

不同温度下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相转变差异

李梦飞¹, 李世维¹, 陈铁军², 张汉泉¹, 路漫漫¹

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 对自熔性鲕状赤铁矿进行CO气基磁化焙烧—磁选试验,以探究不同温度下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相转变差异。结果表明,自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧过程中,升高焙烧温度能够减少最佳焙烧时间,提高分选效率,同时升高焙烧温度能够提高焙烧矿磁选精矿的铁品位,但会减少磁选精矿的铁回收率。物相分析可知,800℃下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相变化规律:赤铁矿→磁铁矿→富氏体→方铁矿;650℃下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相变化规律:赤铁矿→磁铁矿→富氏体。自熔性鲕状赤铁矿气基高温长时间磁化焙烧时,焙烧矿磁选精矿中的铁主要赋存在磁铁矿和方铁矿中。

关键词: 自熔性鲕状赤铁矿; 磁化焙烧; 磁选; 物相转化; 富氏体

中图分类号:TD951

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)02-0079-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.028

Differences in phase conversion of magnetized roasting iron of self-fusing oolitic hematite at different temperatures

LI Mengfei¹, LI Shiwei¹, CHEN Tiejun², ZHANG Hanquan¹, LU Manman¹

(1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the differences in the phase conversion of magnetized roasting iron of self-fusing oolitic hematite at different temperatures, CO gas-based magnetization roasting and magnetic separation experiments are carried out on the self-fusing oolitic hematite. The results show that, in the self-fusing oolitic hematite magnetization roasting process, increasing the roasting temperature can reduce the optimal roasting time and improve the sorting efficiency, while increasing the roasting temperature can increase the iron grade of the magnetic separation concentrate of the roasted ore, but reduce the iron recovery rate of the magnetic separation concentrate. Phase analysis show that the phase variation of magnetized roasting iron of self-fusing oolitic hematite at 800℃ is as follows: hematite→magnetite→wustite→iozite; Phase variation of magnetized roasting iron of self-fusing oolitic hematite at 650℃ is as follows: hematite→magnetite→wustite. When the self-fusing oolitic hematite gas-based is magnetized and roasted for a long time, the iron in the magnetic separation concentrate of the roasting ore is mainly deposited in magnetite and iozite.

Key words: self-fusing oolitic hematite; magnetized roasting; magnetic separation; phase conversion; wustite

鲕状赤铁矿分布于我国多个地区, 占我国铁 资源储量的11%^[1]。由于其嵌布粒度极细, 且较

收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(519742041); 湖北省重点研发计划(2022BCA062)

作者简介: 李梦飞(2000—), 男, 硕士研究生, 从事难选铁矿石的回收利用研究。

通信作者: 路漫漫(1989—), 男, 博士, 副教授, 从事复杂矿物综合利用、固废增值化利用、铁矿造块、工业废水处理等方面的研究。

易与某些磷矿物、鲕绿泥石、石英等以共生的方式形成包裹的状态, 导致其难以利用^[2]。先前研究利用浮选法、直接还原法、重选法、磁化焙烧—磁选等工艺对鲕状赤铁矿进行选别研究^[3]。RAO 等^[4]对铁品位为 49.25% 的鲕状赤铁矿进行浮选试验, 得到铁品位为 58.1%, 铁回收率为 92.6% 的浮选精矿, 该方法操作简单、成本较低, 但磨矿时产生的大量矿泥不利于提高选矿指标。LI 等^[5]对铁品位为 42.21% 的鲕状赤铁矿进行直接还原—磁选试验研究, 得到铁品位为 90%, 铁回收率为 96% 的铁精矿, 该方法能够取得较好的分选指标, 但过高的还原温度导致生产成本增加。ROY 等^[6]采用螺旋分离和摇床分离相结合的方法对铁品位为 37.5% 的鲕状赤铁矿进行分选, 得到铁品位为 38.63%, 铁回收率为 70% 的精矿, 该方法操作简单, 但分选效果较差。综合选矿效果和成本, 磁化焙烧—磁选工艺是处理鲕状赤铁矿最有效的手段之一^[7]。

韦东等^[8]在焙烧温度为 800 °C、焙烧时间为 90 min、还原剂用量为 15% 的条件下对鲕状赤铁矿进行煤基磁化焙烧—磁选试验, 得到铁品位为 58%, 铁回收率为 90% 的精矿。该条件下精矿铁回收率很高, 但铁品位较低。针对精矿铁品位较低的原因, 余洪等^[9]研究表明, 精矿未达到单体解离, 导致精矿中杂质磷、铝等含量较高。为提高煤基磁化焙烧—磁选精矿的铁品位, 黄红军等^[10]进一步提升焙烧温度至 950 °C, 可以得到铁品位为 63.06%, 铁回收率为 88.45% 的精矿。该试验虽然能得到高品位的铁精矿, 但焙烧温度过高, 导致能耗过大。

