某选铁尾矿有价元素回收及资源化利用

郭风芳[1]，兰 舟[1]，朱智超[1]，张少平[1]，赵 强[2]，张鹏羽[2]
（1. 海南矿业股份有限公司，海南 昌江 571927；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：“双碳”背景下，尾矿综合利用技术已进入新阶段，不仅可以通过选矿回收尾矿中的有价元素，同时以尾矿粉用作水泥混凝土掺合料的尾矿资源化利用技术也具有发展前景。本文以选铁尾矿为对象，先通过选矿工艺回收其中有价元素，再探究选矿过程产生的 <5 mm 细粒级尾矿粉用作掺合料置换水泥的可行性。试验结果表明：该尾矿经破碎筛分到合适粒度后，通过磁选可以得到铁品位为 32.44%、回收率为 35.03% 的铁精矿；再用 <5 mm 细粒级尾矿粉用作掺合料置换水泥，当替代率为 10% 时得到的混凝土力学性能保持稳定，抗压强度达到未掺混凝土的 95% 以上，抗折强度达到未掺混凝土的 99% 以上。本文创新性地将选矿回收与混凝土原料制备相结合，既富集回收了铁精矿，避免了资源浪费，同时也缓解了铁尾矿堆积造成的环境污染问题，整体实现了该选铁尾矿中有价元素的回收及资源化利用，为该类型资源的综合利用提供一定依据和技术指导。

关键词：选铁尾矿；有价元素回收；力学性能；资源化利用
中图分类号：TD926.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)02－0090－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.029

Recovery and resource utilization of valuable elements from any iron ore tailing

GUO Fengfang[1], LAN Zhou[1], ZHU Zhichao[1], ZHANG Shaoping[1], ZHAO Qiang[2], ZHANG Pengyu[2]
(1. Hainan Mining Co., Ltd., Changjiang 571927, Hainan, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Under the background of "dual carbon", the comprehensive utilization technology of tailings has entered a new stage, which can not only recover valuable elements in tailings through beneficiation, at the same time, the tailings resource utilization technology of using tailings powder as cement concrete admixture also has development prospects. The iron ore tailing is taken as the object, the valuable elements are recovered by beneficiation process, and then the feasibility of replacing cement with fine tailings powder <5 mm produced by beneficiation process is explored. The results show that after the tailings are crushed and screened to a suitable particle size, iron ore concentrate with iron grade of 32.44% and recovery rate of 35.03% can be obtained by magnetic separation. When the fine tailings powder <5 mm is used as admixture to replace cement, the mechanical properties of the concrete are stable when the substitution rate is 10%, and the compressive strength reaches more than 95% and the flexural strength reaches more than 99% of the concrete without admixture. The beneficiation recovery and the preparation of concrete raw materials are innovatively combined, which not only enriches and recovers iron ore concentrate, avoids the waste of resources, but also alleviates the environmental pollution caused by the accumulation of iron tailings, and realizes the recovery and resource utilization of valuable elements in the iron beneficiation tailings as a whole, which provides a certain basis and technical guidance for the comprehensive utilization of this type of resources.

Key words: iron tailings; recovery of valuable elements; mechanical properties; resource utilization

收稿日期：2023－11－01；**修回日期：**2023－12－12
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902305)
作者简介：郭风芳(1965—)，男，高级工程师，从事选矿工艺与选矿工程等方面的技术研究工作。

随着经济发展进入新常态，我国工业化进程进一步深化，矿产资源消费结构随着工业化发展进一步调整，传统矿产逐渐被新兴矿产替代[1]。2019 年以来，铁矿石原矿产量逐年增长，2021 年铁矿石产量达 9.81 亿吨，同比增长 9.4%。铁尾矿作为含有用组分很低的原矿废弃物，其堆存量逐年增加。据统计，我国尾矿累积堆存量已超 146 亿吨，其中铁尾矿占比最大[2]。受技术限制，传统的铁尾矿处理方式主要为尾矿堆存与回填。对生态系统而言，铁尾矿中残留的药剂与重金属离子会造成环境污染和生态破坏。对人类而言，堆存的铁尾矿粉会造成空气污染，对人体呼吸系统造成危害。因此，促进铁尾矿资源化利用是变废为宝、改善生态环境和促进经济发展的重要突破口[3]。

