

细粒级镜铁矿造球-磁化焙烧试验研究^①

万军营^{1,2}, 陈铁军^{1,2}, 周仙霖^{1,2}, 刘佳文^{1,2}, 姜翔波^{1,2}, 庄骏^{1,2}

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要: 对细粒级镜铁矿进行造球-磁化焙烧工艺研究, 考察造球工艺以及球团在磁化焙烧过程的焙烧性能及效果。结果表明: 采用细磨造球-磁化焙烧工艺, 还原剂外配, 在焙烧温度 810 °C、焙烧时间 60 min、煤粉用量 2.5% 条件下磁化焙烧, 精矿铁品位 49.04%、回收率 76.99%; 采用直接造球-磁化焙烧工艺, 还原剂外配, 在焙烧温度 650 °C、焙烧时间 60 min、兰炭用量 3.0% 条件下磁化焙烧, 可获得精矿铁品位 52.95%、回收率 85.07% 的较好指标。直接造球-磁化焙烧工艺简单, 可获得更好的选矿指标, 为细粒级镜铁矿磁化焙烧现场应用提供依据。

关键词: 镜铁矿; 造球; 磁化焙烧; 磁选; 铁矿资源

中图分类号: TD981

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.05.024

文章编号: 0253-6099(2024)05-0119-05

Experimental Study on Pelletizing and Magnetization Roasting Process for Fine-Grained Specularite

WAN Junying^{1,2}, CHEN Tiejun^{1,2}, ZHOU Xianlin^{1,2}, LIU Jiawen^{1,2}, JIANG Xiangbo^{1,2}, ZHUANG Jun^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: An experiment was carried out with a pelletizing and magnetization roasting process for fine-grained specularite to investigate the pelletizing process, as well as the roasting performance and effect of pellets in the process of magnetization roasting. The results show that by adopting a process of fine grinding and pelletizing followed by magnetization roasting with an additionally prepared reducing agent, under the condition of roasting at 810 °C for 60 min, and addition of charcoal at an amount of 2.5%, a concentrate grading 49.04% Fe at 76.99% recovery can be obtained. In comparison, with a process of direct pelletizing followed by 60 min magnetization roasting at 650 °C with additionally prepared reducing agent and addition of semi-coke at an amount of 3.0%, the concentrate grading 52.95% Fe at 85.07% recovery can be obtained. It is found that the processing technique consisting of direct pelletizing and magnetization roasting is simpler and can bring better processing indicators. It can provide a reference for on-site processing of fine-grained specularite by adopting magnetizing roasting.

Key words: specularite; pelletizing; magnetization roasting; magnetic separation; iron ore resource

2015 年以来, 我国铁矿石对外依存度超过 80%^[1], 2022 年进口铁矿石 11.07 亿吨, 过度依赖境外资源供应对国家经济安全已构成严重威胁^[2]。工信部 2021 年初发布的《关于推动钢铁工业高质量发展的指导意见》中明确将铁矿资源作为紧缺战略性矿产。当前, 迫切需要依靠技术进步来最大限度地利用国内

现有铁矿资源^[3]。镜铁山式铁矿是一种难选贫铁矿石^[4], 某钢企年产 0~15 mm 镜铁矿粉矿 400 万吨, 其中 0~1 mm 细粒级占比为 33%, TFe 品位 28%~31%, 常规强磁选工艺选别指标不佳, 精矿铁品位 47%~49%, 回收率约 67%, 导致尾矿品位高, 资源浪费严重^[5]。

① 收稿日期: 2024-03-30

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BCA062); 中冶长天科研开发基础研究基金项目(2023JCYJ05)

作者简介: 万军营(1992—), 男, 河南信阳人, 博士后, 主要研究方向为复杂铁矿分选、烧结球团、直接还原。E-mail: jywan92@163.com

通信作者: 陈铁军(1973—), 男, 湖南株洲人, 博士, 教授, 主要从事复杂铁矿分选、铁矿造块、固废综合利用方面的研究工作。E-mail: chentiejun@wust.edu.cn

