

攀西某钒钛磁铁矿废石抛尾实验

王建平, 李韦韦, 罗德强, 吴雪红

(攀钢集团矿业有限公司设计研究院, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617063)

摘要: 针对攀西某钒钛磁铁矿废石, 采用“干式+湿式”组合抛尾。结果表明: 废石破碎至-40 mm 后, 采用干式抛尾, 可抛出流程产率 23.73%、TFe 品位 9.96%、TiO₂ 品位 3.92% 的尾矿; 干抛精矿细碎至-5 mm 后, 采用湿式重磁拉抛尾, 可抛出流程产率 27.36%、TFe 品位 7.86%、TiO₂ 品位 2.81% 的尾矿; “干式+湿式”组合抛尾, 最终抛尾率可达 51.09%, 精矿 TFe 品位提升 5.56 个百分点, TiO₂ 品位提升 2.75 个百分点, 可大幅降低后续磨矿量, 提高后续入选品位, 降低此类资源的选矿成本。

关键词: 矿物加工工程; 废石; 干式抛尾; 湿式抛尾

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.024

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 01-0181-07

引用格式: 王建平, 李韦韦, 罗德强, 等. 攀西某钒钛磁铁矿废石抛尾实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 181-187.

WANG Jianping, LI Weiwei, LUO Deqiang, et al. Test on discarding tailings of waste rocks of a vanadium-titanium magnetite in panxi area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 181-187.

我国钒钛磁铁矿主要分布于攀西地区(攀枝花—西昌), 该地区主要特大型矿区有攀枝花矿区、红格矿区、白马矿区和太和矿区。攀枝花矿区为攀西四大矿区之一, 至 2010 年累计探明资源量 15.19 亿 t, 伴生 V₂O₅ 资源储量 202 万 t, 伴生 TiO₂ 资源储量为 8 281 万 t。

攀枝花矿至今已开采多年, 生产剥岩的废石长期以来采用铁路运输或胶带运输的方式排弃至铁路排土场堆存, 截止 2020 年底, 其资源量约为 3.6 亿 t, 考虑 20% 的大理岩、表土等不可利用废石, 可有效利用废石资源为 2.9 亿 t, 其 TFe 平均品位约 14%、TiO₂ 平均品位约 6%。同时, 经过多年开采, 攀枝花矿可采资源量逐年降低, 而资源需求量不断增加, 供需矛盾突出, 为缓解此矛盾, 需加大上述废石资源的开发利用, 但此类废石资源由于品位低, 直接进行磨选其选矿成本较高。

为降低此类废石资源的选矿成本, 需要在破

碎过程中增加干式抛尾, 根据 2012 建成的攀枝花矿区大表外矿抛尾生产情况, 原矿 TFe 品位 18% 左右, 给矿粒度 -40 mm, 干式抛尾后精矿 TFe 品位 19.2% 左右, 以及 2009 年底建成的表内矿干式抛尾^[1], 原矿 TFe 品位 27% 左右, 给矿粒度 -60 mm, 干式抛尾后精矿 TFe 品位 28% 左右, 均表明干式抛尾品位提高幅度仅 1~2 个百分点, 主要原因是目的矿物未解离, 进行的是大块矿岩分离。因而仅采用干式抛尾, 无法大幅提高废石抛尾精矿品位, 需要在干式抛尾的基础上, 进一步进行破碎, 使脉石矿物进一步单体解离后, 进行粗粒湿式抛尾。根据表内矿采用湿式重磁拉抛尾实验室实验^[2], 其精矿品位能提高 3~5 个百分点, 同时, 目前干式抛尾和湿式抛尾设备与工艺已研发成熟^[3-8]。因此, 有必要对该类废石进行抛尾实验研究, 采用新型干式、湿式抛尾设备, 优化抛尾工艺流程, 在保证资源回收率的情况下, 最大限度的提高抛尾精矿品位, 从而降低该类资

