁矿,探究还原焙烧动力学特征,为此类矿石还原焙烧提供技术支持。

1 实验

1.1 实验原料

原矿样品取自新疆和静某铁矿,经闭路破碎筛分至-2.0 mm 备用。原矿化学多元素分析结果见表 1。原矿中全铁(TFe)含量为 47.04%;含有铅、锌和硫等有害杂质,含量分别为 0.39%、0.30%和 1.19%,表明该试样为含铅锌难选赤褐铁矿。

表 1 原矿化学多元素分析结果(质量分数) %

TFe	FeO	Pb	Zn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
47.04	1.25	0.39	0.30	20.33	2.85	2.62
MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	P	C	LOI
1.89	0.84	0.78	1.19	0.099	0.31	2.81

原矿 X 射线衍射图谱如图 1 所示。试样中含铁矿物主要为赤铁矿及少量磁铁矿、针铁矿;脉石矿物主要为石英及少量绢云母、绿泥石等^[2]。

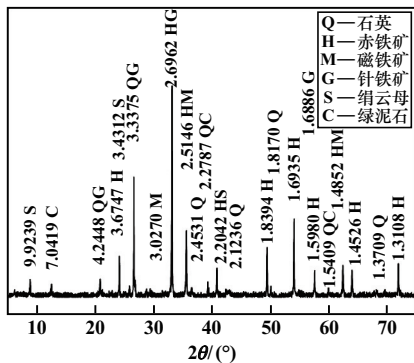


图 1 原矿 X 射线衍射(XRD) 图谱

还原焙烧煤粉取自中国宝武钢铁集团有限公司武钢烧结厂,其工业分析结果如表 2 所示。

表 2 还原焙烧煤粉工业分析结果

固定碳/%	热值/(J·g ⁻¹)	挥发分/%	水分/%	灰分/%
78.42	27 181	7.9	1.7	11.98

1.2 实验原理

利用高温还原焙烧将弱磁性铁矿物还原为磁性铁矿物,随还原焙烧温度升高,进而还原为富氏体(FeO),最后可直接还原为单质 Fe,还原过程按 Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO→Fe 进行^[8-9]。

1.3 实验设备

破碎设备为 XPC-60×100 小型颚式破碎机、XPS-Φ250×150 双辊式破碎机;还原焙烧选用 JZ-12-1200 型高温马弗炉;磨矿选用 XMQ-Φ150×50 锥型球磨机;弱磁选采用 XCGS 型 Φ50 磁选管。

1.4 动力学过程分析

还原焙烧过程化学反应的动力学三因子为:表观活化能 E 、指前因子 A 及反应机理函数 $f(\alpha)$,可通过等温法获得,即在热重试验中,待炉内温度达到设定温度后放入待烧样品测定质量变化,从而进行动力学分析^[10]。

反应分数是指样品在焙烧过程中某一时刻 t 失去的质量与反应进行完全时样品失去的质量之比,反应分数 α 可由式(1)求得:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \quad (1)$$

式中 m_0 为样品初始反应质量, g; m_t 为样品在反应 t 时刻的质量, g; m_∞ 为样品理论充分反应完全时的质量, g。

反应速率常数 k 与反应温度 T 之间的关系用阿伦尼乌斯公式表示为:

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

将式(2)变形,可得:

$$\ln k = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

式中 E 为反应活化能, kJ/mol; A 为指前因子, min⁻¹; T 为热力学温度, K; R 为热力学常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

还原焙烧可能发生的动力学反应机理、函数模型如表 3 所示。

2 实验结果与讨论

2.1 含铅锌赤褐铁矿还原焙烧及铅锌杂质脱除

2.1.1 含铅锌赤褐铁矿还原焙烧参数选择

焙烧时间 60 min、碳氧比 1.5,焙烧温度对赤褐铁

表3 动力学反应函数及模型

反应机理	编号	函数模型	$g(\alpha)$	$f(\alpha)$
随机成核与随后生长	A ₁	Avrami-Erofeew	$-\ln(1-\alpha)$	$1-\alpha$
	A ₂	Avrami-Erofeew	$[-\ln(1-\alpha)]^2$	$\frac{1}{2}(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{-1}$
	A ₃	Avrami-Erofeew	$[-\ln(1-\alpha)]^3$	$\frac{1}{3}(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{-2}$
收缩边界控制反应	B ₁	相界面反应	α	1
	B ₂	收缩圆柱体	$1-(1-\alpha)^{1/2}$	$2(1-\alpha)^{1/2}$
	B ₃	收缩球体	$1-(1-\alpha)^{1/3}$	$3(1-\alpha)^{2/3}$
扩散控制反应	C ₁	幂函数法则	α^2	$\frac{1}{2}\alpha^{-1}$

