酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究

袁晨光，黄自力，刘楚玉，朱超波，肖 硕，黄 涛
（武汉科技大学 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：酒钢选矿厂排出的镜铁矿强磁选尾矿铁品位约为 28%，有较高的回收价值。为回收其中的铁矿物，本研究基于该强磁选尾矿工艺矿物学，对其进行反浮选—磁化焙烧—磁选试验研究。研究结果表明：该强磁尾矿经过一粗一精的反浮选试验流程，可得到铁品位为 43.88% 的浮选精矿，其作业铁回收率为 50.93%。经过磁化焙烧后得到焙砂，焙砂进行一粗一精的磁选试验后可得到铁品位为 62.37% 的磁选铁精矿，其作业铁回收率为 83.39%。

关键词：镜铁矿；强磁尾矿；反浮选；磁化焙烧；磁选
中图分类号：TD926.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)01－0098－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.015

Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JISCO

YUAN Chenguang, HUANG Zili, LIU Chuyu, ZHU Chaobo, XIAO Shuo, HUANG Tao
(*Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*)

Abstract: The iron grade of specularite tailings using strong magnetic separation discharged from the concentrator plant in JISCO is about 28%, which has high recovery value. In order to recover the iron minerals, the reverse flotation-magnetizing roasting-magnetic separation experiment is carried out based on the process mineralogy of the tailings using strong magnetic separation. The results show that the strong magnetic tailings can obtain a flotation concentrate with an iron grade of 43.88% and an operating iron recovery rate of 50.93% after a rough and refined reverse flotation test process. After magnetizing roasting, calcining is obtained, and after a rough and refined magnetic separation test, a magnetic concentrate with an iron grade of 62.37% could be obtained, and its operating iron recovery rate is 83.39%.

Key words: specularite; strong magnetic tailings; reverse flotation; magnetizing roasting; magnetic separation

从 1996 年至今，我国钢铁产量一直居于世界第一，钢铁行业对于铁矿石的需求量逐年攀升。我国铁矿石普遍存在“贫、细、杂”的特点，难以满足钢铁市场的需求。因此，充分开发利用好我国的铁矿资源，加强对铁尾矿的回收利用，对于节约和保障铁矿资源安全供应具有重要的意义[1]。

国内有众多学者对开发利用铁尾矿进行了相关研究。张淑会等[2]利用铁尾矿成功制备 SiC-$Y_2Al_5O_{12}$复相陶瓷。李荣海等[3]成功地将鞍钢铁尾矿应用在公路工程中。胡天喜等[4]利用铁尾矿开发研制出了土壤改良剂，经过小区种植对比试验和大区示范试验，农作物增产效果明显。夏征宇等[5]通过向竖炉球团添加含铁改

收稿日期：2022－01－26；**修回日期**：2022－05－13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51872210)
作者简介：袁晨光(1997—)，男，硕士研究生，从事二次资源回收利用研究。
通信作者：黄自力(1965—)，男，博士，教授，从事矿物加工与资源综合利用研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性添加剂试验，证明了竖炉配加含铁细沙尾矿改性添加剂替代膨润土生产球团的可行性。潘料庭等[6]使用镍铁尾矿代替白云石进行工业试验，结果表明烧结矿中硅酸盐、磁铁矿、镁橄榄石和铁酸钙等增加，形成中孔厚壁结构，烧结矿强度得到改善，转鼓指数提高，烧结机利用系数提高，烧结矿成本下降，铁水成本下降，效益显著增加。祁忠旭等[7]对云南某超贫微细赤铁矿优化原有选矿工艺，在原有工艺流程上增加重选和浮选，得到的铁精矿较改造前铁品位提高 8.73%，回收率提高 20.42%。张春伟等[8]对某铁尾矿采用强磁选—摇床—反浮选流程最终得到的铁精矿铁品位 52.13%，铁回收率 34.67%。刘伟等[9]对某铁尾矿采用强磁预选，将强磁精矿制粒—磁化焙烧—磁选回收铁矿物，得到的铁精矿铁品位为 56.17%，铁回收率为 61.75%。庄骏等[10]对某铁尾矿进行了强磁选—磁化焙烧—弱磁选研究，得到了铁品位为 53.96%，铁回收率为 80.22% 的铁精矿。余建文等[11]采用悬浮磁化焙烧—弱磁选回收鞍钢东部铁尾矿，经过处理后可以获得铁品位为 65.91%，铁回收率为 94.06% 的磁选精矿。

