

鲕状赤铁矿悬浮焙烧试验研究

陈超^{1,2}, 李艳军², 张裕书¹, 王儒², 韩跃新²

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所 钒钛磁铁矿综合利用重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:研究对象为典型的“宁乡式”鲕状赤铁矿,属微细粒嵌布高磷鲕状赤铁矿,TFe品位44.56%。利用自制的实验室间歇式悬浮焙烧炉,考察了给矿细度、气流速度、H₂浓度、焙烧温度、焙烧时间等对悬浮焙烧的影响,在适宜的条件下,获得了TFe品位56.73%,回收率83.96%的较优指标。相比于马弗炉焙烧,悬浮焙烧可以缩短焙烧时间,提高焙烧产品质量,降低焙烧能耗,具有较强的推广意义。

关键词:鲕状赤铁矿;磁化焙烧;流态化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2013.06.008

中图分类号:TD951 文献标识码:A 文章编号:1000-6532(2013)06-0030-05

随着我国钢铁工业的飞速发展,铁矿石的需求量越来越大,致使多数大型钢铁企业不得不高价从国外购买矿石,2011年全年我国累计进口铁矿石6.86亿t,同比增长10.9%。进口铁矿石均价达到163.84\$/t,同比增长27%,铁矿进口对外依存度高达56.4%^[1]。我国的鲕状赤铁矿储量极为丰富^[2-3],此类铁矿储量高达30亿~50亿t,占我国铁矿资源总量的1/9,至今未被很好的开发利用。在我国铁矿石需求量大,难选铁矿资源丰富但未开发利用的情况下,研究鲕状赤铁矿的开发利用技术,增强国内铁矿石的供给能力,对有效抑制铁矿石价格的上涨,促进国民经济持续、健康、协调发展,具有十分重要的战略意义。

1 试验原料和研究方法

1.1 试验原料

试验原料为典型性的“宁乡式”鲕状赤铁矿,原矿化学多项分析和铁物相分析结果分别见表1、2。

由表1、2可以看出,原矿含铁矿物主要分布在赤褐铁矿中,有害杂质硫的含量很低,但磷的含量较高,属低硫高磷的单一酸性矿石。工艺矿物学研究

结果表明,矿石中主要矿物有赤铁矿、石英、方解石、鲕绿泥石,其次为胶磷矿、菱铁矿、褐铁矿、长石、伊利石、黑云母、白云石等。主要工业利用的赤褐铁矿单晶粒度0.002~0.007mm,与鲕绿泥石、部分胶磷矿紧密镶嵌成集合体出现,不可能单体解离进行选别,只能以赤褐铁矿集合体为选别对象。

表1 原矿化学多项分析结果/%

Table 1 The analysis results of the multi-elements of the raw ore

TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	P	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃
44.56	2.63	60.69	1.02	0.041	13.22	6.58
CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	C	TFe/FeO
5.42	0.94	0.43	0.082	0.25	2.39	16.94

表2 原矿铁物相分析结果

Table 2 The analysis results of iron phase

成分	磁性铁*	菱铁矿	氧化铁*	硫铁矿	硅酸铁	合计
含量/%	0.016	0.67	43.29	0.2	0.13	44.306
分布率%	0.04	1.51	97.71	0.45	0.29	100.00

* 磁性铁:磁铁矿,磁黄铁矿;氧化铁:赤铁矿,褐铁矿。

试验所用还原剂为H₂,保护剂为N₂,纯度为99.99%。马弗炉磁化焙烧过程中所用煤的成分分析结果见表3,煤样的固定碳含量相对较高,为70。

收稿日期:2013-07-17

基金项目:中国地质大调查资助项目鲕状赤铁矿高效清洁利用技术试验研究(1212011120317);矿用悬浮焙烧炉的研制(1212011120311)