本研究使用的自熔性鲕状赤铁矿, 其碱性氧化物与酸性氧化物的比值在 0.8 ~ 1.2 之间, 有助于降低高炉冶炼熔剂消耗和焦比、提高高炉利用系数^[11]。由于自熔性鲕状赤铁矿中 Ca、Mg 含量比酸性鲕状赤铁矿高, 使得赤铁矿易与 CaO 反应生成铁酸钙, 对焙烧矿的矿物组成和显微结构产生较大影响^[12]。同时 MgO 会加速赤铁矿的热分解, 有利于形成磁铁矿, 导致其在磁化焙烧过程中铁物相转化规律与酸性鲕状赤铁矿不同^[13]。

综上, 为揭示不同温度下自熔性鲕状赤铁矿磁

化焙烧铁物相转变差异, 本研究在 650 °C 和 800 °C 下对自熔性鲕状赤铁矿进行气基磁化焙烧—磁选试验, 以查明精矿铁品位和回收率随焙烧时间的变化规律。由于焙烧产物和磁选精矿的铁物相主要为磁性铁, 故只对磁选中矿和尾矿进行 XRD 分析, 明确其物相组成, 揭示不同温度下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相转变差异, 为高效利用自熔性鲕状赤铁矿提供理论支撑和技术指导。

1 试验

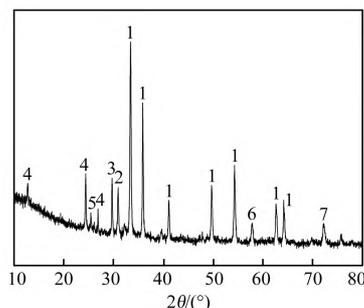
1.1 试验原料

试样所用鲕状赤铁矿原矿取自湖北恩施, 粒径 < 2 mm。其主要化学成分及烧损如表 1 所示, 其 X 射线衍射(XRD)分析如图 1 所示。由表 1 可知, 原矿 TFe 质量分数较高, 为 48.77%, 有害杂质硫的含量很低, 但有害成分磷的质量分数高达 0.916%, 不利于后续冶炼。原矿磁性率 $w(\text{TFe})/w(\text{FeO})$ 为 11.90, 属氧化矿石。碱性系数 $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 1.07$, 属自熔性矿石。需要选矿排除的脉石组分主要是 SiO_2 , 其次是 Al_2O_3 。

表 1 原矿主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of raw ore %

CaO	MgO	S	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	TFe	FeO	烧损
7.36	1.10	0.038	6.88	0.916	3.86	48.77	4.10	5.83



1—赤铁矿; 2—白云石; 3—石灰石; 4—石英;
5—绿泥石; 6—磷灰石; 7—黄铁矿。

图 1 原矿 XRD 衍射分析

Fig. 1 X-ray diffraction analysis of raw ore

由图 1 可知, 原矿中主要矿物为赤铁矿, 脉石矿物主要为石灰石、石英、白云石和绿泥石。矿石组成较为复杂, 铁、磷等元素主要以独立矿物形式存在。原矿中铁的物相分析见表 2。由表 2

可知,原矿中铁赋存状态较为单一,以赤(褐)铁矿为主,其铁分布率高达98.12%,铁的最大理论回收率为赤(褐)铁矿、磁铁矿和碳酸铁中铁的分布率之和,为99.12%。

表2 原矿中铁化学物相分析结果(质量分数)

Table 2 Chemical phase analysis results of iron in

		ore sample				%
项目	磁性铁	赤(褐)铁矿中的铁	碳酸铁中的铁	硫化铁中的铁	难溶硅酸铁中的铁	合计
金属量	0.07	47.85	0.42	0.28	0.15	48.77
分布率	0.14	98.12	0.86	0.57	0.31	100

1.2 试验方法

1.2.1 磁化焙烧—磁选

试验采用CO作为还原剂,原矿在GSL-1400X型气氛炉内进行磁化焙烧,焙烧产品经RK/QZM(BM)系列智能球磨机磨矿后,采用RK/CXG-Ø50型磁选管和湿式弱磁选机进行选别,将不同条件下的中矿和尾矿通过D8 Advance型X射线衍射仪进行分析,使用数据拟合法进行铁物相的定量分析,通过调整相关拟合参数,反复拟合使拟合参数小于10%,从而测定铁物相的相对含量。

磁化焙烧时,先通入N₂,5 min后,通入适量CO,在高温(800℃)和低温(650℃)下焙烧,改变焙烧时间,于密封环境下冷却得到焙烧产品。取30 g焙烧产品,磨矿至<0.074 mm质量分数为88%,用磁选管进行磁选,粗选磁场强度为46 kA/m,扫选磁场强度为93.5 kA/m。对精矿、中矿和尾矿进行化学分析。试验流程如图2所示。

