# 某滨海沉积型锆砂矿矿物赋存规律及离心抛废可行性研究*

李佩昱[1,2],孙大勇[1,2,3],祁忠旭[1,2,3],王龙[1,2],雷志兰[1,2],欧阳林莉[1,4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4.战略性稀有金属矿产高效开发国家技术创新中心, 湖南 长沙 410012)

**摘要**:针对海南某滨浅海低品位锆铪砂矿开采分选难题,采用X射线衍射、矿物解离分析仪、扫描电子显微-能谱仪等检测手段系统开展工艺矿物学研究,阐明矿石化学组分、矿物组成、有价矿物嵌布粒度与赋存规律,并利用自制LX-60型立式旋流离心机,开展预先筛分-离心预选抛废可行性研究。结果表明,原矿$ZrO_2$品位仅0.105 0%,有用矿物锆石仅占0.14%,石英、长石等轻质脉石含量高达86.60%;75%的锆石为粒径0.04~0.20 mm的单体,与脉石密度差异显著,适宜重选抛废,25%的锆石为粒径小于0.05 mm的石英、长石、钛铁矿包裹体,该部分细粒包裹体易导致金属流失;钛铁矿嵌布粒度粗于锆石,重选时同步富集。在预先筛除+0.15 mm粗粒物料后,筛下物料在离心力80$g$、反冲洗水量4 L/min、给矿量80 g条件下经一次粗选,可获得$ZrO_2$品位0.483 6%、作业回收率95.50%的预选粗精矿。筛分-离心联合流程锆金属总回收率达93.37%,对原矿总损失率仅6.63%,该工艺实现了大量轻质脉石的高效抛除与锆矿物的预先富集,具备海上原位预选抛废的潜在适用性,可为同类型极低品位锆砂矿预选抛废提供技术支撑。

**关键词**:海滨砂矿;工艺矿物学;嵌布粒度;锆石;离心抛废

**中图分类号**:TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0292-10

**Study on Mineral Occurrence Regularity and Feasibility of Centrifugal Waste Discarding for a Coastal Sedimentary Zircon Placer**

*Li Peiyu*[1,2], *Sun Dayong*[1,2,3], *Qi Zhongxu*[1,2,3], *Wang Long*[1,2], *Lei Zhilan*[1,2], *Ouyang Linli*[1,4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China;
4.National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract**: To address the mining and separation difficulties of a low-grade zircon-hafnium placer in a coastal shallow sea of Hainan, a systematic process mineralogy study was conducted using analytical techniques such as X-ray diffraction, mineral liberation analyzer (MLA), and scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The chemical composition of the ore, mineral composition, dissemination size of valuable minerals, and mineral occurrence characteristics were clarified. Furthermore, a feasibility study on pre-screening and centrifugal tailing discarding was carried out using a self-made LX-60 vertical cyclone centrifuge. The results indicate that the $ZrO_2$ grade of the raw ore is only 0.105 0%, the valuable mineral zircon accounts for only 0.14%, and the content of light gangues such as quartz and feldspar is up to 86.60%. 75% of zircons are monomer with particle size of 0.04-0.20 mm, showing a significant specific density difference from the gangues, which is suitable for gravity separation waste discarding. 25% of zircons contain quartz, feldspar, and ilmenite inclusions with particle sizes less than 0.05 mm. This part of fine inclusions is easy to cause metal loss. The dissemination size of ilmenite is coarser than that of zircon, and it is synchronously enriched during gravity separation. After pre-screening out the +0.15 mm coarse material, the undersize material undergoes one-stage roughing under the conditions of a centrifugal force of 80$g$, a backwash water flow rate of 4 L/min, and a feeding amount of 80 g, yielding a pre-selected rough concentrate with a $ZrO_2$ grade of 0.483 6% and an operation recovery of 95.50%. The total zirconium recovery of the combined screening-centrifugation

* **收稿日期**:2026-03-23
**基金项目**:深地国家科技重大专项(2025ZD1009000,2025ZD1009004)
**作者简介**:李佩昱(1994—),男,陕西安康人,博士,工程师,主要从事战略稀有矿产资源高效分选研究。E-mail:lpy_7817285@163.com

process reaches 93.37%, and the total loss rate to the raw ore is only 6.63%. This process achieves the efficient discarding of massive light gangues and the pre-concentration of zircon minerals, demonstrates potential applicability for offshore in-situ pre-selection tailing discarding, and can provide technical support for the pre-selection tailing discarding of similar extremely low-grade zircon placers.

**Key words**: Coastal placer, Process mineralogy, Dissemination particle size, Zircon, Centrifugal waste discarding

## 0 引言

锆、铪是支撑核工业、航空航天、高端电子陶瓷、特种耐蚀合金产业的关键战略性稀有金属,锆石是工业提取锆、铪的主要原生矿物原料。全球锆资源高度集中于澳大利亚等海外国家,国内自给率偏低;我国东南沿海(如海南、广东、广西)广泛分布滨浅海沉积型锆铪砂矿,是本土锆资源的重要来源[1-4]。该类滨海砂矿普遍存在原矿锆品位极低、石英与长石类轻质脉石占比大、细粒含量高等资源特征,大量脉石会大幅增加后续磁、电精选处理负荷,亟须开发高效前端预选抛废工艺,实现有价矿物预先富集,提升资源利用经济性[5-7]。

目前处理滨海锆砂的主流预选设备为螺旋溜槽、摇床,依托锆石与脉石的显著密度差实现轻重矿物分离,工艺成熟、运行成本低廉,但这两类设备分选流场对水体波动极为敏感,且单机处理量有限、设备占地大,仅适用于陆地基底稳定的分选场景;若面向海上原位开采预选场景,船体受风浪影响产生持续晃动,船体晃动带来持续水流扰动,极易造成设备分选流场紊乱,破坏矿物密度分层,且螺旋溜槽、摇床等重选设备占地面积大、单机处理能力有限,难以满足船采过程同步预选抛废的需求[8-12]。近年来,立式离心选矿机逐步应用于细粒重矿物预处理,利用高倍离心力场强化轻重矿物,使其按密度分层,分选过程受外界晃动干扰小,具备紧凑、高效、适应性强的优点,在海上原位预选领域具备一定的应用潜力[13-17]。然而,目前针对 $ZrO_2$ 含量低于 0.2%的极低品位锆砂矿,鲜少系统开展工艺矿物学特征与离心预选适配性研究,锆石的粒度组成、嵌布关系等因素直接影响离心分选效果,难以为该类资源的利用提供可靠技术储备。

