

四川某铁精矿回收超纯铁精矿的选矿实验研究

何婷, 余新文, 杨晓军, 喻福涛, 刘志刚

(四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心(国土资源部成都矿产资源监督检测中心), 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要: 四川某铁精矿中 TFe 品位为 64.56%, 杂质成分 SiO_2 、 Al_2O_3 含量分别为 5.50% 和 2.01%。物质组分研究表明, 铁矿物主要以磁性铁形式存在, 采用“阶段磨矿(再磨过程添加分散剂 H01)-阶段磁选”工艺对该铁精矿进行提质降杂实验, 实验可获得 TFe 品位为 72.11% 的超纯铁精矿产品, 精矿中杂质成分 SiO_2 含量为 0.20%, Al_2O_3 的含量为 0.16%, 酸不溶物的含量为 0.28%, TFe 的回收率为 92.72%。

关键词: 铁精矿; 阶段磨矿; 分散剂; 阶段磁选; 超纯铁精矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.029

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)05-0169-06

超纯铁精矿可广泛应用于冶金、电子、化工和医疗等行业, 市场需求量巨大, 尽管我国铁矿资源丰富, 次于巴西、澳大利亚、乌克兰、俄罗斯^[1], 但我国正处于经济快速发展阶段, 中国作为世界第一铁矿石生产与消费大国, 每年需要从国外进口大量铁矿石来满足国内生产需求, 且我国铁矿石主要以“贫、细、杂、散”为主^[2], 矿石类型复杂, 分选难度大。因此, 想要得到超纯铁精矿, 必须对铁精矿进行提铁降杂处理。

目前制备超纯铁精矿的主要方法有: 单一反浮选工艺^[3]、单一磁选工艺^[4-5]、浸出工艺^[6]、磁-重联合选工艺^[7]、磁-浮联合流程^[8]以及磁-浮-酸浸联合流程^[9]等。随着超纯铁精粉的市场需求逐渐增

大, 需要在保证超纯铁精矿的品质的同时, 尽量降低成本, 简化工艺流程才能获得最大的企业经济效益。

本文主要采用“阶段磨矿(再磨过程添加分散剂 H01)-阶段磁选”工艺来对铁精矿进行进一步的提纯除杂处理, 从而获得超纯铁精矿产品。采用该工艺的优势在于, 工艺流程结构简单, 成本能耗较低, 对矿山企业实际生产起到重要的指导意义。

1 试样化学组成

对代表性铁精矿试样进行化学多项分析、铁的物相分析, 结果分别见表 1、2。

表 1 化学多元素分析结果/%

Table 1 Analysis results of chemistry multi-elements of the sample

TFe	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	TS	P	TiO_2
64.56	5.50	2.01	0.21	0.17	0.68	0.25	0.31	0.068	0.146

由表 1、2 可知, 铁精矿试样中 TFe 的含量为 64.56%, 且铁主要以磁铁矿和磁黄铁矿的形式存在, 占 97.83%。主要杂质组分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO、S 等。

2 -2 mm 试样粒度分析

-2 mm 试样粒度组成及铁的分布结果见表 3。

由表 3 可以看出, 铁在各个粒级中均有分布, 产率主要集中在 -0.15+0.074 mm、-0.074+

收稿日期: 2020-08-06

作者简介: 何婷(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事资源综合利用。

表 2 铁的物相分析结果

Table 2 Analysis results of iron phase of the sample

铁相态	含量/%	分布率/%
磁铁矿·磁黄铁矿	63.16	97.83
菱铁矿	0.15	0.23
氧化铁	0.35	0.54
硫化铁	0.90	1.40
全铁	64.56	100.00

表 3 -2 mm 试样粒度组成及分析结果

Table 3 Result of the -2 mm particle size distribution of sample

粒级/mm	产率/%	TFe品位/%	TFe分布率/%
+0.45	1.11	23.58	0.41
-0.45+0.25	6.39	50.41	4.99
-0.25+0.15	16.50	61.46	15.71
-0.15+0.074	30.76	64.77	30.86
-0.074+0.045	20.42	67.86	21.46
-0.045+0.038	3.35	68.84	3.57
-0.038	21.47	69.16	23.00
试样	100.00	64.56	100.00