矿还原过程的影响如图2所示。由图2可知,含铅锌赤褐铁矿在750~850℃范围内表现为磁化焙烧过程,弱磁分选后的精矿TFe品位处于56.66%~58.27%之间,铁回收率在90.51%~78.82%之间波动;当还原焙烧温度升至900~1000℃时,赤褐铁矿转变为铁富氏体,弱磁精矿TFe品位升至58.00%~64.14%,而铁回收率仅13.84%~16.62%;当还原焙烧温度达到1000~1200℃时,其弱磁精矿TFe品位可达66.36%~92.39%,铁回收率大幅提升至17.42%~77.64%。碳氧比1.5时,TFe品位最高为92.39%,此时回收率为77.64%,笔者所在课题组研究发现,当碳氧比增大至2.25时,TFe品位略有降低,铁回收率增大至86.09%^[11]。

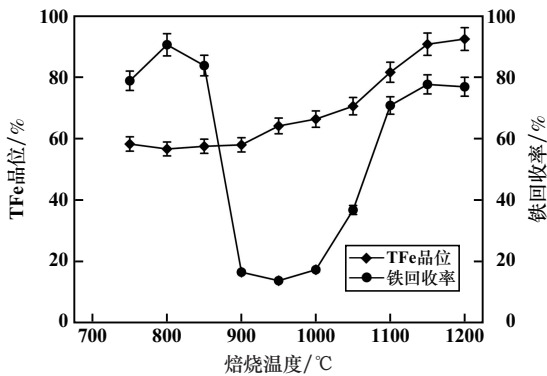


图2 焙烧温度对铁矿物还原焙烧过程的影响

选择还原温度1150℃、碳氧比2.25,焙烧时间对精矿TFe品位和铁回收率的影响如图3所示。从图3可以看出,焙烧时间从20min增加到60min,精矿TFe品位从80.50%增加到90.59%,铁回收率从55.51%升至89.71%。焙烧时间超过60min后,精矿TFe品位和铁回收率提升缓慢,表明赤褐铁矿还原为金属铁和金属铁颗粒长大的反应进行得较完全。

综合考虑还原指标,确定适宜的焙烧条件为:焙烧温度1200℃、焙烧时间60min、碳氧比2.25,此时铁精矿TFe品位为89.63%、铁回收率86.09%。

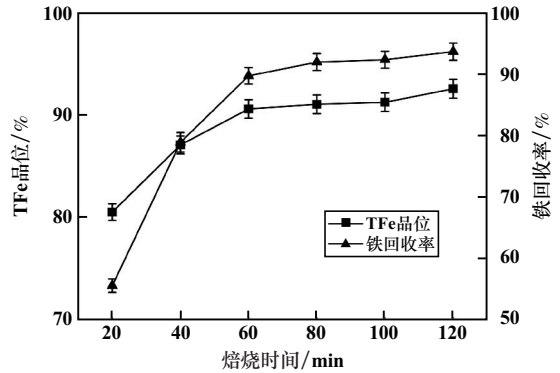


图3 焙烧时间对赤褐铁矿还原的影响

2.1.2 还原焙烧过程铅锌杂质的脱除效果

碳氧比2.25、焙烧时间60min条件下,焙烧温度对还原焙烧过程中铅锌脱除效果的影响如图4所示(扣除煤粉的灰分)。800℃下磁化焙烧时,铅、锌杂质总脱除率较低,分别仅为23.98%、6.47%;焙烧温度达到900℃后,含铅锌赤褐铁矿由人工磁铁矿(Fe_3O_4)向富氏体(FeO)转化,铅、锌杂质脱除率分别仅为29.87%、6.67%;焙烧温度升到1150℃,脱铅率为96.40%,脱锌率为59.17%;当焙烧温度升至1200℃,铅、锌脱除率分别提高到98.36%、90.17%,铅锌杂质脱除效果较好。后续动力学研究温度范围选择深度还原阶段(1050~1200℃)来考察。