海南万宁海域锆砂矿 $ZrO_2$ 含量仅 0.1%左右,属于典型的极低品位海滨沉积型砂矿,锆石以细粒单体及包裹体形式产出。本研究以该砂矿为对象,采用 X 射线衍射(XRD)、矿物解离分析仪(MLA)、扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS)等手段,系统厘清矿物组成、锆石嵌布特征及影响抛废的矿物学因素;在此基础上,采用自制 LX-60 型立式旋流离心机开展预选抛废试验,以期为该类极低品位锆砂矿的利用提供矿物学依据与技术支撑。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

试验所用砂矿样品取自海南万宁乌场湾滨浅海,总计取样湿重 5 t 左右。采用空气压缩机气力抽吸工艺开展采样工作,取样层位为海床面以下 2~6 m,作业依托高压风压机提供气源,通过水下吸砂管路形成负压扰动,抽吸海底松散沉积物。施工过程严格洗孔和控制采样深度,采用网格多点取样法,每次采集至海床以下 2 m 处,确保样品具有代表性。样品自然晾干后经多次混匀,采用四分法缩分后进行取样化验分析,其化学多元素分析结果见表 1。由表 1 可知,砂矿中需要选矿富集回收的主要元素为锆,$ZrO_2$ 含量为 0.105 0%,伴生 $HfO_2$ 含量极低(0.002 0%),无单独综合回收价值,仅随锆石同步富集。脉石杂质以 $SiO_2$ 为主,占比高达 83.30%,$Al_2O_3$、CaO、$K_2O$ 和 TFe 合计占比 9.5%,为砂矿中主要有害杂质。$TiO_2$ 含量 0.62%,钛铁矿、金红石为主要钛载体,重选富集时会与锆石同步进入粗精矿,再通过后续磁选、电选等手段脱除;砂矿烧失量为 2.94%,主要来源于贝壳、方解石、云母、有机质等。

**表 1 原矿主要化学成分分析结果**

**Table 1 Analysis results of main chemical composition of raw ore** %

| $ZrO_2$ | $HfO_2$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | TFe | $Na_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.105 0 | 0.002 0 | 83.30 | 3.69 | 2.66 | 1.80 | 1.35 | 0.81 |
| $TiO_2$ | MgO | S | P | As | MnO | F | 烧失量 |
| 0.62 | 0.50 | 0.046 | 0.041 | <0.001 | 0.027 | 0.024 | 2.94 |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 工艺矿物学研究

将砂矿充分混匀、缩分,制成环氧树脂光片,采用光学显微镜、MLA、SEM-EDS 进行矿物组成、主要矿物嵌布特征研究。其中,使用布鲁克 D8 ADVANCE X 射线衍射仪完成矿物物相鉴定;采用徕卡 DM4P 偏光显微镜对矿物组成、包裹形式、产

出特征等进行观察,采用 FEI QEMSCANMLA 650 矿物参数自动分析系统明确砂矿矿物组成与含量、嵌布粒度分析,有效统计颗粒约 4 万粒,粒度识别下限 0.01 μm,所用解离度算法为解离表面积算法,颗粒与脉石接触面占比<5%判定为完全单体,接触面占比≥5%判定为连生包裹体;使用 JSM-7900F 型场发射扫描电子显微镜和 OXFORD X-MAX 50 能谱仪对砂矿进行微观结构与微区化学成分分析。

1.2.2 离心抛废试验

使用自行研发的 LX-60 型立式旋流离心机进行预选抛废研究,设备结构包含旋转富集锥、流态化反冲水系统、给料筒、溢流尾矿出口。该设备利用高速旋转产生的高倍离心力和流态化反冲水的综合效应,物料进入富集锥后,在高倍离心力场和反冲水力作用下按密度及粒度大小实现松散-分层,高密度锆石克服反冲水剪切力附着于锥壁形成重矿物精矿层,石英、长石轻质脉石随上升水流由溢流口排出。将砂矿按不同粒级进行离心抛废试验,研究离心力、给矿量、反冲洗水量等参数对预选抛废效果的影响。

## 2 工艺矿物学研究

### 2.1 矿物组成及含量

采用 XRD 分析了砂矿的矿物组成,结果如图 1 所示,原矿的主要组成矿物为石英,其次为钠长石、微斜长石、透闪石和云母等,锆石等有价矿物由于含量太低,无法在图谱中显示。

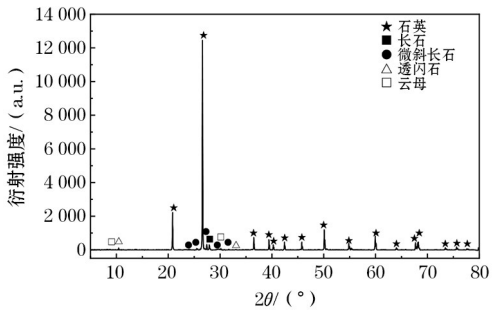



图 1 原矿的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of raw ore

采用 MLA 进一步分析了砂矿中的矿物组成及含量,砂矿的 MLA 矿物彩图见图 2,主要矿物组成及含量见表 2。由图 2 可知,砂矿主要组成矿物为石英,其次为长石和方解石,部分杂质矿物粒径较大,可通过预先筛分抛除;目的矿物锆石主要以单体形式产出,少量与石英、长石连生,粒度细小;其他金属矿物如钛铁矿、金红石等嵌布关系与锆石相比更为复杂,且粒度较小。由表 2 可知,矿石中主要有用矿物锆石含量仅为 0.14%,钛铁矿、金红石含量仅为 0.53%和 0.36%,可在重选阶段同步富集至精矿中。非金属矿物主要为石英、钾长石和钠长石,含量分别高达 69.06%、10.07%和 6.26%,是选矿需要脱除的主要杂质,其他杂质矿物包括钠钙长石、方解石、绿泥石、白云母、普通角闪石、黑云母、铁铝榴石、绿帘石等。