作者简介:陈超(1987-),男,硕士研究生,主要从事复杂难选铁矿流态化磁化焙烧技术研究。

44%,煤中灰分为11.50%,挥发份为17.28%。

表3 煤的成份分析/%

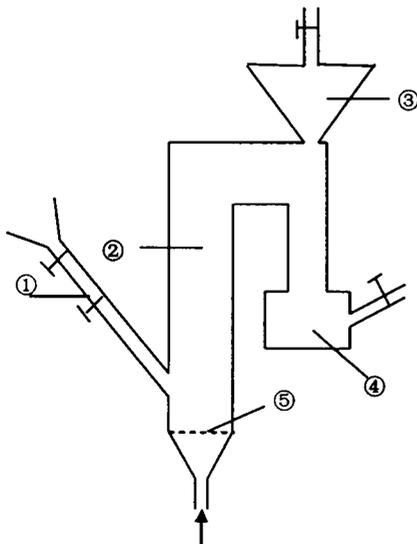
Table 3 The composition of coal

挥发份	C 固定	灰分	S
17.28	70.44	11.50	0.78

1.2 研究方法

1.2.1 悬浮焙烧试验研究

在实验室间歇式悬浮焙烧炉中进行悬浮焙烧试验研究。先向焙烧炉中通入 N₂ 以排净其中空气,并在给矿停留管中给人 50g 磨到一定细度的鲕状赤铁矿。当悬浮焙烧炉的温度达到预定反应温度后,预热后的 N₂ 和 H₂ 按照一定比例和流量通入间歇式悬浮焙烧炉中,同时从给矿管中给人鲕状赤铁矿进行悬浮焙烧工艺试验研究,焙烧矿在氮气保护气氛下进行冷却。缩分取样后剩余矿样装入给矿管中可以再次进行焙烧。将取出的焙烧熟料磨至 -0.074mm 95%,在磁场强度为 85.1kA/m 的条件下进行磁选管磁选试验。间歇式悬浮焙烧炉示意图见图 1。



①给矿停留管; ②主炉体; ③收尘装置;
④收料装置; ⑤分布板

图1 间歇式悬浮焙烧炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intermittent suspension roaster

该装置有如下特点:(1)物料悬浮于气相中,分散状态较好,充分与气体接触,产品质量均匀;(2)物料比表面积大,反应速度快,反应过程中传热、传质均匀,能耗低;(3)温度和气流分布均匀,调节控

制方便;(4)无运转部件,装卸料容易,检修方便。

1.2.2 马弗炉磁化焙烧试验研究

焙烧之前将研磨到一定细度的物料与煤粉混匀,在达到预定温度后,将混合物料加盖后放入马弗炉中进行焙烧,焙烧完成后将焙烧物料进行水淬,烘干后称重。将焙烧料细磨至 -0.074mm 95%,在磁场强度为 85.1kA/m 的条件下进行磁选管磁选试验。

2 结果和讨论

给矿细度、气流速度、H₂ 浓度、焙烧温度、焙烧时间是影响焙烧-磁选指标的几个关键因素,本研究采用多因素逐项试验的方法对上述 5 个因素进行了试验。并与马弗炉为焙烧装置、用煤作还原剂的焙烧-磁选结果做了对比试验。

2.1 给矿细度试验

试验固定条件:气流速度 2.1m/s, H₂ 浓度 30%,焙烧温度 650℃,焙烧时间 15s。给矿细度对焙烧-磁选指标的影响试验结果见图 2。

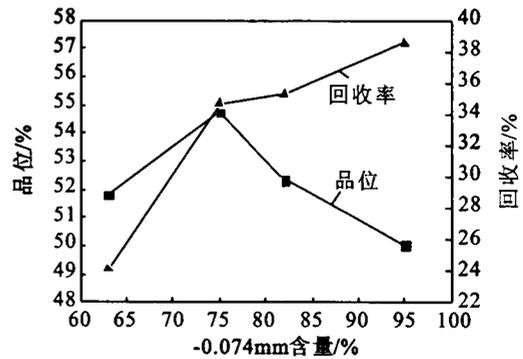


图2 给矿细度对焙烧-磁选指标的影响

Fig. 2 The effect of grinding fineness on the index of roasting-magnetic separation

从图 2 可以看出,当 -0.074mm 含量低于 75% 时,精矿品位呈上升趋势,超过 75% 时,精矿品位呈下降趋势,回收率随着给矿细度的增加而逐渐增加。当粒度过粗时,反应不够充分,品位和回收率都偏低;粒度过细,物料的比表面积增加,反应速率加快,回收率增加,但由于粒度过细,在炉内的停留时间更短,反应不够充分,从而导致精矿品位下降。综合考虑,选择给矿细度 -0.074mm 75%。

2.2 气流速度试验

试验固定条件:给矿 -0.074mm 75%, H₂ 浓度

30%，焙烧温度 650℃，焙烧时间 15s。考察了给入气流速度，对焙烧-磁选指标的影响，结果见图 3。

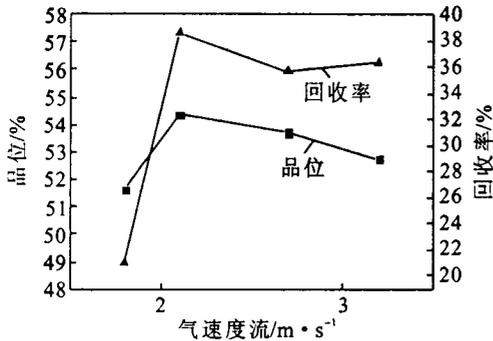


图 3 气流速度对焙烧-磁选指标的影响

Fig. 3 The effect of airflow velocity on the index of roasting-magnetic separation