目前铁尾矿利用途径主要是铁元素回收及用作混凝土材料[4]。铁尾矿中铁元素的再富集回收可以通过较少的投资成本和集约管理实现，常用的铁尾矿再选工艺有重选、磁选、浮选及联合流程[5]。磁选工艺流程简单，不会产生额外污染，应用广泛。如张韶敏[6]通过一段弱磁粗选、两段磁选柱精选，获得了品位为 60.33%、回收率为 3.70%的铁精矿。本钢集团马耳岭选矿厂通过强磁预富集抛尾、细磨后三次磁选，获得了精矿品位 51.39%、回收率为 10.39%的铁精矿[7]。钟义等[8]通过中磁粗选富集、中磁粗精再磨、弱磁精选工艺，获得了品位为 60.40%、回收率为 5.59%的精矿。除铁尾矿中含有的有价元素可以通过选别富集再利用外，同时铁尾矿中含有的硅、铝、钙等元素成分在制备建筑材料时必不可少，因此铁尾矿用作混凝土材料也具备前景和可行性[9]。孙建恒等[10]以铁尾矿粉作掺合料制备大体积混凝土，通过现场试验与软件模拟得出铁尾矿粉降温效果优于粉煤灰。吴丽萍等[11]将研磨后铁尾矿粉与硅粉按一定比例作掺合料替代水泥制备混凝土试件，最终得出改性后混凝土试件抗压强度能够达到普通混凝土强度的 85%以上且满足工程要求。LIU 等[12]将不同比例铁尾矿替代河沙，并对铁尾矿混凝土进行抗压强度、抗折强度与劈裂抗拉强度试验，得出铁尾矿替代河砂的最佳比例和混凝土的最优养护时间。王艳艳等[13]用铁尾矿砂替代混凝土中的河砂，发现含有不同铁尾矿砂替换百分比的混凝土和易性(混凝土易性也称为工作性，是指在搅拌、运输、浇注、振捣等施工过程中，混凝土应具备的流动性、黏聚性和保水性等适宜性能)都较好，铁尾矿混凝土的部分性能要优于普通河砂混凝土。

本文以选铁尾矿为研究对象，研究回收其中有价元素及将其用做混凝土材料的可行性：首先进行工艺矿物学研究与选矿回收试验，探究该类型尾矿选矿回收有价元素能达到的最佳技术指标，同时利用选矿回收后产生的细粒级铁尾矿作掺合料置换水泥，探究细粒级铁尾矿粉掺量对水泥混凝土力学性能影响，从而制备一种低成本且绿色环保的掺铁尾矿粉水泥混凝土，最终为该类资源的整体综合利用提供技术依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

对原矿进行缩分、破碎制备得到工艺矿物学试样后，对其进行化学分析，得到原矿的 XRF 分析结果、矿物组成分别如表 1、2 所示，重点回收元素铁的不同矿物形式及分布如表 3 所示，重点矿物磁铁矿的嵌布特征如图 1 所示。

由表 1 可知：矿石中主要组成元素为 O、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe 元素，其中 Fe 为主要的有价回收元素；Na、Mg、Al、Si、K、Ca 构成了硅酸盐等脉石矿物；P、S 等有害组分的含量较低；通过 XRF 分析，并未发现除 Fe 元素外其他具有回收价值的元素。由表 2 可知：该矿石主要组成为石英以及含铁矿物。主要含铁矿物为磁铁矿，质量分数为 8.40%，是选矿回收的唯一目的矿物；其余铁矿物为黄铁矿、褐石、铁铝榴石、铁绿泥石、铁橄榄石等，还含有极少量的磁黄铁矿、钛磁铁矿、赤铁矿等，总体对于铁精矿质量的影响较小；脉石矿物以石英、辉石为主，其余为方解石、阳起石、长石、黝帘石与白云母等；脉石矿物均为非磁性矿物，总体上对于磁铁矿的回收较为有利。由表 3 可知：矿石中铁主要分布于磁铁矿中，其分布率(质量分数)达 59.86%；其次为铁铝榴石、阳起石、铁绿泥石、铁橄榄石、辉

表 1 原矿 XRF 分析结果(质量分数)

Table 1 XRF analysis results of raw ore %

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti
44.687	0.147	4.202	3.842	22.394	0.045	0.464	0.015	1.455	7.999	0.225
Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Ba	—
0.006	0.403	14.1	0.009	0.006	0.005	0.012	0.002	0.015	0.0204	—

表 2 矿石的矿物组成及相对含量(质量分数)