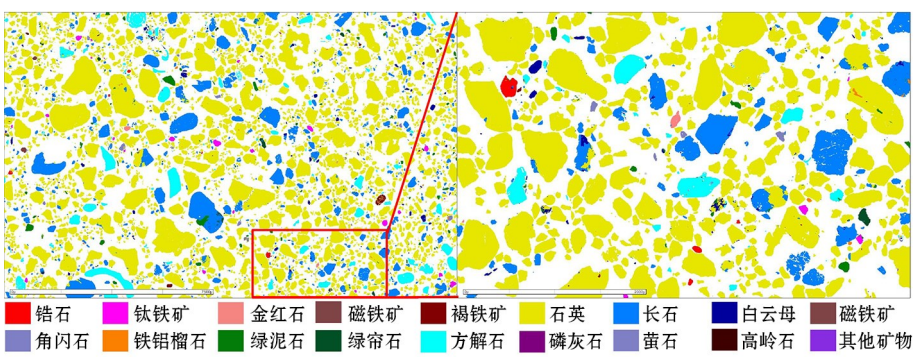



图 2 原矿的 MLA 矿物组成与赋存状态

Fig.2 MLA mineral composition and occurrence state of raw ore

表 2 原矿矿物组成及含量

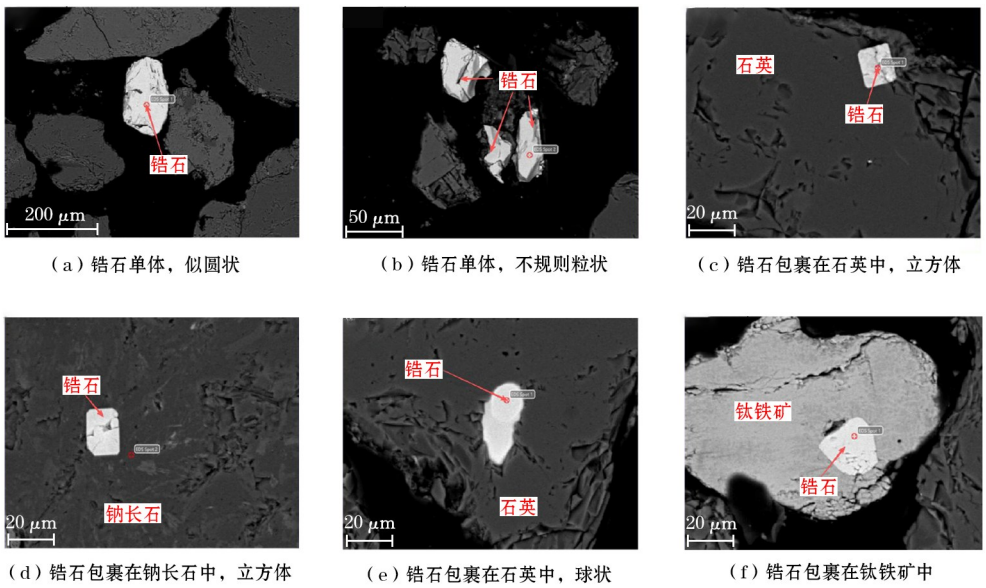
Table 2 Mineral composition and content of raw ore %

| 锆石 | 褐铁矿 | 钛铁矿 | 磁铁矿 | 榍石 | 独居石 | 金红石 | 石英 | 钾长石 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.14 | 0.55 | 0.53 | 0.20 | 0.04 | 0.01 | 0.36 | 69.06 | 10.07 |
| 钠长石 | 钠钙长石 | 方解石 | 绿泥石 | 白云母 | 普通角闪石 | 黑云母 | 铁铝榴石 | 绿帘石 |
| 6.26 | 1.21 | 3.75 | 2.74 | 1.56 | 0.64 | 0.41 | 0.62 | 0.28 |
| 铁闪石 | 透闪石 | 高岭石 | 白云石 | 萤石 | 磷灰石 | 红柱石 | 生物碎屑 | 其他矿物 |
| 0.09 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.89 | 0.46 |

## 2.2 主要矿物产出特征

### 2.2.1 锆石

锆石($Zr[SiO_4]$),四方晶系,双锥状、柱状、板柱状单形。砂矿中锆石的产出特征如图 3 所示,多呈自形粒状或不规则粒状。砂矿中的锆石以两种形式产出,一类为独立矿物(单体),分布率约为 75%,粒度一般处于 0.04～0.20 mm 之间,呈粒状或条状(见图 3(a)和图 3(b));另一类以连生体形式产出,分布率约为 25%,粒度一般<0.05 mm(见图 3(c)至图 3(f))。以连生体形式产出的锆石,一般包裹在石英、长石或钛铁矿中。整体上,砂矿中锆石粒度偏细小,多以独立矿物产出,少量细-微细粒锆石包裹在石英、长石等矿物中,重选抛废时易损失在尾矿中。




(a)锆石单体,似圆状 (b)锆石单体,不规则粒状 (c)锆石包裹在石英中,立方体

(d)锆石包裹在钠长石中,立方体 (e)锆石包裹在石英中,球状 (f)锆石包裹在钛铁矿中

**图 3 锆石的嵌布特征**

**Fig.3 Embedded characteristics of zircon**

为厘清砂矿中锆石的化学成分特点,采用 SEM 对其进行了能谱微区成分分析,结果见表 3。砂矿中锆石的化学成分以 $SiO_2$ 和 $ZrO_2$ 为主,平均值分别为31.82%、62.93%;还含有少量的 $HfO_2$、$Y_2O_3$,平均值分别为2.32%、2.51%;掺杂少量 $Al_2O_3$、CaO、$Fe_2O_3$、$TiO_2$ 等杂质成分,平均值分别为 0.07%、0.07%、0.21%、0.07%。

