

攀西地区白马辉长岩型超低品位钒钛磁铁矿选铁试验研究

陈福林^{1,3}, 杨晓军^{2,3}, 蔡先炎¹, 吴宁¹

(1. 攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 2. 四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心, 四川 成都 610081; 3. 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: 以攀西地区白马辉长岩型超低品位钒钛磁铁矿为研究对象, 查明了该矿石中化学组分、矿物组成、铁和 TiO_2 的相态。在此基础上进行了多粒级多磁场梯度干式磁选抛尾试验, 通过铁和 TiO_2 的相态分析, 阐述了干式磁选抛尾的合理性; 进行了干式磁选精矿阶段磨矿阶段选别试验, 二段磁选在 -0.074 mm 80% 细度下, 获得了 TFe 57.78%、 TiO_2 7.72%、 V_2O_5 0.69% 的铁精矿, 铁精矿产率为 12.93%, 铁回收率 51.56%, 相对磁性铁回收率为 98.70%, V_2O_5 回收率 78.26%。结果表明, 该矿石虽然铁品位低, 仍具综合回收利用价值。

关键词: 辉长岩; 超低品位; 钒钛磁铁矿; 选铁

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.06.005

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 06-027-05

钒钛磁铁矿是一种分布广泛的含铁、钒、钛矿物, 在全球矿藏分布很广, 该类型矿石主要生成于基性、超基性侵入矿床(岩浆型铁矿床), 以富含钒、钛为特征^[1-3]。据资料统计, 世界上已探明的钒钛磁铁矿储量达 400 亿 t, 主要集中在俄罗斯、南非、中国、美国、加拿大、挪威、芬兰、印度和瑞典等国^[4-6]。各国钒钛磁铁矿资源由于矿石特性各异, 其开发利用侧重面也不同, 有些矿山主要利用铁资源, 有些矿山侧重于利用钒资源, 有些矿山侧重于利用钛资源^[7-8]。总体而言, 国外岩浆型钒钛磁铁矿矿床目前尚未得到大规模开发利用, 综合利用钒钛磁铁矿资源, 目前我国具世界领先地位^[4]。

我国钒钛磁铁矿矿床分布广泛, 储量丰富, 在我国矿产资源开发利用及国民经济发展战略中具有极大的意义, 属关系国计民生发展的重大战

略资源。攀西地区钒钛磁铁矿在我国有特殊的重要地位, 该区已探明大型、特大型矿床 7 处, 中型矿床 6 处, 已探明储量约 100 亿 t, 远景储量达 300 亿 t 以上, 该类型矿石中钒资源量占世界第三位、我国第一位, 钛资源量占全国 90%, 为世界第一^[9-11]。白马矿为攀西地区四大钒钛磁铁矿床之一, 至 07 年年底累计探明资源量 17.42 亿 t, 伴生 TiO_2 资源 1.08 亿 t, 伴生 V_2O_5 资源 389.51 万 t^[12]。白马岩体上部为闪长岩, 中部为辉长岩, 下部为橄榄辉长岩、斜长橄榄岩和橄榄岩^[1,12-14]。

1 试验部分

1.1 试验原料及性质

试样采自于白马矿田家村-青杠坪矿段地表, 矿石类型为辉长岩型。试样的化学成分分析见表 1, 铁化学物见表 2, TiO_2 化学物见表 3。

表 1 试样化学成分分析结果 /%

Table 1 Analysis results of chemical composition of the samples

TFe	TiO_2	V_2O_5	Co	S	Ni	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Sc	P
14.49	4.54	0.114	0.011	0.127	0.001	37.36	14.26	9.507	6.436	0.22	0.0024	0.26

收稿日期: 2019-11-20

作者简介: 陈福林 (1982-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产资源综合利用及钒钛磁铁矿选矿领域的科研工作。