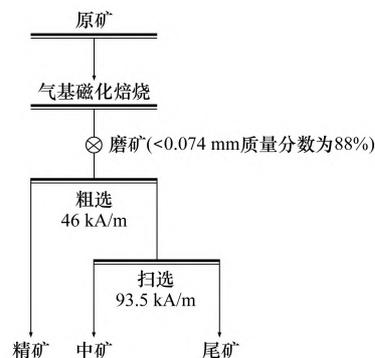


图2 鲕状赤铁矿磁化焙烧及分选流程

Fig. 2 Flow charts of magnetization roasting and separation of oolitic hematite

1.2.2 磁化还原率计算

以矿石氧化亚铁的质量与全铁的质量百分比来表征铁的磁化率,计算方法如下:

$$R_{Fe} = \frac{\omega(\text{FeO})}{\omega(\text{TFe})} \times 100\%$$

式中: R_{Fe} 为磁化还原率,%; $\omega(\text{FeO})$ 为亚铁质量分数,%; $\omega(\text{TFe})$ 为全铁质量分数,%。

当Fe₂O₃全部转化为Fe₃O₄,此时矿石磁化还原率为42.86%,可认为当焙烧矿磁化还原率低于此值时,处于欠还原状态,磁化还原率大于42.86%时,发生过还原^[14]。

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

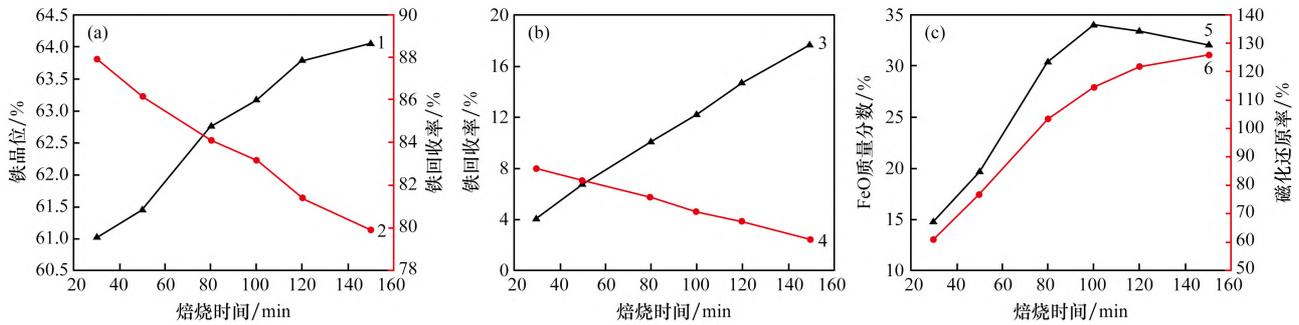
磁化焙烧过程在600~1 000℃温度下进行,温度过低,还原过程缓慢,导致还原不充分;温度过高时,生成的磁铁矿不稳定,易发生过还原产生富氏体,导致磁选产率和回收率变低^[15]。本试验以焙烧时间为变量,在800℃(高温)和650℃(低温)条件下,揭示自溶性鲕状赤铁矿在磁化焙烧时,铁物相转化差异。

2.1.1 800℃磁化焙烧—磁选试验

试验在物料粒度小于2 mm,焙烧温度为800℃,配入30% CO条件下,开展了焙烧时间(30、50、80、100、120、150 min)对磁化焙烧—磁选试验相关指标影响,结果如图3所示。

由图3(a)可知,焙烧时间对焙烧效果有明显影响。精矿铁品位随焙烧时间的延长而升高,在150 min达到最大值(64.05%);精矿铁回收率随焙烧时间的延长而减小,在150 min达到最小值(79.91%)。原因是当焙烧温度为800℃、焙烧时间大于30 min时,发生过还原,人工磁铁矿继续还原生成弱磁性的铁矿物并经磁选离开精矿,精矿中磁性铁含量降低,导致精矿铁回收率减小。综合精矿质量和成本,确定800℃下的最佳焙烧时间为100 min,经磁选得到铁品位为63.17%,铁回收率为83.19%的精矿。

由图3(b)可知,中矿铁回收率随焙烧时间的延长而增加;尾矿铁回收率随焙烧时间的延长而减小。该结果说明随着焙烧时间的延长,赤铁矿被不断还原为磁铁矿,使得磁选进入尾矿的赤