收稿日期: 2022-03-10

作者简介: 王建平 (1985-), 男, 硕士, 从事钒钛磁铁矿选矿工作。

源的选矿成本，为大规模利用该类废石资源提供技术支撑。

1 原矿性质研究

1.1 原矿成分分析

对原矿进行化学多元素分析见表 1，铁物相分析见表 2，钛物相分析见表 3。

从表 1 可知，原矿中可回收利用的有价元素

为铁、钛、钒和硫，其中 TFe 品位 14.25%，TiO₂ 品位 5.83%；从表 2 可知，原矿中的铁主要以钛磁铁矿形式存在，占总铁量的 46.28%；表 3 可知，原矿中钛主要以钛铁矿形式存在，占总钛量的 55.66%；因此，在抛尾过程中，目的矿物为强磁性矿物钛磁铁矿和弱磁性矿物钛铁矿，需要采用中、高场强的磁选设备一起回收钛磁铁矿和钛铁矿。

表 1 原矿化学多元素分析结果/%

Table 1 Multi-element analysis results of the raw ore

TFe	Fe ₂ O ₃	FeO	V ₂ O ₅	TiO ₂	S	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P
14.25	8.69	11.60	0.10	5.83	0.26	11.78	7.52	11.80	36.38	0.33

表 2 原矿铁物相分析

Table 2 Iron phase analysis of the raw ore

名称	钛磁铁矿中铁	钛铁矿中铁	硫化物中铁	硅酸盐中铁	合计
含量/%	6.61	2.95	0.68	4.04	14.28
分布率/%	46.28	20.67	4.74	28.31	100.00

表 3 原矿钛物相分析

Table 3 Titanium phase analysis of the raw ore

名称	钛磁铁矿中钛	钛铁矿中钛	脉石中钛	合计
含量/%	1.32	3.36	1.35	6.03
分布率/%	21.92	55.66	22.42	100.00

1.2 主要矿物的嵌布特性

原矿中的钛磁铁矿主要以它形粒状为主，嵌布粒度为 0.1~0.89 mm，其客晶矿物镁铝尖晶石呈点状、片晶状排列，原矿中钛铁矿以它形粒状为主，嵌布粒度为 0.1~0.39 mm；大部分钛磁铁矿沿脉石边缘嵌布，与脉石接触边缘有不同程度的绿泥石化现象，且大部分钛磁铁矿与钛铁矿构成铁钛集合体成为攀西矿区的典型结构——海绵陨体结构，这为抛尾过程中铁、钛一起回收提供了良好条件；少量钛磁铁矿与钛铁矿呈小粒状稀疏浸染嵌布于脉石中形成贫连生体，这部分铁、钛在抛尾过程中容易进入尾矿流失。

原矿中的脉石，自形晶、半自形晶、他形粒状均有，嵌布粒度为 0.1~1.6 mm，与目的矿物钛磁铁矿和钛铁矿相比略粗，有利于实现粗粒抛尾。

2 实验方法

为降低钒钛磁铁矿废石的选矿成本，需合理

利用“多碎少磨，能抛早抛”的理念，从实际生产运行情况可知，破碎流程主要为粗破、中破和细破三段破碎，抛尾作业一般位于中破之后，对中破产品进行抛尾。目前，密地选矿厂中破筛网筛孔一般选择 40~60 mm，结合粒度越细，抛尾率越高的特点，最终，本次实验原矿干式抛尾粒度选择-40 mm。

首先对原矿进行中破至-40 mm 后进行干式抛尾，由于破碎产品粒度分布范围较宽，为优化干式抛尾效果，利用窄粒级选矿，对破碎产品分级为-40+20 mm(粗粒级)和-20 mm(细粒级)，并分别对其进行干式抛尾；其次，对干抛精矿细碎后进行湿式强磁抛尾；利用“干式+湿式”抛尾优势组合，最大限度的提高精矿品位和抛尾率，从而降低选矿成本，选别原则流程见图 1。

3 实验结果与讨论

3.1 干式抛尾实验

3.1.1 分级实验

原矿采用中破破碎至-40 mm 后，采用 20 mm 筛孔分级为粗粒级(-40+20 mm)和细粒级(-20 mm)，结果见表 4。

从表 4 可知，经过分级处理后，获得粗粒级产率 30.38%、TFe 品位 13.61%、TiO₂ 品位 5.83%，

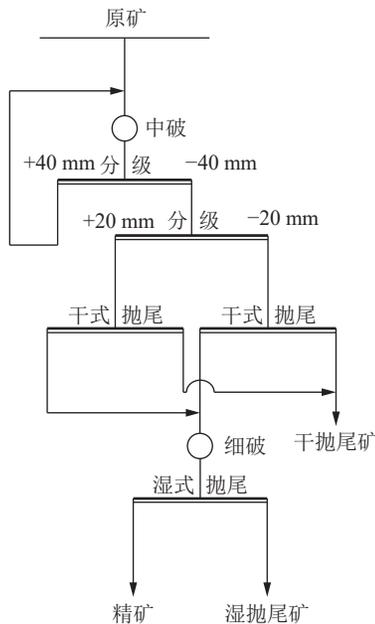


图1 钒钛磁铁矿废石抛尾原则流程
Fig.1 Flow of vanadium titanium magnetite waste rock discarding tailings