表 2 试样中铁的化学物相分析

Table 2 Chemical phase analysis of iron in the samples

名称	磁性 铁中 Fe	赤褐 铁矿 中 Fe	钛铁 矿中 Fe	硫化 物中 Fe	硅酸 盐中 Fe	TFe
含量 /%	7.57	0.64	1.28	1.21	3.79	14.49
分布率 /%	52.24	4.42	8.83	8.35	26.16	100.00

表 3 试样中 TiO_2 的化学物相分析

Table 3 Chemical phase analysis of titanium clinochile in the samples

项目	钛磁铁矿 中 TiO_2	钛铁矿 中 TiO_2	金红石 中 TiO_2	硅酸盐 中 TiO_2	总 TiO_2
含量 /%	1.34	2.27	0.03	0.90	4.54
分布率 /%	29.52	50.00	0.66	19.82	100.00

矿石中主要金属矿物为磁铁矿、钛磁铁矿和钛铁矿，含少量磁黄铁矿、黄铁矿和赤铁矿，偶见黄铜矿和紫硫镍矿；主要非金属矿物斜长石、普通辉石，少量橄榄石和绿泥石。

1.2 试验方法

在白马辉长岩型低品位钒钛磁铁矿选铁试验中，主要进行了不同粒级不同磁场强度干式磁选抛尾试验、干式抛尾粗精矿一段磨矿弱磁-强磁联合选别试验、一段磁选粗精矿二段磨矿选铁等试验，考察了铁、钛在各选别作业的分布情况。

2 研究结果与讨论

2.1 磁场强度及矿石粒度对干式磁选抛尾效果的影响

试验流程见图 1，试验中扫选与粗选磁场强度相同，试验结果见表 4。

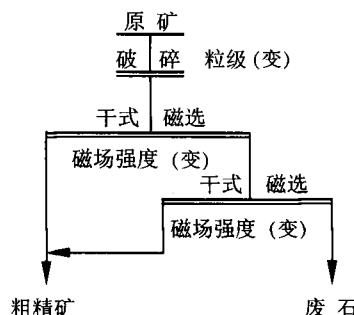


图 1 干式磁选抛尾试验流程

Fig. 1 Experimental flow of tail-throwing of dry magnetic separation

表 4 干式磁选抛尾试验结果

Table 4 Test results of tail-throwing of dry magnetic separation

粒级 /mm	磁场 强度 /T	产品 名称	产率 /%	品位 /%		回收率 /%	
				TFe	TiO_2	TFe	TiO_2
-20	0.3	粗精矿	79.52	16.58	4.84	90.13	83.47
		废石	20.48	7.05	3.72	9.87	16.53
	0.4	原矿	100.00	14.63	4.61	100.00	100.00
		粗精矿	82.38	16.02	4.64	91.63	86.57
	0.5	废石	17.62	6.84	3.37	8.37	13.43
		原矿	100.00	14.40	4.42	100.00	100.00
	0.6	粗精矿	87.23	15.64	4.74	94.39	91.32
		废石	12.77	6.35	3.08	5.61	8.68
	0.7	原矿	100.00	14.45	4.53	100.00	100.00
		粗精矿	78.28	16.46	4.67	89.50	82.09
-12	0.3	废石	21.72	6.96	3.67	10.50	17.91
		原矿	100.00	14.40	4.45	100.00	100.00
	0.4	粗精矿	80.56	16.37	4.87	91.16	86.61
		废石	19.44	6.58	3.12	8.84	13.39
	0.5	原矿	100.00	14.47	4.53	100.00	100.00
		粗精矿	85.01	15.87	4.86	93.54	90.74
	0.6	废石	14.99	6.22	2.81	6.46	9.26
		原矿	100.00	14.42	4.55	100.00	100.00
	0.7	粗精矿	72.38	17.39	4.88	86.93	78.38
		废石	27.62	6.85	3.53	13.07	21.62
-5	0.3	原矿	100.00	14.48	4.51	100.00	100.00
		粗精矿	74.52	17.33	5.11	89.37	84.41
	0.4	废石	25.48	6.03	2.76	10.63	15.59
		原矿	100.00	14.45	4.51	100.00	100.00
	0.5	粗精矿	77.60	17.06	5.16	91.36	88.20
		废石	22.40	5.59	2.39	8.64	11.80
	0.6	原矿	100.00	14.49	4.54	100.00	100.00
		粗精矿	70.00	17.00	5.10	91.36	88.20