0.045 mm 和 -0.038 mm 三个粒级，分布率分别是 30.86%、21.46%、23.00%，在 +0.45 mm、-0.45+0.25 mm、-0.045+0.038 mm 产率三个粒级产率较低，分别是 1.11%、6.39%、3.35%，分布率也相对较低，为 0.41%、4.99%、3.57%。TFe 的品位在粗粒级中较低，随着粒级逐渐变细，TFe 的品位逐渐增高。

3 主要矿物嵌布特征

将试样制作砂光片和砂薄片后通过光学显微镜观察发现，试样中磁铁矿 80% 左右，磁黄铁矿 1%~2%，黄铁矿<1%，赤铁矿<1%，磁铁矿和磁黄铁矿均主要为单体，见少量连生体。连生体多为磁铁矿、磁黄铁矿与透明矿物构成，偶见磁铁矿与磁黄铁矿构成的连生体。其他透明矿物 18% 左右，其中石英 7%~8%，绿泥石 3%~4%，白云母 3%~4%，透闪石 2%~3%，单体、连生体均含。连生体主要为石英与白云母、石英与绿泥石，石英与金属矿物、石英与透闪石、石英与方解石、白云母与绿泥石，绿泥石与金属矿物和方解石等构成的连生体。另零星可见方解石、斜长石、电气石存在。图 1、2 分别为试样光学显微镜薄片和光片。

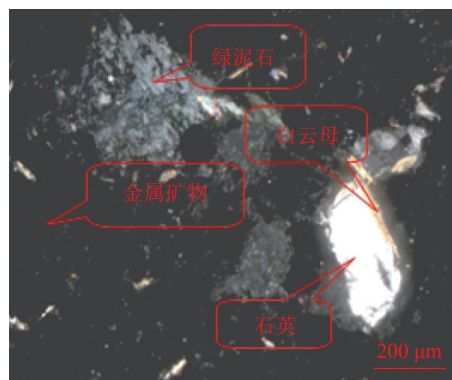


图 1 薄片 (正交偏光)

Fig.1 Flake (cross-polarized light)

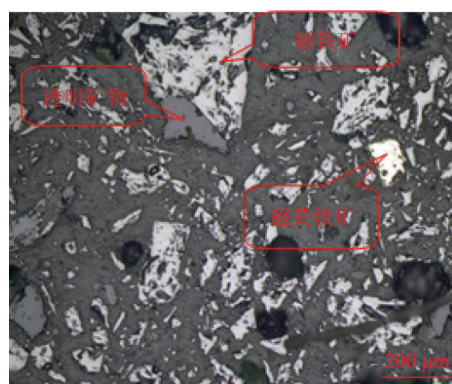


图 2 光片 (单偏光)

Fig.2 Light sheet (single polarized light)

4 磁选条件实验

试样铁的物相分析结果和光学显微镜岩矿鉴定结果表明，试样中铁主要以磁性铁的形式存在，影响铁精矿中铁品位的主要原因是，试样中含有不少的铝、硅杂质如石英、绿泥石、白云母等单体矿物，以及部分跟磁铁矿和磁黄铁矿构成的连生体。因此，要进一步提高试样 TFe 的品位，需对试样进行磨矿处理，使目的矿物与脉石矿物单体解离，为避免过磨泥化造成分选过程中的损失，先对试样进行粗磨，然后根据目的矿物与脉石矿物磁性差异，采用弱磁选设备进行分选实验。