酒钢选矿厂使用的镜铁矿经磨矿后，<0.038 mm 颗粒的粒级占比达到 90%，属于难选矿石，回收率低，强磁分选后尾矿 TFe 品位仍高达 27%。该矿开发早，建矿时间长，尾矿大量堆积，而且酒钢选矿厂每年仍持续产生大量铁尾矿。这些尾矿数量大，且铁品位高，含铁量丰富，因此对其中铁矿物进行回收利用，具有节约资源、保护环境、创造经济效益等多重意义。本文在基于该尾矿工艺矿物学研究的基础上，采用反浮选脱硅，浮选铁精矿进行磁化焙烧—磁选等工艺，对回收其中的铁矿物进行了系统的试验研究。

1　工艺矿物学研究

1.1　试样粒度组成

试样来自某铁矿选矿厂强磁选尾矿，呈灰褐色、粉状，经过干燥处理后，测得其含水量为 1.3%。对试样进行水筛分析，其粒度组成如表 1 所示。

表 1　试样粒度分析(质量分数)

Table 1　Particle size analysis of the sample　　%

项目	≥0.074 mm	(0.074,0.053] mm	(0.053,0.038] mm	<0.038 mm
占比	1.36	0.97	2.48	95.19
品位	8.60	9.22	8.96	28.61
金属分布率	0.42	0.32	0.80	98.46

由表 1 可知，试样中 <0.038 mm 粒级占比高达 95.19%，属于微细粒级矿物，分选难度较大。

1.2　化学组成

试验主要化学成分如表 2 所示。由表 2 可知，试样中主要金属元素铁质量分数为 27.68%，脉石成分复杂，其中 SiO_2 质量分数最高，为 37.59%。

表 2　试样主要化学成分(质量分数)

Table 2　Main chemical components of the sample　　%

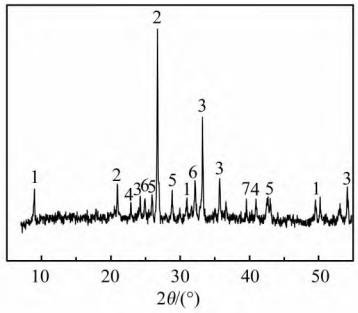
TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
27.68	6.67	37.59	7.06	2.29	2.06

1.3　试样矿物组成

为了解试样的矿物组成，对该试样进行了 X 射线衍射分析(XRD)，铁元素化学物相分析，以及偏光显微镜分析，结果分别见图 1、表 3 与图 2。

由图 1 可知，试样中铁矿物主要有镜铁矿、褐铁矿和菱铁矿，脉石矿物主要为云母、石英、方解石、斜长石、重晶石等，其它矿物由于质量分数过低而无法被检测。由表 3 可知，铁主要以赤褐铁矿的形式存在，其金属分布率占 85.3%，其次铁以菱铁矿的形式存在，其分布率占 12.44%，而有较少量的铁存在于硅酸盐矿物、硫铁矿中，仅有极少量的铁存在于磁铁矿

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1—云母；2—石英；3—镜(褐)铁矿；4—方解石；5—重晶石；6—菱铁矿；7—斜长石。

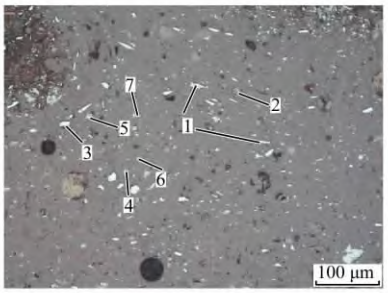
图 1 试样 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the sample

表 3 试样铁元素化学物相分析(质量分数)

Table 3 Chemical phase analysis of iron element in the sample %

铁赋存相	铁品位	金属分布率
磁性铁中铁	0.02	0.07
菱铁矿中铁	3.45	12.44
赤褐铁矿中铁	23.60	85.30
硅酸铁中铁	0.50	1.80
硫铁矿中铁	0.11	0.39
合计	27.68	100



