

文章编号:1674-2869(2014)011-0012-06

冷却方式对焙烧鲕状赤铁矿磨矿性能影响

张汉泉,付金涛,路漫漫,李雪强,詹忠杰

武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074

摘 要:鲕状赤铁矿有用矿物嵌布粒度细,磨矿成本高,属于典型难选铁矿石。磁化焙烧—磁选工艺是分选此类难选铁矿石的有效方法,研究了不同冷却方式对磁化焙烧矿的磨矿性能产生的影响。鲕状赤铁矿进行磁化焙烧后分别隔绝空气密闭冷却、水淬及空气中自然冷却,进行粒度筛析和磨矿试验。发现焙烧后矿石粒径变粗,从原矿的平均粒径为 0.069 9 mm 至密闭冷却、水冷和自然冷却焙烧矿的 0.088 2 mm、0.084 3 mm、0.087 0 mm。相同磨矿条件下,原矿、密闭冷却焙烧矿、水冷焙烧矿和自然冷却焙烧矿—0.045 mm 含量分别为 84.89%、83.89%、76.51%、77.14%。表明磁化焙烧使鲕状赤铁矿变得更为难磨,密闭冷却时磨矿效果最佳,自然冷却次之,水冷最差。

关键词:鲕状赤铁矿;磁化焙烧;磨矿;冷却方式

中图分类号:TD981

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.011.003

0 引 言

宁乡式沉积型鲕状赤铁矿主要分布在我国湖北、湖南、四川、贵州等地,已探明的工业储量达 30 多亿 t^[1]。鲕状赤铁矿是目前国内外公认的最难选的铁矿石之一。鲕状赤铁矿的化学成分为 Fe_2O_3 ,属三方晶系的氧矿物,与等轴晶系的磁铁矿成同质多象^[2]。因其典型的鲕状、肾状结构,矿物嵌布粒度极细很不利于矿石的单体解离^[3]、原矿性质复杂^[4]等特点,长期以来被认为是“呆矿”。国内外鲕状赤铁矿选矿研究包括脱磷、脱硫、脱硅、反浮选、选择性聚团-反浮选、高梯度磁选、直接还原法、酸浸、焙烧、新设备和新技术等^[5]。鄂西鲕状赤铁矿储量丰富,目前开发利用难度大。对于这部分难选矿石,由于嵌布粒度极细,不易单体解离,磁化焙烧-磁选是目前选别此类矿石最高效的途径^[6-7],磁化焙烧将其中的非磁性物质还原为磁性物质,进而通过磁选进行选别。磁化焙烧不仅改变了该铁矿的磁性,将 Fe_2O_3 还原成 Fe_3O_4 ,铁矿可磨性也会发生变化^[8]。冷却介质和冷却速度^[9]对焙烧矿选矿效果有重要影响,目前焙烧矿都采用水淬冷,可以防止新生成的磁铁矿接触空气发生氧化^[10],但用水量大,不适用于缺水地区。由于冷却介质与高温焙烧矿表面直接接触可能发生反应,而对矿物表面性质产生影响,从而对磨矿产生影

响,本文研究了鄂西鲕状赤铁矿磁化焙烧前后可磨性的变化情况以及不同冷却方式对焙烧矿磨矿的影响,以期选择适宜的冷却方法。

1 矿石性质分析

鄂西鲕状赤铁矿全铁品位为 43.76%,最主要的铁矿物是赤铁矿,占全铁的 95.11%,微细的赤铁矿呈细脉状、网脉星散状的形式嵌布在脉石中,嵌布粒度 0.01~0.07 mm,故传统的物理选矿方法较难选别。脉石矿物以石英(见图 1)为主,有害元素磷含量很高,占 0.84%,远高于炼钢炼铁对磷含量的要求,因此开发此类矿石的重难点在于提高铁品位和降低磷的含量。由于磷主要以磷灰石形式存在(见图 2),以不规则团块状、环状等形式与赤铁矿鲕粒共生,共生关系复杂。