(a) 精矿; (b) 中矿和尾矿; (c) 尾矿

1—铁品位; 2—铁回收率; 3—中矿铁回收率; 4—尾矿铁回收率; 5—FeO 质量分数; 6—铁回收率。

图 3 焙烧时间对磁化焙烧—磁选试验相关指标影响(焙烧温度为 800 °C)

Fig. 3 Effect of roasting time on magnetization roasting-magnetic separation performance metrics (roasting temperature: 800 °C)

铁矿减少, 并且磁铁矿过还原生成的弱磁性铁矿物没有一直增加, 导致尾矿铁回收率减小。同时随着焙烧时间的延长有磁性较强的铁矿物生成, 该矿物经磁选进入中矿, 使得中矿铁回收率增加。

由图 3(c) 可知, 800 °C 下尾矿磁化还原率随焙烧时间的延长而增加, 且焙烧时间超过 30 min, 磁化还原率大于 42.8%; FeO 质量分数随焙烧时间的延长先增加后减小, 在 100 min 达到最大值。该结果说明 800 °C 下, 当焙烧时间超过 30 min, 磁铁矿发生过还原, Fe_3O_4 转化为 FeO, 生成的铁矿物磁性较弱经磁选进入尾矿; 而当焙烧时间超过 100 min, 尾矿中含有 FeO 的铁矿物含量随焙烧时间的延长而减小。

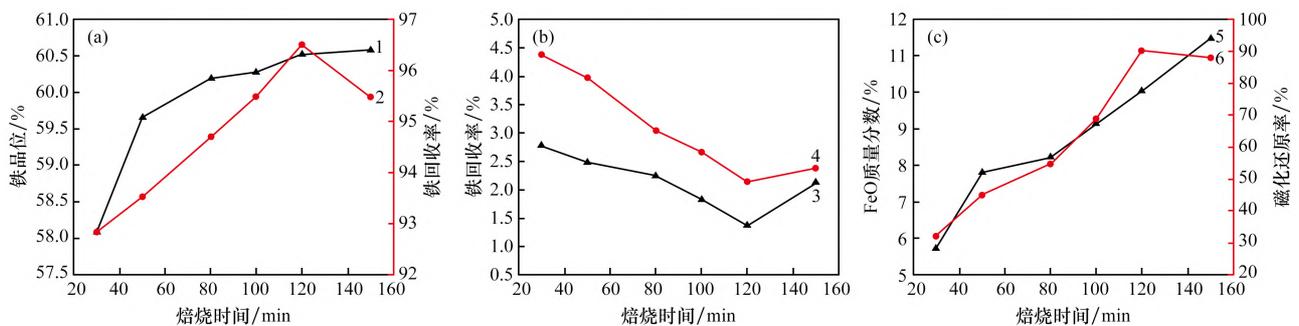
2.1.2 650 °C 磁化焙烧—磁选试验

试验在物料粒度小于 2 mm, 焙烧温度为 650 °C, 配入 30% CO 条件下, 开展了焙烧时间

(30、50、80、100、120、150 min) 对磁化焙烧—磁选试验相关指标影响, 结果如图 4 所示。

由图 4(a) 可知, 精矿品位随焙烧时间的延长而升高, 在 150 min 达到最大值(60.58%); 精矿回收率随焙烧时间的延长先增加后减小, 在 120 min 时达到最大值(96.50%)。原因是当焙烧温度为 650 °C, 焙烧时间从 0 min 延长至 120 min 过程中, 由赤铁矿还原得到的磁性铁含量增加, 使得精矿产率增加, 从而精矿铁回收率增大; 继续延长焙烧时间, 磁铁矿发生过还原, 生成弱磁性铁矿物并经磁选离开精矿, 导致精矿铁回收率减小。

由图 4(b)、(c) 可知, 650 °C 下中矿和尾矿的铁回收率随焙烧时间的延长先减小后增加, 均在 120 min 达到最小值。尾矿 FeO 质量分数随焙烧时间的延长而增加, 磁化还原率随焙烧时间的延长先增加后减小, 在 120 min 达到最大值, 并且



(a) 精矿; (b) 中矿和尾矿; (c) 尾矿

1—铁品位; 2—铁回收率; 3—中矿铁回收率; 4—尾矿铁回收率; 5—FeO 质量分数; 6—铁回收率。

图 4 焙烧时间对磁化焙烧—磁选试验相关指标影响(焙烧温度为 650 °C)

Fig. 4 Effect of roasting time on magnetization roasting-magnetic separation performance metrics (roasting temperature: 650 °C)