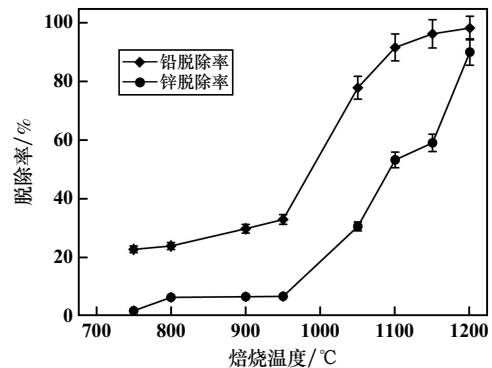


图4 焙烧温度对还原焙烧过程中铅锌脱除效果的影响

2.2 还原焙烧过程动力学分析

2.2.1 还原焙烧过程反应分数

反应分数表征还原焙烧反应进行的程度,可掌握还原反应进程。赤褐铁矿试样在不同焙烧温度下,其反应分数随焙烧时间的变化趋势大致相同,如图5所示。同一焙烧温度下,反应刚开始时,反应分数快速增加,随着反应时间延长,反应分数增加变缓,后渐趋于1;相同时间内,温度越高,反应分数越大,即铁氧化物还原反应更充分;4个温度下焙烧60min后,反应速率变

得缓慢,趋于充分反应。

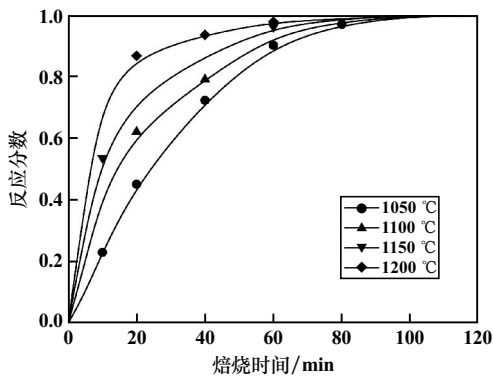


图 5 不同温度下还原焙烧过程反应分数

2.2.2 还原焙烧过程反应速率

对反应分数与焙烧时间的曲线进行微分,可得反应速率与时间的关系,如图 6 所示。不同焙烧温度下,反应速率随焙烧时间增加,总体上先急剧增长再快速下降后逐渐减小;且焙烧温度越高,初期反应速率增长越快,中期反应速率减小亦越快。90 min 以后,不同温度下的反应速率趋于 0,反应基本停止,达到充分反应。焙烧温度 1 200 °C 时,最大反应速率为 0.08 min⁻¹,

1 050 °C 时最大反应速率为 0.026 min⁻¹。反应速率达到最大时,各反应温度的还原度差值也达到最大。

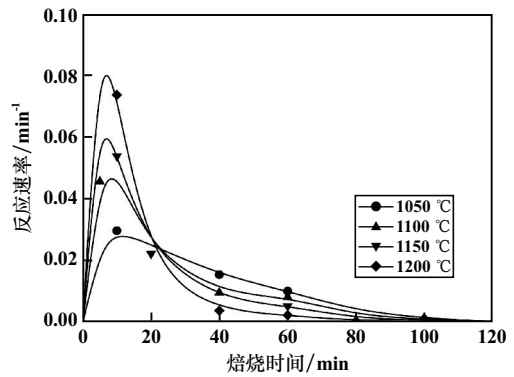


图 6 不同温度下还原焙烧过程反应速率

2.2.3 还原焙烧过程动力学参数计算

动力学参数可以描述反应速率和揭示反应机理。为了获得深度还原阶段反应速率的限制性环节,分别将不同温度下得到的 4 组 $\alpha-t$ 值代入 $g(\alpha) = \int_0^t A e^{(-E/RT)} dt = kt$ 进行线性拟合,得到反应速率常数和还原温度倒数之间的关系。各函数拟合结果如表 4 所示。

表 4 深度还原阶段各机理函数线性拟合结果

编号	1 050 °C		1 100 °C		1 150 °C		1 200 °C	
	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>R</i> ²	<i>k</i>	<i>R</i> ²
A ₁	0.076 0	0.823 6	0.077 5	0.831 8	0.083 6	0.865 2	0.088 5	0.879 4
A ₂	0.690 2	0.528 5	0.751 4	0.548 2	0.885 5	0.606 5	1.030 3	0.718 7
A ₃	6.623 2	0.389 7	7.485 2	0.402 9	9.355 5	0.452 0	11.261 8	0.620 6
B ₁	0.007 8	0.809 1	0.006 2	0.745 9	0.005 1	0.667 0	0.003 7	0.488 0
B ₂	0.008 5	0.958 3	0.007 6	0.934 5	0.006 9	0.894 9	0.005 7	0.795 9
B ₃	0.008 2	0.996 4	0.007 6	0.987 2	0.007 3	0.969 6	0.006 4	0.909 7
C ₁	0.009 5	0.893 9	0.008 4	0.847 3	0.007 4	0.765 9	0.005 6	0.585 7