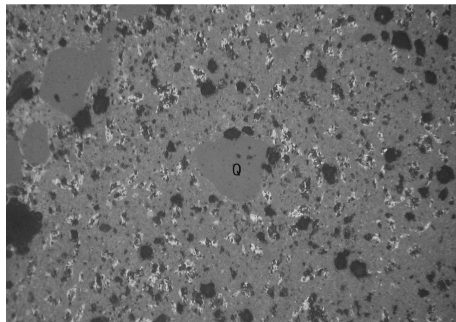


图 1 微细的赤铁矿(白色)弥散分布在石英(Q)中

Fig. 1 Fine hematite (white) distributed in quartz($d=2$ mm)

收稿日期:2014-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51474161);武汉工程大学校长基金(2014036)

作者简介:张汉泉(1971-),男,湖北浠水人,副教授,博士。研究方向:黑色金属矿石加工、造块工艺。

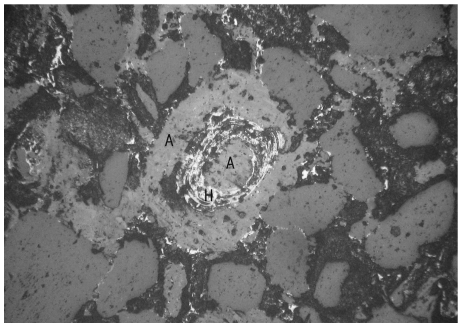


图 2 胶磷矿(A)、石英和带状赤铁矿(H)紧密共生
Fig. 2 Collophane, quartz and stripe hematite(H)
intergrowth closely($d=2\text{ mm}$)

2 实验过程

根据文献[11]的研究成果,鄂西鲕状赤铁矿磁化焙烧的条件选择为还原粉煤配比 8%,温度为

750 ℃,保温 60 min. 分别在密闭、水冷和自然冷却 3 种方式下冷却焙烧矿,冷却后筛析. 再分别焙烧,冷却,进行磨矿试验,磨矿时间为 5、8、11、14、17 min,水筛筛析. 应重点描述 3 种冷却方式及冷却过程,特别是密闭冷却和自然冷却,如:是否隔绝空气,冷却速度,及不同速度下的冷却效果.(注:密闭冷却是将产品和容器一起埋入湿煤中隔绝空气冷却;水冷是直接将焙烧产品倒入冷水中;自然冷却是将产品拿出焙烧炉,置于空气中冷却.)

3 实验结果与讨论

3.1 试样磁化焙烧的效果

原矿焙烧矿铁物相分析结果见表 1.

表 1 原矿、焙烧矿铁物相分析结果
Table 1 Iron mineral phase analysis on oolitic hematite and roasted ore

样品	铁 相	磁性铁之铁	菱铁矿之铁	赤褐铁矿之铁	硫化铁之铁	硅酸铁之铁	TFe/%
原矿	铁质量分数/%	0.20	0.19	41.62	0.03	1.72	43.76
	铁分布率/%	0.46	0.44	95.11	0.06	3.93	100.00
焙烧矿	铁质量分数/%	39.70	0.14	3.36	0.14	0.02	43.36
	铁分布率/%	91.56	0.32	7.75	0.32	0.05	100.00

由表 1 可见,原矿经焙烧后,磁性铁含量明显增多,由 0.20%增长到了 39.70%,磁性铁分布率也由原来的 0.46%增长到 91.56%,说明焙烧磁化效果明显,这将有利于磁选选别. 从焙烧矿外观

看,自然冷却时,产品有所氧化,表面呈浅红色. 水冷时冷却速度最快,密闭冷却时冷却速度最慢.

3.2 焙烧前后矿石粒度分析

对原矿、焙烧矿粒度组成分析结果见表 2.