4.1 粗选磨矿细度条件实验

选择磁场强度为 151.24 kA/m，改变粗选磨矿细度条件，考查磨矿细度对磁选粗精矿中 TFe 的品位和回收率的影响，磨矿细度实验流程及实验结果见图 3、4。

随着磨矿细度的增加，粗选铁精矿中 TFe 的品位呈下降趋势，TFe 的回收率逐渐增高。当磨矿细度继续增加的时候，粗选铁精矿中 TFe 的品位

又有增高的趋势，综合考虑粗选铁精矿中 TFe 的品位和回收率的指标，确定粗选磨矿细度选择在 -0.074 mm 65% 条件下进行。

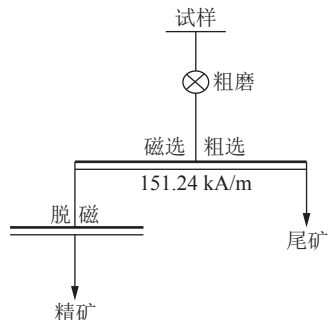


图3 磁选实验流程

Fig.3 Magnetic separation experiment process

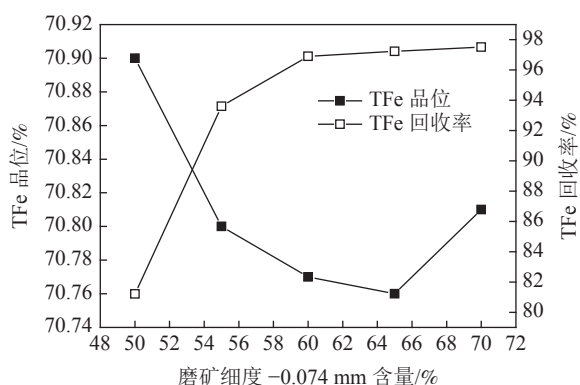


图4 磨矿细度对粗精矿 TFe 的品位和回收率的影响
Fig.4 Effect of grinding fineness on grade and recovery of iron rough concentrate

4.2 粗选磁场强度条件实验

为考查磁场强度对磁选粗精矿中 TFe 的品位和回收率的影响，在磨矿细度 -0.074 mm 65% 的条件下进行粗选磁场强度条件实验，实验流程同图 3，实验结果见图 5。

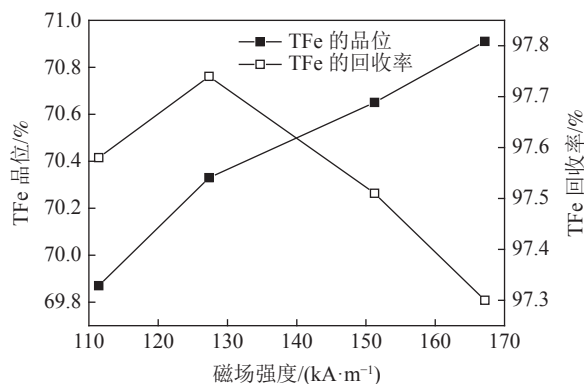


图5 粗选磁场强度对粗精矿 TFe 的品位和回收率的影响

Fig.5 Effect of roughing magnetic intensity on grade and recovery of iron rough concentrate

随着粗选磁场强度的增加，粗选铁精矿中 TFe 的品位逐渐增高，TFe 的回收率先增高后降低，综合考虑粗选铁精矿 TFe 的品位和回收率，粗选磁场强度选择在 151.24 kA/m 条件下进行。

4.3 粗选精矿粒度分析实验

经显微镜镜下观察发现粗选精矿中部分磁铁矿与其他透明矿物未完全解离，所以想获得超纯铁精矿必须对粗选精矿进行再磨，为减少后续磨矿处理量，且避免后续再磨造成过磨现象，考虑将部分筛分得到的合格铁精矿产品优先分离出来，因此对粗选精矿进行筛析实验，结果见表 4。

表4 粗选精矿粒度组成及分析结果

Table 4 Result of distribution of rough concentrate

粒级/mm	产率/%	TFe品位/%	TFe分布率/%
-0.45+0.25	1.19	60.28	1.02
-0.25+0.15	6.82	67.34	6.50
-0.15+0.074	19.22	69.89	19.01
-0.074+0.045	32.36	71.19	32.61
-0.045+0.038	7.37	71.36	7.44
-0.038	33.04	71.45	33.42
合计	100.00	70.65	100.00

粗选精矿筛析实验结果可以看出，粗选精矿各粒级中 TFe 的品位随着粒度变细逐渐增高，但仍未达到超纯铁精矿的质量标准，因此需要对粗选精矿进行再磨使有用矿物与透明矿物达到充分解离。

4.4 粗选精矿再磨细度条件实验

由于粗选铁精矿中磁铁矿含量较高，造成磁选后剩磁较大，磁团聚现象严重，沉降速度快，稳定性差。因此在对粗选铁精矿脱磁后进行再磨时添加无机分散剂来缓解磁团聚现象，实验流程见图 6，实验结果见图 7。

随着粗选铁精矿再磨磨矿细度的增加，精选铁精矿中 TFe 的品位逐渐增高，TFe 的回收率先增高后降低，为综合考虑精选铁精矿 TFe 的品位和回收率，粗精矿再磨磨矿细度选择在 -0.074 mm 85% 条件下进行。