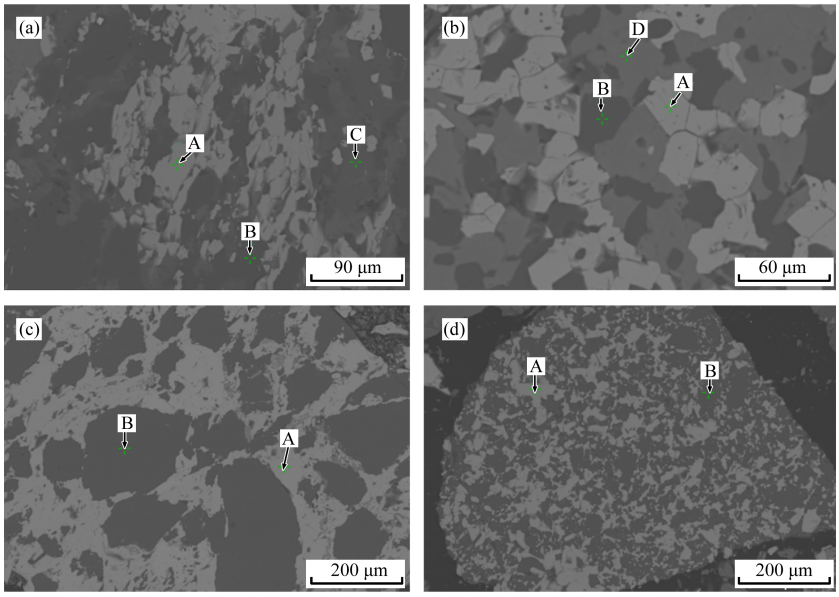
Table 2 Mineral composition and relative content of ore %

石英	辉石	方解石	磁铁矿	阳起石	长石	黝帘石	白云母	铁铝榴石	铁绿泥石	闪石	铁橄榄石	黄铁矿	榍石
29.54	13.64	10.64	8.40	8.37	7.87	4.98	4.77	2.75	2.43	1.83	1.03	0.78	0.35
白云石	重晶石	滑石	磷灰石	磁黄铁矿	钛磁铁矿	钛铁矿	黄铜矿	方铅矿	锆石	萤石	高岭土	赤铁矿	其他矿物
0.32	0.25	0.16	0.13	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.002	余量

表 3 铁在不同矿物中的平均配分(质量分数)

Table 3 Average distribution of iron in different minerals %

矿物名称	磁铁矿	铁铝榴石	阳起石	铁绿泥石	铁橄榄石	辉石	黄铁矿
铁品位	5.73	0.93	0.73	0.63	0.58	0.45	0.36
铁的分布率	59.86	9.67	7.65	6.61	6.02	4.68	3.78
矿物名称	闪石	钛磁铁矿	磁黄铁矿	钛铁矿	黄铜矿	赤铁矿	合计
铁品位	0.10	0.03	0.03	0.005	0.003	0.001	9.57
铁的分布率	1.02	0.31	0.30	0.05	0.03	0.01	100



(a) 磁铁矿(A)、钾长石(C)呈不规则状嵌布在石英(B)中;(b) 磁铁矿(A)、钙铁榴石(D)、石英(B)呈稠密浸染共生;(c) 石英(B)呈不规则块状嵌布在磁铁矿(A)中;(d) 磁铁矿(A)呈稠密浸染状嵌布在石英(B)中

A—磁铁矿;B—石英;C—钾长石;D—钙铁榴石。

图 1 磁铁矿的嵌布特征

Fig. 1 Embedded characteristics of magnetite

石与黄铁矿中,其分布率(质量分数)总计达到 38.41%。由图 1 可知:磁铁矿、钾长石呈不规则状嵌布在石英中;磁铁矿、钙铁榴石、石英呈稠密浸染共生[图 1(a)];石英呈不规则块状嵌布在

磁铁矿中[图 1(b)]；磁铁矿呈稠密浸染状嵌布在石英中[图 1(c)]；磁铁矿呈蠕虫状嵌布在石英中[图 1(d)]。由此可见，磁铁矿与矿石中石英的嵌镶关系极为紧密。

1.2　试验方法

1.2.1　整体研究技术路线

该尾矿中有价元素回收及资源化利用技术路线如图 2 所示。由图 2 可见：以该选铁尾矿作为原料，先闭路破碎筛分得到不同粒径产品，再分别进行磁选试验得到合格的精矿产品；利用选矿产生的细粒级尾矿粉作混凝土掺合料，通过抗压和抗折强度测试以其部分替代水泥制成的混凝土性能，最终实现该尾矿的有价元素回收和资源化利用。