当焙烧时间超过 50 min,尾矿磁化还原率大于 42.8%。该结果说明 650 °C 下磁化焙烧过程中有过还原反应的发生。当焙烧时间超过 50 min,磁铁矿发生过还原生成富氏体,经磁选进入尾矿。焙烧时间从 50 min 延长至 120 min 过程中,由于还原为磁铁矿的赤铁矿比进入尾矿的富氏体含量多,使得尾矿铁回收率减小;当焙烧时间继续延长,进入尾矿的富氏体超过还原为磁铁矿的赤铁矿含量,使得尾矿铁回收率增加。综合经济成本和分选效率,确定 650 °C 下的最佳焙烧时间为 120 min,经磁选得到铁品位为 60.52%,铁回收率为 96.50%的精矿。

综上,800 °C 下的最佳焙烧时间比 650 °C 下的最佳焙烧时间短 20min;800 °C 最佳焙烧时间下磁选精矿的铁品位比 650 °C 的高 2.65%;800 °C 最佳焙烧时间下磁选精矿的铁回收率比 650 °C 的低 13.31%。

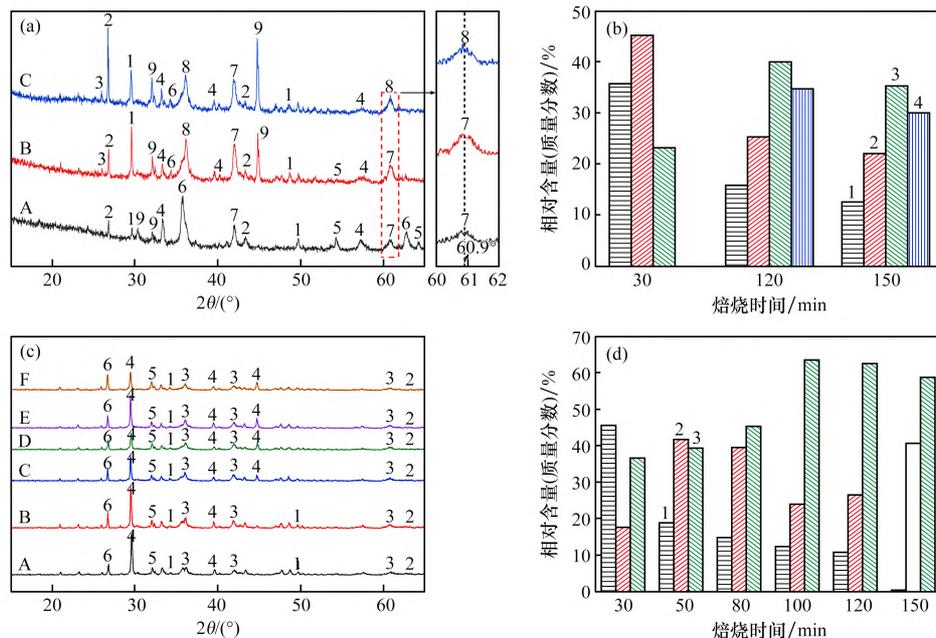
2.2 鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相转化过程及规律分析

2.2.1 800 °C 磁化焙烧铁物相转化过程及规律分析

不同焙烧时间磁选中矿和尾矿的 XRD 图谱及铁物相相对含量如图 5 所示。

由图 5(a)、(c)可知,随着焙烧时间的延长,短时间磁化焙烧—磁选中矿和尾矿 XRD 图谱中部分赤铁矿峰消失,说明磁化焙烧过程中,焙烧矿中的赤铁矿被还原为磁铁矿。不同焙烧时间磁选中矿 XRD 图谱中均出现富氏体峰,同时 120 min 和 150 min 磁选中矿 XRD 图谱中出现方铁矿峰,说明 800 °C 下,当焙烧时间超过 30 min,焙烧矿中磁铁矿过还原生成富氏体,同时富氏体会继续还原为方铁矿。

由图 5(b)、(d)可知,中矿中方铁矿相对含量随焙烧时间的延长而增加,同时不同焙烧时间磁选尾矿均不存在方铁矿。结合 800 °C 磁化焙烧—磁选试验结果可以得出,方铁矿能够被 93.5 kA/m 的磁场吸引,使得中矿铁回收率随焙烧时间的延长而增大。该结果说明焙烧过程中,焙烧矿中方铁矿含量随着焙烧时间的延长而增加。



(a) 磁选中矿 XRD 图谱; (b) 磁选中矿铁物相相对含量; (c) 磁选尾矿 XRD 图谱; (d) 磁选尾矿铁物相相对含量
(a): 1—石灰石; 2—石英; 3—磷灰石; 4—绿泥石; 5—赤铁矿; 6—磁铁矿; 7—富氏体; 8—方铁矿; 9—白云石。

(c): 1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—富氏体; 4—石灰石; 5—磷灰石; 6—石英。