**表 3 锆石的能谱微区成分分析**

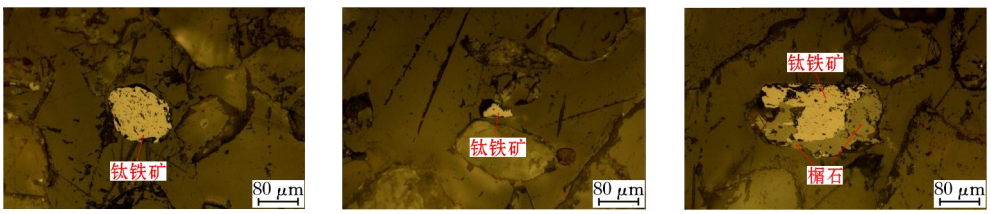
**Table 3 Energy spectrum micro-area composition analysis of zircon** %

| 序号 | $SiO_2$ | $ZrO_2$ | $HfO_2$ | $Y_2O_3$ | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 31.76 | 62.96 | 2.69 | 2.59 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 2 | 32.21 | 63.40 | 2.21 | 2.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 3 | 29.67 | 60.47 | 2.51 | 4.15 | 0.83 | 0.88 | 1.49 | 0.00 | 100.00 |
| 4 | 31.94 | 63.41 | 2.31 | 2.34 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 5 | 34.28 | 60.75 | 2.31 | 2.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 6 | 32.05 | 63.75 | 1.94 | 2.26 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 7 | 31.96 | 63.64 | 2.05 | 2.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 8 | 31.86 | 63.09 | 2.83 | 2.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 9 | 31.66 | 63.19 | 2.45 | 2.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 10 | 31.11 | 62.80 | 1.97 | 2.27 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.85 | 100.00 |
| 11 | 31.66 | 64.10 | 2.15 | 2.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 12 | 31.67 | 63.63 | 2.42 | 2.28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| 平均值 | 31.82 | 62.93 | 2.32 | 2.51 | 0.07 | 0.07 | 0.21 | 0.07 | 100.00 |

### 2.2.2 钛铁矿

钛铁矿($FeTiO_3$),三方晶系,菱面体晶类。砂矿中含少量钛铁矿,产出特征如图 4 所示,多为似圆状,少部分呈不规则粒状,粒度一般处于 0.07～0.30 mm 之间。砂矿中的钛铁矿以两种形式产出,一类为独立矿物(单体),分布率约为 80%,粒度一般处

于 0.07～0.30 mm 之间(见图 4(a)和图 4(b));另一类以连生体形式产出,分布率约为 20%,粒度一般偏细。以连生体形式产出的钛铁矿,一般与榍石、石英等连生(见图 4(c))。整体上,砂矿中钛铁矿粒度属细粒级嵌布范畴,多以独立矿物产出,少量细-微细粒钛铁矿与榍石、石英等连生。




(a)钛铁矿单体,似圆状 (b)钛铁矿单体,不规则粒状 (c)钛铁矿局部蚀变成榍石

**图 4 钛铁矿的嵌布特征**

**Fig.4 Embedded characteristics of ilmenite**

为厘清砂样中钛铁矿的化学成分特点,采用 SEM 对其进行了能谱微区成分分析,分析时选择的微区均不含微细粒或析出作用形成的金红石、榍石微粒,结果见表 4。钛铁矿的化学成分以 $TiO_2$ 和 FeO 为主,平均值分别为 52.31%、45.17%,$TiO_2$ 含量略低于理论值;常有 Mn 和 Si 混入其中,MnO、$SiO_2$ 平均值分别为 2.19%、0.26%;不均匀混入少量 Mg,MgO 平均值为 0.07%。

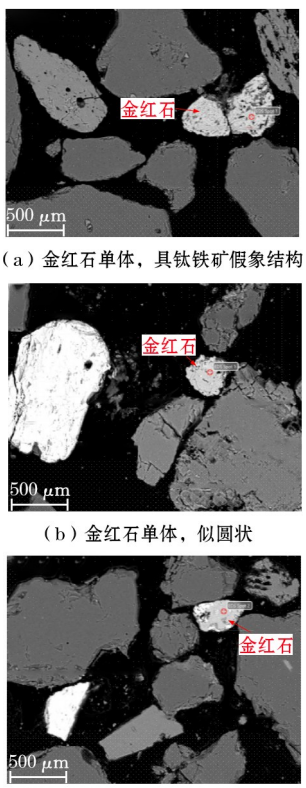
**表 4 钛铁矿的能谱微区成分分析**

**Table 4 Energy spectrum micro-area composition analysis of ilmenite** %

| 序号 | $SiO_2$ | $TiO_2$ | MnO | FeO | MgO | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.47 | 50.40 | 1.19 | 47.94 | 0.00 | 100.00 |
| 2 | 0.23 | 53.06 | 2.55 | 44.16 | 0.00 | 100.00 |
| 3 | 0.23 | 51.21 | 3.66 | 44.90 | 0.00 | 100.00 |
| 4 | 0.29 | 52.42 | 2.39 | 44.90 | 0.00 | 100.00 |
| 5 | 0.24 | 50.83 | 1.19 | 47.74 | 0.00 | 100.00 |
| 6 | 0.25 | 52.41 | 2.32 | 45.02 | 0.00 | 100.00 |
| 7 | 0.25 | 52.49 | 2.63 | 44.63 | 0.00 | 100.00 |
| 8 | 0.40 | 53.96 | 2.13 | 43.51 | 0.00 | 100.00 |
| 9 | 0.21 | 49.29 | 3.10 | 47.40 | 0.00 | 100.00 |
| 10 | 0.29 | 52.16 | 1.39 | 46.16 | 0.00 | 100.00 |
| 11 | 0.27 | 50.33 | 1.94 | 47.46 | 0.00 | 100.00 |
| 12 | 0.25 | 52.61 | 0.85 | 46.29 | 0.00 | 100.00 |
| 13 | 0.23 | 51.55 | 2.23 | 45.99 | 0.00 | 100.00 |
| 14 | 0.27 | 51.64 | 4.06 | 43.73 | 0.30 | 100.00 |
| 15 | 0.23 | 49.21 | 3.25 | 47.31 | 0.00 | 100.00 |
| 16 | 0.00 | 63.43 | 0.00 | 36.57 | 0.00 | 100.00 |
| 17 | 0.30 | 52.03 | 1.35 | 45.65 | 0.67 | 100.00 |
| 18 | 0.25 | 52.61 | 2.60 | 44.17 | 0.37 | 100.00 |
| 19 | 0.25 | 52.27 | 2.72 | 44.76 | 0.00 | 100.00 |
| 平均值 | 0.26 | 52.31 | 2.19 | 45.17 | 0.07 | 100.00 |

### 2.2.3 金红石

金红石($TiO_2$),砂矿中含有少量金红石,产出特征如图 5 所示,多为似圆状,少部分呈不规则粒状,粒度一般处于 0.05～0.23 mm 之间。金红石一般为钛铁矿氧化产物,大部分由钛铁矿彻底氧化而来,以单体形式存在,少部分处于未完全氧化状态,与钛铁矿连生。