表4 原矿分级实验
Table 4 Classification tests of the raw ores

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
粗粒级	30.38	13.61	5.83	29.20	29.71
细粒级	69.62	14.40	6.02	70.80	70.29
原矿	100.00	14.16	5.96	100.00	100.00

细粒级产率 69.62%、TFe 品位 14.40%、TiO₂ 品位 6.02%，后续将对这两种产品分别进行干式抛尾实验。

3.1.2 抛尾条件实验

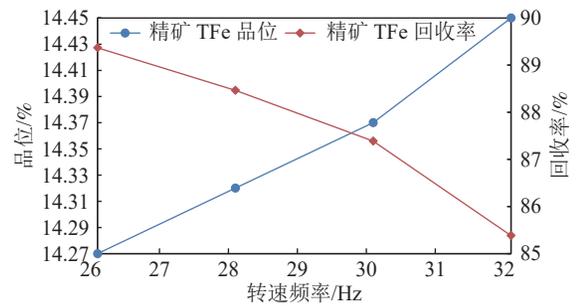
(1) 粗粒级干式抛尾条件实验

针对粒度较粗的粗粒级产品，选择分选效果较好的 CT 0506 型磁滚筒磁选机进行选别，磁场强度为 398 kA/m，分别调节不同转速频率进行实验，结果见图 2。

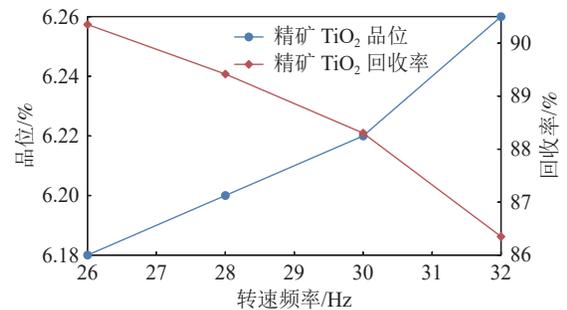
从图 2 看出，随着转速频率逐渐增加，精矿 TFe 品位、TiO₂ 品位逐渐增加，TFe 回收率、TiO₂ 回收率逐渐降低，较佳滚筒转速频率为 30 Hz。

(2) 细粒级干式抛尾条件实验

针对粒度较细的细粒级产品，选择分选效果较好的 CTF 0404 高磁力箱式干选机进行选别，磁场强度为 358 kA/m，分别调节不同转速频率进行实验，结果见图 3。

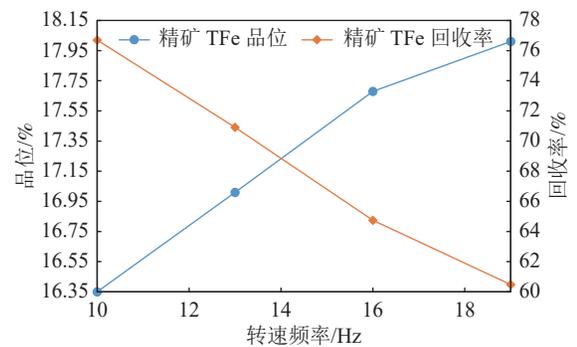


(a) 转速对精矿中 TFe 的影响
Effect of rotational speed on TFe in concentrate

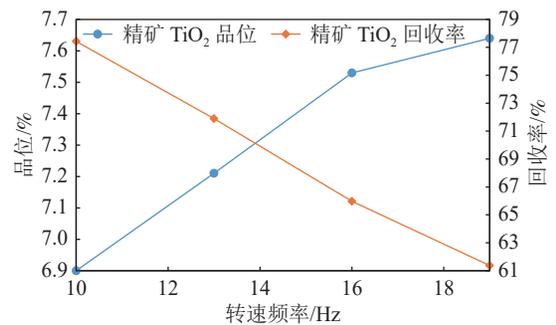


(b) 转速对精矿中 TiO₂ 的影响
Effect of rotational speed on TiO₂ in concentrate

图2 磁滚筒转速频率条件实验
Fig.2 Effect of speed signal of magnetic drum for dressing indexes