(b)、(d): 1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—富氏体; 4—方铁矿。

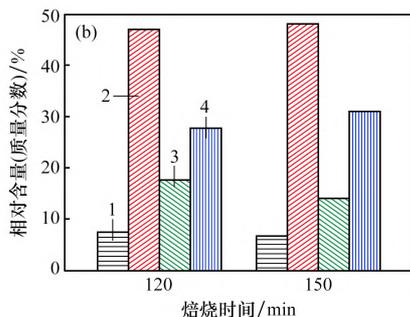
图 5 不同焙烧时间磁选中矿和尾矿的 XRD 图谱及铁物相相对含量(焙烧温度为 800 °C)

Fig 5 XRD patterns and relative iron content of ore and tailings in magnetic separation at high temperature and different roasting times(roasting temperature:800 °C)

尾矿中赤铁矿相对含量随焙烧时间的延长而减少,富氏体相对含量在焙烧时间从 30 min 延长至 100 min 过程中一直增加,并在 100 min 达到最大值。继续延长焙烧时间,富氏体含量减少。该结果说明,在焙烧时间从 30 min 延长至 100 min 过程中,焙烧矿中磁铁矿过还原为富氏体的速度比富氏体还原为方铁矿的速度快,富氏体含量增加,经磁选进入尾矿,使得尾矿 FeO 含量增大;继续延长焙烧时间,由于磁铁矿含量的减少和富氏体含量的增加,使得富氏体还原为方铁矿的速度超过磁铁矿过还原为富氏体的速度,富氏体含量减少,方铁矿含量继续增加,使得尾矿 FeO 质量分数降低。因此,100 min 下的焙烧矿中富氏体含量最多。

综上,在 800 °C 下,经过磁化焙烧,发生了赤铁矿→磁铁矿→富氏体→方铁矿的物相转变。致密富氏体外壳阻碍 Fe^{2+} 和电子通过晶格的空位向内层 Fe_2O_3 扩散,使得磁铁矿的相对厚度层随着时间的延长不能再继续大幅度增加。同时磁铁矿的过还原,导致精矿铁回收率随焙烧时间的延长而减少。

鲕状赤铁矿在短时间磁化焙烧时,磁选精矿的铁物相主要为磁铁矿^[16],为说明自熔性鲕状赤铁矿长时间磁化焙烧时,磁选精矿的铁物相组成,测定 800 °C 下 120 min 和 150 min 磁选精矿的铁物相相对含量,结果如图 6 所示。



1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—富氏体; 4—方铁矿。

图 6 120 min 和 150 min 高温磁化焙烧—磁选精矿的铁物相相对含量

Fig. 6 Relative content of iron phase in 120 min and 150 min high-temperature magnetization roasting magnetic separation concentrate

由图 6 可知, 120 min 和 150 min 磁选精矿的

铁物相中磁铁矿和方铁矿的相对含量最大,同时磁铁矿和方铁矿的相对含量随着焙烧时间的延长而增加。该结果说明部分方铁矿磁性较强,能够被 46 kA/m 的磁场吸引,因此自熔性鲕状赤铁矿在气基高温长时间磁化焙烧时,磁选精矿铁物相主要由磁铁矿和方铁矿组成。

综上所述,得出自熔性鲕状赤铁矿原矿颗粒在 800 °C 下被还原的过程: ① CO 通过赤铁矿边界层向赤铁矿表面扩散、吸附,与表面 Fe_2O_3 反应,在表面生成 Fe_3O_4 及 CO_2 ; ② CO 在表面继续吸附,外层的 Fe^{2+} 和电子通过晶格的空位向内层 Fe_2O_3 扩散,经过晶格重构,转变为磁铁矿 Fe_3O_4 ,而内层 O^{2-} 向外层扩散,与 CO 作用生成 CO_2 脱除; ③ 随着焙烧时间的延长,外层的磁铁矿发生过还原,生成致密富氏体外壳,阻碍磁铁矿层的大幅度加厚; ④ 继续延长焙烧时间,赤铁矿核基本全部被还原为磁铁矿,而富氏体外壳则大部分被还原为方铁矿,磁选精矿的铁物相主要由磁铁矿和方铁矿组成。