(a)金红石单体,具钛铁矿假象结构

(b)金红石单体,似圆状

(c)金红石为钛铁矿氧化产物,局部可见钛铁矿残余

**图 5 金红石的嵌布特征**

**Fig.5 Embedded characteristics of rutile**

为厘清砂样中金红石的化学成分特点,采用 SEM 对其进行了能谱微区成分分析,结果见表 5。金红石的化学成分以 $TiO_2$ 为主,平均值为 96.41%,略低于理论值;少量 Fe、Al、Si 和 Cl 混入其中,FeO、$Al_2O_3$、$SiO_2$、Cl 的平均值分别为 2.74%、0.10%、

0.65%、0.10%。

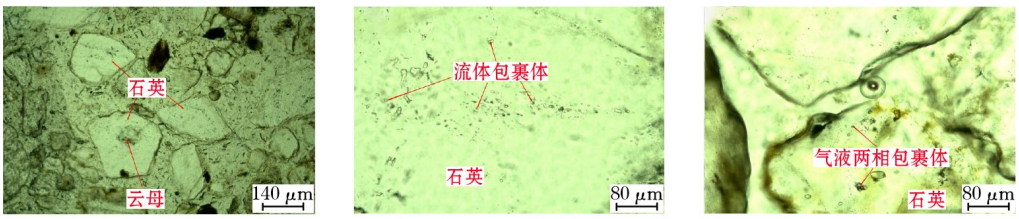
表 5 金红石的能谱微区成分分析

Table 5 Energy spectrum micro-area composition analysis of rutile %

| 序号 | $TiO_2$ | FeO | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | Cl | 合计 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 97.55 | 1.22 | 0.40 | 0.83 | 0.00 | 100.00 |
| 2 | 94.64 | 4.51 | 0.00 | 0.62 | 0.23 | 100.00 |
| 3 | 96.44 | 2.41 | 0.15 | 0.79 | 0.21 | 100.00 |
| 4 | 96.58 | 2.53 | 0.00 | 0.89 | 0.00 | 100.00 |
| 5 | 97.59 | 1.78 | 0.00 | 0.45 | 0.18 | 100.00 |
| 6 | 96.77 | 2.37 | 0.00 | 0.86 | 0.00 | 100.00 |
| 7 | 95.72 | 3.63 | 0.24 | 0.41 | 0.00 | 100.00 |
| 8 | 96.02 | 3.51 | 0.00 | 0.32 | 0.15 | 100.00 |
| 平均值 | 96.41 | 2.74 | 0.10 | 0.65 | 0.10 | 100.00 |

#### 2.2.4 石英

石英($SiO_2$),砂矿中石英的产出特征如图 6 所示,多呈似圆状或似椭圆状或不规则粒状,粒径一般介于 0.05～1.37 mm 之间。砂矿中的石英以两种形式产出,一类为独立矿物(单体),分布率约为 78%;另一类以连生体形式产出,分布率约为 22%,以连生体形式产出的石英表面附着云母、黏土矿物或其他杂质,与石英、长石、绿泥石、云母等构成岩屑(见图 6(a)),少部分石英颗粒以硅质胶结物次生边加大的形式生长。由图 6(b)和图 6(c)可知,石英晶体中含纯液相包裹体和气-液两相流体包裹体。石英中的气液包裹体呈不规则分布,在不同石英颗粒中分布密度不同,粒径为 1～16 μm。



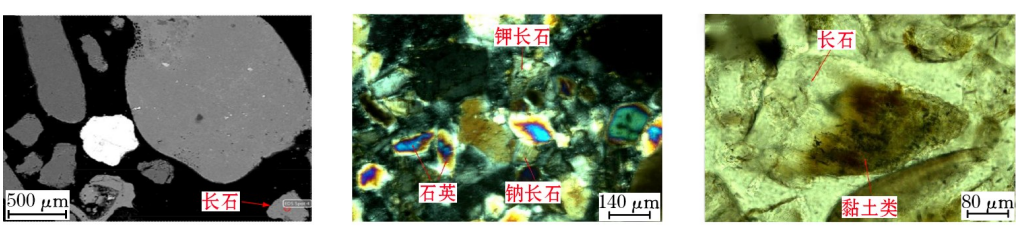

(a) 石英单体,石英与云母连生 (b) 石英中可见纯液相包裹体和气液两相包裹体 (c) 石英中可见气液两相包裹体

图 6 石英的嵌布特征

Fig.6 Embedded characteristics of quartz

#### 2.2.5 长石

长石($Na[AlSi_3O_8]$～$K[AlSi_3O_8]$),经镜下鉴定、MLA 检测分析可知,砂矿中长石含量约为17.54%,以钾长石(10.07%)为主,钠长石(6.26%)次之,少量钠钙长石等。长石产出特征如图 7 所示,多呈短柱状、板片状,部分双晶显著,粒度以 0.04～1.25 mm 为主(见图 7(a))。单体为主,富连生体次之,部分长石发生弱云母化和黏土矿化,长石颗粒边缘和解理裂隙中常有细小云母嵌布,长石表面可见弱黏土矿化,小部分长石与石英等矿物构成岩屑(见图 7(b)和图 7(c))。




(a) 长石单体 (b) 长石与石英构成岩屑 (c) 长石发生弱黏土矿化

图 7 长石的嵌布特征

Fig.7 Embedded characteristics of feldspar

### 2.3 有用矿物嵌布粒度

砂矿中主要矿物的粒度组成及其分布特点对制定合理的选矿工艺流程有着直接的影响。为此,利用光学显微镜和 MLA 对采集、晾干的自然砂矿样中锆石和有价组分钛铁矿的嵌布粒度进行了分析,统计结果如图 8 所示。可以看出,粒级为+0.074 mm 时,锆石和钛铁矿的嵌布粒度累积占比分别为 63.80%、91.17%;粒级为+0.037 mm 时,锆石和钛铁矿的嵌布粒度累积占比分别为 92.64%、98.59%,可见钛铁矿整体嵌布粒度粗于锆石,在一般重选预富作业中,钛铁矿与锆石将同步富集。

