



海滨砂矿中锆石重-磁-电联合分选工艺试验研究

林光隆¹, 陈欣¹, 郑文燕¹, 赵强², 张鹏羽², 杨卓²

(1. 福建省地质调查研究院, 福建 福州 350012; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为解决海滨砂矿中锆资源难以高效回收的难题,针对某低品位石英岩型海滨砂矿,系统开展了工艺矿物学与选矿试验研究,查明了有价元素的赋存特征与选别规律。结果表明:该海砂矿 ZrO_2 质量分数为 0.10%, 含泥量较高 ($<0.038\text{ mm}$ 粒级颗粒占 18.67%), 且富含贝壳碎片; 锆石单体解离度较高, 但粒度细小 ($10\sim50\text{ }\mu\text{m}$)。基于上述特征,开展了预富集及重-磁-电联合分选试验,通过条件优化确定了选矿工艺流程。采用“溜槽预富集-摇床精选-磁选除杂-电选提纯”联合流程,获得了产率为 0.03%、 ZrO_2 品位为 63.18%、回收率为 16.98% 的锆石精矿和产率为 0.06%、 ZrO_2 品位为 26.82%、回收率为 15.91% 的混合锆精矿,锆矿物综合回收率为 32.89%。本文成果可为同类低品位海滨砂矿的资源化利用提供了技术参考。

关键词: 海滨砂矿; 锆石; 重选; 磁选; 电选

中图分类号: TD98

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)05-0001-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.05.047

Experimental study on gravity-magnetic-electrostatic separation of zircon from coastal placer

LIN Guanglong¹, CHEN Xin¹, ZHENG Wenyan¹, ZHAO Qiang², ZHANG Pengyu², YANG Zhuo²

(1. Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350012, Fujian, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problem that zirconium resources in coastal placer are difficult to recover efficiently, for a low-grade quartzite-type coastal placer, the experimental research on process mineralogy and beneficiation is systematically carried out. The occurrence characteristics and selection laws of valuable elements are identified. The results show that the ZrO_2 mass fraction of the coastal placer is 0.10%, the mud content is high ($<0.038\text{ mm}$ accounting for 18.67%), and it is rich in shell fragments. The dissociation degree of zircon monomer is high, but the particle size is fine ($10\sim50\text{ }\mu\text{m}$). Based on the above characteristics, pre-enrichment and gravity-magnetic-electrostatic separation tests are carried out, and the beneficiation process is determined by condition optimization. The combined process of “chute pre-enrichment-shaking table cleaning-magnetic separation for impurity removal-electrostatic separation for purification” is adopted to obtain zircon concentrate with a yield of 0.03%, a ZrO_2 grade of 63.18%, and a recovery rate of 16.98%, and a mixed zirconium concentrate with a yield of 0.06%, a ZrO_2 grade of 26.82%, and a recovery rate of 15.91%, and the comprehensive recovery rate of zirconium minerals is 32.89%. The results can provide a technical reference for the resource utilization of similar low-grade coastal placer.

Key words: coastal placer; zircon; gravity separation; magnetic separation; electrostatic separation

收稿日期: 2025-11-25

基金项目: 福建省地质调查和灾害防治专项资金资助项目 (GY20240505)

作者简介: 林光隆 (1988—), 男, 高级工程师, 从事地质找矿、海洋地质等工作。

通信作者: 陈欣 (1983—), 男, 高级工程师, 从事地质找矿、海洋地质等工作。

海滨砂矿作为重要的滨海沉积型矿产资源,富含锆石、钛铁矿、金红石等战略性矿物,是全球锆资源的关键潜在来源^[1-3]。随着核工业、耐火材料及高端陶瓷等领域对锆资源需求的持续增长,陆地锆矿资源日益趋紧,开发低品位海滨砂矿已成为保障供给的重要途径^[4-5]。然而,此类矿石普遍存在品位低、嵌布粒度细、矿物组成复杂等特点,锆石常与石英、长石及多种重矿物紧密共生,导致分选难度大,回收率偏低^[6-7]。因此,系统研究海滨砂矿中锆石的赋存特征及其高效分选工艺,对提升低品位锆资源综合利用水平具有重要的理论价值与工程意义^[8]。