1—镜铁矿；2—褐铁矿；3—方解石；4—石英；5—白云母；6—斜长石；7—绢云母。

图 2 试样偏光显微镜分析

Fig. 2 Polarizing microscope analysis of the sample

中。此外，由图 2 可知：试样中的镜铁矿呈自形或半自形针板状，为灰白色，大多呈细小单晶粒零散均匀分布，部分分布在脉石矿物裂隙中；褐铁矿则呈不规则粒状，且部分分布在镜铁矿晶粒边缘；试样中主要含有的脉石矿物，即石英、斜长石、绢云母、方解石、白云母，均呈不规则粒状，且零散分布。

1.4 还原剂

磁化焙烧所用还原剂为煤粉，将煤块破碎，磨粒度小于 0.150 mm 占比为 90%，其成分分析如表 4 所示。

表 4 煤粉的成分分析(质量分数)

Table 4 Composition analysis of pulverized coal %

固定碳	挥发分	水分	灰分
69.31	10.89	0.40	19.36

由表 4 可知，该煤粉含碳量达 69.31%，且其所含挥发分较低，可作为磁化焙烧的还原剂。

2 试验方法

2.1 反浮选试验

采用一粗一精的反浮选试验流程。由于该试样粒度较细，浮选时易产生泥化现象，故采用较稀的浮选矿浆浓度为 20%。用 1 mol/L 的盐酸和 1 mol/L 的氢氧化钠溶液作为 pH 调整剂，以质量浓度为 1% 的可溶性淀粉为抑制剂，0.1 mol/L 十二胺盐酸溶液作为捕收剂，同时由于十二胺具有起泡性能，可兼作起泡剂使用。试验主要探讨了 pH 值、抑制剂用量、捕收剂用量等工艺参数对反浮选粗选的影响，根据粗选精矿指标确定反浮选粗选优化条件。最后，在优化条件下进行一粗一精浮选开路试验，得到反浮选铁精矿。

2.2 焙烧试验

经过干燥处理后的反浮选铁精矿与煤粉混匀，置于马弗炉中进行磁化焙烧。试验主要考察煤粉用量、焙烧温度、焙烧时间等工艺参数对磁化焙烧的影响，在此基础上确定焙烧试验的优化条件，在优化条件下得到焙砂。最后，试验通过焙砂的磁选粗选指标，对焙烧工艺参数进行评价。

2.3 磁选试验

焙砂采用一粗一精的磁选试验方法进行分选。粗选磁场强度为 144 kA/m，精选磁场强度为 96 kA/m。

3 试验结果与讨论

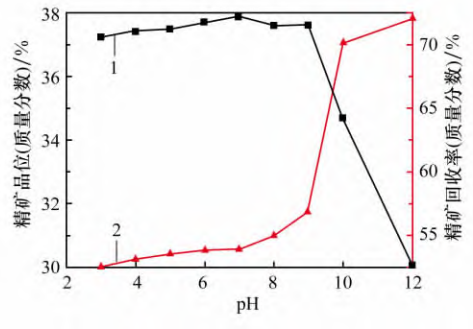
3.1 反浮选试验

3.1.1 反浮选粗选条件试验

(1) pH 值对粗选指标的影响。在矿浆浓度

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为 20%，可溶性淀粉用量为1 000 g/t，十二胺用量为 300 g/t 的条件下，考察 pH 值对粗选指标的影响，结果如图 3 所示。



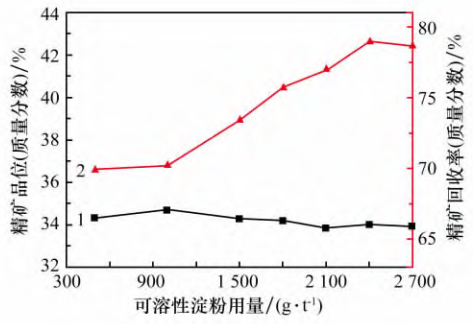
1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 3　粗选精矿品位和回收率随 pH 变化曲线