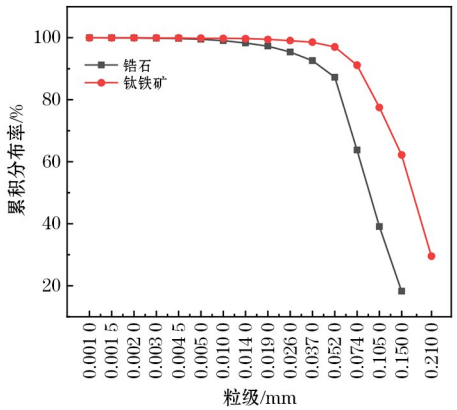



**图 8 有用矿物的嵌布粒度特性**

**Fig.8 Dissemination particle size characteristics of valuable minerals**

## 3 离心预选抛废试验研究

原矿中目标矿物占比极低,石英、长石轻质脉石占矿物总量的 86.60%,大量脉石需提前抛除以降低后续分选负荷。砂矿开采工具通常为采砂船,如果能在船采过程中同步实现杂质抛除,则能大幅提高采矿效率。螺旋溜槽、摇床等重选设备受船体晃动引发的水流扰动干扰严重,分选稳定性差,同时设备占地面积大、单台处理能力有限,难以满足海上原位高效预选抛废需求。针对上述船采分选痛点,本研究采用自制的微细粒旋流离心机开展研究,依托高倍离心力场强化轻重矿物分选,可大幅削弱船体扰动对分选流场的负面影响,占地小、单机处理量大,具备海上原位预选抛废的潜在适用性。旋流离心机工作原理及预选抛废试验流程如图 9 所示,单因素梯度试验为单次试验。

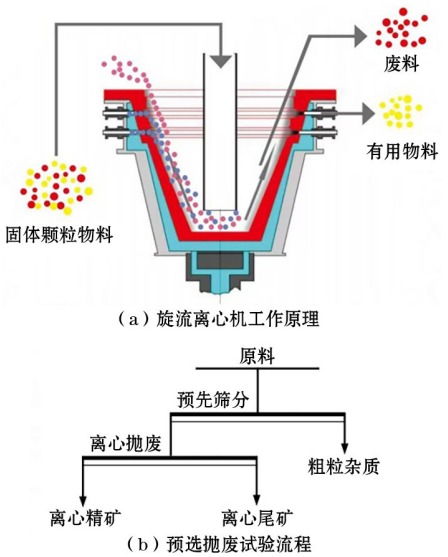



**图 9 旋流离心机工作原理及预选抛废试验流程**

**Fig.9 Working principle of cyclone centrifuge and test process of pre-concentration and waste discarding**

### 3.1 砂矿粒度特性

砂矿粒度分布及 $ZrO_2$ 在不同粒级中的分布率如图 10 所示。由图 10 可知,锆铪砂矿样品粗细分布不均。其中,−0.5～+0.25 mm、−0.25～+0.15 mm 粒级含量分别为 14.25%、17.95%,−0.15～+0.074 mm 粒级含量达到 50.35%,是锆铪砂矿粒度分布最集中的粒级。锆元素在+0.15 mm 中的含量低至 0.014%,具备预先筛分的可行性。随着粒度降低,锆元素含量逐渐增加,其中−0.15～+0.074 mm、−0.074～+0.038 mm 粒级中 $ZrO_2$ 含量分别为 0.085%和 0.78%,是砂矿中锆元素分布最集中的粒级。

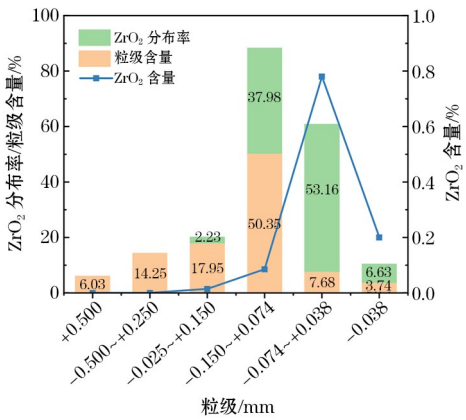



**图 10 砂矿粒度分布及 $ZrO_2$ 在不同粒级中的分布率**

**Fig.10 Particle size distribution of placer and distribution rate of $ZrO_2$ in different particle size**

### 3.2 粒级对离心抛废效果的影响

对原矿及筛分后的砂矿进行离心抛废试验,固定选别条件为:离心力 90$g$,反冲洗水量 4 L/min,给矿量 100 g,选别流程为一次粗选,试验结果如图 11 所示。

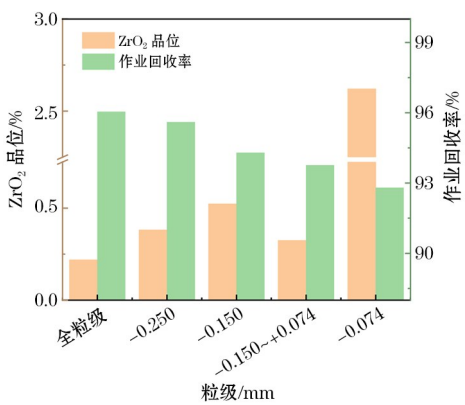



**图 11 粒级对离心抛废效果的影响**

**Fig.11 Influence of particle size on centrifugal waste discarding**

由图 11 可知,未筛分时经离心预选可得 $ZrO_2$ 品位 0.218 8%、作业回收率 96.04%的预选粗精矿;筛分后将−0.25 mm 物料进行离心预选,精矿 $ZrO_2$ 品位提高到 0.380 9%,作业回收率降低至 95.60%;将−0.15 mm 物料进行离心预选,精矿 $ZrO_2$ 品位进一步提高到 0.522 8%,作业回收率略微降低至 94.29%。−0.074 mm 细粒级精矿品位大幅提高至 2.620 6%,但作业流程加长,选别回收率进一步降低,难以满足海上原位抛废要求。由筛分结果可知,锆矿物主要分布在−0.15 mm 粒级,经筛分除去粗粒杂质后,有效避免了大粒物料占用筒壁重矿物富集空间,大幅提高了锆矿物的离心富集效果。因此在后续试验中,对砂矿进行预先筛分,−0.15 mm 物料给入离心机选别。

### 3.3 给矿量对离心抛废效果的影响

通过控制给矿量可以调整精矿产率,在离心力 90$g$、反冲洗水量 4 L/min 条件下,研究了给矿量对−0.15 mm 砂矿抛废效果的影响,结果如图 12 所示。