(a) 转速对精矿中 TFe 的影响
Effect of rotational speed on TFe in concentrate



(b) 转速对精矿中 TiO₂ 的影响
Effect of rotational speed on TiO₂ in concentrate

图3 箱式干选机转速频率条件实验
Fig.3 Effect of speed signal of chamber dry separator for dressing indexes

从图 3 看出, 随着转速频率逐渐增加, 精矿 TFe 品位、TiO₂ 品位逐渐增加, TFe 回收率、TiO₂ 回收率逐渐降低, 较佳滚筒转速频率为 14 Hz, 但由于所有条件下获得的尾矿 TFe、TiO₂ 品位均偏高, 需要对尾矿增加一次扫选作业。

3.1.3 抛尾生产实验

依据上述条件实验, 对粗粒级产品, 采用磁滚筒进行生产实验, 转速频率为 30 Hz, 实验结果见表 5。

表 5 粗粒级干式抛尾生产实验
Table 5 Dry-discarding production test of coarse grain V-Ti magnetite

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
精矿	83.18	14.36	6.21	87.77	88.61
尾矿	16.82	9.90	3.95	12.23	11.39
给矿	100.00	13.61	5.83	100.00	100.00

从表 5 可知, 经过生产实验, 可抛出产率 16.82% 的尾矿, 尾矿 TFe 品位小于 10%、TiO₂ 品位小于 4%。

同样对细粒级产品, 采用箱式干选机进行生产实验, 粗选转速频率为 14 Hz, 尾矿增加一次扫选作业, 扫选转速频率为 25 Hz, 实验结果见表 6。

表 6 细粒级干式抛尾生产实验
Table 6 Dry-discarding production test of fine-grain V-Ti magnetite

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
粗选精矿	55.95	17.36	7.23	67.45	67.23
扫选精矿	17.31	11.66	5.34	14.01	15.36
扫选尾矿	26.74	9.98	3.92	18.54	17.41
给矿	100.00	14.40	6.02	100.00	100.00

从表 6 可知, 经过生产实验, 可抛出产率 26.74% 的尾矿, 尾矿 TFe 品位小于 10%、TiO₂ 品位小于 4%。

为分析干抛尾矿损失情况, 对上述生产的粗粒尾矿和细粒尾矿进行磨磁弱磁选铁, 实验结果见表 7。

从表 7 可知, 粗粒尾矿选出产率 1.12% 的铁精矿, 细粒尾矿选出产率 1.23% 的铁精矿, 损失量少, 属合理损失, 两种尾矿无选矿价值, 可作为建筑材料的原料。

表 7 尾矿选铁实验
Table 7 Iron separation tests of tailings

样品	产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
粗粒尾矿	精矿	1.12	54.87	7.45	6.21	2.11
	尾矿	98.88	9.39	3.91	93.79	97.89
	给矿	100.00	9.90	3.95	100.00	100.00
细粒尾矿	精矿	1.23	54.62	7.52	6.73	2.36
	尾矿	98.77	9.42	3.88	93.27	97.64
	给矿	100.00	9.98	3.92	100.00	100.00

3.2 湿式抛尾实验

3.2.1 抛尾条件实验

对上述粗粒干选精矿和细粒干选精矿按流程比例混合后进行细碎, 对细碎产品进行湿式抛尾。

(1) 抛尾设备对比实验

由于目的钛磁铁矿属强磁性矿物, 钛铁矿属弱磁性矿物, 因此, 需采用磁场强度较高的磁选设备来同时回收这两种目的矿物, 目前已研发的新型防堵型强磁机有重磁拉强磁设备。

选择常规的中磁滚筒磁选机 (磁场强度 318 kA/m) 与重磁拉强磁设备 (磁场强度 557 kA/m) 进行对比实验, 中磁滚筒磁选机给料粒度要求 -3 mm, 为此, 对干选精矿破碎至 -3 mm 后进行对比实验, 实验结果见表 8。