针对海滨砂矿中锆英石的回收,国内外学者已开展了大量试验研究。邵伟华等^[9]对国内某海滨石英砂尾矿,采用“螺旋溜槽一粗一扫-重矿物合并摇床精选”工艺得到预选粗精矿,继而通过“高梯度强磁选-重选”联合流程,成功分离出合格钛铁矿产品和高品位锆钛混合矿物。张华等^[10]针对国外某多种矿物组成的海滨砂矿,采用湿式平环强磁选预选,结合电选-磁选-重选精选稀土矿物,以及干法磁选-电选锆英石与电选-磁选金红石等工艺,实现了多种精矿产品的综合回收。张益玮^[11]针对国外某嵌布粒度较粗的海滨砂矿,采用“重选预富集-磁选分离-重选再富集-干式磁电选分离”全流程,获得了合格的钛铁矿、金红石和锆精矿。

总体而言,现有研究虽验证了海滨砂矿中锆的可回收性,但多侧重于理想品位及粒级条件,对于低品位、细粒级海滨砂矿中锆的回收,如何在保证回收率的同时兼顾工程适用性,仍需深入研究^[12]。本文以典型低品位石英岩型海滨砂矿为研究对象,

系统开展工艺矿物学分析,明确锆石与脉石矿物及伴生重矿物的嵌布关系和解离特征;在此基础上,开展预富集及重-磁-电联合分选试验,实现低品位条件下锆石的有效富集,以期同类资源的高效回收提供更具工程适用性的技术方案。

1 试验原料与方法

1.1 矿石化学成分及矿物组成

原矿多元素化学分析结果如表 1 所示。原矿中 ZrO_2 质量分数为 0.1%,属于典型的低品位海滨砂矿。矿物组成分析结果如表 2 所示。由表 2 可知:矿石中具有回收价值的金属矿物主要为锆石(0.18%)和钛铁矿(0.41%);金红石与独居石含量甚微(均小于 0.1%);脉石矿物以石英和长石为主,合计占比超过 85%。

1.2 锆石嵌布特征

锆石矿物的嵌布特征如图 1 所示。由图 1 可知:原矿中锆石晶形发育完好,多呈典型的自形晶少见磨圆现象;矿物以明显的四方双锥状、柱状形态为主,局部可见断裂或碎裂晶体。矿物颜色大多为白色或浅色,仅少数为深色。锆石基本以单体形态式产出,粒度总体略细于钛铁矿。此外,可见镁铝榴石沿锆石晶体外缘形成 5~10 μm 厚的连续或不连续“反应边”,属冠状反应边结构;锆石呈自形-半自形颗粒(10~50 μm),被石英或钾长石完全包裹,亦可见石英被锆石包裹的现象,属典型的包裹嵌布结构。

1.3 原矿粒级分布及金属量分布

为确定锆元素的粒度分布特征,对原矿进行筛析化验,结果如表 3 所示。由表 3 可知:原矿含泥量较高,<0.038 mm 粒级颗粒占比达 18.67%;

表 1 原矿多元素化学分析结果(质量分数)

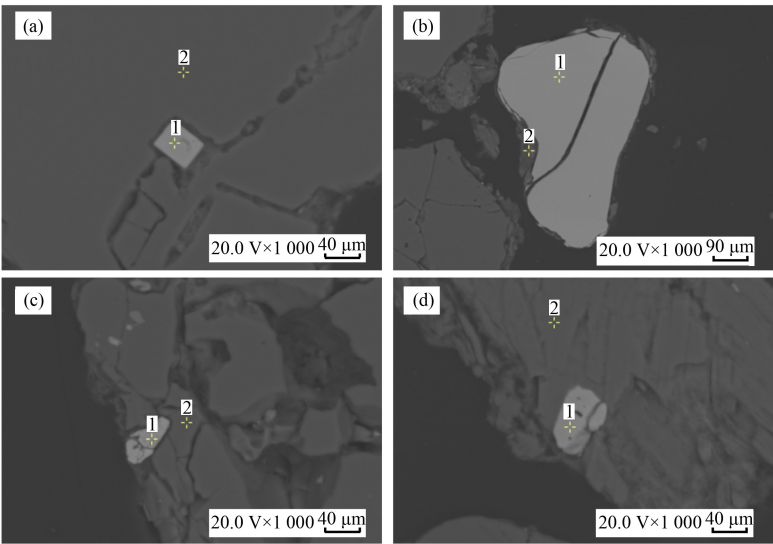
%

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	Na_2O
74.210 0	12.300 0	3.149 0	2.790 0	1.800 0	1.790 0	1.730 0
ZrO_2	TiO_2	SO_3	P_2O_5	MnO	BaO	其他
0.100 0	0.628 0	0.371 0	0.100 0	0.081 5	0.037 0	0.939 0

