

白云鄂博中贫氧化矿氢基矿相转化—磁选试验研究

曾永杰, 王星

(包头钢铁(集团)有限责任公司宝山矿业公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要:白云鄂博中贫氧化矿存量巨大,氧化程度高,杂质含量高,其中铁和稀土为主要回收成分,铁品位为28.74%,FeO含量为1.99%,稀土品位为5.45%,矿石中的铁主要以赤褐铁及磁性铁形式存在,分布率分别为48.54%及43.84%。针对白云鄂博中贫氧化矿开展矿石性质研究,探索回收其中铁资源,采用“预富集—氢基矿相转化—阶段磨矿—阶段磁选”工艺,可以获得铁精矿品位为66.07%、铁总回收率为87.47%的合格铁精矿,该方法有利于铁资源充分利用,提高了矿山资源利用率。

关键词:中贫氧化矿;氢基矿相转化;提质降杂

中图分类号:TD951

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2023)01-0010-07

Experimental Study on Hydrogen – based Mineral Phase Transformation – Magnetic Separation of Medium – lean Oxidized Ore in Bayan Obo

Zeng Yong – jie, Wang Xing

(Baoshan Mining Co. of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The stock of medium – lean oxidized ore in Bayan Obo is huge as well as its degree of oxidation and impurity content are high. Among them, iron and rare earth are the main recovered components. The grade of iron is 28.74%, content of FeO is 1.99% and grade of rare earth is 5.45%. The iron in the ore mainly exists in forms of hematite and limonite and magnetic iron as well as the distribution ratios are 48.54% and 43.84% respectively. The qualified iron concentrate with grade of iron concentrate of 66.07% and gross recovery of iron of 87.47% is obtained by studying the ore properties of medium – lean oxidized ore in Bayan Obo as well as exploring and recycling its iron resource with the process of “preconcentration – hydrogen – based mineral phase transformation – stage grinding – stage magnetic separation”. This method is beneficial to the full utilization of iron resources and improving the utilization rate of mine resources.

Key words: medium – lean oxidized ore; hydrogen – based mineral phase transformation; improve quality and reduce impurities

白云鄂博铁矿在开矿之初堆存了大量的中贫氧化矿,目前存量尚有约1500万t。这批原矿铁品位在30%左右,稀土品位约为5.5%,萤石品位约为

15%~20%。白云博宇公司和宝山矿业均曾将其应用于选铁生产中,但是由于氧化程度高,现有工艺回收率低,仅能达到50%左右,且杂质含量高,尤其是

氟、钾、钠等难以控制,选别指标不能满足需求。所以如能将此部分原矿高效利用,经济效益和社会效益都是非常巨大的^[1]。

东北大学采用“氢基矿相转化—弱磁选工艺”对鞍钢、宝武、酒钢、山钢等 10 余种难选铁矿石进行中试试验,试验结果表明:该技术对于氧化矿选矿,铁精矿品位可提高 1 ~ 9 个百分点,回收率提高 15 个百分点以上^[2-3]。为探索该工艺能否进一步提

高铁精矿品位及回收率,降低铁精矿中杂质含量,试验采用“预富集—氢基矿相转化—弱磁选”工艺对白云鄂博中贫氧化矿开展研究,以提高铁资源利用率。

1 矿石性质

矿样为白云鄂博中贫氧化矿原矿,化学成分分析见表 1,铁物相分析见表 2,XRD 分析见图 1。

表 1 原矿化学成分分析结果(质量分数)

													%
TFe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	F	Nb	K ₂ O	Na ₂ O	REO	烧损
28.74	1.99	19.14	1.49	9.76	1.10	0.53	0.50	9.30	0.05	0.49	0.47	5.45	6.09

表 2 原矿铁物相分析结果(体积分数)

						%
项目	磁性铁中的铁	碳酸铁中的铁	赤、褐铁中的铁	硫化铁中的铁	硅酸铁中的铁	全铁
含量	12.60	0.49	13.95	0.48	1.22	28.74
分布率	43.84	1.70	48.54	1.67	4.25	100.00