镜铁矿矿石中铁矿物主要为镜铁矿、菱铁矿和褐铁矿,脉石矿物主要为碧玉、重晶石、铁白云石和石英,矿体围岩为千枚岩,具有矿石品位低(平均 TFe 品位 33%左右)、结晶颗粒细(一般 0.02~0.5 mm)、脉石中含铁高、菱铁矿中镁锰夹杂较高等特点,是我国难选铁矿石之一,被称之为“镜铁山式”难选氧化铁矿^[6],常规物理选矿指标较差。回转窑磁化焙烧是处理此类矿石的有效方法^[7],但回转窑生产过程中存在回转窑结圈、焙烧矿不均匀、窑内气氛难控制、配煤高、细粒级损失大等问题^[8],尤其是细粒级矿石不能直接入回转窑磁化焙烧,需要造球后才能进行磁化焙烧^[9]。

本文针对细粒级镜铁矿造球-磁化焙烧进行工艺参数优化,详细考察 0~1 mm 细粒级镜铁矿造球工艺参数以及球团在磁化焙烧过程的焙烧性能,得出适宜的工艺参数范围及工艺优化措施,为细粒级镜铁矿磁化焙烧分选现场应用提供依据。

1 试验原料特性

某细粒级镜铁矿粒度组成和元素分析结果分别见表 1 和表 2。细粒级镜铁矿中粉末较多,其中 -0.047 mm 粒级占比 39.15%。镜铁矿含有多种元素,其中 TFe 品位 28.69%,属于贫铁矿。

表 1 镜铁矿粒度分析结果

粒径/mm	质量分数/%
-1.00+0.45	9.08
-0.45+0.30	16.06
-0.30+0.15	15.81
-0.15+0.074	12.05
-0.074+0.047	7.85
-0.047	39.15

表 2 原矿化学多元素分析结果(质量分数) %

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	烧损
28.69	5.97	27.21	4.17	1.75	2.54	0.32	0.029	10.57

镜铁矿矿物组成分析结果如表 3 所示。该矿中主要含铁矿物为镜铁矿,其次为菱铁矿和褐铁矿,磁铁矿与黄铁矿含量较少。镜下鉴定可见主要金属矿物为镜铁矿、针铁矿(褐铁矿)、菱铁矿、磁铁矿、黄铁矿等,为选矿回收的主要有用矿物。脉石矿物主要为碧玉(铁质浸染的石英)、石英、铁白云石。

表 3 镜铁矿矿物组成分析结果(质量分数) %

镜铁矿	褐铁矿	菱铁矿	磁铁矿	黄铁矿	石英	铁白云石	云母	其他
28.4	9.2	14.6	1.8	2.3	23.3	12.8	6.9	0.7

为了分析微细粒嵌布的镜铁矿对原矿单体解离的影响,同时也为了得到合理的磨矿制度,进行了解离度分析计算,结果见表 4。从表 4 可知,当原矿磨至 -0.074 mm 粒级占 85% 时,单体解离度为 67.7%;即使磨至 -0.074 mm 粒级占 90%,单体解离度也仅 75.6%。而且镜下发现细粒含铁矿物与脉石呈弯曲复杂连生,或以微细多包裹体形式存在,因此含铁矿物很难充分单体解离。

表 4 原矿解离度分析结果

-0.074 mm 粒级占比/%	单体 解离度/%	连生体/%			
		>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4
75	54.1	18.9	9.3	7.6	10.1
80	58.7	17.6	8.0	6.2	9.5
85	67.7	14.1	7.0	4.8	6.4
90	75.6	9.8	6.3	2.7	5.6

试验以烟煤和兰炭为磁化焙烧固体还原剂,其基本特性分析结果如表 5 所示。由表 5 可知,烟煤挥发分较高,较高的挥发分能提高反应体系内还原气体浓度,有利于还原反应的进行。