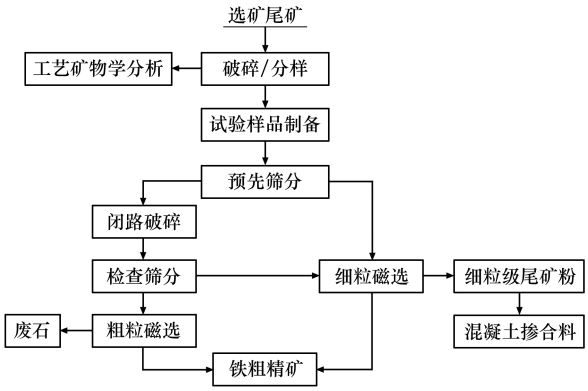


图 2　试验工艺流程

Fig. 2　Research technical route

1.2.2　混凝土养护制度及测试方法

采用 SJD-30L 型强制式单卧轴混凝土搅拌机进行混凝土试件制备试验。试验步骤：将制备混凝土原料与细粒级尾矿粉按比例加入搅拌机中，搅拌均匀后装入 100 mm × 100 mm × 100 mm 模具中，采用捣棒等工具将模具中混凝土捣实，而后放入室温(20 ℃)、相对湿度大于 50% 的室内静置 24 h，时间满足后进行脱模，试件脱模后立即放入温度(20 ± 2) ℃，相对湿度为 95% 以上的标准养护室内进行养护[14]。掺细粒级尾矿粉后混凝土的抗压与抗折强度主要依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行测定，测试仪器分别采用 DTE—2000S 型压力试验机、DBZ—300 KN 型抗折试验机。满足养护期后，分别将试件放在压力机上进行抗压及抗折强度测试，取 3 个试件强度平均值为最终结果。

2　结果与讨论

2.1　选矿回收工艺试验

2.1.1　原矿的破碎与分级

对原矿粒度进行初步分析，考察矿石中 >20、(10,20]、≤10 mm 三个粒级的质量分数，结果如表 4 所示。由表 4 可知：原矿主要以 >20 mm 粒级为主，质量分数达 70.16%；其次为(10,20] mm，质量分数为 28.86%，二者总质量分数达到 99.02%。为得到合格的磁选给矿样，首先对原矿预先分级出 <5 mm 粒级的矿石，再通过粗碎和中碎(设备为不同型号的颚式破碎机)，最终得到(10,20] mm 与 <5 mm 两个粒级的产品。破碎分级流程如图 3 所示，破碎后产品的粒度以(10,20] mm为主，质量分数为 69.01%，其铁品位为 15.11%；<5 mm 粒级质量分数为 30.99%，铁品位相对较低，为 12.77%。

表 4　原矿筛分结果(质量分数)

Table 4　Screening results of raw ore　　%

项目	>20 mm	(10,20] mm	≤10 mm
质量分数	70.16	28.86	0.98
累积产率	70.16	99.02	100

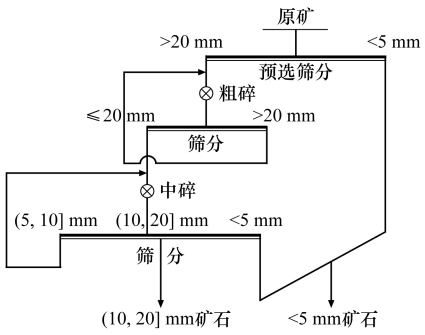


图 3　原矿破碎分级流程

Fig. 3　Raw ore crushing classification process

2.1.2　磁选试验

对破碎分级得到的(10,20] mm 与 <5 mm 粒级原矿进行磁选试验(设备为永磁磁选机)，分别考察磁选场强对分选效果的影响，磁选流程、试验结果分别如图 4、表 5 所示。由表 5 可知：对 <5 mm 粒级原矿进行磁选，当磁场强度为 4 500 Gs 时，作业回收率达到64.21%，但铁精矿的品位仅为

表 5 <5 mm 粒级和(10,20] mm 粒级的原矿磁选试验结果(质量分数)

Table 5 Magnetic separation test results with particle sizes of <5 mm and (10,20] mm %

磁场强度/Gs	产品名称	<5 mm 粒级			(10,20] mm 粒级		
		产率	铁品位	作业回收率	产率	铁品位	作业回收率
1 000	磁选精矿	13.16	31.21	32.01	13.13	33.92	29.03
	磁选尾矿	86.84	10.04	67.99	86.87	12.53	70.97
	给矿	100.00	12.83	100.00	100.00	15.34	100.00
1 500	磁选精矿	16.65	28.90	37.70	16.60	31.80	36.38
	磁选尾矿	83.35	9.54	62.30	83.40	11.07	63.62
	给矿	100.00	12.76	100.00	100.00	14.51	100.00
2 500	磁选精矿	29.87	24.22	57.68	32.29	27.64	59.03
	磁选尾矿	70.13	7.57	42.32	67.71	9.15	40.97
	给矿	100.00	12.54	100.00	100.00	15.12	100.00
4 500	磁选精矿	37.12	22.52	64.21	38.59	26.91	69.56
	磁选尾矿	62.88	7.41	35.79	61.41	7.40	30.44
	给矿	100.00	13.02	100.00	100.00	14.93	100.00

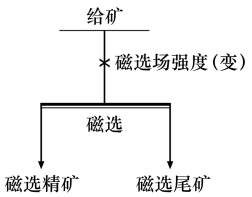


图 4 磁选试验流程

Fig. 4 Magnetic separation test process

22.52%；随着磁场强度的降低，精矿铁品位不断提高，但回收率不断下降，当磁场强度降低至 1 000 Gs 时，铁精矿的品位达到 31.21%，回收率为 32.01%。综合考虑，对 <5 mm 粒级给矿，磁选试验的最佳磁场强度为 1 000 Gs。