表 8 抛尾设备对比实验
Table 8 Effect of separation equipment on dressing indexes

抛尾设备	产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
中磁滚筒磁选机	精矿	40.34	23.81	9.22	62.09	56.44
	尾矿	59.66	9.83	4.81	37.91	43.56
	给矿	100.00	15.47	6.59	100.00	100.00
重磁拉强磁选机	精矿	62.22	20.03	8.90	80.56	84.03
	尾矿	37.78	7.96	2.79	19.44	15.97
	给矿	100.00	15.47	6.59	100.00	100.00

从表 8 可知, 中磁滚筒磁选机获得的尾矿 TiO₂ 品位 4.81%, 重磁拉强磁机获得的尾矿 TiO₂ 品位 2.79%, 中磁滚筒磁选机较难回收弱磁性矿物钛铁矿, 而重磁拉强磁选机可达到铁、钛一起回收的目的, 因此, 湿式抛尾设备选择重磁拉强磁选机。

(2) 抛尾给料粒度条件实验

对干选精矿分别细碎至 -12、-8、-5 和 -3 mm,

在筒体转速 12 r/min、坡度 6°条件下，进行湿式重磁拉选别，实验结果见图 4。

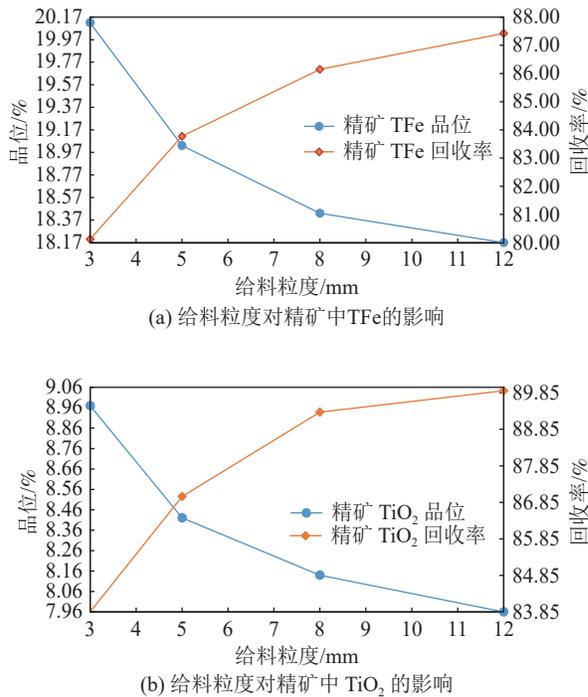


图 4 给料粒度条件实验

Fig.4 Effect of feeding size on dressing indexes

从图 4 可知，随着给料粒度增粗，精矿 TFe、TiO₂ 品位逐渐降低，TFe、TiO₂ 回收率逐渐增加，较佳给料粒度为 5 mm。

(3) 筒体转速条件实验

在给料粒度 5 mm、坡度为 6°条件下，进行重磁拉筒体转速条件实验，实验结果见图 5。

从图 5 可知，随着筒体转速增大，精矿 TFe、TiO₂ 品位逐渐降低，TFe、TiO₂ 回收率逐渐增加，较佳筒体转速为 13 r/min。

(4) 坡度条件实验