Fig. 3　The effect of pH value on roughing concentrate grade and recovery rate

由图 3 可知：当矿浆 pH 小于 10 时，粗选精矿品位为 37%~38%，而回收率均低于 57%；当 pH 为 10 时，精矿品位与之前相比降低较少，而回收率显著增加；当 pH 大于 10 时，精矿品位显著降低，且回收率未明显增加。综合考虑，确定浮选矿浆最佳 pH 值为 10，此时粗精矿铁品位为 34. 70%，铁回收率为 70. 13%。

(2) 可溶性淀粉用量对粗选指标的影响。在矿浆浓度为 20%，矿浆 pH 值为 10，十二胺用量为 300 g/t 的条件下，考察可溶性淀粉用量对粗选指标的影响，结果如图 4 所示。



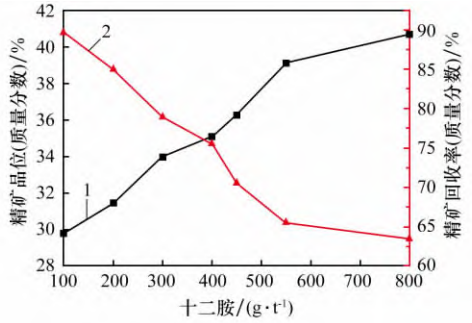
1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 4　粗选精矿品位和回收率随可溶性淀粉用量变化曲线

Fig. 4　The effect of soluble starch dosage on grade and recovery rate of roughing concentrate

由图 4 可知，可溶性淀粉对粗选精矿品位的影响不大，在试验用量范围内粗选精矿品位为 34%~35%，然而其对粗选精矿的回收率影响相对较大。当可溶性淀粉用量在 500 ~ 1 000 g/t 时，回收率基本不变；在 1 000 ~ 2 400 g/t 时，回收率的增长趋势明显，当用量大于 2 400 g/t 时，回收率和粗精矿品位基本不变。综合考虑，确定可溶性淀粉最佳用量为2 400 g/t，此时粗精矿铁品位为 34. 01%，铁回收率为 78. 92%。

(3) 十二胺用量对粗选指标的影响。在矿浆浓度为 20%，矿浆 pH 值为 10，可溶性淀粉用量为 2 400 g/t 的条件下，考察十二胺用量对粗选指标的影响，结果如图 5 所示。



1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 5　粗选精矿品位和回收率随十二胺用量变化曲线

Fig. 5　The effect of dodecylamine dosage on grade and recovery rate of roughing concentrate

由图 5 可知，随着十二胺的用量增加，粗精矿品位增加，回收率降低。当十二胺用量从 100 g/t 增加到 550 g/t 时，粗精矿品位提高及回收率降低都比较明显；当用量大于 550 g/t 时，粗精矿品位增加及回收率降低均有减缓。综合考虑，确定十二胺最佳用量为 400 g/t，此时粗精矿铁品位为 35. 10%，铁回收率为 75. 50%。

根据以上条件试验结果，可以将矿浆 pH = 10，抑制剂可溶性淀粉用量为 2 400 g/t，以及捕收剂十二胺用量为 400 g/t 作为反浮选粗选的优化条件。

3. 1. 2　反浮选开路试验

在优化条件下进行反浮选粗选，反浮选粗精矿在矿浆 pH = 10，可溶性淀粉为 1 200 g/t，以及十二胺用量为 200 g/t 的条件下进行精选。浮选指标如表 5 所示，反浮选开路试验数质量流程如图 6 所示。经过一粗一精试验，得到反浮选铁精矿铁品位为 43. 88%，作业铁回收率为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

50.93%。

表 5 反浮选各产物指标(质量分数)

Table 5 Reverse flotation product indexes %

产物	产率	铁品位	回收率
精选精矿	32.13	43.88	50.93
精选尾矿	27.41	24.81	24.57
粗选尾矿	40.46	16.76	24.50
原矿	100	27.68	100