表 2 矿物组成及含量分析结果(质量分数)

%

金属矿物						脉石矿物					
钛铁矿	锆石	铁橄榄石	赤铁矿	黄铁矿	钠铁闪石	石英	正长石	黑云母	钠长石	方解石	其他矿物
0.412 6	0.182 7	0.154 8	0.113 9	0.095 1	0.353 9	70.541 1	10.929 1	4.124 0	3.059 4	1.609 4	2.558 7



(a) 锆石 (点 1) 镶嵌钠铝榴石中; (b) 镁铝榴石沿锆石 (点 1) 边缘镶嵌; (c) 锆石 (点 1) 被包裹在石英中; (d) 锆石 (点 1) 被包裹在钾长石中

图 1 锆石矿物嵌布特征

同时 >0.250 mm 粒级含有大量贝壳碎片。对比各粒级金属分布发现, >0.15 mm 粒级累计产率近 65%, 但其 ZrO_2 分布率仅约为 20%。

表 3 原矿筛析结果

粒级/mm	产率/%	ZrO_2 品位/%	ZrO_2 分布率/%
>0.250	5.02	0.090	4.52
(0.150,0.250]	59.55	0.034	20.25
(+0.074,0.150]	15.17	0.340	51.56
(0.038,0.074]	1.59	0.996	15.83
≤0.038	18.67	0.042	7.84

1.4 选矿试验方案

化学分析结果表明, 原矿中有价元素主要为 Zr、Fe、Ti。鉴于 Fe、Ti 质量分数较低, 不具备回收价值, 本文主要聚焦于锆矿物的回收。由于 Zr、Fe、Ti 元素主要以氧化物形式存在, 可利用锆石不导电、无磁性的物理特点, 通过磁选与电选有效去除、钛氧化物。考虑到原矿品位较低, 需通过重选进行预富集以提高入选品位。

此外, 原矿中锆石主要以单体形式产出, 解离度较高, 同时原矿含泥量较高。若进行磨矿, 不仅会导致锆石过粉碎并产生大量微细粒级矿物, 加剧重选损失, 还会恶化后续磁选、电选的给料条件, 降低整体回收率, 同时增加能耗与成本。因此, 试验方案未设置磨矿作业。最终制定的回收工艺流

程: 原矿直接进行重选预富集, 粗精矿再经摇床、磁选及电选联合分选, 原则流程如图 2 所示。

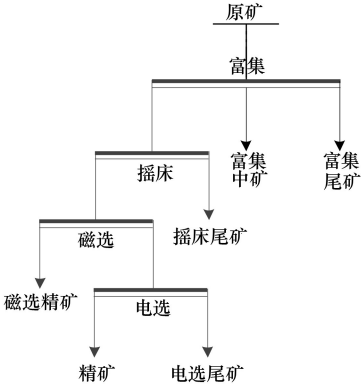


图 2 联合选矿工艺原则流程

2 结果与讨论

2.1 预富集试验

鉴于原矿品位较低、粒级较粗, 需通过重选进行预富集, 以达到减少入选矿量、提高入选品位的目的, 为后续作业创造条件。试验分别对原矿采用毛毯、摇床及螺旋溜槽等方式进行富集, 流程如图 3 所示, 结果如图 4 所示。