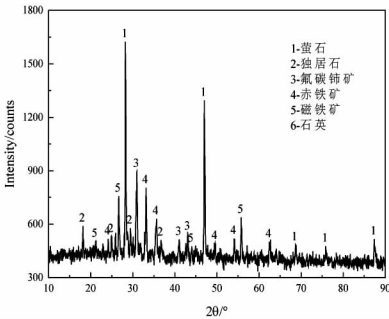


图 1 原矿 XRD 分析图谱

由表 1 可知,原矿中铁和稀土为主要回收成分,铁品位为 28.74%,FeO 含量为 1.99%,稀土品位为 5.45%,F 含量为 9.30%,SiO₂ 含量为 9.76%,CaO 和 MgO 含量分别为 19.14%、1.49%,Al₂O₃ 含量为 1.10%,有害元素 S、P 含量分别为 0.53%、0.50%,K₂O、Na₂O 含量分别为 0.49%、0.47%,烧损为 6.09%。XRD 分析与铁物相分析结果表明原矿中 有用矿物主要为铁矿物、氟碳铈矿、独居石及萤石,其中铁矿物主要为赤铁矿和磁铁矿。矿石中的铁主要以赤、褐铁及磁性铁形式存在,分布率分别为 48.54% 及 43.84%;硅酸铁中铁的分布率为 4.25%,碳酸铁中铁的分布率为 1.70%,硫化铁中铁的分布率为 1.67%。因此,原矿中铁矿物的主要回收对象为赤、褐铁矿和磁铁矿。

2 中贫氧化矿预富集实验室试验

2.1 磨矿细度条件试验

针对中贫氧化矿进行预富集磨矿细度条件试验,试验流程如图 2 所示。预富集工艺参数为:磨矿细度为 -0.074 mm 含量 50% ~ 90%,弱磁选场强为 1 000 Oe,强磁选场强为 8 000 Oe。试验结果如图 3 所示。

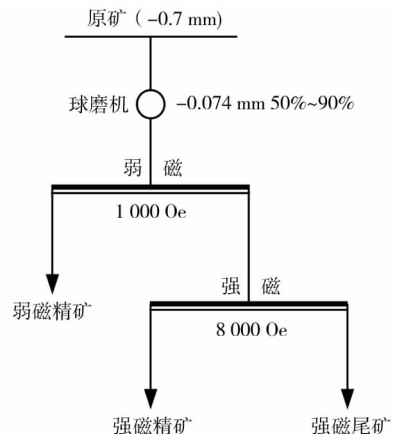


图 2 预富集磨矿细度试验流程

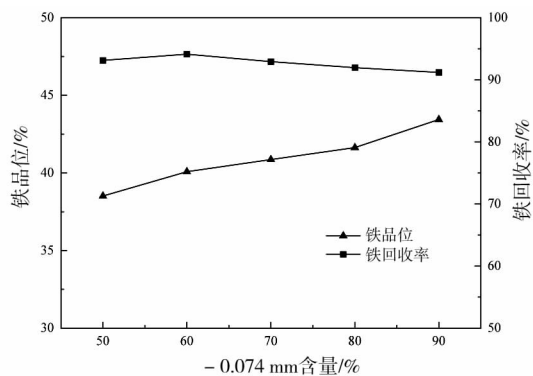


图 3 磨矿细度对预富集铁精矿指标的影响

由图 3 可知,当原矿磨矿细度 -0.074 mm 含量由 50% 提高至 90% 时,预富集铁精矿(即弱磁铁精矿与强磁铁精矿混合精矿)铁品位由 38.51% 升高至 43.44%,铁回收率由 93.13% 降低至 91.19%;预富集铁精矿中稀土含量在 5.16% ~ 5.30% 范围内波动,稀土回收率由 63.21% 降低至 55.61%;预富集抛尾产率由 31.03% 升高至 38.44%,强磁尾矿中稀土含量在 6.59% ~ 6.78% 范围内波动。综合考虑确定合适的预富集磨矿细度为 -0.074 mm 含量 60%。

2.2 强磁场强条件试验

针对原矿进行预富集强磁场强条件试验,试验流程如图 4 所示,预富集工艺参数为:强磁选场强为 4 000 ~ 11 000 Oe,磨矿细度为 -0.074 mm 含量 60%,弱磁选场强 1 000 Oe。试验结果如图 5 所示。