表 2 原矿、焙烧矿粒度筛析
Table 2 Size screening results of crude ore and roasted ore

粒级/mm	原矿/%		密闭冷却/%		水冷/%		自然冷却/%	
	γ_i , 产率	铁分布率	γ_i , 产率	铁分布率	γ_i , 产率	铁分布率	γ_i , 产率	铁分布率
+0.250	41.05	41.17	50.35	48.86	46.70	46.34	49.98	50.86
−0.250+0.150	14.95	16.30	14.13	15.03	15.14	16.10	13.04	13.37
−0.150+0.106	9.08	8.79	7.70	7.16	9.03	8.43	8.93	8.56
−0.106+0.075	5.56	5.17	4.58	4.42	5.04	4.62	4.16	3.80
−0.075+0.045	5.29	5.18	5.74	5.97	5.76	5.76	6.14	5.97
−0.045	24.07	23.39	17.50	18.55	18.34	18.74	17.75	17.43
平均粒径 d_p /mm	0.069 9		0.088 2		0.084 3		0.087 0	

注:调和平均粒径 $d_p=1/[\sum(\gamma_i/d_i)]$; $d_i=\sqrt{d_n d_{n+1}}$; d_n 、 d_{n+1} 分别为粒级上下限尺寸, γ_i 为各粒级的产率[12].

由表 2 可知,经过焙烧之后,颗粒平均粒径由 0.069 9 mm 增加到 0.08 mm 以上,且粗粒级增多,细粒级减少,以+0.25 mm 为例,原矿含量为 41.05%,而焙烧后含量均在 46%以上;对于−0.045 mm,原矿含量为 24.07%,焙烧矿含量

均在 17%左右. 焙烧后铁元素向粗颗粒中富集,如原矿中+0.25 mm 中铁分布率为 41.17%,焙烧后+0.25 mm 中铁分布率均大于 46%. 由粒度分析可知,焙烧后矿石粒度变化规律相同,即平均粒径增大,粗颗粒增多,细颗粒减少.

3.3 不同冷却方式对磨矿效果的影响

根据已有的报道,鄂西鲕状赤铁矿选矿磨矿的最佳粒度范围为-0.045 mm80%以上^[13-15],故选择-0.045 mm 进行磨矿结果比较.由图 3 可知,原矿磨矿曲线自始至终都高于其他曲线,说明鄂西鲕状赤铁矿经过磁化焙烧后可磨性变差.由图 4 可知,密闭冷却磨矿效果相对较好,如磨矿 14 min 时,密闭冷却、水冷、自然冷却-0.045 mm 含量分别为 83.89%、76.51%、77.14%,水冷和自然冷却的磨矿效果基本相同.