由表 4 可知,不同温度下,拟合结果较好的为 B₃ 机理函数,即收缩边界控制反应-收缩球体模型。对 B₃ 按其函数模型进行线性拟合,结果如图 7 所示,拟合方程为: $y = -10\ 990x + 3.522\ 8$, 拟合常数为 0.999, 拟合效果较好。根据式(2),拟合直线的斜率为 $-E/R$, 截距为 $\ln A$, 计算可得: $A = 18.09\ \text{min}^{-1}$, $E = 91.37\ \text{kJ/mol}$ 。

表观活化能表征化学反应发生的难易程度,可以用来判断反应速率的限制性环节^[12]。铁氧化物反应的速率控制环节与表观活化能的关系如表 5 所示,由表 5 可知,含铅锌赤褐铁矿在温度 1 323~1 473 K 下还原的限制环节为固相扩散。在深度还原反应阶段,碳气化为 CO 参与还原反应^[13],铁氧化物以从颗粒边缘到颗粒内部的反应顺序逐渐还原,还原过程中金属铁

颗粒的不断生长阻碍了铁氧化物的进一步还原,故此阶段限制环节是固相扩散。此时 CO 还原 FeO 的反应为放热反应^[13],有助于铁氧化物进一步还原的同时铅、锌被有效脱除。

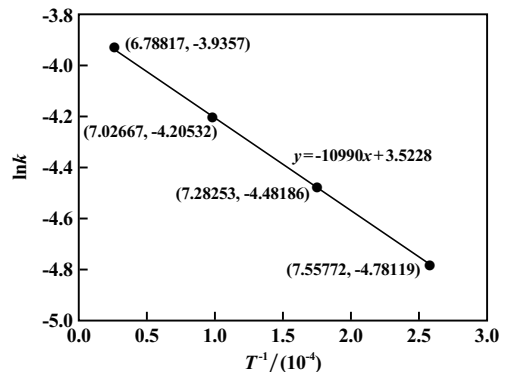


图 7 不同焙烧温度下 lnk 与 1/T 的关系

表5 铁氧化物速率控制环节与表观活化能的关系

$E/(kJ \cdot mol^{-1})$	速率控制环节
8~16	气体内扩散控制
29~42	气体内扩散与界面化学反应共同控制
60~67	界面化学反应控制
>90	固相扩散控制

2.3 焙烧产品微观形貌分析

不同放大倍率下1200℃焙烧矿的微观形貌见图8。由图8可知,含铅锌赤褐铁矿经深度还原焙烧后,含铁矿物主要转变为自然铁,图中可见大量细小的类球状金属铁颗粒,颗粒边缘圆滑,随焙烧时间延长,颗粒逐渐聚集长大,且被炭质及少量褐铁矿等填充交代,未见明显铅、锌杂质存在,与Pb、Zn脱除率分别为98.36%和90.17%的结论相符。

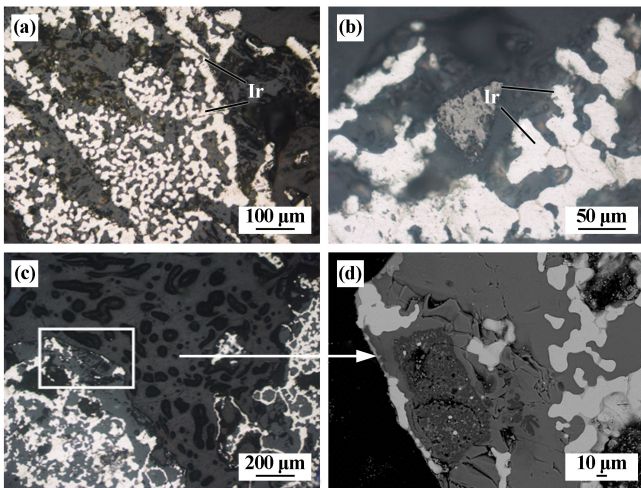


图8 焙烧矿(1200℃)的微观形貌

为了进一步查明焙烧试样不同微区的含铁矿物还原特征和铅锌杂质脱除效果,采用EMPA-EDS对还原焙烧温度1200℃、焙烧时间60min所得焙烧产物(图8(d))进行能谱微区成分分析,能谱成分图如图9所示,图9中各微区点的X射线能谱成分结果见表6。