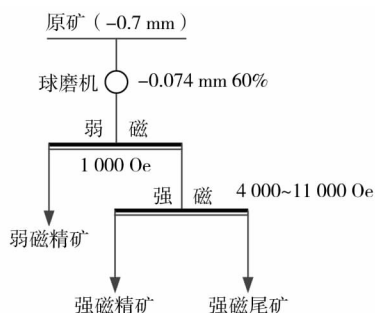


图 4 预富集强磁场强条件试验流程

由图 5 可知,随着强磁场强由 4 000 Oe 升至 11 000 Oe,预富集铁精矿铁品位由 42.49% 降低至 39.20%,铁回收率由 89.17% 升高至 93.91%,抛尾产率由 40.22% 降低至 30.98%。为了保证工业现场具有较高的铁回收率,故确定采用两段强磁选工

艺回收铁矿物,即原矿磨矿后进行弱磁选回收强磁性铁矿物,弱磁尾矿进行强磁粗选,粗选场强定为 6 000 Oe,强磁粗选尾矿进行强磁扫选,强磁扫选场强定为 10 000 Oe。

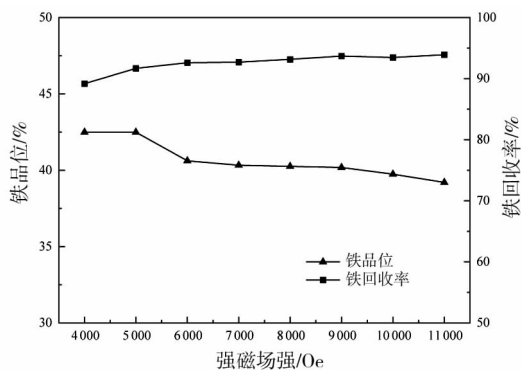


图 5 强磁场强对预富集铁精矿指标的影响

3 预富集铁精矿氢基矿相转化试验

3.1 还原温度条件试验

针对预富集铁精矿开展还原温度条件试验,固定氢基矿相转化工艺条件为:还原气浓度为 20%,还原气为 CO 、 H_2 混合气体, CO 与 H_2 比例为 1:3,还原时间为 30 min,总气体流量为 600 mL/min。焙烧矿磨矿细度为 -0.038 mm 含量 95%,磁选管磁场强度为 1 000 Oe,试验结果如图 6 所示。

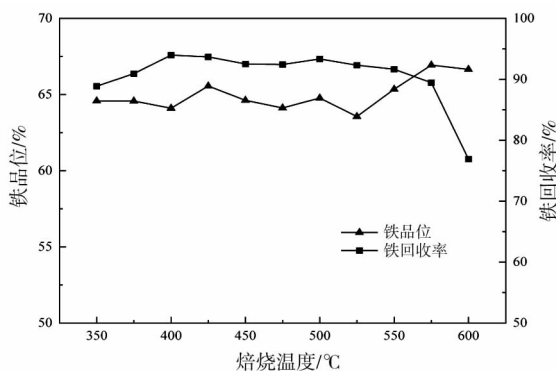


图 6 还原温度对磁选铁精矿指标的影响

由图 6 可知,随着还原温度的升高,精矿铁品位呈波动式上升趋势,而精矿铁作业回收率呈先波动上升后显著下降的趋势,当还原温度由 350 °C 升高至 550 °C 时,精矿铁品位在 64.10% ~ 65.56% 范围内波动,继续提高还原温度至 600 °C 时,精矿铁品位升至 66.65%;精矿铁作业回收率在还原温度为 400 °C 以下时均较低,当还原温度在 400 ~ 550 °C 范

围时,精矿铁作业回收率在 91.65% ~ 93.97% 范围内波动,继续提高还原温度,精矿铁作业回收率显著下降。综合考虑确定适宜的还原温度为 425 °C,此时可获得铁精矿品位为 65.56%、铁作业回收率为 93.68% 的技术指标。