对(10,20] mm 粒级原矿进行磁选，随着磁场强度的降低，产出铁精矿的品位不断提高，但回收率不断下降，当磁场强度降低至 1 500 Gs 时，铁精矿的品位即达到 31.80%，回收率为 36.38%；尽管进一步降低磁场强度能使品位略有提升，但回收率下降幅度较大。综合考虑，最佳的磁选场强应定于 1 500 Gs。

2.2 最终选矿回收工艺流程与指标

基于磁选试验结果，确定最终选矿回收工艺流程与指标分别如图 5、表 6 所示。由表 6 可知，基于条件试验的结果，经过确定的流程对原矿进行分选，预计可得到含铁质量分数为 32.44%、铁回收率为 35.03% 的铁精矿产品。

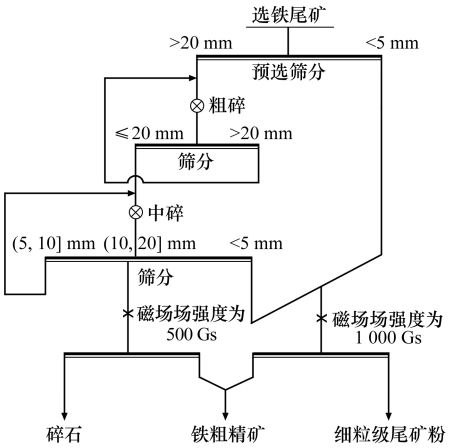


图 5 最终的选矿回收工艺流程

Fig. 5 Final beneficiation recovery process flow

表 6 最终的选矿回收工艺试验结果(质量分数)

Table 6 Final beneficiation and recovery process test results %

产品名称	产率	Fe 品位	回收率
铁粗精矿	15.53	32.44	35.03
尾矿	84.47	11.06	64.97
原矿	100.00	14.38	100.00

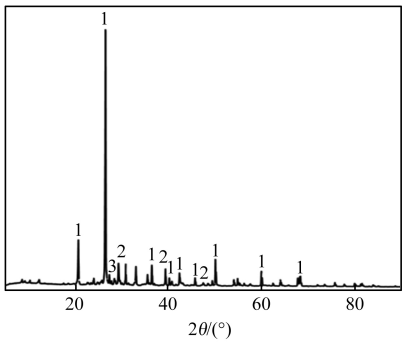
3 细粒级尾矿粉的性能分析

该尾矿通过选矿回收铁的同时产生的 <5 mm 的细粒级尾矿粉可用作掺合料置换水泥，从而减少尾矿排放，因此专门探究该细粒级尾矿粉掺量对水泥混凝土力学性能的影响，从而制备一种低

成本且绿色环保的掺铁尾矿粉水泥混凝土。

3.1　化学组成分析

该细粒级尾矿粉和水泥的化学成分如表 7 所示。水泥为普通硅酸盐水泥(PO42.5)，取自某水泥公司，符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2020)标准。细粒级尾矿粉的 XRD 分析结果、粒度分布曲线如图 6、7 所示。由图 6 可知，该细粒级尾矿粉主要矿物成分为石英、方解石与斜长石，其他矿物质量分数较小。由图 7 可知，该细粒级尾矿粉的粒径呈正态分布，且频率曲线中存在一个单峰，单峰曲线展开度窄、峰值高，表明该细粒级尾矿粉分选性好，其粒径主要集中在(5,10] μm 区间内，该区间质量分数和值超过 20%。



1—石英；2—方解石；3—斜长石。

图 6　细粒级尾矿粉 XRD 图谱

Fig. 6　XRD pattern of fine-grained tailings powder

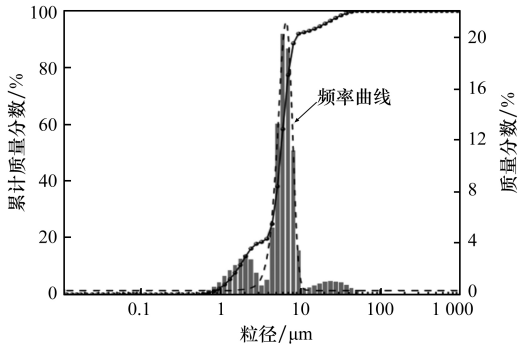


图 7　细粒级尾矿粉粒度曲线

Fig. 7　Particle size curve of fine-grained tailings powder

3.2　配合比设计

为探究该细粒级尾矿粉质量分数对水泥混凝土力学性能影响，使用细粒级尾矿粉等质量替代硅酸盐水泥，替代率分别为 0、10%、20%、40%。参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)设计水泥混凝土配合比，具体如表 8 所示。