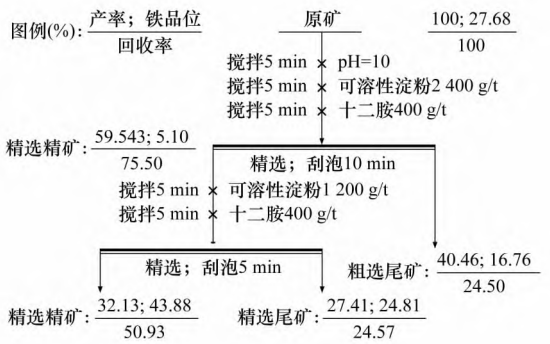
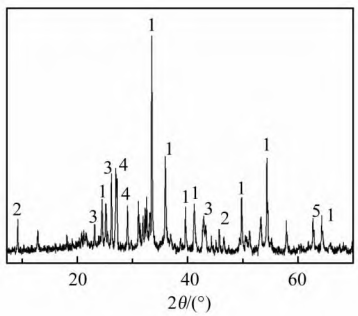


图 6 反浮选开路试验数质量流程

Fig. 6 Numerical and quality flow chart of reverse flotation open circuit test

3.1.3 反浮选铁精矿矿物组成分析

对在反浮选优化条件下得到的反浮选铁精矿进行矿物组成分析，其 XRD 分析如图 7 所示。与图 1 相比，图 7 中镜铁矿的 XRD 衍射吸收峰明显增强，且为第一强吸收峰，这表明通过反浮选脱硅试验，镜铁矿在浮选过程中产生了明显的富集现象。



1—镜铁矿；2—云母；3—重晶石；4—石英。

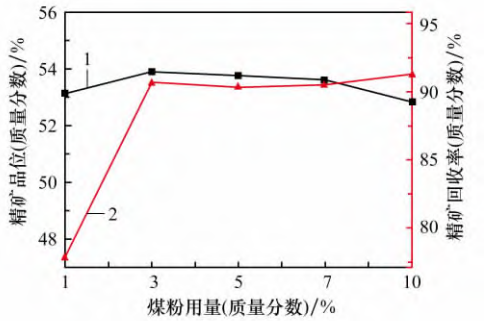
图 7 反浮选铁精矿 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of reverse flotation iron concentrate

3.2 磁化焙烧试验

3.2.1 磁化焙烧条件试验

(1) 煤粉用量对焙砂磁选粗选精矿指标的影响。煤粉用量即表示煤粉对于浮选铁精矿质量的百分比。在焙烧温度为 700 ℃，焙烧时间为 100 min 的条件下，试验考察了煤粉用量对焙砂磁选粗选精矿指标的影响，结果如图 8 所示。



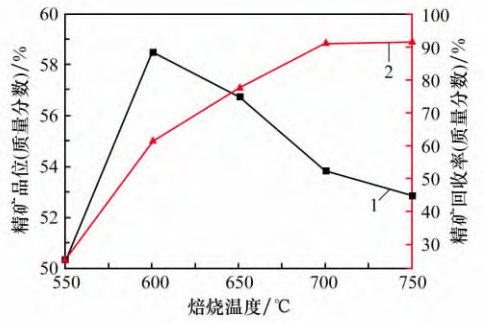
1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 8 煤粉用量对粗磁选精矿的影响

Fig. 8 The effect of coal dosage on coarse magnetic concentrate

由图 8 可知，当煤粉用量增加时，铁品位先以较小幅度增加，后缓慢降低，而回收率在煤粉用量为 1%~3% 时显著增加，当煤粉用量大于 3% 之后无明显变化。综合考虑，将 3% 的煤粉用量作为焙烧试验最优条件。此时，精矿铁品位为 53.90%，铁回收率 90.69%。

(2) 焙烧温度对焙砂磁选粗选精矿指标的影响。在煤粉用量为 3%，焙烧时间为 100 min 的条件下，考察了焙烧温度对焙砂磁粗选精矿指标的影响，结果如图 9 所示。



1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 9 焙烧温度对粗磁选精矿的影响

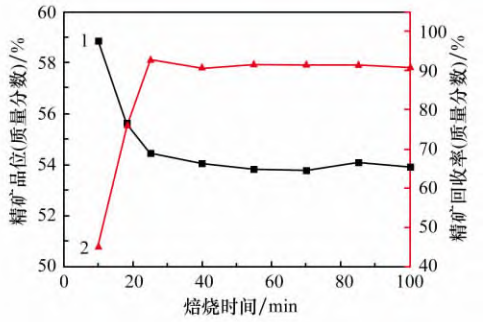
Fig. 9 The effect of roasting temperature on coarse magnetic concentrate