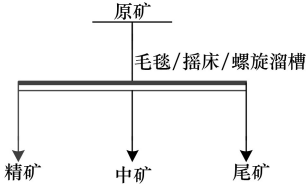


图 3 整体摇床富集流程

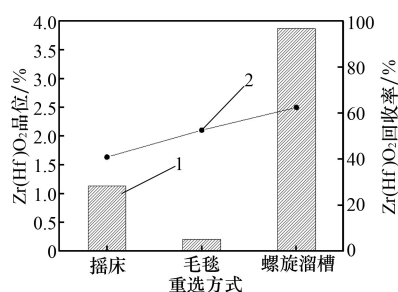
1—ZrO₂ 品位；2—ZrO₂ 回收率。

图 4 整体摇床富集结果

由图 4 可知：摇床富集获得的精矿 ZrO₂ 品位为 1.13%，回收率为 40.92%，整体富集效果较差，推测是原矿中夹杂的大量细小贝壳阻碍了床面分层，难以形成整齐矿带。毛毯富集获得的精矿 ZrO₂ 品位为 0.21%，回收率为 52.61%，同样受贝壳影响，富集比低。相比之下，溜槽富集效果显著，可获得 ZrO₂ 品位为 3.87%、回收率为 62.50% 的精矿。溜槽效果优于摇床和毛毯，主要是因为其独特的离心-重力复合分选机制。轻质脉石矿物在径向水流驱动下迅速向外缘迁移进入尾矿，而密度较大的锆石则沉入内缘被有效捕集。同时，螺旋溜槽的有效分选粒级与原矿中锆石的主富集粒级高度匹配，对原矿的细泥具有较强的抗干扰能力，从而实现了较高的精矿品位和回收率。

2.2 摇床精选试验

2.2.1 摇床精选 I

为进一步提升 ZrO₂ 品位，对溜槽精矿进行一次摇床精选，流程如图 5 所示，结果如表 4 所示。由表 4 可知：经过一次摇床精选，可获得 ZrO₂ 品位为 11.50%、回收率为 82.79% 的精矿。摇床作业显著提升了精矿品质并保持了较高回收率，这主要归因于溜槽预先对各个粒级锆矿物的有效富集，使得进入摇床的物料可选性大幅提升。

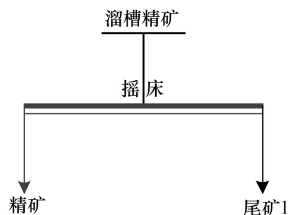


图 5 摇床精选 I 流程

2.2.2 摇床精选 II

为进一步净化精矿，对一次摇床精矿进行第二次摇床精选，流程如图 6 所示，结果如表 5 所

表 4 摇床精选 I 结果(质量分数)

产品名称	产率	ZrO ₂ 品位	ZrO ₂ 回收率
精矿	27.86	11.50	82.79
尾矿 1	72.14	0.92	17.21
溜槽精矿	100.00	3.87	100.00

示。由表 5 可知：经二次摇床精选，可获得 ZrO₂ 品位为 12.63%、回收率为 95.96% 的精矿。这表明，通过两次精选，显著降低了杂质含量，实现了品质的跨越式提升。

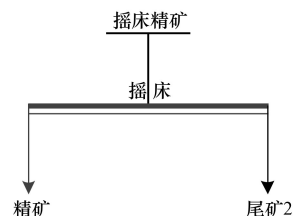


图 6 摇床精选 II 流程

表 5 摇床精选 II 结果(质量分数)

产品名称	产率	ZrO ₂ 品位	ZrO ₂ 回收率
精矿	87.38	12.63	95.96
尾矿 2	12.62	3.68	4.04
摇床精矿	100.00	11.50	100.00

2.2.3 摇床精选全流程指标

对溜槽精矿进行两段摇床精选，结果如表 6 所示。由表 6 可知：最终可获得产率为 24.34%、ZrO₂ 品位为 12.63%、ZrO₂ 回收率为 79.45% 的精矿。虽然尾矿 2 的产率仅为 3.52%，但其 ZrO₂ 品位已降至 3.68%，故继续重选意义不大。为进一步提高精矿纯度，后续可采用磁选-电选联合工艺进行深度除杂。

表 6 摇床精选结果(质量分数)

产品名称	产率	ZrO ₂ 品位	ZrO ₂ 回收率
精矿	24.35	12.63	79.45
尾矿 2	3.52	3.68	3.34
尾矿 1	72.14	0.92	17.21
溜槽精矿	100.00	3.87	100.00

2.3 磁选回收试验

2.3.1 磁选场强条件试验

为分离铁矿物与钛矿物，获得合格锆精矿，对摇床精矿进行不同场强的磁选试验，流程如图 7 所示，结果如图 8 所示。由图 8 可知：随着场强增加，尾矿中 ZrO₂ 回收率逐渐降低。当场强为