表 5 还原剂基本特性分析结果

还原剂 名称	工业分析结果(质量分数)/%			热值/ (MJ·kg ⁻¹)
	灰分	挥发分	固定碳	
烟煤	10.05	37.64	52.50	23.3
兰炭	11.04	12.60	63.66	25.6

试验用膨润土粒度较细,-0.074 mm 粒级占比 92.3%,含水量(质量分数)9.9%,胶质价 223.9%/mL,膨胀容 8.0 mL/g,其中蒙脱石质量分数 70.93%。

2 试验方法及设备

首先对镜铁矿进行球磨,将球磨后的镜铁矿与球磨后的固体还原剂均匀混合,采用圆盘造球机进行造球,测定生球落下强度、抗压强度及爆裂温度;生球(105±5)℃干燥后,测定成品干球的耐磨性能。随机称取 10~15 mm 干球团装入铁罐,待马弗炉升到设定温度后,迅速将铁罐放入炉内,关上炉门并开始计时,待焙烧结束,快速将铁罐内的焙烧样水淬急冷,经过滤烘干,闭路破碎至 0~1 mm,备用。在磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 85%、磁场强度 0.12 T、矿浆质量分数 20% 条件下进行磁选,获得精矿和尾矿。对球磨后的焙烧矿和磁选精矿分别进行磁化率测试。

试验设备包括 HLXPS-Φ250×150 辊式破碎筛分

机、XMQ- Φ 240 \times 90 锥形球磨机、 Φ 800 无动力刮刀圆盘造球机、101-4 电热鼓风恒温干燥箱、SX2-10-15 马弗炉、HLDL-5C 盘式真空抽滤机、XZM-100 振动研磨机和 CXG-99 磁选管等。

3 镜铁矿细磨造球-磁化焙烧试验

3.1 造球参数优化试验

3.1.1 镜铁矿磨矿细度对造球的影响

外配煤粉,在膨润土用量 2%、造球混合料水分 8%、造球时间 16 min 条件下,不同镜铁矿磨矿细度制备的球团性能见表 6 和图 1。随着镜铁矿磨矿细度变细,生球抗压强度变化不大,落下强度先上升后下降,在镜铁矿磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 85% 时, -0.45 mm 粒级干球耐磨性能很差,生球爆裂温度较高,说明球团综合性能较好。

表 6 镜铁矿磨矿细度对球团质量的影响

-0.074 mm 粒级占比/%	生球爆裂温度/ $^{\circ}$ C	干球耐磨性能(转鼓指数)/%		
		+6 mm	+3.5 mm	-0.45 mm
75	446	56.59	56.69	42.04
85	444	86.90	86.80	12.84
95	404	53.69	54.52	41.75

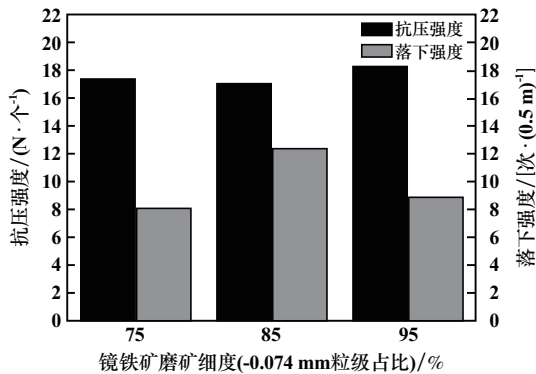


图 1 镜铁矿磨矿细度对生球强度的影响

3.1.2 膨润土用量对造球的影响

外配煤粉,在造球水分 8%、造球时间 16 min、磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 85% 条件下,考察了膨润土用量(对镜铁矿的质量分数)对球团性能的影响,结果如表 7 和图 2 所示。随着膨润土用量由 0 增加到 3%,生球抗压强度变化不大,均在 17 N/个左右,落下强度由 5.7 次/(0.5 m) 增加到 12.4 次/(0.5 m),生球爆裂温度由 283 $^{\circ}$ C 提高到 461 $^{\circ}$ C;干球耐磨性能明显提高, -0.45 mm 粒级干球转鼓指数由 84.61% 降到 5.32%,说明球团性能可以保持。膨润土用量 2% 时,球团已经