在给料粒度 5 mm、筒体转速 13 r/min 条件下，进行重磁拉坡度条件实验，实验结果见图 6。

从图 6 可知，随着设备坡度增大，精矿 TFe、TiO₂ 品位逐渐增加，TFe、TiO₂ 回收率逐渐降低，较佳坡度为 7°。

3.2.2 抛尾生产实验

依据上述条件实验，对干抛精矿破碎至 5 mm 后，采用重磁拉进行湿式抛尾生产实验，筒体转速为 13 r/min、坡度为 7°，实验结果见表 9。

从表 9 可知，经过生产实验，可抛出产率 35.87% 的尾矿，尾矿 TFe 品位小于 8%、TiO₂ 品

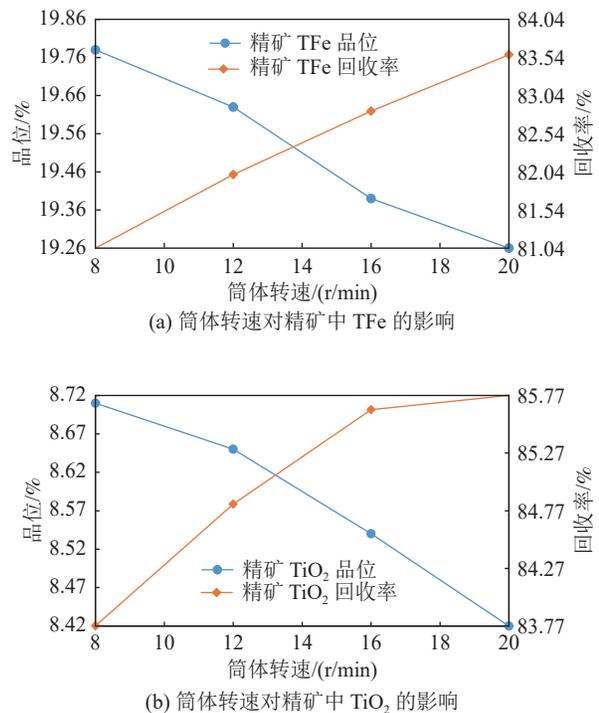


图 5 筒体转速条件实验

Fig.5 Effect of drum velocity on dressing indexes

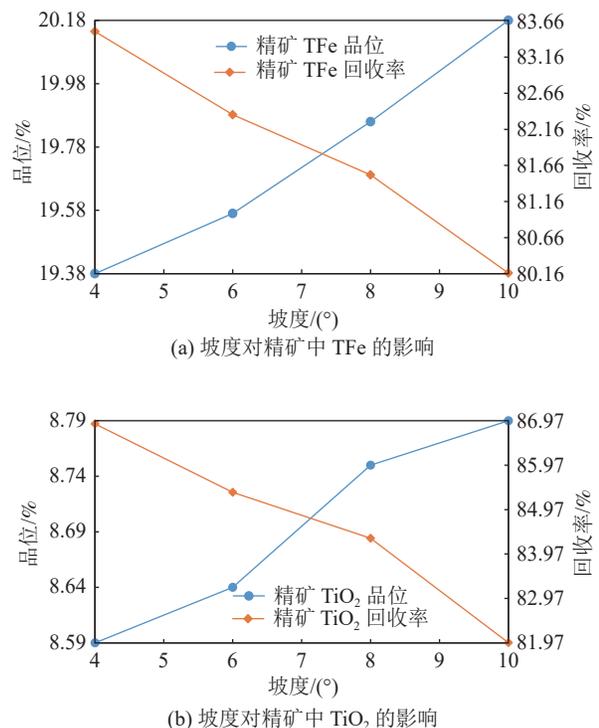


图 6 坡度条件实验

Fig.6 Effect of slopes for dressing indexes

位小于 3%。

为分析湿抛尾矿损失情况，对上述生产的尾矿进行磨矿弱磁选铁，实验结果见表 10。

表 9 湿式抛尾生产实验
Table 9 Wet tailing production test

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
精矿	64.13	19.72	8.71	81.77	84.71
尾矿	35.87	7.86	2.81	18.23	15.29
给矿	100.00	15.47	6.59	100.00	100.00

表 10 尾矿选铁实验
Table 10 Iron separation tests of tailings

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
精矿	0.46	55.41	6.15	3.24	1.01
尾矿	99.54	7.64	2.79	96.76	98.99
给矿	100.00	7.86	2.81	100.00	100.00