由图 9 可知，随着试验温度的升高，品位先增加后降低，精矿回收率逐渐增加趋于平稳。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在 550 ℃时，没有达到镜铁矿磁化焙烧的温度条件。从 600 ℃开始，随温度的升高，生成的弱磁性的浮氏体和硅酸铁逐渐增多，导致铁品位逐渐降低。在试验过程中焙烧温度由 550 ℃开始升高到 700 ℃时，精矿回收率逐渐增加，到 700 ℃后趋于平稳。综合考虑确定最佳焙烧温度为 700 ℃，且在 700 ℃时精矿铁品位为 53.90%，铁回收率为 90.69%。

(3) 焙烧时间对焙砂磁选粗选精矿指标的影响。在煤粉用量为 3%，焙烧温度为 700 ℃的条件下，进行了考察焙烧时间对粗磁选精矿的影响试验，结果如图 10 所示。



1—精矿品位；2—精矿回收率。

图 10　焙烧时间对粗磁选精矿的影响

Fig. 10　The effect of roasting time on coarse magnetic concentrate

由图 10 可知，当焙烧时间从 15 min 延长到 25 min 时，精矿品位持续降低，而回收率从 45% 增加到 90% 以上，这是因为焙烧时间较短时，反应未进行完全，只有少量镜铁矿被还原成磁铁矿，磁选时由于磁铁矿量少，夹杂的脉石少，故精矿品位明显较高。而当焙烧时间达到 25 min 及以上时，反应基本进行完全，精矿铁品位约为 54%，回收率约为 91%。综合考虑，焙烧温度取 25 min 较为合适，此时铁品位为 54.43%、作业铁回收率为 90.96%。

根据以上条件试验结果，可将煤粉用量为 3%、焙烧温度为 700 ℃、焙烧时间为 25 min 作为磁化焙烧的最佳条件。

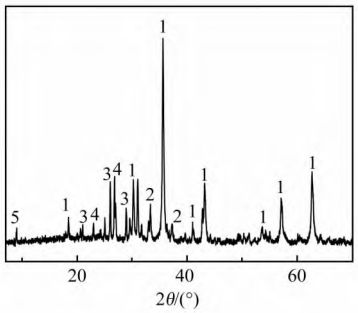
3.2.2　焙砂矿物组成分析

反浮选铁精矿在优化条件下进行磁化焙烧，所得焙砂的 XRD 分析和铁元素化学分析分别如表 6 和图 11 所示。

表 6　焙烧前矿样铁元素化学物相分析(质量分数)

Table 6　Chemical phase analysis of iron element before roasting　　%

铁赋存相		铁品位	金属分布率
磁性铁中铁	焙烧前	0.12	0.41
	焙烧后	42.31	89.43
菱铁矿中铁	焙烧前	4.62	10.53
	焙烧后	0.85	1.80
赤褐铁矿中铁	焙烧前	38.85	88.54
	焙烧后	4.35	9.19
硫铁矿中铁	焙烧前	0.15	3.42
	焙烧后	0.18	0.38
硅酸铁中铁	焙烧前	0.14	0.32
	焙烧后	0.22	4.65
合计	焙烧前	43.8	100
	焙烧后	47.31	100



1—磁铁矿；2—镜铁矿；3—重晶石；4—石英；5—云母。

图 11　焙砂的 XRD 图谱

Fig. 11　XRD pattern of calcine

由图 11 可知，焙砂中的铁矿物主要是磁铁矿，脉石矿物仍然是重晶石、石英、云母等。结合图 1、图 7 和表 6 可知，原试样的 XRD 图谱中没有磁铁矿的衍射吸收峰，有较强的镜铁矿和菱铁矿的衍射吸收峰，而焙烧样的 XRD 图谱中出现了很强的磁铁矿衍射吸收峰，并且是第一强度峰，而镜铁矿的衍射吸收峰很弱，没有发现菱铁矿的衍射吸收峰。焙烧前后样品中磁性铁的铁分布率从 0.41% 增加到了 89.43%，而菱铁矿和镜铁矿的铁分布率明显降低。以上分析表明，焙烧样中的镜铁矿和菱铁矿基本被还原成了磁铁矿，磁化焙烧效果良好。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 焙砂磁选试验