从表 4 中可以看出，同一粒级条件下，磁场强度越高，废石产率越低，废石中 TFe 和 TiO_2 含量越低，废石中损失的 TFe 和 TiO_2 越低；同一磁场条件下，粒度越细，废石产率越大，废石中 TFe 和 TiO_2 含量越低，废石中 TFe 和 TiO_2 的损失有所增大，但增大幅度不多。经比较，选取矿石粒度为 -5 mm、磁场强度为 0.5 T 进行该样品的干式磁选抛尾是合适的，该条件下可抛掉产率 22.40%，含 TFe 5.59%、 TiO_2 2.39%，铁、钛损失率分别为 8.64%、11.80% 的废石，粗精矿含 TFe 17.06%、 TiO_2 5.16%，铁、钛回收率分别为 91.36%、88.20%。为了进一步说明干式磁选抛尾效果，将所抛废石进行了铁和钛的化学物相分析，结果分别见表 5、表 6。

表 5 废石中铁的化学物相分析结果

Table 5 Results of chemical phase analysis of iron in the wasted ore

名称	磁性铁 中 Fe	赤褐铁 矿中 Fe	钛铁矿 中 Fe	硫化物 中 Fe	硅酸盐 中 Fe	TFe
含量 /%	0.24	0.56	0.94	0.74	3.11	5.59
分布率 /%	4.29	10.02	16.82	13.24	55.63	100.00

表 6 废石中钛的化学物相分析结果 /%

Table 6 Results of chemical phase analysis of titanium in the wasted ore

名称	钛磁铁 矿中 TiO ₂	钛铁矿 中 TiO ₂	金红石 中 TiO ₂	硅酸盐 中 TiO ₂	合计
含量 /%	0.13	1.56	0.06	0.63	2.39
分布率 /%	5.44	65.27	2.51	26.78	100.00

物相分析研究表明，废石中铁主要以硅酸盐形式存在，钛铁矿、硫化物和赤褐铁矿相态中的铁分布次之，以磁性铁形式分布的铁含量较小，磁性铁的损失仅占原矿磁性铁的 0.71%；废石中 TiO₂ 主要以钛铁矿和硅酸盐等两个相态存在，以钛磁铁矿和金红石形式存在的较少，废石中钛铁矿损失占原矿钛铁矿的 15.39%。

2.2 干式磁选粗精矿一段磨矿磁选试验

一段磨矿磁选试验中以干式磁选 (-5 mm 粒级、0.5 T) 粗精矿为研究对象，磨至不同粒度级别进行湿式弱磁 - 强磁联合试验，考察各产品中 TFe 和 TiO₂ 走向。试验流程见图 2，试验结果见表 7。

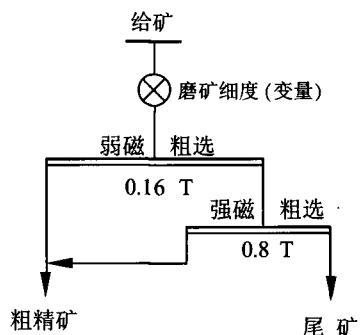


图 2 干抛粗精矿一段磨矿磁选试验流程

Fig. 2 Test flow of the first stage grinding magnetic separation of coarse concentrate in dry magnetic separation

表 7 干抛粗精矿一段磨矿磁选试验结果

Table 7 Test results of one grinding magnetic separation of coarse concentrate in dry magnetic separation