由表6可知,微区点1、2、3、4、5的能谱分析中Fe含量均在99.4%以上,其他元素为O,说明含铁矿物在1200℃被有效还原为金属铁。能谱分析结果表明,微区点6、7、8中含有60%以上的Fe及部分O、Si,各微区点中均未见铅、锌杂质,表明深度还原阶段对铅、锌脱除效果较好。

3 结 论

1) 对含铅0.39%、含锌0.30%、TFE含量47.04%的难选赤褐铁矿进行还原焙烧-磁选法处理,当焙烧温

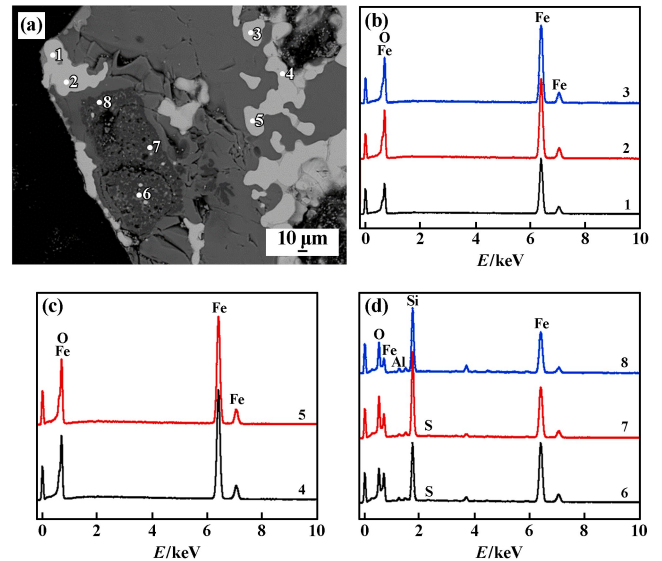


图9 焙烧矿微区点及EDS能谱图

表6 赤褐铁矿还原焙烧产物EDS分析结果

图中位置	质量分数/%					
	Fe	O	Pb	Zn	S	Si
1	99.61	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00
2	99.58	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
3	99.45	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
4	99.65	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
5	99.56	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
6	71.09	7.44	0.00	0.00	0.28	20.26
7	60.90	10.14	0.00	0.00	0.26	27.57
8	62.18	9.37	0.00	0.00	0.00	26.82

度1200℃、碳氧比2.25、焙烧时间60min时,获得的弱磁选精矿TFE品位为89.63%、铁回收率达86.09%,铅、锌杂质脱除率分别为98.97%、91.19%。

2) 含铅锌赤褐铁矿在1050~1200℃下的还原焙烧过程符合收缩边界控制反应机理和收缩球体模型,函数表达式为: $g(\alpha) = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$,表观活化能、指前因子分别为91.37 kJ/mol、18.09 min⁻¹,深度还原焙烧过程中反应速率受固相扩散控制。

3) 微观形貌分析与EDS能谱测试结果表明,含铅锌铁矿物经深度还原后,铁矿物主要转变为自然铁,形成细小的类球状金属铁颗粒,颗粒边缘圆滑,微区点含铁纯度可达99.4%以上;铅、锌杂质经还原挥发逸出,还原产物中未见铅、锌杂质。

参考文献:

- [1] 肖军辉,张裕书,冯启明,等. 难选赤褐-菱铁矿离析焙烧-弱磁选提铁研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015,46(10):3573-3579.

(下转第96页)