3.2 还原时间条件试验

针对预富集铁精矿开展还原时间条件试验,固定氢基矿相转化工艺条件为:还原温度为 425 °C,还原气为 CO、H₂ 混合气体,CO 与 H₂ 比例为 1:3,还原气浓度为 20%,总气体流量 600 mL/min。焙烧矿磨矿细度为 -0.038 mm 含量 95%,磁选管磁场强度为 1 000 Oe,试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,随着还原时间由 10 min 延长至 30 min,精矿铁品位由 62.32% 升高至 64.94%,精矿铁作业回收率由 89.25% 升高至 92.86%,继续延长还原时间,精矿铁品位保持在 63.56% ~ 64.56% 范围内,铁作业回收率保持在 91.98% ~ 93.63% 范围内,故确定适宜的还原时间为 30 min。

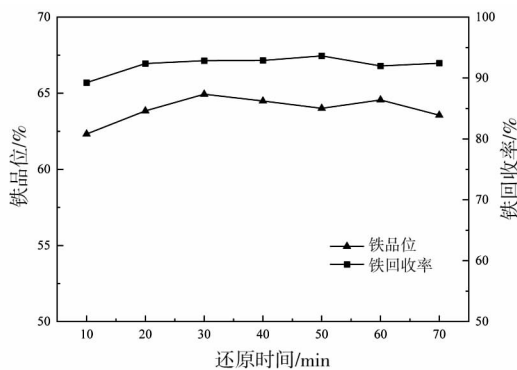


图 7 还原时间对磁选铁精矿指标的影响

3.3 还原气浓度条件试验

针对预富集铁精矿开展还原气浓度条件试验,固定氢基矿相转化工艺条件为:还原温度为 425 °C,还原气为混合气体(CO 与 H₂ 比例为 1:3),还原时间为 30 min,总气量 600 mL/min。焙烧矿磨矿细度 -0.038 mm 含量 95%,磁选管磁场强度 1 000 Oe,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,随着还原气浓度由 10% 升高至 30%,精矿铁品位由 63.89% 升高至 65.26%,精矿铁作业回收率由 90.76% 升高至 92.46%,继续增加还原气浓度,精矿铁品位和铁作业回收率变化不大,故适宜的还原气浓度为 30%。

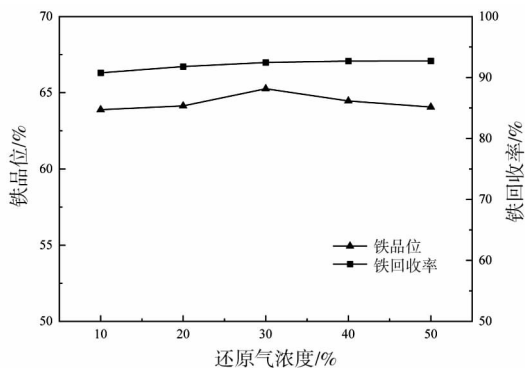


图 8 还原气浓度对磁选铁精矿指标的影响

3.4 还原气氛条件试验

针对预富集铁精矿开展还原气氛条件试验,固定氢基矿相转化工艺条件为:还原温度为 425 °C,还原气浓度为 30%,还原气为混合气体(模拟煤制气 CO 与 H₂ 比例为 2:1)、天然气裂解(CO 与 H₂ 比例为 1:3)、高炉煤气(CO 浓度为 100%)、焦炉煤气(H₂ 浓度 100%),还原时间为 3.0 min,总气体流量为 600 mL/min。焙烧矿磨矿细度为 -0.038 mm 含量 95%,磁选管磁场强度为 1 000 Oe,试验结果如图 9 所示。

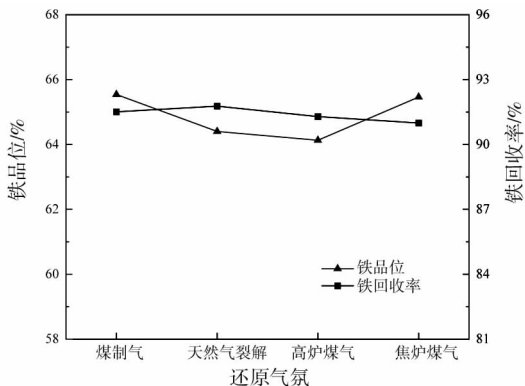


图 9 还原气氛对磁选铁精矿指标的影响

由图 9 可知,在不同还原气氛下,精矿铁品位均能达到 64% 以上,铁作业回收率保持在 90.99% ~ 91.77% 范围内,四种不同还原气氛下获得的磁选铁精矿技术指标差别不大。