当气流速度低于 2.1m/s 时，精矿品位和回收率随着气流速度的增加而升高，当气流速度超过 2.1m/s 时，精矿品位和回收率随着气流速度的增加而降低。当气流速度较小时，焙烧炉内形成鼓泡流态化状态^[4]，使焙烧矿在流化床内停留时间不均匀，导致焙烧矿产品质量不均匀，当气流速度达到一定值时，焙烧炉内形成快速流态化状态，这时焙烧矿在炉内停留时间较均匀，产品质量均匀，但是，总气量过大时，气流流速过快，物料在焙烧炉内停时间过短而导致还原不够充分。综合考虑，给入气流速度确定为 2.1m/s。

2.3 H₂ 浓度试验

试验固定条件：给矿-0.074mm 75%，气流速度 2.1m/s，焙烧温度 650℃，焙烧时间 15s。炉内 H₂ 浓度对焙烧-磁选指标的影响试验结果见图 4。

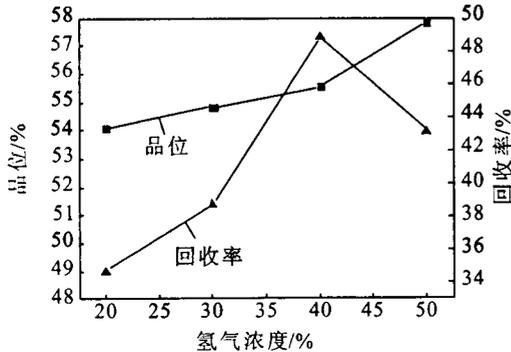


图 4 H₂ 浓度对焙烧-磁选指标的影响

Fig. 4 The effect of H₂ concentration on the index of roasting-magnetic separation

图 4 结果表明，随着 H₂ 浓度的增加，精矿品位

逐渐增加，回收率先增加后降低。这是因为在较强的还原气氛中，还原速率更快。但是当 H₂ 浓度超过 40% 以后，回收率下降较多，将发生如下化学反应^[5]： $Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO + H_2O$ ，即有弱磁性的 Fe₃O₄-FeO 固溶体生成，从而使回收率下降。

2.4 焙烧温度试验

试验固定条件：给矿-0.074mm 75%，气流速度 2.1m/s，H₂ 浓度 40%，焙烧时间 15s。焙烧温度对焙烧-磁选指标的影响试验结果见图 5。

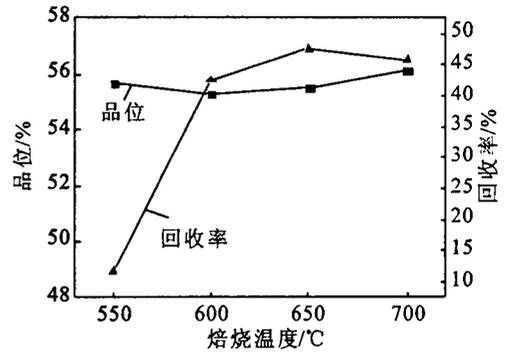


图 5 焙烧温度对焙烧-磁选指标的影响

Fig. 5 The effect of roasting temperature on the index of roasting-magnetic separation

从图 5 可以看出，随着反应温度的升高，精矿品位变化不大，回收率逐渐增加，温度超过 650℃ 时，回收率变化不明显。这是因为温度越高，反应速度越快，使回收率增加，但是当温度达到 700℃ 时，也会生成弱磁性的 Fe₃O₄-FeO，使回收率下降。

2.5 焙烧时间试验

试验固定条件：给矿-0.074mm 75%，气流速度 2.1m/s，H₂ 浓度 40%，焙烧温度 650℃。焙烧时间对焙烧-磁选指标的影响试验结果见图 6。

试验结果表明，在给矿细度-0.074mm 75%，气流速度为 2.1m/s，焙烧温度 650℃ 的试验条件下，根据流态化理论，在雷诺数 $Re = 2000 \sim 200000$ 范围内，颗粒的终端速度^[4]为：

$$U_t = 1.74 \left(\frac{gd_p(\rho_s - \rho_f)}{K_2 \rho_f} \right)^{0.5}$$

式中： U_t 为颗粒终端速度，m/s； g 为重力加速度，m/s²； d_p 为颗粒直径，m； ρ_s 为物料密度，kg/m³； ρ_f 为流体密度，kg/m³； K_2 为修正系数，且 $K_2 = 5.31 - 4.88\Phi_0$ ； Φ_0 为球形系数。