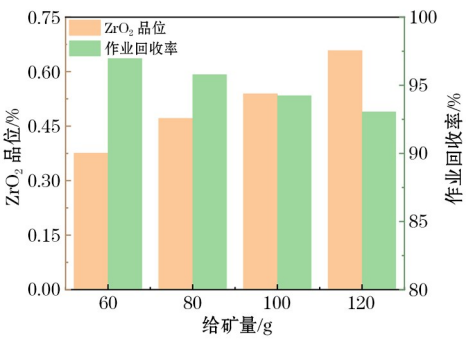



**图 12 给矿量对离心抛废效果的影响**

**Fig.12 Influence of feed mass on centrifugal waste discarding**

由图 12 可知,给矿量较低时,作业回收率最高,这是由于筒内精矿富集层结构松散,大量低密度石英、长石脉石夹杂进入精矿,锆矿物富集提质效果较差。随着给矿量的增加,粗精矿 $ZrO_2$ 品位提高,作业回收率明显降低。当给矿量由 60 g 提高到 80 g,粗精矿 $ZrO_2$ 品位由 0.375 5%大幅提高到 0.471 4%,作业回收率由 96.98%略微降低至 95.78%。进一步提高给矿量至 120 g,$ZrO_2$ 品位提高至 0.657 8%,但作业回收率进一步降低至 93.05%。考虑到抛废阶段要尽可能在精矿提质条件下确保回收率,因此确定适宜的给矿量为 80 g。

### 3.4 离心力对离心抛废效果的影响

离心力大小直接决定锆石与脉石颗粒在富集锥内壁的沉降富集行为,在给矿量 80 g、反冲洗水量 4 L/min 的试验条件下,研究了离心力对−0.15 mm 砂矿抛废效果的影响,结果如图 13 所示。

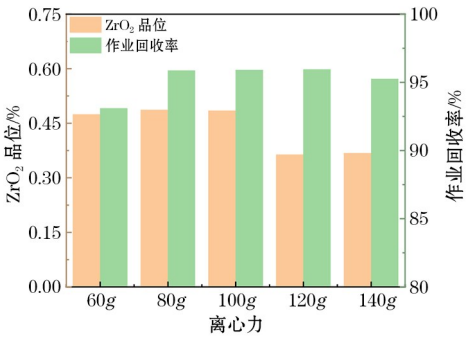



**图 13 离心力对离心抛废效果的影响**

**Fig.13 Influence of centrifugal force on centrifugal waste discarding**

由图 13 可知,当离心力由 60$g$ 升高至 80$g$,精矿 $ZrO_2$ 品位由 0.474 1%提升至 0.486 3%,锆作业回收率由 93.09%上升至 95.86%。进一步增加离心力,作业回收率提升幅度不明显,且筒体内过高的离心力(140$g$)会将石英、长石等低密度脉石颗粒强制裹挟进入筒壁富集层,精矿 $ZrO_2$ 品位大幅降低至 0.36%左右,同时更高的离心力会造成设备磨损加剧,提高生产成本。在离心力为 80$g$ 时,可充分放大锆石与脉石的受力差异,实现高效密度分层,兼顾了精矿富集品位与锆金属回收率。综合各项分选指标,确定本试验下适宜离心力为 80$g$。

### 3.5 反冲洗水量对离心抛废效果的影响

反冲洗水可以冲刷富集锥精矿层中被机械包裹、夹杂的石英、长石轻质脉石,重矿物受高强度离心力固结附着在富集锥内壁成为精矿产品。在给矿量 80 g、离心力 80$g$ 条件下,研究了反冲洗水量对−0.15 mm 砂矿抛废效果的影响,结果如图 14 所示。

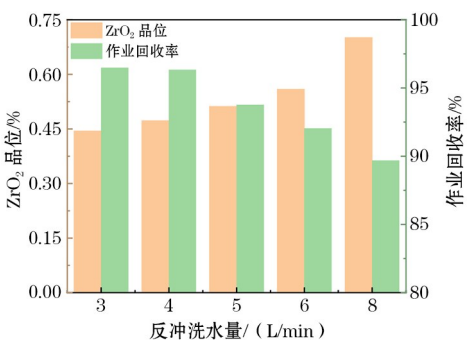



**图 14 反冲洗水量对离心抛废效果的影响**

**Fig.14 Influence of backwash water volume on centrifugal waste discarding**

由图 14 可知,随着反冲洗水量增加,精矿 $ZrO_2$ 品位持续上升,锆作业回收率整体呈下降趋势。反冲洗水量为 3 L/min 时,水流冲刷强度不足,富集锥内部裹挟的大量轻质脉石难以被有效脱除,$ZrO_2$ 品位仅 0.394 4%,离心预选抛废效果较差;冲洗水量提升至 4 L/min 时,混杂在重矿物层中的脉石杂质被剥离,精矿 $ZrO_2$ 品位提升至 0.483 6%,$ZrO_2$ 作业回收率稳定在 95.50%,锆金属损失量处于较低水平;当反冲洗水量提高到 8 L/min 时,部分目标矿物随冲洗水流一并进入尾矿,锆作业回收率降至 89.89%。综合锆金属回收指标,确定适宜反冲洗水量为 4 L/min。

结合最佳抛废粒级与抛废参数,筛分-离心全流程选别指标见表 6。由表 6 可知,筛分作业抛除产率 38.23%的粗粒杂质,$ZrO_2$ 品位仅 0.006 1%,筛分阶段锆损失率为 2.23%。筛下物料给入离心预选,离心尾矿 $ZrO_2$ 品位仅 0.011 1%,离心阶段锆损失率为 4.40%,全流程锆总损失率为 6.63%。预选精矿产率为 20.27%,精矿 $ZrO_2$ 品位达 0.483 6%,全流程 $ZrO_2$ 总回收率为 93.37%。当前完成了室内条件试验,验证了砂矿离心抛废的可行性,后续将开展连续运行和扰动条件验证试验。

**表 6 全流程试验结果**

**Table 6 Full-process test results** %

| 产品名称 | 产率 | $ZrO_2$ 品位 | $ZrO_2$ 回收率 |
|---|---|---|---|
| +0.15 mm 粗粒杂质 | 38.23 | 0.006 1 | 2.23 |
| −0.15 mm 离心精矿 | 20.27 | 0.483 6 | 93.37 |
| −0.15 mm 离心尾矿 | 41.50 | 0.011 1 | 4.40 |
| 给矿 | 100.00 | 0.105 0 | 100.00 |

## 4 结论

(1) 试验所用矿样属于极低品位滨浅海沉积型锆砂矿,原矿 $ZrO_2$ 含量仅为 0.105 0%,$HfO_2$ 以类质同象形式赋存于锆石中,含量为 0.002 0%,不具备单独回收价值,$SiO_2$ 占比高达 83.30%。矿物组分分析结果显示,主要脉石矿物为石英、长石,总占比达 86.60%,有价矿物锆石仅占矿物总量的 0.14%,钛铁矿、金红石为伴生重矿物,合计占比 0.89%。