- [2] 毛润,张鹏飞,胡超杰,等.拜耳法赤泥磁化焙烧理论与实践问题探讨[J].矿冶工程,2021,41(6):38-42.
- [3] WANG L, SUN N, TANG H H, et al. A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis[J]. Minerals, 2019,9(6):362.
- [4] SAMAL S. Utilization of red mud as a source for metal Ions—A review[J]. Materials, 2021,14(9):2211.
- [5] 黄蒙蒙,李宏煦,刘召波,等.低铁拜耳法赤泥中回收铁的实验研究[J].矿冶工程,2017,37(1):92-95.
- [6] DING W, XIAO J H, PENG Y, et al. Iron extraction from red mud using roasting with sodium salt[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2019,42(3):153-161.
- [7] Agrawal S, Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2021,27(2-3):00246.
- [8] 宁凌峰,何德文,陈伟,等.赤泥中硫酸选择性浸出铁、钕及动力学研究[J].矿冶工程,2019,39(3):81-84.
- [9] 黄柱成,蔡凌波,张元波,等. Na_2CO_3 和 CaF_2 强化赤泥铁氧化物还原研究[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):838-844.
- [10] LU F H, SU X D, HUANG F, et al. Co-treatment of spent pot-lining and red mud for carbon reutilization and recovery of iron, aluminum and sodium by reductive roasting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020,51:1564-1575.
- [11] LIU Y J, ZOU K S, YANG G, et al. Recovery of ferric oxide from Bayer red mud reduction roasting-magnetic separation process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016,31(2):404-407.
- [12] Agatzini L S, Oustadakis P, Tsakiridis P E, et al. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,157(2-3):579-586.
- [13] 王海峰,王芹.高铁赤泥还原磁化焙烧的热力学分析[C]//2008年全国冶金物理化学学术会议专辑(上册).2008:96-99.
- [14] 李建锡,余苏,马丽萍,等.磷石膏预分解的热分析研究[J].环境工程学报,2009,3(10):1861-1864.
- [15] 李慧春,沈忠,梁秀艳.镜铁矿粉回回转窑磁化焙烧-磁选试验研究[J].矿冶工程,2021,41(6):89-92.
- [16] CUI Z, LIU Q, ETSSELL T H. Magnetic properties of ilmenite, hematite and oil sand minerals after roasting[J]. Minerals Engineering, 2002,15(12):1121-1129.
- [17] 万军营,陈铁军,周仙霖,等.高铁赤泥强化赤泥直接还原试验研究[J].烧结球团,2020,45(6):10-15.
- [18] 赵瑞超.东鞍山铁矿石磨矿特性基础研究[D].沈阳:东北大学资源与土木工程学院,2017.
- [19] 柳晓,高鹏,吕扬,等.高铁赤泥悬浮磁化焙烧-弱磁选提铁工艺[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(3):414-421.

引用本文:郝娇,毛润,胡超杰,等.添加剂活化赤泥磁化焙烧-弱磁选回收铁[J].矿冶工程,2023,43(2):91-96.

(上接第90页)

- [2] 罗立群, Mustafa S, Niyonzima J C, 等.含铅锌难选铁矿石的矿物学及铅锌杂质产出特征[J].中国有色金属学报,2021,31(1):181-193.
- [3] Mikhail K, Alexander F, Svetlana A. Recovery of magnetite-hematite concentrate from iron ore tailings [J]. E3S Web of Conferences, 2021,247:01042.
- [4] Ravisankar V, Venugopal R, Bhat H. Investigation on beneficiation of goethite-rich iron ores using reduction roasting followed by magnetic separation[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2019,128(3):175-182.
- [5] GAO P, SUN Y S, REN D Z, et al. Growth of metallic iron particles during coal-based reduction of a rare earths-bearing iron ore[J]. Mining, Metallurgy and Exploration, 2013,30(1):74-78.
- [6] LUO L Q, HUANG H, YU Y F. Characterization and technology of fast reducing roasting for fine iron materials[J]. Journal of Central South University, 2012,19(8):2272-2278.
- [7] 张小龙,韩跃新,李艳军,等.綦江菱-赤混合型铁矿石磁化焙烧动力学研究[J].金属矿山,2018(2):70-75.
- [8] LUO L Q, ZHANG X X, WANG H Y, et al. Comparing strategies for iron enrichment from Zn- and Pb-bearing refractory iron ore using reduction roasting-magnetic separation [J]. Powder Technology, 2021,393:333-341.
- [9] 张晓雪,罗立群,郑波涛,等.铁矿石碳热还原过程中铅锌及含铁物相的演变规律[J].矿冶工程,2021,41(6):21-25.
- [10] ZHANG Z L, SUN Y, CHEN R, et al. Non-isothermal reduction kinetics of roasted high alumina iron ore pellets[J]. Metallurgical Research and Technology, 2020,117(5):1-5.
- [11] 魏晨曦,罗立群,郑波涛,等.含铅锌难选赤褐铁矿还原焙烧及铅锌杂质同步脱除效果研究[J].中国矿业,2019,28(12):161-166.
- [12] 李刚,丁成义,宣森炜,等.铁酸钙与赤铁矿非等温还原动力学[J].工程科学学报,2018,40(11):1317-1324.
- [13] 叶恒棣,郑富强,胡兵,等.氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势[J].烧结球团,2022,47(1):10-17.

引用本文:罗立群,雷严明,魏晨曦,等.含铅锌难选赤褐铁矿还原焙烧及动力学[J].矿冶工程,2023,43(2):86-90.