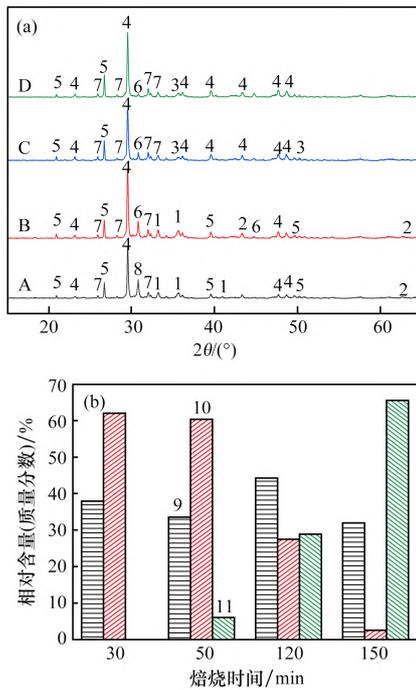
2.2.2 650 °C 磁化焙烧铁物相转化过程及规律分析

不同焙烧时间磁选尾矿的 XRD 图谱及铁物相相对含量如图 7 所示。

由图 7 可知, 650 °C 下,当焙烧时间为 50 min,尾矿 XRD 图谱中开始出现富氏体峰;富氏体相对含量随焙烧时间的延长而增加。结合低温磁化焙烧试验结果可以得出,焙烧过程中赤铁矿核的还原反应随着焙烧时间的延长不断向内层推进。在焙烧时间从 30 min 延长至 120 min 过程中,焙烧矿中赤铁矿过还原为磁铁矿的速度比磁铁矿过还原为富氏体的速度快,使得精矿铁回收率在 30 ~ 120 min 持续增加。焙烧时间继续延长,由于磁铁矿含量的增加和赤铁矿含量的减少,使得磁铁矿过还原为富氏体的速度超过赤铁矿还原为磁铁矿的速度,导致 150 min 精矿铁回收率减小。因此,在 650 °C 下,经过磁化焙烧,发生了赤铁矿→磁铁矿→富氏体→方铁矿的物相转变。

3 结论

(1) 自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧过程中,升高焙烧温度能够减少最佳焙烧时间,提高分选效



(a) 磁选尾矿 XRD 图谱; (b) 磁选尾矿铁物相相对含量
1—赤铁矿; 2—磁铁矿; 3—富氏体; 4—石灰石;
5—石英; 6—白云石; 7—磷灰石; 8—绿泥石;
9—赤铁矿; 10—磁铁矿; 11—富氏体。

图 7 不同焙烧时间磁选尾矿的 XRD 图谱及铁物相
相对含量(焙烧温度为 650 °C)

Fig. 7 XRD patterns and relative iron content of magnetic
separation tailings at low temperature and different
roasting times(roasting temperature:650 °C)

率,同时升高焙烧温度能够提高焙烧矿磁选精矿的铁品位,但会减少磁选精矿的铁回收率。

(2) 800 °C 下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相变化规律:赤铁矿→磁铁矿→富氏体→方铁矿;650 °C 下自熔性鲕状赤铁矿磁化焙烧铁物相变化规律:赤铁矿→磁铁矿→富氏体。

(3) 自熔性鲕状赤铁矿气基高温长时间磁化焙烧时,焙烧矿磁选精矿中的铁主要赋存在磁铁矿和方铁矿中。

参考文献:

[1] ZHOU W T, SUN Y S, HAN Y X, et al. Recycling iron from oolitic hematite via microwave fluidization roasting and magnetic separation [J]. Minerals Engineering, 2021, 164: 106851.
[2] 王普蓉,徐国印. 云南某低品位难选鲕状赤铁矿选矿工艺研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(6): 197-201.

WANG Purong, XU Guoyin. Study on beneficiation process of a low-grade refractory oolitic hematite ore in Yunnan[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(6): 197-201.
[3] ZHOU W T, SUN Y S, HAN Y X, et al. An innovative technology for utilization of oolitic hematite via microwave fluidization roasting: Phase, structure and reaction kinetics analyses[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(6): 757-770.
[4] RAO Z Q, ZHANG Y S, JIN Y C. Improved flotation of oolitic hematite ore based on a novel cationic collector [J]. Advanced Materials Research, 2013, 712: 743-747.
[5] LI W B, LIU D Q, HAN Y X, et al. An innovative study for pretreatment of high-phosphorus oolitic hematite via high-temperature heating: Phase, microstructure, and phosphorus distribution analyses [J]. Advanced Powder Technology, 2023, 34(5): 103996.
[6] ROY S K, NAYAK D, RATH S S. A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation[J]. Powder Technology, 2020, 367: 796-808.
[7] ZHANG H Q, ZHANG P F, ZHOU F, et al. Application of multi-stage dynamic magnetizing roasting technology on the utilization of cryptocrystalline oolitic hematite: A review [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4): 865-876.
[8] 韦东,郭泽,张鹏飞,等. 鄂西某高磷鲕状赤铁矿煤基磁化焙烧—磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2022(4): 90-95.
WEI Dong, GUO Ze, ZHANG Pengfei, et al. Coal based magnetic roasting magnetic separation test study of a high phosphorus oolitic Hematite in western Hubei [J]. Metal Mines, 2022(4): 90-95.
[9] 余洪,谢蕾,殷佳琪,等. 鄂西高磷鲕状赤铁矿磁化还原矿物组成及分布规律[J]. 矿物岩石, 2019, 39(3): 1-8.
YU Hong, XIE Lei, YIN Jiaqi, et al. Composition and distribution of magnetically reduced minerals of high phosphorus oolitic Hematite in western Hubei [J]. Mineral Rocks, 2019, 39(3): 1-8.
[10] 黄红军,胡岳华,杨帆,等. 某复杂难选红铁矿磁化焙烧—磁选工艺及机理研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(6): 38-41.