(2) 目的矿物嵌布特征差异明显,锆石以中细粒单体为主,75%的锆石为粒径 0.04～0.20 mm 的单体,与石英、长石等轻质脉石密度差异悬殊,重选分离条件有利;25%的微细锆石粒径小于 0.05 mm,多被石英、长石、钛铁矿包裹,是分选过程锆金属损失的主要原因。钛铁矿整体嵌布粒度粗于锆石,重选时会与锆石同步富集。

(3) 基于工艺矿物学特性与船采扰动难题,采用自制 LX-60 立式旋流离心机开展预选抛废试验,确定较优分选条件为预先筛除+0.15 mm 粗粒杂质,筛下物料在离心力 80$g$、反冲洗水量 4 L/min、给矿量 80 g 条件下经一次粗选,精矿 $ZrO_2$ 品位由原矿的 0.105 0%提高至 0.483 6%,全流程 $ZrO_2$ 总回收率达 93.37%。该工艺可高效抛除大量轻质脉石,兼顾锆精矿品位与金属回收率,具备海上原位预选抛废的潜在适用性,后续需开展连续试验及扰动试验验证运行稳定性,为滨海锆铪砂矿船采预选抛废提供了矿物学依据与技术支撑。

**参考文献(References):**


[1] 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.
Zhang Jianwen, Wang Haidong, Gong Wenyong, et al. Analysis on development and utilization situation of zirconium resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2019,39(5):106-110.

[2] 尹传凯,王春连,游超,等.中国锆矿资源特征、矿床类型、关键应用及找矿远景[J].中国地质,2024,51(6):1930-1945.
Yin Chuankai, Wang Chunlian, You Chao, et al. Zircon resource characteristics, deposit types, key applications and prospecting prospects in China[J]. Geology in China,2024,51(6):1930-1945.

[3] 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.
Zhang Yiwei. Experimental study on high efficiency recovery of zirconium and titanium from a coastal placer abroad[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2023(2):110-115+160.

[4] 樊敬亮,丁存根,沈华光,等.滨海砂矿重砂样品淘洗次数探讨[J].矿产勘查,2011,2(4):428-433.
Fan Jingliang, Ding Cungen, Shen Huaguang, et al. The washing times of the coastal placer deposit samples[J]. Mineral Exploration,2011,2(4):428-433.

[5] 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.
Shao Weihua, Lyu Liang, Chang Xueyong, et al. Experiment on the comprehensive recovery of zirconium and titanium from seaside quartz sand tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2025,46(5):126-134.

[6] 梁焘茂,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.
Liang Taomao, Yang Zhaojun, Zhong Senlin, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a beach placer ore abroad[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2022,43(3):91-97.

[7] 彭程,来志庆,周慧文,等.莫桑比克楠普拉省滨海型锆钛矿的选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2024(1):77-88.
Peng Cheng, Lai Zhiqing, Zhou Huiwen, et al. Experimental study on beneficiation of coastal zirconium titanium ore from Nampula Province, Mozambique[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(1):77-88.

[8] 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.
Ma Chongzhen, Zhang Hua, Liang Han. Current situation of spiral chutes and its application in beach placer[J]. Hunan Nonferrous Metals,2020,36(1):18-22.

[9] 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.
Peng Shaowei, Wang Qian, Wang Zhaolian, et al. Experimental study on beneficiation of a coastal placer in Egypt[J]. Ceramics,2023(2):32-37.

[10] 廖乾,张胜广,张建文,等.某含铬海滨砂矿选矿试验研究[J].矿冶工程,2025,45(1):57-60.
Liao Qian, Zhang Shengguang, Zhang Jianwen, et al. Experimental research on beneficiation technology of chrome-bearing beach placer[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2025,45(1):57-60.

[11] 周迎春,彭程,黄蓉,等.海南文昌某石英砂矿提纯实验研究[J].矿产保护与利用,2023,43(4):73-80.
Zhou Yinchun, Peng Cheng, Huang Rong, et al. Experimental study on purification of a quartz placer in Wenchang of Hainan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2023,43(4):73-80.

[12] 曹永丹,刘云龙,邓忠诚,等.低品位锆英石矿除杂提质试验研究[J].内蒙古科技大学学报,2022,41(1):22-26.
Cao Yongdan, Liu Yunlong, Deng Zhongcheng, et al. Experimental study on impurity removal and quality improvement for a low grade zirconite ore[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology,2022,41(1):22-26.

[13] 刘培坤,王辉,张悦刊,等.抛物线型旋流器分离赤泥性能试验研究[J].轻金属,2019(7):17-24.
Liu Peikun, Wang Hui, Zhang Yuekan, et al. Experimental study on separation performance of red mud by parabolic cyclone[J]. Light Metals,2019(7):17-24

[14] 彭帝,杨明悦,柳忠彬,等.叠式台阶流对铜矿分选特征的影响研究[J].矿业研究与开发,2025,45(3):261-270.
Peng Di, Yang Mingyue, Liu Zhongbin, et al. Influence of stacked step flow on the separation characteristics of copper mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(3):261-270.

[15] 和建荣,王进明,俞霞,等.基于 EDEM-FLUENT 耦合的离心选矿机仿真优化分析[J].矿产综合利用,2021(2):174-179+140.
He Jianrong, Wang Jinming, Yu Xia, et al. Simulation and optimization analysis of centrifugal concentrator based on EDEM-FLUENT coupling[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(2):174-179+140.

[16] 宗路,蔡改贫,刘志刚,等.离心选矿机操作参数对选矿效果的影响[J].中国粉体技术,2018,24(2):65-72.
Zong Lu, Cai Gaipin, Liu Zhigang, et al. Analysis of influence of operation parameters of centrifugal concentrator on dressing effect[J]. China Powder Science and Technology,2018,24(2):65-72.

[17] 刘潇倩,陈禄政,彭征,等.SL 离心机技术及应用进展[J].中国钨业,2023,38(4):33-40+70.
Liu Xiaoqian, Chen Luzheng, Peng Zheng, et al. The industrialization progress of SL centrifugal separation technology[J]. China Tungsten Industry,2023,38(4):33-40+70.