4 矿相转化后矿物性质分析

对矿相转化后矿物性质进行分析,化学成分见表 3,铁物相分析见表 4,XRD 分析见图 10。

表 3 焙烧矿化学成分(质量分数)

											%
TFe	REO	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	F	K ₂ O	Na ₂ O
41.42	5.20	17.73	13.53	1.54	9.76	1.30	0.29	0.29	6.14	0.39	0.26

表 4 焙烧矿铁物相分析结果(体积分数)

							%
项目	磁性铁中的铁	碳酸铁中的铁	赤、褐铁中的铁	硫化铁中的铁	硅酸铁中的铁	全铁	
含量	35.58	0.68	3.69	0.21	0.94	41.10	
分布率	86.57	1.65	8.98	0.51	2.29	100.00	

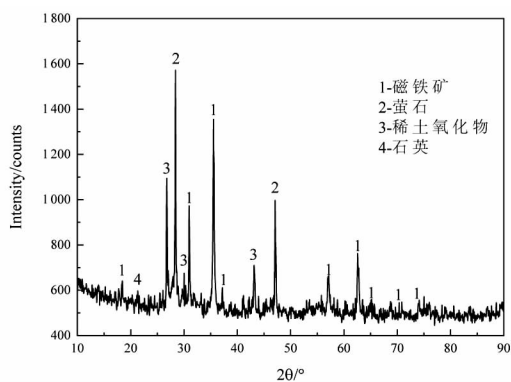


图 10 焙烧矿 XRD 图谱

由表 3、表 4 可知,矿相转化后矿物中的铁主要以磁性铁的形式存在,铁分布率为 86.57%;其次以赤、褐铁矿的形式存在,铁分布率为 8.98%;少量铁以硅酸铁的形式存在,铁分布率为 2.29%,碳酸铁和硫化铁的含量较少,铁分布率均小于 2%。与预富集铁精矿物相结果对比分析可知,矿石经氢基矿相转化后,赤、褐铁矿含量明显减少,磁性铁矿物含量明显增加,进一步表明氢基矿相转化可将矿石中大部分中弱磁性矿物转变为强磁性铁矿物。

5 矿相转化后矿物选别实验室试验

5.1 磨矿细度条件试验

针对矿相转化后矿物开展磨矿细度条件试验。固定氢基矿相转化工艺条件为:还原温度为 425 ℃,还原气浓度为 30%,还原气为混合气体(CO 与 H₂ 比例为 1:3),还原时间为 30 min,总气量 600 mL/min,磁选管磁场强度 1 000 Oe,试验结果如图 11 所示。

由图 11 可知,随着磨矿细度 -0.038 mm 含量由 60% 升至 95%,精矿铁品位由 60.36% 升至 63.17%,而精矿铁作业回收率变化不大,在 92.23% ~ 93.56% 范围内波动。为了保证获得较高

质量的铁精矿,故确定焙烧矿适宜的磨矿细度为 -0.038 mm 含量为 95%。

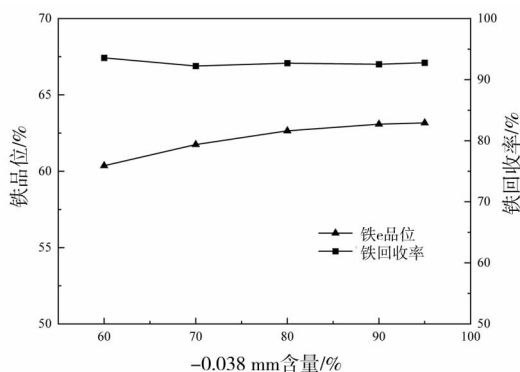


图 11 焙烧矿磨矿细度对磁选铁精矿指标的影响

5.2 磁场强度条件试验

针对矿相转化后矿物开展磁场强度条件试验。固定氢基矿相转化工艺条件为:还原温度为 425 ℃,还原气浓度为 30%,还原气为混合气体(CO 与 H₂ 比例为 1:3),还原时间为 30 min,总气体流量为 600 mL/min。磨矿细度为 -0.038 mm 含量 95%,采用磁选管进行磁选。磁场强度条件试验结果如图 12 所示。