将优化条件下的磁化焙烧试样，进行一粗一精磁选试验，试验数质量流程与磁化焙烧—磁选各产物指标分别见图12与表7。

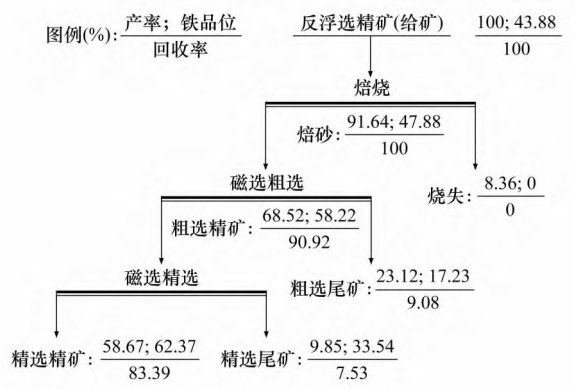


图12 磁化焙烧—磁选试验数质量流程

Fig. 12 Numerical and quality flow chart of magnetic roasting-magnetic separation test

表7 磁化焙烧－磁选各产物指标(质量分数)

Table 7 Product indexes of magnetic roasting-magnetic separation %

产物	产率	铁品位	金属回收率
精选精矿	58.67	62.37	83.39
精选尾矿	9.85	33.54	7.53
粗选尾矿	23.12	17.23	9.08
反浮选精矿(给矿)	100	43.88	100

由图12与表7可知，该试验可得到铁品位为62.37%的磁选铁精矿，作业铁回收率为83.59%。

4 结 论

(1) 酒钢铁精矿强磁选尾矿全铁品位较高，为27.68%。该尾矿中铁矿物主要以镜铁矿和褐铁矿的形式存在，其次以菱铁矿的形式存在，只有少量铁矿物存在于硅酸铁、黄铁矿和磁铁矿中。其脉石矿物主要有石英、重晶石以及云母类硅酸盐矿物。

(2) 在矿浆pH=10，抑制剂可溶性淀粉用量为2 400 g/t，以及捕收剂十二胺盐酸用量为400 g/t的优化条件下进行反浮选粗选，对反浮选粗选精矿进行一段精选，可得到铁回收率为50.93%，铁品位为43.88%的浮选精矿。

(3) 在煤粉用量为3%、焙烧温度为700 ℃，焙烧时间为25 min这一优化条件下得到的焙烧样，经过一粗一精磁选可得到铁品位为62.37%的铁精矿，反浮选精矿磁化焙烧—磁选作业回收率为83.39%。

参考文献:

[1] 潘宝峰,时彦宁. 铁尾矿综合利用研究现状[J]. 西部探矿工程,2015(5):153－155,159.
PAN Baofeng,SHI Yanning. Research status of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Exploration project in the west,2015(5):153－155,159.

[2] 张淑会,薛向欣,吕庆,等. 利用铁尾矿制备SiC-$Y_3Al_5O_{12}$复相陶瓷[J]. 钢铁,2008,43(11):94－98.
ZHANG Shuhui,XUE Xiangxin,LÜ Qin,et al. Preparation of SiC-$Y_3Al_5O_{12}$ multiphase ceramics from iron tailings[J]. Iron & Steel,2008,43(11):94－98.

[3] 李荣海,汪建,周志华,等. 铁尾矿在公路工程中的应用[J]. 矿业工程,2007,5(5):52－54.
LI Ronghai,WANG Jian,ZHOU Zhihua,et al. Application of iron tailings in highway engineering[J]. Mining Engineering,2007,5(5):52－54.

[4] 胡天喜,文书明,陈名洁. 我国尾矿综合利用的一些进展[J]. 中国矿业,2006(1):22－29.
HU Tianxi,WEN Shuming,CHEN Mingjie. Some progress on the comprehensive utilization of the tailings inour country[J]. China Mining Magazine,2006(1):22－29.