3.3　试验结果与分析

试验测定不同细粒级尾矿粉掺量下水泥混凝

表 7　细粒级尾矿粉和普通硅酸盐水泥的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 7　Main chemical composition and burning loss of fine-grained tailings powder and ordinary portland cement　%

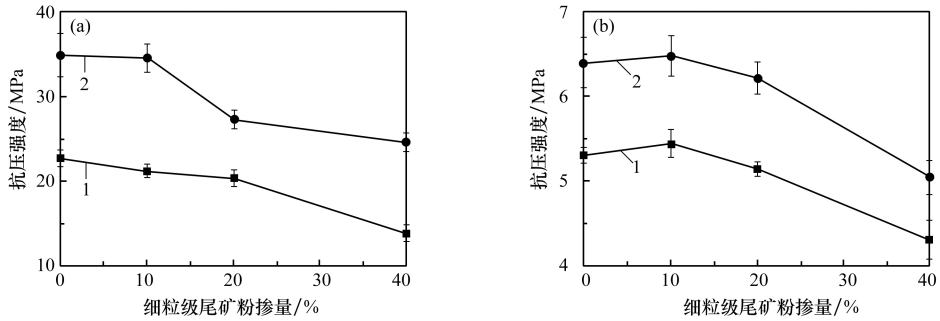
物料名称	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	Na_2O	烧损
细粒级尾矿粉	49.18	11.09	12.5	5.31	2.13	2.3	4.19	0.24	2.59
普通硅酸盐水泥	27.15	8.36	2.60	57.01	0.94	1.19	0.52	0.25	2.21

表 8　掺细粒级尾矿粉制水泥混凝土配合比

Table 8　Mixing proportion of cement concrete with fine-grained tailings powder

混凝土强度等级	掺量/%	细粒级铁尾矿/kg	水泥/kg	水/kg	中砂/kg	5～25 mm 连续粒径碎石/kg
C30	0	0	680	306	424	990
	10	68	612	306	424	990
	20	136	544	306	424	990
	40	272	408	306	424	990
C40	0	0	707	290	463	940
	10	71	636	290	463	940
	20	141	566	290	463	940
	40	283	424	290	463	940
C50	0	0	912	283	386	819
	10	91	821	283	386	819
	20	182	730	283	386	819
	40	365	547	283	386	819

土试件的抗压与抗折强度，结果如图 8 ~ 10 所示。由图 8(a)、9(a)与图 10(a)可知，当养护时间为 7 d 时，掺和细粒级尾矿粉混凝土抗压强度随着细粒级尾矿粉替代率的增大先缓慢增加后降低。抗压强度变化的转折点发生在细粒级尾矿粉替代率为 10% 时。当细粒级尾矿粉替代率大于 10% 时，抗压强度随细粒级尾矿粉替代率增大而降低。当养护时间为 28 d、掺和细粒级尾矿粉为 10% 时，混凝土抗压强度达到未掺和混凝土的强度 95% 以上。由图 8(b)、9(b)与图 10(b)可知，养护时间为7 d 时，掺和细粒级尾矿粉混凝土抗折强度随着细粒级尾矿粉替代率的增大先缓慢增加后降低。