磨矿 细度 /mm	产品 名称	产率 /%	品位 /%		回收率 /%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
-1 mm	粗精矿	56.92	21.20	6.26	83.27	78.54
	尾矿	20.68	5.67	2.12	8.09	9.66
-0.5 mm	粗精矿	38.66	30.85	9.68	82.31	82.43
	尾矿	38.94	3.37	0.68	9.05	5.77
-0.3 mm	粗精矿	35.47	32.49	10.31	79.53	80.55
	尾矿	42.13	4.07	0.82	11.83	7.65
	给矿	77.60	17.06	5.16	91.36	88.20

表 7 结果表明，入料磨至 -0.5 mm 时试验效果较好，该细度条件下采用弱磁 (0.16 T) - 强磁 (0.8 T) 联合试验可获得产率 38.66% (对原矿)，含 TFe 30.85%、TiO₂ 9.68%，铁回收率 82.31% (对原矿)、钛回收率 82.43% (对原矿) 的粗精矿；一段磨矿磁选再次抛掉产率 38.94%，含 TFe 3.37%、TiO₂ 0.68%，TFe、TiO₂ 损失率分别为 9.05%、5.77% 的尾矿。

2.3 一段磁选粗精矿二段磨矿磁选试验

试验流程见图 3，试验结果见表 8。

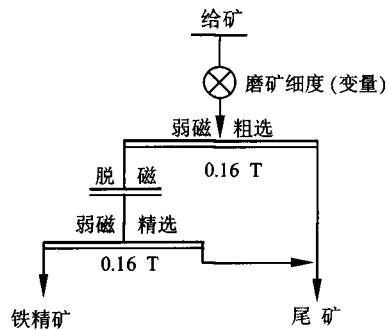


图 3 一段磁选粗精矿二段磨矿磁选试验流程

Fig. 3 The second stage grinding-magnetic separation test flow of coarse concentrate in first stage magnetic separation

表 8 一段磁选粗精矿二段磨矿磁选试验结果

Table 8 The second stage grinding-magnetic separation test results of coarse concentrate in the first stage magnetic separation

-0.074 mm /%	产品名称	产率 /%	品位 /%		回收率 /%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
	铁精矿	15.71	52.55	6.95	56.97	24.05
50	尾矿	22.95	16.00	11.55	25.34	58.38
	给矿	38.66	30.85	9.68	82.31	82.43
	铁精矿	13.38	55.80	7.92	51.53	23.24
60	尾矿	25.28	17.64	10.63	30.78	59.19
	给矿	38.66	30.85	9.68	82.31	82.43
	铁精矿	13.22	56.45	7.87	51.50	22.92
70	尾矿	25.44	17.55	10.62	30.81	59.51
	给矿	38.66	30.85	9.68	82.31	82.43
	铁精矿	12.93	57.78	7.72	51.56	21.99
80	尾矿	25.73	17.32	10.66	30.75	60.44
	给矿	38.66	30.85	9.68	82.31	82.43

表 8 结果表明，随着磨矿细度的增加铁精矿中 TFe 含量逐渐增大，TiO₂ 含量变化范围在 1% 左右；铁精矿中 TFe 回收率随磨矿细度增大先降低后基本保持不变，铁精矿中 TiO₂ 分布率随磨矿细度的增大小幅度下降。

实验室中曾进行了精选铁精矿的二次精选试验及尾矿的扫选试验，其精选和扫选效果皆不理想，通过镜下观察发现铁精矿中非磁性矿物和弱磁性矿物单体颗粒很少；尾矿中强磁性矿物单体颗粒也很少，其强磁性矿物主要粘连在弱磁性矿物表面，少量的为贫连生体。铁精矿中主要矿物为钛磁铁矿和磁铁矿，钛磁铁矿为磁铁矿、钛铁矿、镁铝尖晶石等形成的固溶体^[1-3]，因此，要进一步提高铁精矿中 TFe 含量和回收率存在一定的困难。虽然表面上看铁精矿中 TFe 回收率偏低，但磁性铁矿物的回收率较高，如细度 -0.074 mm 为 80% 的铁精矿中 TFe 相对磁性铁回收率达 98.70%。该细度条件下，铁精矿含 V₂O₅ 0.69%，铁精矿中 V₂O₅ 回收率为 78.26%。