从表 10 可知，尾矿选出产率 0.46% 的铁精矿，损失量少，属合理损失，湿抛尾矿无选矿价值，可作为建筑材料的原料。

3.3 数质量流程

依据上述干式抛尾和湿式抛尾生产实验结果，可得出抛尾工艺的数质量流程见图 7。

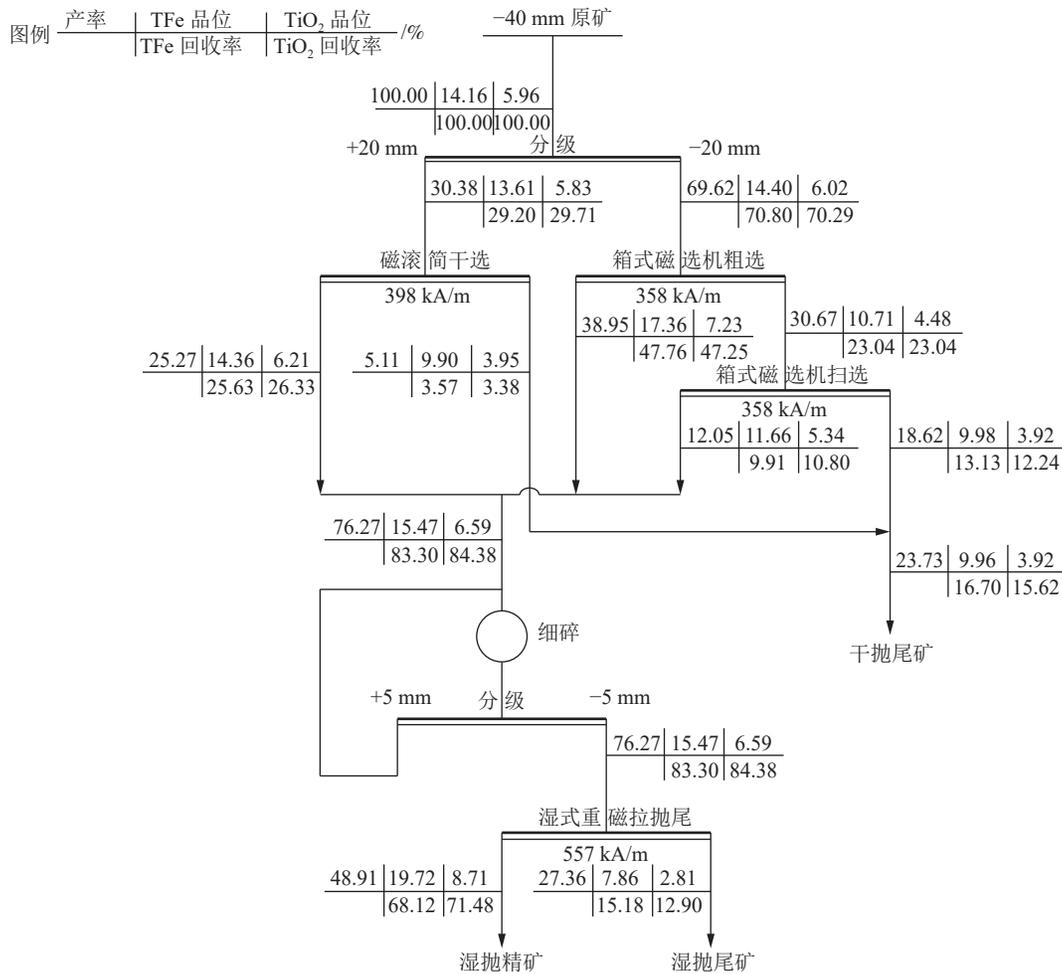


图 7 废石抛尾数质量流程

Fig.7 Quantity-quality flowsheet of discarding tailings

从图 7 看出，原矿经干式抛尾后，可抛出产率 23.73%、TFe 品位 9.96%、TiO₂ 品位 3.92% 的合格尾矿，抛尾精矿 TFe 品位 15.47%、TiO₂ 品位 6.59%，TFe 品位提升 1.31 个百分点，TiO₂ 品位提升 0.63 个百分点；抛尾精矿细碎后经湿式抛尾后，可抛出产率 27.36%、TFe 品位 7.86%、TiO₂ 品位 2.81% 的合格尾矿，精矿 TFe 品位 19.72%、TiO₂ 品位 8.71%，TFe 品位提升 4.25 个百分点，

TiO₂ 品位提升 2.12 个百分点。

4 结论

(1) 原矿 TFe 品位 14.25%，TiO₂ 品位 5.83%，原矿中目的矿物为钛磁铁矿和钛铁矿，大部分钛磁铁矿与钛铁矿连生成铁钛集合体，有利于铁、钛一起回收；脉石矿物嵌布粒度为 0.1~1.6 mm，粒度较粗，适合采用粗粒抛尾。

(2) 原矿采用“干式+湿式”抛尾后，精矿 TFe 品位提高 5.56 个百分点，TiO₂ 品位提高 2.75 个百分点，采用该抛尾工艺可大幅提高精矿品位。

(3) 干式抛尾主要优势在于破碎成本低，但由于矿物基本没解离，精矿品位提升幅度较低，湿式抛尾主要优势在于精矿品位提升幅度较大，但破碎成本略高，因此，“干式+湿式”抛尾可实现优势互补，大幅提升精矿品位，同时降低抛尾选别成本，可为低成本开发利用该类废石提供技术支撑。