计算得出颗粒的终端速度为 0.22m/s，最终计

算出焙烧一次颗粒在悬浮炉内停留时间约为 15s。

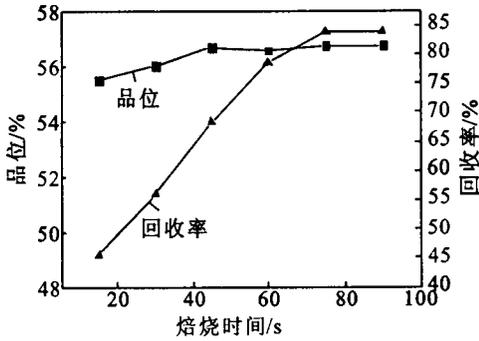


图6 焙烧时间对焙烧-磁选指标的影响

Fig. 6 The effect of roasting time on the index of roasting-magnetic separation

从图6可以看出,随着反应时间的增加,精矿品位变化不大,回收率逐渐增加,反应时间越长,铁矿被还原越充分,当焙烧时间超过75s时,回收率已经趋于平稳,此时已基本达到了反应的极限。

2.6 马弗炉焙烧试验

在焙烧温度 800℃、配煤量 11%、焙烧时间 20min 的条件下考察了给矿细度对焙烧-磁选指标的影响,图7所示试验结果表明随着磨矿细度(-0.074mm 含量)的增加,磁选精矿品位和回收率随着磨矿细度的增加而增加,当磨矿细度达到-0.074mm 75%后精矿品位和回收率下降。综合考虑,确定磨矿细度为75%。

在磨矿细度 75%、配煤量 11%、焙烧时间 20min 的条件下,选取不同焙烧温度在实验室马弗炉中进行磁化焙烧试验。图8所示试验结果表明马弗炉磁化焙烧温度在800℃时取得较佳指标。

在磨矿细度 75%、焙烧时间 20 min、焙烧温度 800℃的条件下,选取不同配煤量进行马弗炉磁化焙烧试验。图9结果表明随着配煤量的增加,焙烧产品磁选精矿品位基本保持不变,而磁选精矿回收率先增加后降低,综合考虑,确定配煤量为11%。

在磨矿细度-0.074mm75%、配煤量 11%、焙烧温度 800℃的条件下,考察了不同焙烧时间对马弗炉磁化焙烧的影响。图10所示试验结果表明随着焙烧时间的增加,焙烧产品磁选精矿品位和回收率增加,当焙烧时间达到30min后磁选精矿品位和回收率下降,故确定焙烧时间为30min。

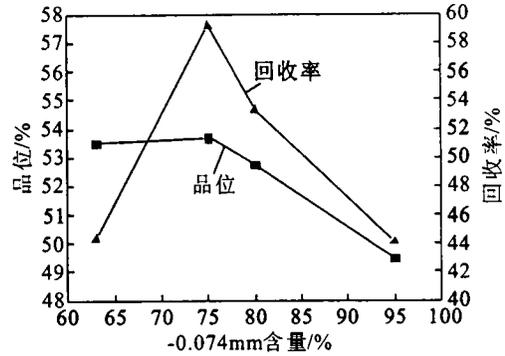


图7 给矿细度对马弗炉焙烧-磁选指标的影响

Fig. 7 The effect of feeding fineness on the index of muffle furnace roasting-magnetic separation

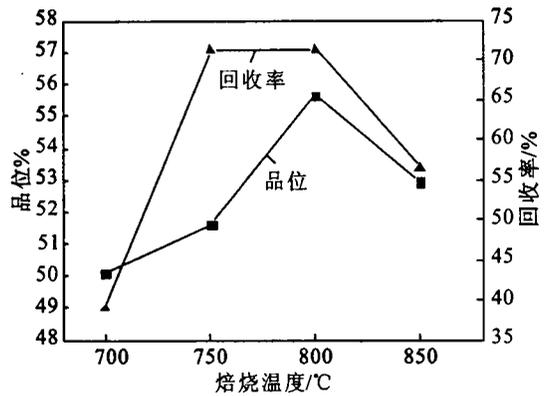


图8 焙烧温度对马弗炉焙烧-磁选指标的影响

Fig. 8 The effect of roasting temperature on the index of muffle furnace roasting-magnetic separation