- HUANG Hongjun, HU Yuehua, YANG Fan, et al. Study on the technology and mechanism of magnetic roasting and separation of a refractory red iron ore [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2010, 30(6): 38 - 41.
- [11] 韩秀丽, 杜亮, 陈前冲, 等. 赤铁矿型烧结矿中不同形态铁酸钙形成规律研究 [J]. *烧结球团*, 2021, 46(5): 1 - 7.
- HAN Xiuli, DU Liang, CHEN Qianchong, et al. Research on formation law of different forms of calcium ferrite in hematite-type sinter [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(5): 1 - 7.
- [12] XIN R F, DU Y, GUO X M. Effect of alumina on crystallization behavior of calcium ferrite in Fe_2O_3 -CaO- SiO_2 - Al_2O_3 system [J]. *Materials*, 2022, 15(15): 5257.
- [13] 韩涛, 胡长庆, 卢超群. 铁矿粉烧结被覆型准颗粒燃烧特性及动力学分析 [J]. *过程工程学报*, 2023, 23(4): 544 - 553.
- HAN Tao, HU Changqing, LU Chaoqun. Combustion characteristics and dynamic analysis of sintered coated quasi particles of iron ore powder [J]. *Journal of Process Engineering*, 2023, 23(4): 544 - 553.
- [14] 欧阳林莉. 山东某低品位微细粒铁矿选矿试验 [J]. *烧结球团*, 2022, 47(2): 81 - 87.
- OUYANG Linli. Mineral processing experiment of a low-grade fine-grained iron ore in Shandong [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(2): 81 - 87.
- [15] 李建, 毛晓明, 熊林. 铁矿石微波烧结试验研究 [J]. *烧结球团*, 2022, 47(1): 80 - 86.
- LI Jian, MAO Xiaoming, XIONG Lin. Experimental study on microwave sintering of iron ore [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(1): 80 - 86.
- [16] 张汉泉, 张鹏飞, 许鑫, 等. 隐晶质鲕状赤铁矿磁化焙烧过程中铁物相转变规律 [J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(10): 1057 - 1066.
- ZHANG Hanquan, ZHANG Pengfei, XU Xin, et al. Iron phase transformation law of cryptocrystalline oolitic hematite during magnetization roasting [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(10): 1057 - 1066.

(上接第 62 页)

- [8] 白志城, 魏子赫, 谢文卓, 等. 基于图像处理的球团矿粒度检测系统及分割算法研究 [J]. *烧结球团*, 2021, 46(5): 41 - 46.
- BAI Zhicheng; WEI, WEI Zihe, XIE Wenzhuo, et al. Research on pellet particle size measurement system and segmentation algorithm based on image processing [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2021, 46(5): 41 - 46.
- [9] 李艺萌, 刘丕亮, 贾星月. 基于图像处理的生球粒度检测研究 [J]. *电工技术*, 2022(22): 18 - 20.
- LI Yimeng, LIU Piliang, JIA Xingyue. Research on particle size detection of green balls based on image processing [J]. *Electric Engineering*, 2022(22): 18 - 20.
- [10] WU X, LIU X Y, DUAN J X. Online size distribution measurement of dense iron green pellets using an efficient and multiscale nested U-Net method [J]. *Powder Technology*, 2021, 387: 584 - 600.
- [11] ZHANG B H, QI S L, WU Y N, et al. Multi-scale segmentation squeeze-and-excitation UNet with conditional random field for segmenting lung tumor from CT images [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2022, 222: 106946.
- [12] PORTAZ M, KOHL M, CHEVALLET J P, et al. Object instance identification with fully convolutional networks [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(3): 2747 - 2764.
- [13] ZHANG C Q, CHEN X D, JI S Y. Semantic image segmentation for sea ice parameters recognition using deep convolutional neural networks [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 112: 102885.
- [14] CARRARO A, SOZZI M, MARINELLO F. The Segment Anything Model (SAM) for accelerating the smart farming revolution [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2023, 6: 100367.
- [15] MAZUROWSKI M A, DONG H Y, GU H X, et al. Segment anything model for medical image analysis: An experimental study [J]. *Medical Image Analysis*, 2023, 89: 102918.
- [16] LUO S, PAN L, JIAN Y M, et al. CTBANet: Convolution transformers and bidirectional attention for medical image segmentation [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 88: 133 - 143.