4.5 再磨磁场强度条件实验

为考查再磨磁场强度对磁选铁精矿中 TFe 的品位和回收率的影响，进行精选磁场强度条件实验，实验流程同图 6，实验结果见图 8。

随着粗选精矿再磨精选磁场强度的增加，精选铁精矿中 TFe 的品位逐渐降低，TFe 的回收率

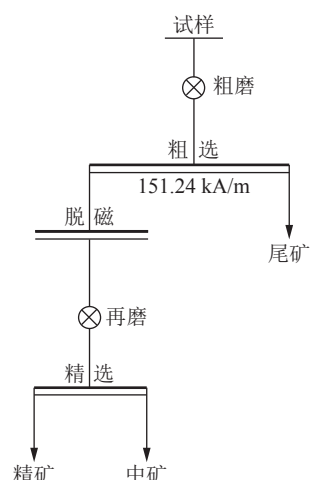


图6 磁选再磨精选实验流程

Fig.6 Magnetic regrinding and cleaning experiment process

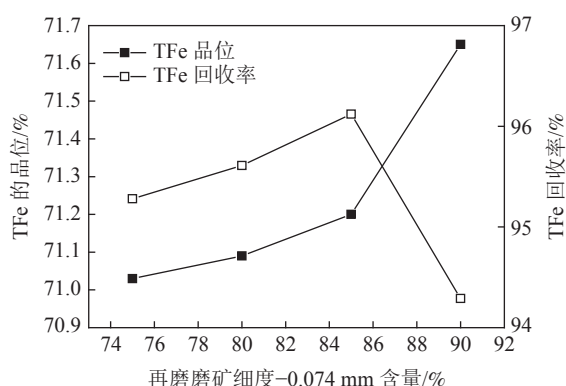


图7 再磨磨矿细度对精选铁精矿 TFe 的品位和回收率的影响

Fig.7 Effect of regrinding fineness on grade and recovery of cleaning iron concentrate

逐渐增高，为综合保证精选铁精矿 TFe 的品位和回收率，因此，粗精矿再磨精选磁场强度选择在 111.44 kA/m 条件下进行。

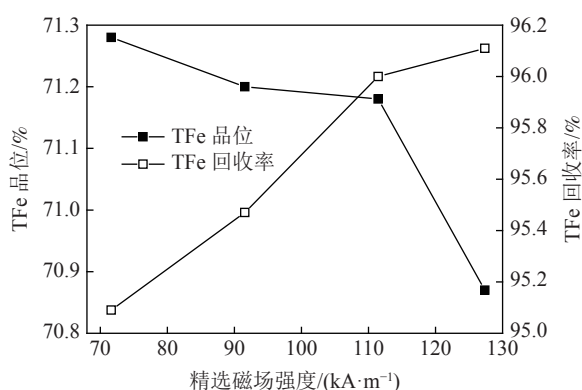


图8 精选磁场强度对精选铁精矿 TFe 的品位和回收率的影响

Fig.8 Effect of cleaning magnetic intensity on grade and recovery of cleaning iron concentrate

5 磁选全流程实验

采用阶段磨矿“一粗一扫二精及中矿再选一粗一精”的磁选工艺流程，粗选、扫选和中矿再选粗选磁场强度为 151.24 kA/m，精选磁场强度均为 111.44 kA/m，粗选磨矿细度为-0.074 mm 65%，再磨磨矿细度为-0.074 mm 85%，为起到分散作用，在磨矿过程中添加无机分散剂 H01，用量为 2 kg/t，磁选全流程实验流程见图 9，磁选全流程实验结果见表 5。