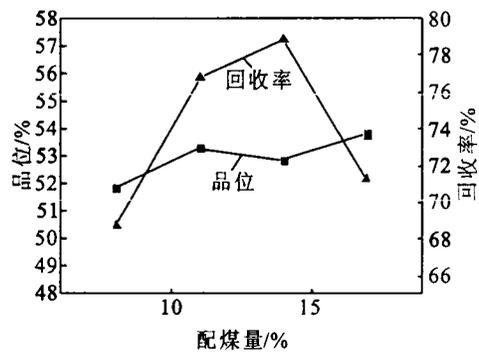


图9 配煤量对马弗炉焙烧-磁选指标的影响

Fig. 9 The effect of the dosage of coal on the index of muffle furnace roasting-magnetic separation

综上所述,马弗炉磁化焙烧试验在磨矿细度-0.074mm 75%、配煤量 11%、焙烧温度 800℃,焙烧时间 30min 时,经过一次弱磁选,可以获得 TFe 品位 54.90%,回收率 72.74% 的最优指标。

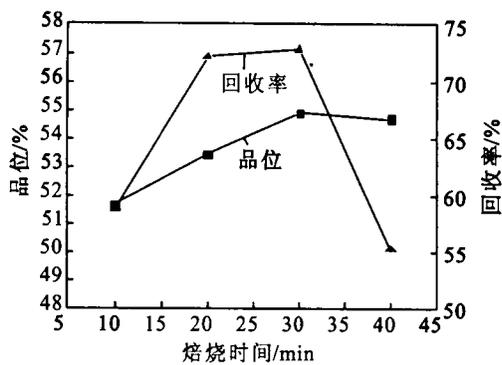


图 10 焙烧时间对马弗炉焙烧-磁选指标的影响

Fig. 10 The effect of roasting time on the index of muffle furnace roasting-magnetic separation

2.7 悬浮焙烧与马弗炉焙烧试验结果比较

从以上试验可以看出,相同的矿石利用悬浮炉焙烧-磁选工艺,可以取得 TFe 品位 56.73%,回收率 83.96% 的最优指标,马弗炉焙烧-磁选取得了 TFe 品位 54.90%,回收率 72.74% 的最优指标。悬浮炉焙烧时间只需要 75s 左右,而马弗炉则需要 30min。可见,悬浮焙烧不仅可以很好的提高焙烧指标,还能大大缩短焙烧时间,降低焙烧能耗。

3 结 论

(1) 试验用鲕状赤铁矿主要含铁矿物为赤褐铁

矿,单晶粒度 0.002 ~ 0.007mm,与鲕绿泥石、部分胶磷矿紧密镶嵌成鲕粒出现,不可能单体解离进行选别,只能以含鲕绿泥石等的赤褐铁矿集合体为选别对象。

(2) 利用悬浮焙烧炉设备,在给矿细度 -0.074mm 75%,气流速度 2.1m/s, H₂ 浓度 40%,焙烧温度 650℃,焙烧时间约 75s 左右的条件下,经过一次弱磁选,可以获得 TFe 品位 56.73%,回收率 83.96% 的最优指标。

(3) 与马弗炉焙烧对比试验可以看出,悬浮焙烧不仅可以提高焙烧产品选铁指标,还能大大缩短焙烧时间,具有广阔的开发应用前景。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 2011 年国土资源公报[Z]. 2012-05-10.
- [2] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山, 2006(3): 11-13.
- [3] 童雄, 黎应书, 周庆华, 等. 难选鲕状赤铁矿石的选矿新技术试验研究[J]. 中国工程科学, 2005(7): 324-326.
- [4] 黎强, 邱宽嵘, 丁玉. 流态化原理及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [5] 朱家骥, 朱俊士, 张闯, 等. 中国铁矿选矿技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

Study on Suspension Roasting for Oolitic Hematite

CHEN Chao^{1,2}, LI Yan-jun², ZHANG Yu-shu¹, WANG Ru², HAN Yue-xin²

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, the Key Lab of Vanadium Titanium Magnetite Multipurpose Utilization, Chengdu, Sichuan, China;

2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Liaoning, Shenyang, China)

Abstract: The fine-disseminated high phosphorus oolitic hematite with a TFe grade of 44.56% was researched by the homemade laboratory batch-type suspension roaster. The feeding fineness, gas velocity, hydrogen concentration, roasting temperature, roasting time were investigated and at an appropriate condition, the optimal index with a TFe grade of 56.73% and a recovery of 83.96% was achieved. Compared with a muffle furnace, the suspension roaster can shorten roasting time, improve product quality and reduce roasting energy consumption with a high popularizing significance.

Key words: Oolitic hematite; Magnetic roasting; Fluidization.