达到较好的指标。

表 7 膨润土用量对球团质量的影响

膨润土用量/%	生球爆裂温度/ $^{\circ}$ C	干球耐磨性能(转鼓指数)/%		
		+6 mm	+3.5 mm	-0.45 mm
0	283	5.05	7.48	84.61
0.8	367	25.16	27.50	69.76
1.2	384	44.42	45.24	53.05
1.6	412	59.15	59.41	39.47
2.0	444	86.09	86.80	12.84
2.5	449	82.60	82.66	16.87
3.0	461	94.68	94.68	5.32

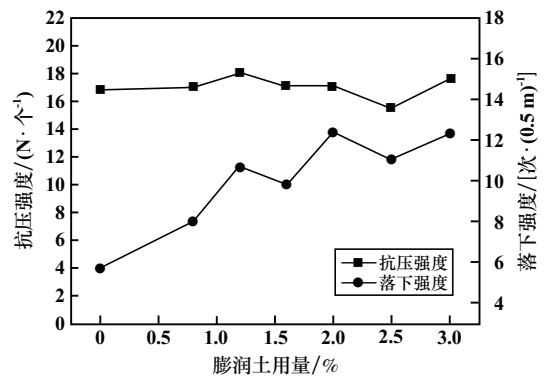


图 2 膨润土用量对生球强度的影响

3.1.3 煤粉用量对造球的影响

煤粉内配时,需要探究煤粉加入对造球过程的影响。将煤粉先磨至 -0.074 mm 粒级占 85% 左右,与 -0.074 mm 粒级占 85% 左右的细磨镜铁矿混合均匀后进行造球,在膨润土用量 2%、造球水分 8%、造球时间 16 min 条件下,考察了煤粉用量(对镜铁矿的质量分数)对球团性能的影响,结果如表 8 和图 3 所示。随着煤粉用量由 0 增加到 3%,生球抗压强度变化不大,均在 18 N/个左右,落下强度稍有降低,由 12.4 次/(0.5 m) 降到 8.9 次/(0.5 m),生球爆裂温度稳定在 423~444 $^{\circ}$ C;干球耐磨性能明显降低, -0.45 mm 粒级干球转鼓指数由 12.84% 增至 41.86%。煤粉用量 2% 时,生球强度和干球耐磨性能降低的幅度相对较小。

表 8 煤粉用量对球团质量的影响(煤粉内配)

煤粉用量/%	生球爆裂温度/ $^{\circ}$ C	干球耐磨性能(转鼓指数)/%		
		+6 mm	+3.5 mm	-0.45 mm
0	444	86.09	86.80	12.84
0.5	437	78.36	80.15	18.69
1.0	434	67.42	67.56	31.53
1.5	427	71.36	73.94	25.31
2.0	442	75.65	76.25	23.09
2.5	438	60.73	62.05	35.87
3.0	423	56.18	56.46	41.86