药剂用量单位: kg/t

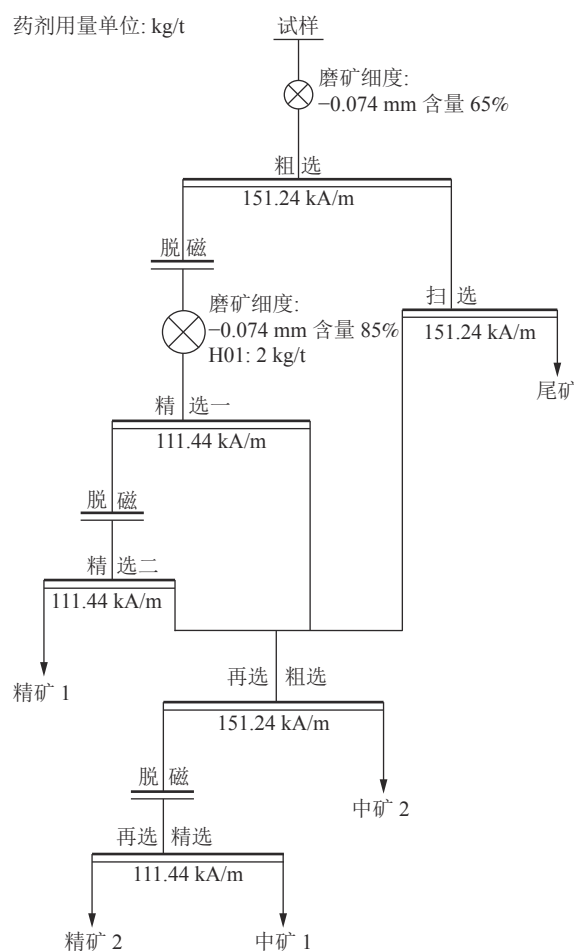


图9 磁选全流程实验流程

Fig.9 Magnetic experiment for total procedure

由全流程实验结果可以看出，精矿 1 和精矿 2 合并作为总铁精矿，产率为 83.16%，TFE 的品位为 72.11%，铁的回收率为 92.72%；中矿 1 中 TFe 的品位较高，作为次铁精矿，产率为 2.71%，TFE 的品位为 63.11%，铁的回收率为 2.64%；尾矿、中矿 2 合并作为总尾矿，产率为 14.13%，TFE 的品位为 21.24%，铁的回收率为 4.64%。

为查明获得的总铁精矿的有用有害成分，对

表5 磁选全流程实验结果
Table 5 Magnetic experiment results of total procedure

产品名称	产率/%	TFe品位/%	TFe回收率/%
精矿 ¹	81.57	72.14	90.98
精矿 ²	1.59	70.57	1.74
总铁精矿	83.16	72.11	92.72
次铁精矿（中矿 ¹ ）	2.71	63.11	2.64
尾矿	9.87	13.43	2.05
中矿 ²	4.26	39.34	2.59
总尾矿	14.13	21.24	4.64
原矿	100.00	64.68	100.00

总铁精矿进行化学多项分析，结果见表6。

总铁精矿中 TFe 含量为 72.11%，主要杂质的含量已经相对较低，其中 SiO₂ 含量为 0.20%，Al₂O₃ 含量为 0.16%，酸不溶物含量为 0.28%，对总铁精矿进行粒度组成分析，结果见表7。

表6 总铁精矿化学多项分析结果/%
Table 6 Chemical composition of final iron concentrate ore

TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S	Cu	Zn
72.11	0.20	0.16	0.18	0.0016	0.0070
Ag	Pb	As	P	酸不溶物	
0.0064	0.0016	<0.005	<0.005	0.28	

表7 总铁精矿粒度组成分析结果
Table 7 Particle size distribution of final iron concentrate ore

粒级/mm	产率/%	TFe品位/%	TFe分布率/%
+0.15	0.51	70.39	0.50
-0.15+0.074	23.26	71.49	23.06
-0.074+0.045	38.29	72.30	38.40
-0.045+0.038	2.24	72.29	2.24
-0.038	35.70	72.31	35.80
合计	100.00	72.11	100.00

总铁精矿中 TFe 的品位随着细度的增加呈现增高的趋势，可能是由于粗粒级的矿石中还存在少量的连生体未得到完全解离，主要是+0.15 mm 和-0.15+0.074 mm 级别中杂质含量相对较多，但最终铁精矿 TFe 的品位已经>72%，综合选矿技术经济考虑，不再进行进一步的提纯处理。

6 结 语

（1）铁精矿试样中铁含量为 64.56%，主要杂质 SiO₂、Al₂O₃ 含量分别为 5.50%、2.01%，其

他杂质还有 CaO、S、MgO 等。试样中的铁 97.83% 以磁铁矿和磁黄铁矿形式存在，其他含铁矿物相对较少，主要为菱铁矿、硫化铁等。

（2）由于杂质 SiO₂、Al₂O₃ 嵌布粒度细，为避免过磨，因此选择阶段磨矿-阶段磁选工艺，在再磨的过程中添加无机分散剂 H01 很好地改善了磁团聚现象，有利于磁选再选铁精矿 TFe 的品位和回收率的提高，并最终获得超纯铁精矿 TFe 的品位为 72.11%，其中 SiO₂ 含量为 0.20%，Al₂O₃ 的含量为 0.16%，酸不溶物的含量为 0.28%，铁的回收率为 92.72%，达到了超纯铁精矿的标准；次铁精矿 TFe 的品位为 63.11%，铁的回收率为 2.64%，生产过程中可作为普通铁精矿单独进行售卖处理。