0.8 T 时，尾矿 ZrO_2 品位较低；当场强增至 1.2 T 时，尾矿 ZrO_2 品位有所升高，但回收率大幅下降。综合考虑，确定 1.0 T 为最佳场强，此时磁选尾矿 ZrO_2 品位为 36.65%，回收率达 70.20%。

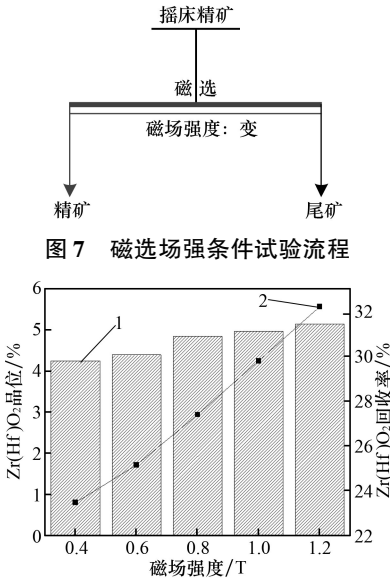


图 7 磁选场强条件试验流程

图 8 磁选场强条件试验结果

2.3.2 磁选试验

为进一步抛除摇床精矿中的弱磁性铁矿物与钛矿物，强化分选效果，采用一粗一扫流程进行磁选试验，流程如图 9 所示，结果如表 7 所示。由表 7 可知：该流程可获得产率为 22.35%、 ZrO_2 品位为 38.12%、回收率为 67.51% 的磁选尾矿。这表明通过一粗一扫流程，可有效实现锆矿物与非磁性脉石的分离。

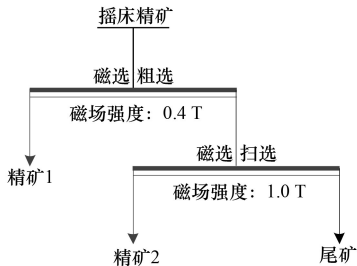


图 9 磁选试验流程

表 7 磁选试验结果(质量分数) %

产品名称	产率	ZrO_2 品位	ZrO_2 回收率
精矿 1	69.47	4.18	23.01
精矿 2	8.18	14.63	9.48
尾矿	22.35	38.12	67.51
给矿	100.00	12.62	100.00

2.4 电选回收试验

磁选尾矿中主要杂质为 Fe 和 Ti。为提高锆精矿品质，利用锆石不导电、钛铁矿导电的物理性质差异，采用高压电选进行分离。

2.4.1 电选电压条件试验

为去除铁矿物与钛矿物，对磁选尾矿进行不同电压条件下的电选试验，流程如图 10 所示，结果如图 11 所示。由图 11 可知：随电压升高，尾矿 ZrO_2 回收率呈下降趋势。当电压为 25 kV 时，回收率最高；当电压升至 35 kV 时， ZrO_2 品位达到峰值，但回收率降幅较大。综合考虑，确定 30 kV 为最佳工作电压，此时可获得 ZrO_2 品位为 63.04%、回收率为 55.22% 的电选精矿。

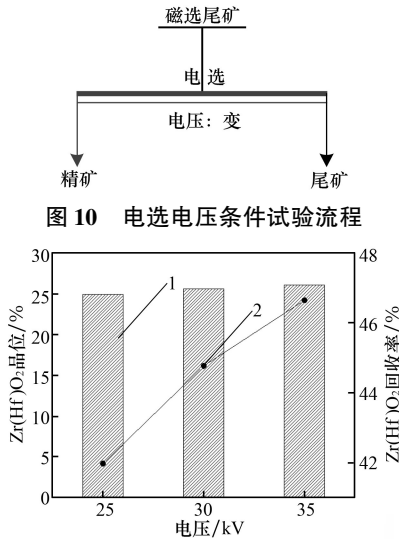


图 10 电选电压条件试验流程

图 11 电选电压条件试验结果

2.4.2 电选试验

为保证除杂效果，对磁选尾矿采用一粗一扫流程进行电选，流程如图 12 所示，结果如表 8 所示。由表 8 可知：通过一粗一扫流程，可获得产率为 31.17%、 ZrO_2 品位为 63.18%、回收率为 51.26% 的最终锆精矿，表明该流程对提高锆矿物纯度效果显著。