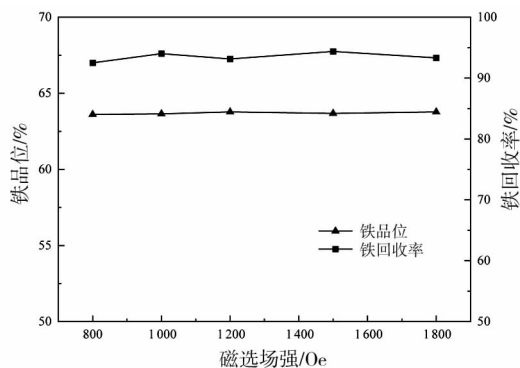


图 12 磁选场强对磁选铁精矿指标的影响

由图12可知,磁场强度对铁精矿品位和作业回收率影响不大,当磁场强度由800 Oe升高至1 800 Oe时,精矿铁品位在63.61%~63.78%范围内波动,精矿铁作业回收率在92.50%~94.38%范围内波动,综合考虑磁选场强为1 500 Oe,可获得精

矿铁品位为63.68%、铁作业回收率为94.38%的技术指标。

5.3 磁选产品化学成分分析

针对矿相转化后矿物磁选产品进行化学成分分析,结果如表5所示。

表5 焙烧矿磁选产品化学成分分析结果(质量分数)

产品名称	TFe	REO	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	F	K ₂ O	Na ₂ O
磁选铁精矿	63.68	1.22	23.72	1.44	1.46	4.37	0.23	0.16	0.08	0.93	0.04	0.01
磁选尾矿	6.34	10.99	1.05	21.13	1.68	19.34	1.40	0.43	0.46	13.18	0.69	0.48

由表5可知,预富集精矿经矿相转化—磨选后,磁选铁精矿铁品位可提高至63.68%,FeO含量为23.72%,F含量为0.93%,其他杂质含量较低;磁选尾矿铁品位降低至6.34%,CaO含量升高至21.13%,主要杂质为SiO₂,其含量为19.34%。

5.4 阶段磨矿—阶段磁选试验

为进一步提高铁精矿技术指标,针对矿相转化

后矿物开展阶段磨矿—阶段磁选试验。参考一段磨选试验结果,固定磨矿—磁选试验条件为:一段磨矿细度为-0.074 mm含量90%,一段磁选管场强为1 000 Oe,二段磨矿细度为-0.038 mm含量95%,二段磁选管场强为1 000 Oe,选别时间5 min。试验结果如表6所示。

表6 矿相转化矿阶段磨矿—阶段磁选结果(质量分数)

产品名称	作业产率	总产率	铁品位	铁总回收率	稀土品位	稀土总回收率	F含量
焙烧矿	100.00	65.63	41.42	94.59	5.87	70.48	
精矿	66.07	38.05	66.07	87.47	1.28	8.94	0.30
中矿	5.09	3.34	13.55	1.57	3.38	2.07	
尾矿	36.93	24.24	6.57	5.55	13.43	59.47	

由表6可知,经过阶段磨矿—阶段磁选后,可获得铁精矿总产率为38.05%、铁品位为66.07%、铁总回收率为87.47%、F含量为0.30%的技术指标。

针对阶段磨矿—阶段磁选铁精矿进行化学成分分析,结果如表7所示。

表7 矿相转化矿阶段磨矿—磁选铁精矿化学成分(质量分数)

TFe	REO	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	P	F	K ₂ O	Na ₂ O
66.07	1.28	25.41	2.21	0.54	1.68	0.21	0.11	0.06	0.30	0.03	0.02

由表7可知,磁选铁精矿中铁品位和FeO含量分别为66.07%、25.41%,SiO₂含量为1.68%,CaO、F含量分别为2.21%、0.30%,稀土品位为1.28%;其他成分MgO、Al₂O₃含量分别为0.54%、0.21%,有害元素S、P含量分别为0.11%、0.06%,K₂O及Na₂O含量分别为0.03%、0.02%。

6 预富集—氢基矿相转化—分选流程

针对预富集铁精矿开展了氢基矿相转化—分选实验室试验,确定了氢基矿相转化工艺参数为:还原温度为425℃,还原时间为30 min,还原气浓度为30%。焙烧矿选别工艺参数为:一段磨矿细度为-0.074 mm含量90%,一段磁选场强为1 000 Oe,二段磨矿细度为-0.038 mm含量95%,二段磁选