参考文献：

[1] 卢斌. 磁滑轮抛尾技术在密地选矿厂的应用实践[J]. *矿冶工程*, 2014, 34(2):61-63+67.
LU B. Practical application of tailings discarding technology by magnetic pulley in midi concentrator[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2014, 34(2):61-63+67.
[2] 王建平. ZCLA 选矿机在攀枝花钒钛磁铁矿预选抛尾中的应用[J]. *矿冶工程*, 2016, 36(3):47-50.
WANG J P. Application of ZCLA concentrator for pre-concentration and tailings discarding of vanadium titanium magnetite in Panzhihua[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2016, 36(3):47-50.
[3] 贾雪梅, 宫亮. 重磁拉磁选机在某钒钛磁铁矿粗粒抛尾中的工业应用[J]. *现代矿业*, 2019, 35(6):23-26+33.
JIA X M, GONG L. Industrial application of heavy magnetic drawing magnetic separator in coarse-grained tailings of a vanadium-titanium magnetite[J]. *Modern Mining*, 2019,

35(6):23-26+33.

[4] 陈福林, 杨晓军, 蔡先炎, 等. 攀西地区白马辉长岩型超低品位钒钛磁铁矿选铁实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):26-30.

CHEN F L, YANG X J, CAI X Y, et al. Experimental study on iron separation of Baima gabbro-type ultra-low-grade vanadium-titanomagnetite in Panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):26-30.

[5] 曾小波, 张渊, 熊文良, 等. 某低品位钒钛磁铁矿选矿实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2017(3): 67-70.

ZENG X B, ZHANG Y, XIONG W L, et al. Experimental research on the mineral processing technology of a low-grade vanadium-titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(03): 67-70.

[6] 成磊, 尚红亮, 朱道瑶. 外磁式磁选机应用于铁矿预选抛尾工艺的实验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(3):78-80.

CHENG L, SHANG H L, ZHU D Y. Experimental research of external magnet drum type magnetic separator used on pre-concentration process of iron ore[J]. *Nonferrous Metals Mineral Processing Section*, 2019(3):78-80.

[7] 崔少文, 郭小飞, 郝悦, 等. 高压辊磨超细碎在贫磁铁矿石预选中的应用[J]. *金属矿山*, 2018(12):115-118.

CUI S W, GUO X F, XI Y, et al. Application of ultra-finely crushing by high pressure grinding rolls in pre-concentration of lean magnetite ore[J]. *Metal Mine*, 2018(12):115-118.

[8] 李国平, 尚红亮, 王芝伟, 等. 新型磨前干式预选工艺在攀西某钒钛磁铁矿的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2018(2):53-56.

LI G P, SHANG H L, WANG Z W, et al. Application of new type dry pre-concentration of V-Ti magnetite in Panxi[J]. *Nonferrous Metals Mineral Processing Section*, 2018(2):53-56.

Test on Discarding Tailings of Waste Rocks of a Vanadium-titanium Magnetite in Panxi Area

WANG Jianping, LI Weiwei, LUO Deqiang, WU Xuehong

(Mining Company's Designing Research Institute Panzhihua Steel, State Key Laboratory about Comprehensive Utilization of Vanadium Titanium Resources, Panzhihua 617063, Sichuan, China)

Abstract: The combined methods of dry-discarding and wet-discarding were used to separate the vanadium-titanium-magnetite waste rock in Panxi. The results indicated that the grades of TFe and TiO₂ which existed in the tailings reached 9.96% and 3.92%, respectively, and the recovery reached 23.73% using the dry-discarding method after the waste rocks were crushed to -40 mm. In addition, after the concentrates of dry-discarding were crushed to -5 mm, using the wet-discarding method, the grades of TFe and TiO₂ which existed in the tailings reached 7.86% and 2.81%, respectively, and the recovery reached 27.36%. Finally, the discarding rate reached 51.09% using the combination methods of dry-discarding and wet-discarding, and the TFe grade of concentrate increased 5.56 percentage, TiO₂ grade increased 2.75 percentage. The method could greatly reduce the subsequent grinding amount, improve the initial grade, and reduce the mineral processing cost.

Keywords: Mineral processing engineering; Wasterocks; Dry-discarding; Wet-discarding