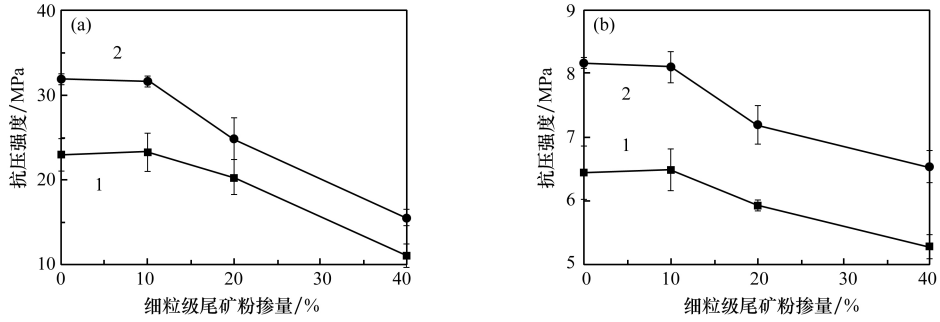


（a）抗压强度；（b）抗折强度

养护周期/d：1—7；2—28。

图 8 C30 掺和混凝土的力学性能变化

Fig. 8 Changes in mechanical properties of C30 mixed concrete

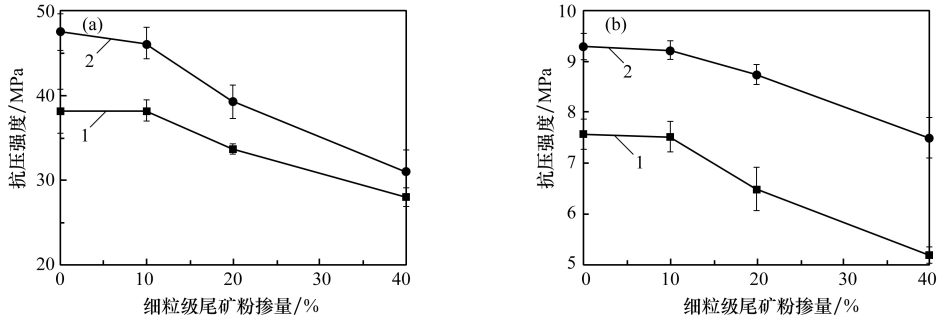


（a）抗压强度；（b）抗折强度

养护周期/d：1—7；2—28。

图 9 C40 掺和混凝土的力学性能变化

Fig. 9 Changes in mechanical properties of C40 mixed concrete



（a）抗压强度；（b）抗折强度

养护周期/d：1—28；2—7。

图 10 C50 掺和混凝土的力学性能变化

Fig. 10 Changes in mechanical properties of C40 mixed concrete

抗折强度变化的转折点发生在细粒级尾矿粉替代率为 10% 时。当细粒级尾矿粉替代率大于 10% 时，抗折强度随细粒级尾矿粉替代率增大而降低。当养护时间为 28 d、掺和细粒级尾矿粉为 10% 时，混凝土抗折强度达到未掺和混凝土的强度 99% 以上。

综上所述，随着养护龄期的增长，混凝土抗压与抗折强度均呈增加趋势。铁尾矿粉对不同强度等级下各养护时间混凝土强度影响不完全相同，铁尾矿粉掺量对不同养护时间混凝土强度增长幅度有影响。在最优条件下该细粒级尾矿粉可替代部分水泥做混凝土原料。

4　结　论

（1）该选铁尾矿中可供选矿回收的有价元素为 Fe，目的矿物为磁铁矿，其嵌布粒度较细，且与石英嵌镶关系紧密。选矿回收工艺产生的 <5 mm 细粒级尾矿的主要矿物成分为石英、方解石与斜长石，其他矿物含量占比较小。该细粒级尾矿粒径集中度高、分选性较好，可用作掺合料置换水泥制备混凝土。

（2）选矿回收工艺流程试验结果表明：对原矿破碎分级后可得到 <5 mm 与(10,20] mm 粒级的两种原料，再经磁选后可得到 Fe 品位为 32.44%、回收率为 35.03% 的铁精矿；对已通过选矿回收工艺试验得到的铁精矿，仍可以进一步考察其细磨后湿式磁选所能达到的分选指标，并考虑是否将其并入总的铁矿选矿系统中。

（3）<5 mm 细粒级尾矿性能测试结果表明：在混凝土强度等级相同的条件下，当细粒级尾矿粉替代率小于 10% 时，细粒级尾矿粉的稀释效应促进了水泥水化反应中水化产物的生成，混凝土强度变化幅度较小，且部分试件强度随着铁尾矿粉替代率增大而增加。细粒级尾矿粉替代率大于 10% 时，同一养护龄期的混凝土试件强度随着细粒级尾矿粉掺量的增加降低明显。在铁尾矿粉替代率为 10%、养护时间为 28 d 的条件下，掺铁尾矿水泥水化较充分，混凝土强度较未掺和时变化不大，说明该条件下细粒级尾矿粉可替代部分水泥做混凝土原料。

参考文献：

[1] 陈其慎,干勇,延建林,等. 从矿产资源大国到矿产资源强国:目标、措施与建议[J]. 中国工程科学,2019,21(1):49－54.
CHEN Qishen,QIAN Yong,YAN Jianlin,et al. lransition from a large to a powerful country in mineral resources: Objectives,measures and proposas[J]. Strategic Study of CAE,2019,21(1):49－54.

[2] 顾晓薇,徐建宇,贾泽藩,等. 极细高硅型铁尾矿制备超高性能混凝土研究[J]. 金属矿山,2022(1):71－75.
GU Xiaowei,XU Jianyu,JIA Zefan,et al. The study on preparation of ultra-high performance concrete utilizing ultra-fine siliconron tailings[J]. Metal Mine,2022(1):71－75.

[3] 刘文博,姚华彦,王静峰,等. 铁尾矿资源化综合利用现状[J]. 材料导报,2020,34(S1):268－270.
LlU Wenbo,YAO Huayan,WANG Jingfeng,et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings[J]. Materials Reports,2020,34(S1):268－270.