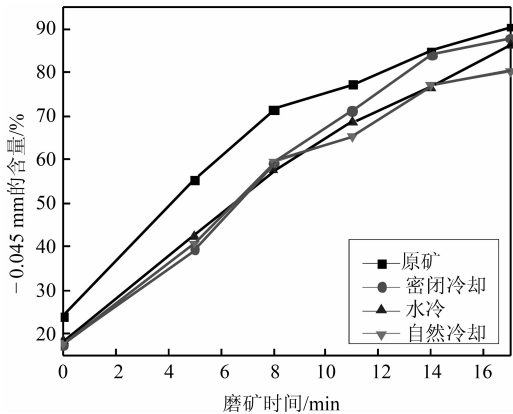


图 3 原矿、焙烧矿磨矿曲线

Fig. 3 Grinding curve of crude ore and roasted ore

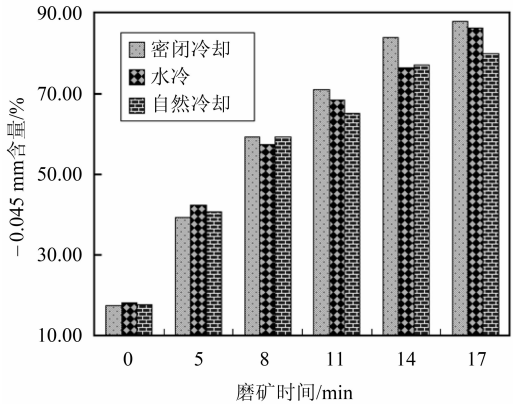


图 4 冷却方式对磨矿的影响

Fig. 4 Grinding result of different roasted cooling methods

3.4 结果讨论

a. 扫描电镜形貌分析结果见图 5~图 8,从总体看,鲕状赤铁矿经焙烧后粗颗粒粒径增大且含量增多,这是焙烧加热过程中细颗粒软化、萎缩产生少量液相,导致颗粒间粘结所致^[16],焙烧加入了矿石量 8% 的煤粉,煤的灰分为 25.06%,可排除煤粉对粒度及粒度分布的影响.一般而言,矿石经过焙烧后,会变得疏松多孔,可磨性会得以提高,变得更容易磨,而本试验中鄂西鲕状赤铁矿经过磁化焙烧后,反而更难磨,可磨性降低,原因是鲕状赤铁矿经过磁化焙烧后,矿物成分由赤铁矿转变为了磁铁矿,其莫氏硬度由鲕状赤铁矿的 2~4

变成了磁铁矿的 5.5~6.5^[7],硬度升高很多,而原矿烧失仅为 3.57%,焙烧过程中分解,蒸发跑掉的成分少,矿石疏松性变化小,从图 6~图 8SEM 照片看,矿石疏松性基本无变化,且焙烧后矿物颗粒变粗也可能使矿石结构变的致密^[4],故而焙烧后矿石可磨性降低.

b. 观察图 6~图 8 可知,焙烧矿经密闭冷却后比经水冷和自然冷却后颗粒要粗且含量也多,这与筛析结果一致,其平均粒径分别为 0.088 2 mm、0.084 3 mm、0.087 0 mm,+0.25 mm 含量分别为 50.35%、46.7%和 49.98%,在磨矿曲线中随着粒径的变小斜率越小,磨矿效率越低,故粒径较粗的密闭冷却的焙烧矿磨矿效率要高一些.由表 3 可见,原矿密度最大,且冷却方式不同,焙烧矿密度存在差别,密闭冷却密度最小、水冷最大、自然冷却居中,且分别为 3.356 g/cm³、3.456 g/cm³、3.384 g/cm³.由于矿石密度越大矿石就越致密,所以密闭冷却的焙烧矿磨矿效果最好,水冷和自然冷却相当,且自然冷却稍微好磨.

表 3 焙烧矿密度

Table 3 The specific gravity of roasted ore

冷却方式	原矿	密闭冷却	水冷	自然冷却
密度/(g/cm ³)	3.657	3.356	3.456	3.384

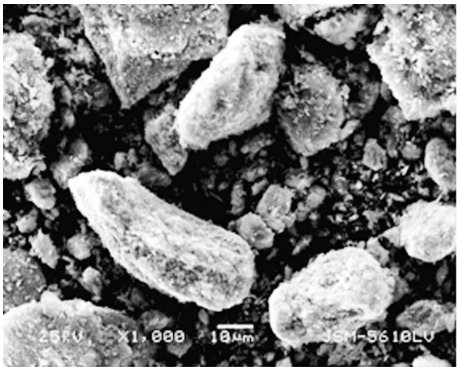


图 5 鲕状赤铁矿 SEM 照片(×1000)

Fig. 5 SEM images of oolitic hematite

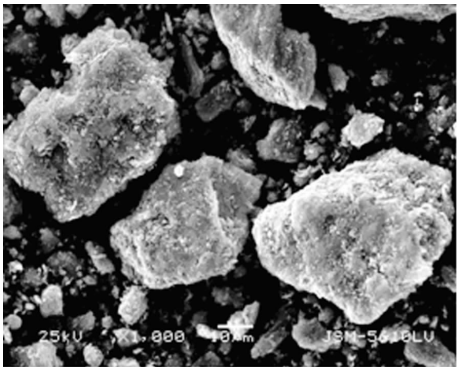


图 6 密闭冷却焙烧矿 SEM 照片(×1000)