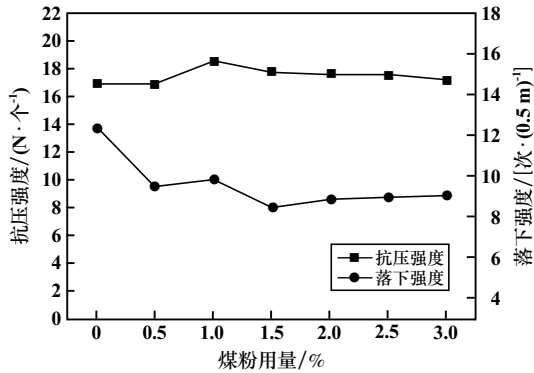


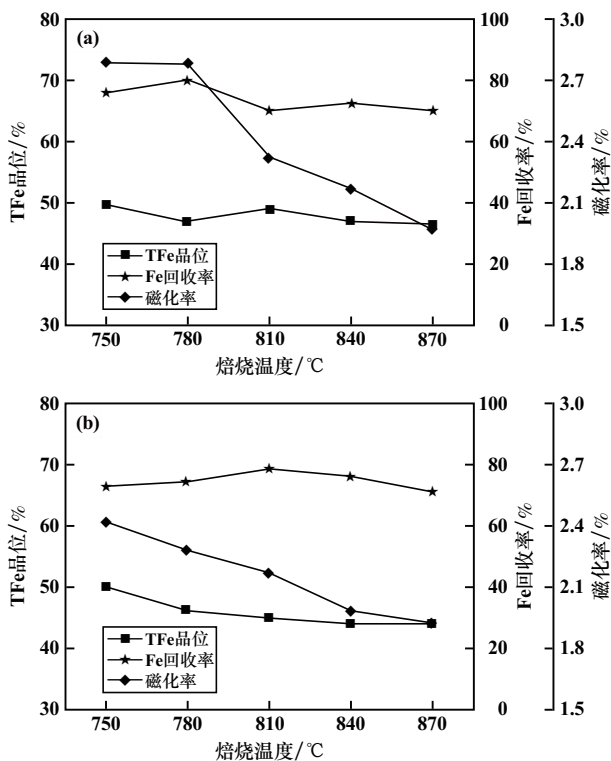
图3 煤粉用量对生球强度的影响(煤粉内配)

3.2 磁化焙烧参数优化试验

结合前期造球试验,确定磁化焙烧-磁选试验所用球团的造球条件为:镜铁矿磨矿细度 -0.074 mm 粒级占85%,膨润土用量2%,混合料水分8%,造球时间16 min。

3.2.1 焙烧温度对磁化效果的影响

焙烧温度对焙烧速率有重要影响,也对物质的转化具有关键作用^[10]。在焙烧时间60 min、煤粉用量2%、煤粉粒度0~1 mm、煤粉外配和煤粉内配条件下,焙烧温度对磁化效果和选别指标的影响如图4所示。由图4可知,随着焙烧温度升高,精矿品位明显下降,回收率先上升后下降。煤粉外配时,Fe回收率在780℃时达到最高,为80.34%,此时铁品位为46.82%;焙烧温度810℃时,铁品位达到49.14%、回收率为70.18%;从磁化



(a) 煤粉外配; (b) 煤粉内配

图4 焙烧温度对焙烧矿磁化效果和选别指标的影响

率可以看出,温度高于810℃时,铁矿物发生过还原反应,生成了无磁性的浮氏体,影响选别指标^[11]。煤粉内配时,焙烧矿更容易出现过还原现象,但整体焙烧效果与煤粉外配无明显区别,无论煤粉内配还是煤粉外配,该条件下都可以获得适宜磁化率的焙烧矿试样;从选矿指标可以看出,煤粉内配时精矿产率高,但品位更低。确定采用煤粉外配,焙烧温度810℃。

3.2.2 焙烧时间对磁化效果的影响

煤粉外配,焙烧温度810℃、煤粉用量2%、煤粉粒度0~1 mm条件下,焙烧时间对磁化效果和选别指标的影响如图5所示。由图5可知,随着焙烧时间延长,精矿品位增加,回收率呈降低趋势,焙烧时间60 min时,铁品位达到49.14%,回收率70.18%。适宜的焙烧时间为60 min。