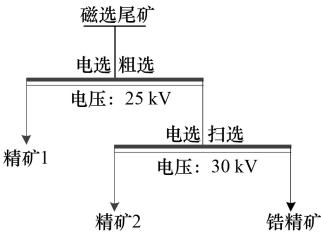


图 12 电选试验流程

表 8 电选试验结果(质量分数) %

产品名称	产率	ZrO ₂ 品位	ZrO ₂ 回收率
精矿 1	64.21	24.84	41.81
精矿 2	4.62	54.26	6.57
锆精矿	31.17	63.18	51.62
给矿	100.00	38.15	100.00

2.5 全流程整体回收试验

全流程整体回收数质量流程如图 13 所示，试验结果如表 9 所示。

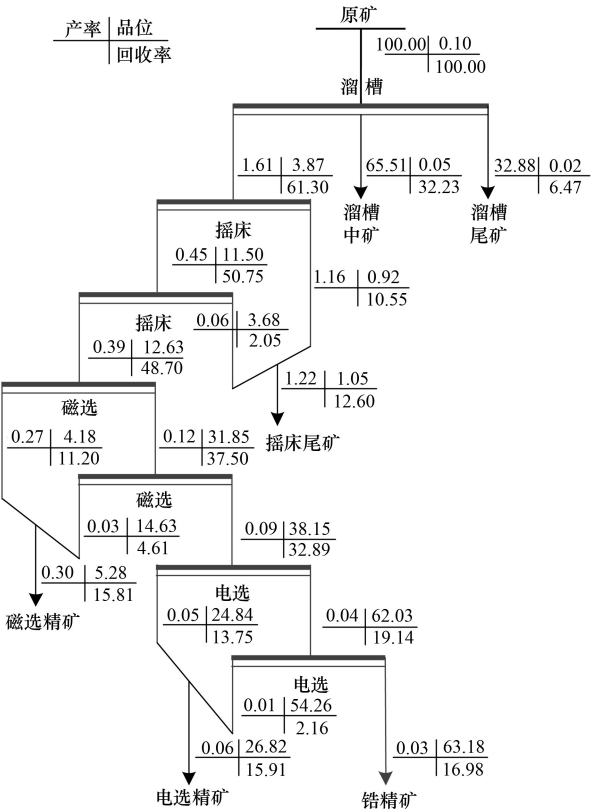


图 13 全流程数质量流程 (质量分数) %

表 9 全流程试验结果(质量分数) %

产品名称	产率	ZrO ₂ 品位	ZrO ₂ 回收率
锆精矿	0.03	63.18	16.98
电选精矿	0.06	26.82	15.91
磁选精矿	0.30	5.28	15.81
摇床尾矿	1.22	1.05	12.60
溜槽中矿	65.51	0.05	32.23
溜槽尾矿	32.88	0.02	6.47
原矿	100.00	0.10	100.00

由表 9 可知：溜槽预富集后采用两段摇床精选，摇床精矿采用一粗一扫磁选除杂，磁选尾矿进行一粗一扫电选进一步除杂，可获得产率为

0.03%、ZrO₂ 品位为 63.18%、ZrO₂ 回收率为 16.98% 的锆精矿；产率为 0.06%、ZrO₂ 品位为 26.82%、ZrO₂ 回收率为 15.91% 的电选精矿；产率为 0.30%、ZrO₂ 品位为 5.28%、ZrO₂ 回收率为 15.81% 的磁选精矿。

全流程整体回收试验获得了多种产品，对其后续利用方向简要分析如下：锆精矿已达到锆英砂精矿质量标准，可直接作为陶瓷、耐火材料、铸造等行业的生产原料使用；电选精矿为低品级锆中矿，可与锆精矿合并以提升综合回收率，也可返回摇床或电选粗选作业进行再富集，或用于生产锆英粉、冶金辅料等低端锆制品；磁选精矿以铁钛矿物为主，锆含量较低，可通过弱磁选进一步回收钛铁矿，或作为铁精矿配矿原料销售；摇床尾矿、溜槽中矿及溜槽尾矿主要为石英、长石等脉石矿物，经脱泥、擦洗后可用作建筑用砂、玻璃原料或采坑回填材料，实现全组分资源化利用。