[5] 夏征宇,黄发元,诸荣孙,等. 竖炉球团使用含铁尾矿改性添加剂试验[J]. 烧结球团,2011,36(1):28－32.
XIA Zhengyu,HUANG Fayuan,ZHU Rongsun,et al. Experimental study on modification of iron tailings in shaft furnace Pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(1):28－32.

[6] 潘料庭,李林峰,蔡小霞. 镍铁尾矿用于烧结生产的工业试验[J]. 烧结球团,2015,40(1):42－44;50.
PAN Liaoting,LI Linfeng,CAI Xiaoxia. Application of nickel iron tailing in sintering production[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(1):42－44;50.

[7] 祁忠旭,韩远燕,孙大勇,等. 提高云南某超贫微细赤铁矿选矿回收率的研究[J]. 烧结球团,2020,45(5):59－62.
QI Zhongxu,HAN Yuanyan,SUN Dayong,et al. Study on improvement of mineral processing recovery of a ultra-lean fine hematite ore in Yunnan[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):59－62.

[8] 张春伟. 梅山铁矿尾矿铁矿物再回收技术研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZAHNG Chunwei. Research on recovery of iron minerals from tailings of meishan iron ore [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.

[9] 刘伟，陈铁军，展仁礼．酒钢尾矿铁及重晶石综合回收试验研究[J]．矿产综合利用，2020(5)：120－124.
LIU Wei, CHEN Tiejun, ZHAN Renli. Experimental study on comprehensive recovery of iron and barite from tailings of jiugang [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5): 120－124.

[10] 庄骏，陈铁军，展仁礼，等．酒钢镜铁矿尾矿再选试验[J]．钢铁钒钛，2017，38(1)：83－90.
ZHAUNG Jun, CHEN Tiejun, ZHAN Renli. Researches on reconcentration of a specularite tailing from JISCO [J]. Iorn steel vanadium titanium, 2017, 38(1): 83－90.

[11] 余建文，欧杨，曲孔辉，等．鞍钢东部铁尾矿悬浮磁化焙烧—磁选试验[J]．钢铁，2021，56(7)：25－30.
YU Jianwen, OU Yang, QU Konghui, et al. Study on suspension magnetization roasting-magnetic separation of iron tailings from eastern anshan iron and steel [J]. Iron & Steel, 2021, 56(7): 25－30.

(上接第 23 页)

[5] 张卫亮，马忠民，周海平，等．烧结工艺余热回收利用技术研究[J]．有色冶金节能，2011 (1)：47－50.
ZHANG Weiliang, MA Zhongmin, ZHOU Haimin, et al. Discussion on waste heat recovery technology of sintering process [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallergy, 2011 (1): 47－50.

[6] 杨明华．钢铁厂蒸汽利用现状及发展方向[C]//2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会论文集．唐山：中国金属学会，2011：110－118.
YANG Minghua. Present situation and development direction of steam utilization in iron and steel works [C]//2011 National metallurgical energy conservation and emission reduction and low-carbon technology development symposium proceedings. Tangshan: The Chinese Society for Metals, 2011: 110－118.

[7] 高光星．烧结余热发电技术应用及改进[J]．宝钢技术，2019(2)：23－28.
GAO Guangxing. Application and improvement of power generation technology using sintering waste [J]. Baosteel Technolgoy, 2019(2): 23－28.

[8] 肖衍党，李晨飞，韩涛．烧结余热发电技术及系统的优化分析[J]．烧结球团，2011，36(3)：47－53.
XIAO Yandang, LI Chenfei, HAN Tao. Sintering waste heat power generation technology and optimization and analysis of its system [J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(3): 47－53.

[9] 王正，戴立明．烧结余热与电动机联合驱动主抽风机技术[J]．科技创新与应用，2018(34)：160－163.
WANG Zheng, DAI Liming. Sinter blower residual heat recovery turbine [J]. Technology Innovation and Application, 2018(34): 160－163.

[10] 王毅，何张陈，颜学宏．烧结冷却余热发电系统的热力学模型及主蒸汽参数的优化选择[J]．烧结球团，2011，36(3)：54－58.
WANG Yi, HE Zhangchen, YAN Xuehong. Thermodynamic model of sintering waste heat power generation and optimization of main steam parameters [J]. Information network of Sintering and Pelletizing, 2011, 36(3): 54－58.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net