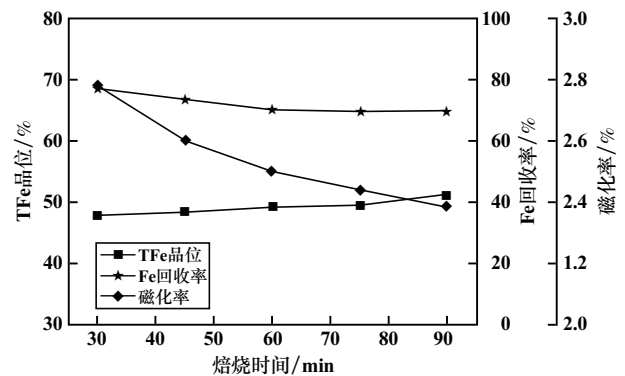


图5 焙烧时间对焙烧矿磁化效果和选别指标的影响

3.2.3 煤粉用量对磁化效果的影响

煤粉外配,焙烧温度810℃、焙烧时间60 min、煤粉粒度0~1 mm条件下,进行了煤粉用量试验,结果如图6所示。由图6可知,对于外配煤粉,随着煤粉用量从1.0%增加到3.5%,精矿品位及回收率变化不明显;从焙烧矿磁化率来看,煤粉用量2.5%时,焙烧矿磁化效果较好,能得到TFe品位49.04%、回收率76.99%的铁精矿。

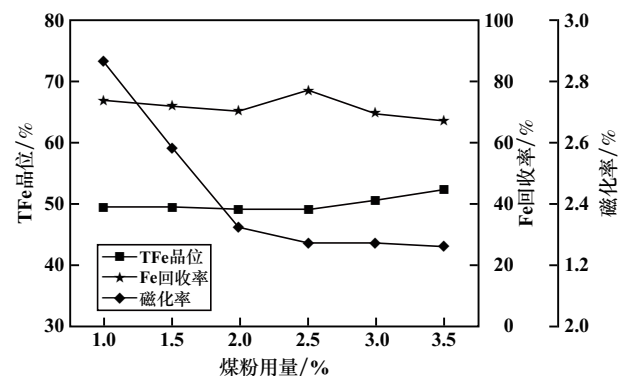


图6 煤粉用量对焙烧矿磁化效果和选别指标的影响

4 镜铁矿直接造球-磁化焙烧试验

由于0~1 mm 镜铁矿粉矿细粒级粉末较多,其-0.047 mm 粒级占比达到39.15%, -0.074 mm 粒级占比为47%,直接进入回转窑磁化焙烧会导致易于结圈等一系列问题,但细粒级颗粒较多又有利于物料造球;同时鉴于细磨镜铁矿造球工艺对精矿品位的不利影响,对镜铁矿直接造球-磁化焙烧工艺进行了研究,试验中均不添加膨润土造球。

4.1 以煤粉为还原剂的磁化焙烧试验

煤粉外配,焙烧时间60 min、煤粉用量3.0%、煤粉粒度0~1 mm 条件下,考察了焙烧温度对磁化效果和选别指标的影响,结果如图7所示。由图7可知,采用细粒级镜铁矿直接造球-磁化焙烧工艺,以煤粉为还原剂,焙烧温度650 ℃时,可获得铁精矿 TFe 品位52.20%、回收率76.15%的指标,焙烧矿磁化率较高,说明还原程度降低;焙烧温度750 ℃时,未出现过还原,但此时精矿指标不太理想。