2.6 精矿产品分析

对全流程整体回收工艺获得的锆精矿产品进行化学多元素分析，结果如表 10 所示。由表 10 可知：锆精矿中 ZrO₂ 品位达 63.18%，符合锆英砂精矿质量标准，且其他杂质含量较低，表明重-磁-电联合分选工艺有效去除了 Fe、Ti 等杂质，获得了高品质锆精矿产品。

表 10 精矿 1 化学多元素分析结果(质量分数) %

ZrO ₂	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFE	V
63.180	0.990	33.050	0.150	0.220	<0.005

3 结 论

(1) 原矿为低品位石英岩型砂矿，主要化学成分为 SiO₂，质量分数为 74.21%；Fe₂O₃ 质量分数为 3.149%，TiO₂ 质量分数为 0.628%，ZrO₂ 质量分数为 0.10%。原矿中有价元素为 Zr、Ti、Fe，但 Ti、Fe 元素品位较低，且主要与脉石矿物紧密共生，难以单体解离与选别。故可供综合利用的有价组分为 Zr 元素，原矿中的锆主要以锆石形式赋存。

(2) 整体富集回收试验结果表明：原矿中含有大量贝壳杂质，直接采用摇床富集难以形成整齐有效的矿带；且因原矿品位偏低，致使摇床精

矿产率极低,若要获得足量精矿需处理大量原矿,分选效率低下。若采用毛毯溜槽,虽处理能力大,但贝壳杂质难以去除,对分选结果影响较大。相比之下,采用溜槽预富集可获得 ZrO_2 品位为 3.87%、回收率为 62.50% 的溜槽精矿,实现处理能力与精矿品质的兼顾。

(3) 综合考虑,针对该细粒级低品位石英岩型砂矿,试验最终确定采用“溜槽预富集-摇床精选-磁选除杂-电选提纯”联合流程进行选别。通过该工艺,最终可获得产率为 0.03%、 ZrO_2 品位为 63.18%、回收率为 16.98% 的锆精矿(精矿 1);产率为 0.06%、 ZrO_2 品位为 26.82%、回收率为 15.91% 的电选精矿(精矿 2);锆矿物综合回收率达 32.89%。本文结果为同类低品位海滨砂矿中锆资源的绿色开发提供了技术参考。

参考文献:

- [1] 梁冬云,李波. 稀有金属矿工艺矿物学[M]. 北京:冶金工业出版社,2015:127-128.
- [2] 张建文,王海东,龚文勇,等. 中国锆矿资源开发利用形势分析[J]. 矿产保护与利用,2019,39(5):106-110.
- [3] 梁焱茂,杨招君,钟森林,等. 国外某海滨砂矿综合回收试验研究[J]. 钢铁钒钛,2022,43(3):91-97.
- [4] 廖乾,龚文勇,张建文,等. 某海滨砂矿重选预富集试验研究[J]. 湖南有色金属,2020,36(1):15-17;51.
- [5] 孙宏伟,许康康,左立波,等. 锆-钛矿产资源分布特点、类型、供需格局及开发利用现状[J]. 中国地质,2023,50(4):1070-1081.
- [6] 彭少伟,王前,王兆连,等. 埃及某海滨砂矿选矿试验研究[J]. 陶瓷,2023(2):32-37.
- [7] 张建文,王海东,龚文勇,等. 莫桑比克某锆英石磁电选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2020,40(1):51-53.
- [8] 肖飞燕,喻连香,周吉奎,等. 国外某海滨砂矿难选锆中矿选矿综合利用研究[J]. 材料研究与应用,2019,13(4):307-312.
- [9] 邵伟华,吕良,常学勇,等. 从海滨石英砂尾矿中综合回收锆钛实验[J]. 矿产综合利用,2025,46(5):126-134.
- [10] 张华,潘炳,李欣,等. 国外某细粒级海滨砂矿多金属综合回收选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2021,41(6):104-108.
- [11] 张益玮. 国外某滨海砂矿锆钛高效回收选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2023(2):110-115;160.
- [12] 马崇振,张华,梁汉. 螺旋溜槽发展现状及在海滨砂矿中的应用实践[J]. 湖南有色金属,2020,36(1):18-22.