[4] 孙志勇,林栋,张芹. 中国铁尾矿资源的综合利用途径[J]. 自然资源情报,2023(8):1－5.
SUN Zhiyong, LIN Dong, ZHANG Qin. Comprehensive utilization of iron ore tailings in China[J]. Natural Resources Information,2023(8):1－5.

[5] 袁晨光,黄自力,刘楚玉,等. 酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究[J]. 烧结球团,2023,48(1):98－105.
YUAN Chenguang, HUANG Zili, LIU Chuyu, et al. Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JlSCO[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):98－105.

[6] 张韶敏. 承德地区某钒钛磁铁矿选铁尾矿回收铁、钛试验[J]. 现代矿业,2013(10):108－109.
ZHANG Shaomin. Test on recovery of iron and titanium from iron tailings of a vanadium-titanium magnetite ore in Chengde area[J]. Modern Mining,2013(10):108－109.

[7] 袁致涛,马玉新,毛卫东,等. 马耳岭选矿厂尾矿中磁铁矿再回收试验研究[J]. 矿产保护与利用,2014(2):44－48.
YUAN Zhitao, MA Yuxin, MAO Weidong, et al. Experimental research on collecting magnetic iron from tailing of Maerling concentrator[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resource,2014(2):44－48.

[8] 钟义,胡承凡. 大冶铁矿尾矿中铁矿物在线回收工艺

与生产实践[J]. 矿产综合利用,2012(5):57 – 59.
ZHONG Yi, HU Chengfan. On-line recovery technology and practice of iron mineral from the tailings in Daye iron mine[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012(5):57 – 59.

[9] 李冰,唐彪,马振. 铁尾矿资源综合利用状况探讨[J]. 内蒙古煤炭经济,2023(18):28 – 30.
LI Bing, TANG Biao, MA Zhen. Discussion on comprehensive utilization of iron tailings resources[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2023(18):28 – 30.

[10] 孙建恒,陈若妤,袁敬. 大体积铁尾矿粉混凝土水化热试验研究及数值模拟[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(3):440 – 446.
SUN Jianheng, CHEN Ruoyu, YUAN Jing. Tailings concrete experimental study and numerical simulation on hydration heat of large-volume iron tailings concrete [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),2023,54(3):440 – 446.

[11] 吴丽萍,王军. 铁尾矿粉 – 硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响[J]. 矿产综合利用,2023(2):184 – 190.
WU Liping, WANG Jun. Effect of iron tailings powder-silica powder mineral admixture on concrete performance [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(2):184 – 190.

[12] LIU X,XU H,LI B,et al. Investigation of the mechanical properties of iron tailings concrete subjected to dry-wet cycle and negative temperature [J]. Materials, 2023, 16(13):4602.

[13] 王艳艳,朱月雷,丁益,等. 铁尾矿砂替代率对混凝土性能的影响[J]. 安徽建筑,2023,30(9):102 – 103;109.
WANG Yanyan, ZHU Yuelei, DING Yi, et al. Effect of iron tailings sand replacement rate on concrete performance [J]. Anhui Architecture, 2023, 30(9): 102 – 103;109.

[14] 李莉. 铁尾矿微粉在硅酸盐胶凝体系中的作用及机理研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
LI Li. Study on the effect and mechanism of iron tailings powder in silicate gel system[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2017.

(上接第16页)

[13] 周昊,蒋朝辉,叶飞强,等. 基于图像多元特征的高炉物料料种识别[C]//2020中国自动化大会论文集. 上海:中国自动化学会,2020:806 – 811.
ZHOU Hao, JIANG Chaohui, YE Feiqiang, et al. Recognition of blast furnace materials based on image multi-feature[C]//CAC2020. Shanghai:Chinese Association of Automation,2020:806 – 811.

(上接第30页)

[7] 臧保文,罗双华. 提高FeO对烧结矿质量的研究[J]. 山西冶金,2021,42(2):10 – 11;33.
ZANG Baowen, LUO Shuanghua. A study on improving FeO quality of sinter by increasing carbon allocation[J]. Shanxi Metallurgy,2021,42(2):10 – 11;33.

[8] 陆洋,张薇. 氧化钙活性对固相烧结反应的影响[J]. 无机盐工业,2012,44(7):16 – 18.
LU Yang, ZHANG Wei. Influence of activity of calcium oxide on solid state sintering reaction[J]. Inorganic Chemicals Industry,2012,44(7):16 – 18.

[9] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(4):1179 – 1188.

(上接第89页)

[14] 王聪兵. 难选氧化锌矿硫化焙烧 – 浮选理论与技术研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
WANG Congbing. Theoretical and technological research on sulphide roasting-flotation of difficult-to-select zinc oxide ores[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2019.

[15] LIU R, ZHAI Q, WANG C, et al. Optimizing the crystalline state of Cu slag by Na_2CO_3 to improve Cu recovery by flotation[J]. Minerals,2020,10(9):820.