（3）该工艺流程简单、可操作性强，可为矿山企业获得超纯铁精矿，获得更大的经济利益，具有良好的生产指导意义。

参考文献：

[1] 李凤久, 尚新月, 李国峰, 等. 河北某铁矿铁精矿制备超级铁精矿试验[J]. 矿产综合利用, 2019(6):33-36.
LI F J, SHANG X Y, LI G F, et al. Experimental study on preparation of the super iron concentrate from an iron concentrate of an iron mine in Hebei Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):33-36.
[2] 宋英良, 陈中航, 辛思奇. 离心分选机在贫铁矿选别中的应用[J]. 矿产综合利用, 2019(5):140-143.
SONG Y L, CHEN Z H, XIN S Q. Application of centrifugal separator in poor iron ore beneficiation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):140-143.
[3] 肖烈江. 阴离子捕收剂反浮选制备高纯铁精矿研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
XIAO L J. Research on the preparation of high-purity iron concentrate by reverse flotation with anionic collectors [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
[4] 牛福生, 李卓林, 张晋霞, 等. 单一磁选法制备超纯铁精矿的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2017(2):27-30.
NIU F S, LI Z L, ZHANG J X, et al. Experimental study on the preparation of ultra-pure iron concentrate by a single magnetic separation method[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(2):27-30.
[5] 刘建兵, 武改琴. 山西某区域超纯铁精矿选别试验研究[J]. 矿产综合利用, 2018(5):38-41.
LIU J B, WU G Q. Study on the beneficiation of ultra-pure iron

concentrate in a certain area of Shanxi[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(5):38-41.

[6] 高斯, 黄自力, 王福坤, 等. 普通铁精矿制备超纯铁精矿试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(2):28-31.

GAO S, HUANG Z L, WANG F K, et al. Experimental research on preparation of ultra-pure iron concentrate from ordinary iron concentrate[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(2):28-31.

[7] 邹玄, 张晋霞, 牛福生, 等. 用河北某地磁铁矿石制备超纯铁精矿[J]. *金属矿山*, 2016(7):117-120.

ZOU X, ZHANG J X, NIU F S, et al. Preparation of ultra-pure iron concentrate from magnetite ore in Hebei[J]. *Metal Mine*,

2016(7):117-120.

[8] 张晋霞, 牛福生, 徐之帅, 等. 用某铁精矿粉制取超纯铁精矿的选矿试验研究[J]. *金属矿山*, 2009(5):73-74+87.

ZHANG J X, NIU F S, XU Z S, et al. Beneficiation test research on the preparation of ultra-pure iron concentrate by using certain iron concentrate powder[J]. *Metal Mine*, 2009(5):73-74+87.

[9] 高斯. 低品位铁矿选矿工艺及超纯铁精矿制备的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.

GAO S. Research on beneficiation technology of low-grade iron ore and preparation of ultra-pure iron concentrate [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.

Experimental Study on Recovery of Super Pure Iron Concentrate from an Iron Concentrate in Sichuan

He Ting, Yu Xinwen, Yang Xiaojun, Yu Futao, Liu Zhigang

(Chengdu Analytical & Testing Center, Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources (Chengdu Mineral Resources Supervision and Testing Center, Ministry of Land and Resources), Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: The iron grade of a iron concentrate in Sichuan is 64.56%, and the content of SiO_2 and Al_2O_3 is 5.50% and 2.01% respectively. Material composition research shows that iron minerals are mainly in the form of magnetic iron. The process of stage grinding and magnetic separation which added dispersant H01 in regrinding is carried out to increase iron grade and reduce silicon content. Finally, the super iron concentrate with iron grade 72.11%, SiO_2 content 0.20%, Al_2O_3 content 0.16%, acid insoluble content 0.28%, and the iron recovery is 92.72%.

Keywords: Iron concentrate; Stage grinding; Dispersant; Stage magnetic separation; Super pure iron concentrate