3 结 论

(1) 该矿石中铁以磁性铁形式仅占一半，1/4 以上的以硅酸盐形式存在，其余以钛铁矿、硫化

物和氧化铁形式存在，因此，要得到高 TFe 回收率的铁精矿存在一定的困难。

(2) 矿石中铁低于边界品位，采用细碎 (-5 mm) 干式磁选抛尾可抛弃 22.40% 的废石，一段磨矿（粗磨，-0.5 mm）磁选又可以丢弃约 38.94% 的尾矿，且废石和丢弃的尾矿中有价组分很低，大幅降低进入后续作业的矿量，提高了入选品位，大大降低作业成本。

(3) 钒钛磁铁矿的固有特性决定了铁精矿中 TFe 品位；表面上看铁精矿中 TFe 回收率偏低，但磁性铁矿物的回收率较高，如磨矿细度 -200 目占 80% 时铁精矿中磁性铁回收率达 98.70%。同时高附加值的钒进入了铁精矿，其回收率达 78.26%，可进一步综合利用。

参 考 文 献：

- [1] 朱骏士. 中国钒钛磁铁矿选矿 [M]. 北京：冶金工业出版社, 1996.
- Zhu J Sh. Chinese vanadium-titanium magnetite dressing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [2] 李潇雨, 周满庚, 王婧, 等. 铁精矿理论品位预测新方法 [J]. 矿产综合利用, 2013 (6):47-49.
- Li X Y, Zhou M G, Wang J, et al. New method for theoretical grade prediction of iron concentrate [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2013 (6):47-49.
- [3] 周满庚, 李潇雨, 王婧. 攀枝花钛磁铁矿性质变化对铁精矿品位的影响 [J]. 矿产综合利用, 2012 (5):28-31.
- Zhou M G, Li X Y, Wang J. Effects of changes in the properties of panzhihua titanomagnetite on the grade of iron concentrate [J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2012 (5):28-31.
- [4] 朱骏士. 钒钛磁铁矿选矿及综合利用 [J]. 金属矿山, 2000 (1):1-11.
- Zhu J Sh. Beneficiation and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite [J]. Metal Mines, 2000(2000 (1):1 ~ 11.
- [5] 周军, 董雅君. 全球钒钛资源概况及开发情况 [N]. 世界金属导报, 2013-3-19 (B15).
- Zhou J, Dong Y J. Overview and development of vanadium and titanium resources in the world [N]. World Metal Bulletin, 2013-3-19 (B15).
- [6] 王帅, 郭宇峰, 姜涛, 等. 钒钛磁铁矿综合利用现状及工业化发展方向 [J]. 中国冶金, 2016(10):40-44.
- Wang Sh, Guo Y F, Jiang T, et al. Current situation of

- comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite and its Industrial Development Direction [J]. China Metallurgy, 2016(10): 40-44.
- [7] 赵海燕 . 钇资源利用概况及我国钒市场需求分析 [J]. 矿产保护与利用 ,2014(2):54-58.
- Zhao H Y. Overview of vanadium resource utilization and analysis of vanadium market demand in China [J]. Mineral Protection and Utilization, 2014(2):54-58.
- [8] 朱月仙 , 张娴 , 许铁 , 等 . 钇钛磁铁矿综合利用关键技术专利分析 [J]. 世界科技研究与发展 ,2017 (4):325-331.
- Zhu Y X, Zhang X, Xu Y, et al. Patent Analysis of key Technologies for comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite [J]. World Science and Technology Research and Development, 2017 (4):325-331.
- [9] 李晓琴 . 攀枝花地区矿产综合利用现状与发展探讨 [J]. 中国资源综合利用 ,2013 (8):35-38.
- Li X Q. Discussion on the status and development of comprehensive utilization of mineral resources in Panzhihua region [J]. Comprehensive Utilization of China Resources, 2013 (8):35-38.
- [10] 王茜 , 廖阮颖子 , 田小林 , 等 . 四川省攀西地区钒钛磁铁矿 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2015.
- Wang Q, LiaoRuan Y Z, Tian X L, et al. Vanadium-titanium magnetite in Panxi Region, Sichuan Province [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [11] 中国地质科学院矿产综合利用研究所 , 国土资源部钒钛磁铁矿综合利用重点实验室 . 攀西钒钛磁铁矿资源及综合利用技术 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 ,2015.
- Institute of Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Ministry of Land and Resources vanadium titanium magnetite comprehensive utilization key laboratory. Panxi Vanadium-titanium magnetite resources and comprehensive Utilization Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [12] 刘亚川 , 丁其光 , 徐明 . 攀西钒钛磁铁矿共伴生资源及利用 [M]. 北京 : 冶金工业出版社 ,2014.
- Liu Y Ch, Ding Q G, Xu M. Co-associated resources and utilization of Panxi vanadium-titanium magnetite [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [13] 张晓琪 , 宋谢炎 , 陈列锰 , 等 . 四川白马基性 - 超基性层状岩体底部厚层钒钛磁铁矿床成因 [N]. 高校地质学报 ,2013,19:164.
- Zhang X Q, Song X Y, Chen L M, et al. Genesis of the thick layer vanadium-titanium magnetite deposit at the bottom of Baima basic-ultrabasic layered rock mass in Sichuan [N]. Journal of University Geology, 2013,19:164.
- [14] 汪楷洋 , 庾先国 , 谢一峰 , 等 . 攀枝花白马地区钒钛磁铁矿床磁异常特征 [J]. 金属矿山 ,2014 (7):110-113.
- Wang K Y, Tuo X G, Xie Y F, et al. Magnetic anomaly characteristics of vanadium titanium magnetite deposit in Baima area, Panzhihua [J]. Metal Mine, 2014 (7):110-113.

Experimental Study on Iron Separation of Baima Gabbro-type Ultra-low-grade Vanadium-titanomagnetite in Panxi Area

Chen Fulin^{1,3}, Yang Xiaojun^{2,3}, Wen Yongcai¹, Cai Xianyan¹, Wu Ning¹

- (1.Panzhihua Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., of Pangang Group, Panzhihua, Sichuan, China;
 2. Chengdu Integrated Testing Center of Rocks and ores of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chengdu, Sichuan , China;
 3. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan,China)

Abstract: The Baima gabbro-type ultra-low-grade vanadium-titanium magnetite in Panxi area was taking as the research object in this paper and the chemical composition, mineral composition, iron and titanium dioxide phase of the ore were ascertained. On these basis, the tail-throwing test of multi-size and multi-magnetic field gradient dry magnetic separation is carried out. The rationality of tail-throwing in dry magnetic separation is explained through the analysis of iron and titanium dioxide phase. The iron concentrate with TFe 57.78% and TiO₂ 7.72% and V₂O₅ 0.69% were obtained by the test of stage grinding and stage separation of dry magnetic separation concentrate when the grinding-fineness was -0.074 mm 80% in the second stage grinding-magnetic separation. And the iron concentrate yield was 12.93% and the recovery of iron and magnetite iron were 51.56% and 98.70%, and the recovery-rate of V₂O₅ in iron concentrate was 78.26%, respectively. The results showed that although iron grade of the ore is low, it still has the value of comprehensive recovery and utilization.

Keywords: Gabbro; Ultra-low grade; Vanadium-titanium magnetite; Iron separation