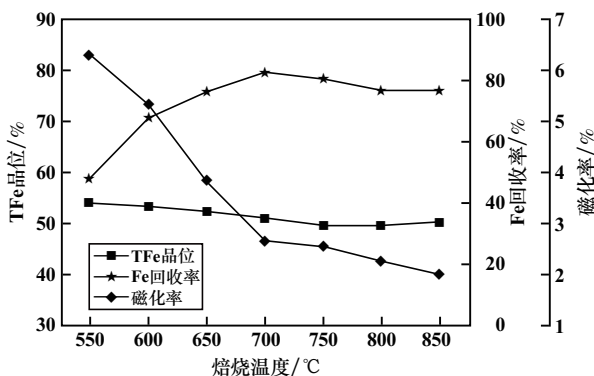


图7 煤粉为还原剂时焙烧温度对磁化效果和选别指标的影响

4.2 以兰炭为还原剂的磁化焙烧试验

兰炭外配,焙烧时间60 min、兰炭用量3.0%、兰炭粒度0~1 mm 条件下,考察了焙烧温度对磁化效果和选别指标的影响,结果如图8所示。由图8可知,采用

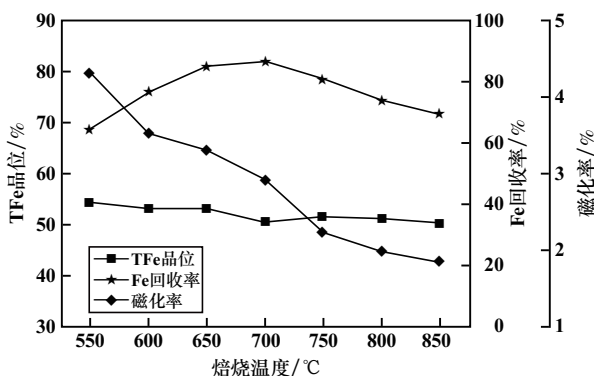


图8 兰炭为还原剂时焙烧温度对磁化效果和选别指标的影响

细粒级镜铁矿直接造球-磁化焙烧工艺,焙烧温度650 ℃、以兰炭为还原剂,可获得铁精矿 TFe 品位52.95%、回收率85.07%的较好综合指标,且焙烧矿磁化率随着焙烧温度升高而降低,焙烧温度超过750 ℃时出现过还原,且随着焙烧温度增加,精矿品位趋于下降。

5 结 论

1) 细粒级镜铁矿适宜造球条件为:磨矿细度-0.074 mm 粒级占85%,膨润土用量2%,混合料水分8%。生球指标为:抗压强度17 N/个、落下强度12次/(0.5 m),爆裂温度444 ℃,干球耐磨性能较好。

2) 采用细粒级镜铁矿细磨造球-磁化焙烧工艺流程,宜采用还原剂外配方式,在焙烧温度810 ℃、焙烧时间60 min、煤粉用量2.5%条件下,可获得较好的铁精矿指标:TFe 品位49.04%、回收率76.99%。

3) 采用细粒级镜铁矿直接造球-磁化焙烧工艺流程,采用还原剂外配的方式,在焙烧温度650 ℃、焙烧时间60 min、外配兰炭3.0%条件下,可获得铁精矿 TFe 品位52.95%、回收率85.07%的较好指标。

4) 相比于细磨造球-磁化焙烧工艺,直接造球-磁化焙烧工艺更简单易行,可获得更好的选矿综合指标,且兰炭作还原剂时试验结果优于煤粉作还原剂。

参考文献:

- [1] 刘梦飞,刘育明. “基石计划”对我国铁矿石资源开发格局的影响分析[J]. 中国矿山工程, 2022,51(5):6-10.
- [2] HUANG J, LIU J, ZHANG H, et al. Sustainable risk analysis of China's overseas investment in iron ore[J]. Resources Policy, 2020, 68:101771.
- [3] 吴巧生,周娜,成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020,42(8):1439-1451.
- [4] 李慧春,沈忠,梁秀艳. 镜铁矿粉矿回转窑磁化焙烧-磁选试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):89-92.
- [5] 丁春江,陈铁军,黄献宝,等. 镜铁矿磁化焙烧前后矿物组成与嵌布结构变化分析[J]. 钢铁钒钛, 2015,36(6):117-122.
- [6] 丁春江,陈铁军,黄献宝,等. 回转窑磁化焙烧细粒级镜铁矿研究[J]. 钢铁钒钛, 2014,35(6):118-123.
- [7] 任亚峰,余永富. 难选红铁矿磁化焙烧技术现状及发展方向[J]. 金属矿山, 2005(11):20-23.
- [8] 余三友. 酒钢难选铁矿石的磁化焙烧-磁选工艺研究[D]. 唐山:河北联合大学, 2015.
- [9] 李家林,陈雯,刘小银,等. 某低品位难选菱铁矿分级磁化焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):51-54.
- [10] 孔德翠,刘杰,张淑敏,等. 某铁矿石悬浮磁化焙烧—磁选实验研究[J]. 矿产综合利用, 2022(5):130-134.
- [11] 唐志波,廖舟. 某难选弱磁性铁矿磁化焙烧-磁选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):97-100.

引用本文: 万军营,陈铁军,周仙霖,等. 细粒级镜铁矿造球-磁化焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):119-123.