场强为 1 000 Oe。

预富集—氢基矿相转化—分选实验室试验数质量流程如图 13 所示。

由图 13 可知,采用预富集—氢基矿相转化—一阶

段磨矿—阶段磁选工艺对原矿进行实验室分选试验,可获得精矿铁品位为 66.07%、铁总回收率为 87.47%、F 含量为 0.30%的技术指标。

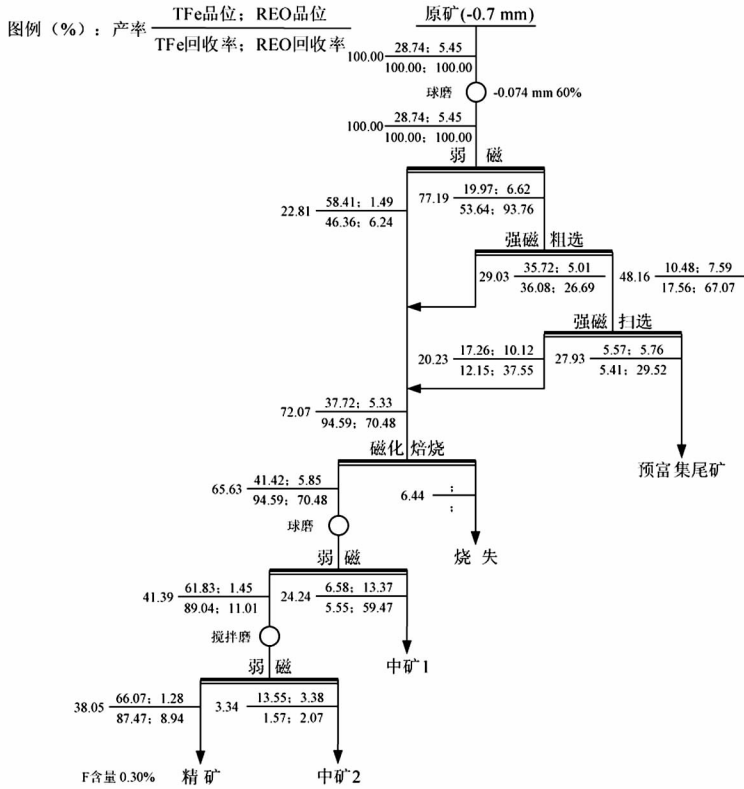


图 13 预富集—氢基矿相转化—阶段磨矿—阶段磁选实验室试验数质量流程图

7 结论

(1)矿样多元素分析表明,原矿中铁品位为 28.74%,XRD 分析与铁物相分析结果表明原矿中 有用矿物主要为铁矿物、氟碳铈矿、独居石及萤石, 其中铁矿物主要为赤铁矿和磁铁矿。矿石中的铁主 要以赤、褐铁及磁性铁形式存在,分布率分别为 48.54% 及 43.84%;硅酸铁中铁的分布率为 4.25%,碳酸铁中铁的分布率为 1.70%,硫化铁中 铁的分布率为 1.67%。因此,原矿中主要回收铁矿 物对象为赤、褐铁矿和磁铁矿。

(2)预富集铁精矿氢基矿相转化实验室试验结 果表明,适宜的工艺参数为还原温度 425 ℃、还原时 间 30 min、还原气(CO 与 H₂ 比例为 1:3)浓度 30%。

(3)采用预富集—氢基矿相转化—阶段磨矿— 阶段磁选工艺对原矿进行实验室分选试验,可获得 精矿铁品位为 66.07%、铁总回收率为 87.47%、F 含量为 0.30%的技术指标。该方法有利于铁资源 充分利用,提高了矿山资源的利用效率,对类似性质 铁矿选矿具有重要的借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 卜俊芬,湛留意,张凌燕. 难选细粒赤(褐)铁 矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用,2012 (3):14-17.

[2] 刘水红. 云南某微细粒嵌布赤铁矿选矿工 艺研究[J]. 金属矿山,2009(8):35-38.

[3] 王彩虹. 酒钢选矿厂选别工艺的改进与发展 [J]. 矿业工程,2021,47(4):4-9.