Fig. 6 SEM images of roasted ore by closed cooling

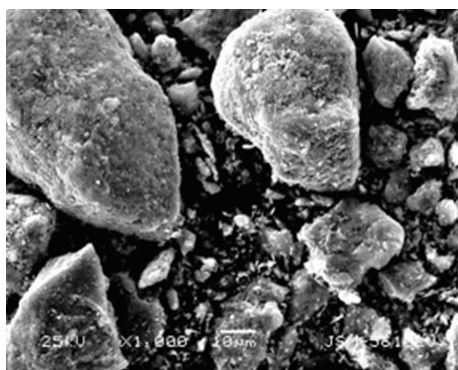
图 7 水冷焙烧矿 SEM 照片 ($\times 1000$)

Fig. 7 SEM images of roasted ore by water cooling

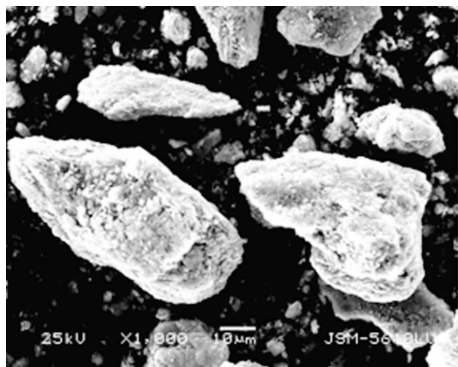
图 8 自然冷却焙烧矿 SEM 照片 ($\times 1000$)

Fig. 8 SEM images of roasted ore by air cooling

4 结 语

a. 鄂西鲕状赤铁矿铁品位为 43.76%，赤铁矿嵌布粒度细，为 0.01~0.07 mm。单体解离困难，可能使其过磨、泥化，所以选别此类矿石的关键是磨矿的研究。

b. 鄂西鲕状赤铁矿焙烧后，矿石变粗，如原矿、密闭冷却、水冷和自然冷却焙烧矿的平均粒径分别为 0.069 9 mm、0.088 2 mm、0.084 3 mm、0.087 0 mm。且矿物中粗颗粒增多，细颗粒减少，以 +0.25 mm 含量为例，原矿为 41.05%，而焙烧后含量均在 46% 以上；-0.045 mm 含量，原矿为 24.07%，焙烧矿含量均在 18% 左右。焙烧后铁元素向粗颗粒中富集，如原矿中 +0.25 mm 中铁分布率为 41.17%，焙烧后 +0.25 mm 中铁分布率均大于 46%。

c. 鄂西鲕状赤铁矿经过磁化焙烧后可磨性变差，3 种冷却方式中密闭冷却磨矿效果最好，如磨矿 14 min 时，密闭冷却、水冷、自然冷却 -0.045 mm 含量分别为 83.89%、76.51%、77.14%，水冷和自然冷却的磨矿效果基本相同，由于水冷消耗水量大，自然冷却会导致焙烧矿表面新生成的赤铁矿被 O_2 氧化而磁性降低，综合考虑鄂西鲕状赤铁矿焙烧矿应该采用密闭冷却。

致 谢

感谢中国国家自然科学基金委员会和武汉工程大学的经费支持，感谢武汉工程大学矿物加工实验室齐全的试验设施与浓厚的科研氛围。

参考文献:

- [1] 左倩, 王一, 田赋, 等. 鄂西某鲕状赤铁矿焙烧磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2008(8): 36-38.
ZUO Qian, WANG Yi, TIAN Fu, et al. Experimental study on the beneficiation of an oolite iron ore from Western Hubei by roasting-magnetic separation [J]. Metal Mine, 2008(8): 36-38. (in Chinese)
- [2] 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): 323-325.
TONG Xiong, LI Ying-shu, ZHOU Qing-hua, et al. Experiment of refractory oolitic hematite with ore processing[J]. Engineering Science, 2005(7): 323-325. (in Chinese)
- [3] 张锦瑞, 胡力可, 梁银英, 等. 难选鲕状赤铁矿的研究利用现状及展望[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 74-76.
ZHANG Jin-rui, HU Li-ke, LIANG Yin-ying, et al. The research on refractory oolitic hematite and expectation[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(7): 74-76. (in Chinese)
- [4] 陈敏. 鄂西鲕状赤铁矿磁化焙烧-弱磁选-反浮选工艺及焙烧性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
CHEN Min. Study on magnetizing roasting-low intensity magnetic separation reverse flotation process and roasting properties of oolitic hematite in Western Hubei[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 孙志勇. 鄂西鲕状赤铁矿磁化焙烧-金属化焙烧工艺选矿试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
SUN Zhi-yong. Experimental research on Exi oolitic hematite with magnetic roasting and metallic roasting processes[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 郑贵山. 鄂西高磷鲕状赤铁矿分选的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
ZHENG Gui-shan. The study of beneficiating process of West Hubei high phosphorus oolitic hematite[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)
- [7] 邱俊, 吕宪俊, 陈平, 等. 铁矿选矿技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 141-154.
QIU Jun, LÜ Xian-jun, CHEN Ping, et al. Iron ore

- dressing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012:141-154. (in Chinese)
- [8] 颜亚梅, 李茂林, 崔瑞, 等. 磁化焙烧对鄂西铁矿磨矿性能的影响[J]. 矿冶工程, 2012, 32(5):34-36.
YAN Ya-mei, LI Mao-lin, CUI Rui, et al. Influence of magnetizing roasting parameters on grindability of oolitic hematite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(5): 34-36. (in Chinese)
- [9] Baozhong Ma, Chengyan Wang, Weijiao Yang, et al. Screening and reduction roasting of limonitic laterite and ammonia-carbonate leaching of nickel-cobalt to produce a high-grade iron concentrate[J]. Minerals Engineering. 2013,50:106-113.
- [10] 庞永莉. 菱铁矿流态化磁化焙烧技术的开发与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
PANG Yong-li. The research and development of the techniques for siderite powder roasted and magnetized in the state of fluidization[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 张汉泉, 汪凤玲, 李浩. 鲕状赤铁矿磁化焙烧-磁选-反浮选降磷试验[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(3): 29-31.
ZHANG Han-quan, WANG Feng-ling, LI Hao. Study on magnetic roasting magnetic separation inverse flotation for phosphorus reduction of oolitic hematite[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology. 2011, 33(3): 29-31. (in Chinese)
- [12] 王淀佐, 邱冠周, 胡岳华. 资源加工学[M]. 北京: 科学出版社, 2010:24-28.
WANG Dian-zuo, QIU Guan-zhou, HU Yue-hua. Resource processing [M]. Beijing: Science Press, 2010:24-28. (in Chinese)
- [13] 杨大伟, 孙体昌, 徐承焱, 等. 鄂西某高磷鲕状赤铁矿提铁降磷选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2009(10): 81-83.
YANG Da-wei, SUN Ti-chang, XU Cheng-yan, et al. Beneficiation test on iron increase and phosphorous reduction of a high-phosphorus oolitic hematite in Western Hubei[J]. Metal Mine, 2009(10): 81-83. (in Chinese)
- [14] 王秋林, 陆小苏, 彭泽友, 等. 高磷鲕状赤铁矿焙烧-磁选-反浮选试验研究[J]. 湖南有色金属, 2009(4): 12-15.
WANG QIU-lin, LU Xiao-su, PENG Ze-you, et al. An experimental research on roasting-magnetic separation-reverse flotation of oolite hematite from Exi iron ore[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2009(4): 12-15. (in Chinese)
- [15] 王国军, 王智化, 杨丽, 等. 某鲕状赤铁矿循环流化床焙烧-磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2010(2): 57-61.
WANG Guo-jun, WANG Zhi-hua, YANG Li, et al. Experiments on roasting technology magnetic separation of oolitic hematite ore by the circulating fluidized bed[J]. Metal Mine, 2010(2):57-61. (in Chinese)
- [16] 宋海霞. 悬浮态磁化焙烧菱铁矿的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
SONG Hai-xia. Research on the suspension magnetic roasting of siderite[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)

(下转第 22 页)