

物理场矿物分选富集技术概要

发明专利 (ZL 2021 1 0446299.3)

中国工业固废管理股份有限公司 · 固废产业研究院

目录

- 一、核心技术基本信息
- 二、专利发明背景
- 三、技术方案概述
- 四、技术先进性分析
- 五、市场优势分析

执行摘要 *Executive Summary*

以贫瘦铀矿资源利用为例的边界下探

0.05%→0.0034% 工业品位边界扩展约一个数量级

铀矿最高富集比

约 3320 倍 精矿铀品位最高 11.29%

综合回收率

≥75% 铀及铈钽锆稀土同步回收

生产成本（相对浮选流程）

约 1/5 纯物理选矿、无浮选药剂

中国铀对外依存度

75%—90% 铀价高位、供需缺口扩大

本报告针对物理场物质分离核心技术先进性与市场优势进行分析。该技术体系采用"聚磁永磁超强磁—射频介电分选—磁重一体"纯物理选矿路线，将稀有、稀贵、稀散等矿物资源可利用边界大幅下探，以铀为例从现行工业品位 0.05%下探至 **0.0034%**，实现铀约 **3320 倍** 富集及铀、钽、钼、钨、稀土同步回收。在中国铀对外依存度高企、核电快速扩张、铀价持续上行的市场格局下，本技术在盘活低品位含铀资源、尾矿固废协同利用等方向具备突出的应用价值，与公司固废资源化综合利用主业存在直接协同。报告同时提示了概念表述、经济数据核算、行业准入与工程化验证四方面风险。

一、技术体系基本信息

项目	内容
技术体系名称	物理场物质分离富集技术体系
核心技术专利号	ZL 2021 1 0446299.3
授权公告号	CN 113042198 B
专利类型	发明专利
证书号	第 5331952 号

二、技术体系研究背景

该技术体系由王裕先提出并担任攻关课题学术带头人，王先生 1965 年毕业于吉林大学物理系固体理论专门化，毕业后分配至中国地质科学院，曾任中国地质科学院矿物材料研究中心主任、矿床地质研究所及矿产资源研究所研究员、矿物学研究室主任，并担任中国地质学会矿物学委员会副主任。1985—1986 年作为德国洪堡访问学者赴德国马尔堡（Marburg）大学矿物学研究所从事矿物物理、超低温穆斯堡尔效应研究。现任 CIWM 独立董事、华筑绿建首席顾问。

其主要技术积累包括：

1. 五十余年来致力于固体物理学与矿物学、矿物材料选矿技术工程的结合，创建了"矿产资源材料的物理场加工工程技术体系"——按矿物的磁、电、密度差异分选，不使用浮选药剂、重介质和化学药剂，具有绿色、环保、节能、低成本的特点。所用仪器、设备先后获全国科学大会奖、国家三等发明奖、国家发明专利、地矿部科技成果二等奖。
2. "聚磁永磁强磁选矿技术"经国家攻关项目评审，达到国际先进水平，并已在金属矿、非金属矿选矿提纯领域推广。
3. 创建了煤炭选煤提质的物理场选煤技术路线（与褐煤聚磁永磁强磁提质、炭的脱灰脱硫等技术同源）。
4. 提出了贫铀资源提取低浓缩铀的方法，即本技术体系。

分析要点：本专利并非孤立成果，而是专业技术团队数十年“物理场选矿”技术体系在铈资源领域的延用，技术成熟度有长期积累支撑，这是其先进性与可实施性的重要背景。

三、技术体系方案概述

梳理本技术路线、关键技术指标与适用范围。

（一）技术路线

采用“聚磁永磁超强磁—射频介电分选—磁重一体”的纯物理选矿流程，替代传统矿物加工“焙烧—浮选—酸法”为主的技术路线。核心流程为：

1. 原矿经破碎筛分、磨矿分级（40—120 目、120—200 目、200—300 目及 300 目以上）后，在弱磁条件（0.3—0.6T）下磁选，分出磁性铁矿等强磁性矿物；
2. 磁尾在中磁条件（0.8—1.2T）下再选；
3. 磁尾经重选按密度（以 3.5g/cm³为界）分离轻重矿物；
4. 重矿物依次经强磁（1.6—1.8T）、超强磁（2.2T）、永磁超强磁（2.6T）多级磁选，逐级富集含铈矿物（烧绿石、锆石、独居石、磷钇矿、钽石等）并抛尾；
5. 结合射频介电分选，配合矿物定量 XRD 分析、电子探针与化学元素全分析，追踪铈的富集规律，实现矿物及共生矿物的同步回收。

（二）关键技术指标

以碱性花岗岩型铈-钽-锆矿床（原矿含铈仅 0.0034%）为例：

元素 / 矿物	原矿品位	精矿品位	富集比
铈	0.0034%	11.29%（3%—10% 以上低浓缩铈）	约 3320 倍
铌（Nb ₂ O ₅ 计）	0.0437%	64.51%	约 1480 倍
钽（Ta ₂ O ₅ 计）	0.031%	4.16%	约 134 倍
锆	0.197%	65.15%	约 330 倍
稀土（Ce ₂ O ₃ 计）	0.091%	7.10%	约 78 倍

综合回收率达到 **75%以上**。以新疆某地特大型稀有、稀土矿床为对象完成提铈及综合利用选矿实验，该区矿石量 7.72 亿吨，伴生 Nb₂O₃ 32.23 万吨、Ta₂O₅ 2.2 万吨、锆氧化物 141 万吨，铈储量估算达 **10 万吨以上**，原本贫瘠矿变成了特大型铈矿规模。

（三）适用范围

- 将可开发利用的有价矿物例如铀资源边界从现行工业品位 0.05%（《铀矿地质勘查规范 DZ/T 0199-2002》最低工业品位）大幅下探至 0.0034%（废石、尾矿级）；
- 矿床类型覆盖硬岩（花岗岩、火山岩）、砂岩、泥岩及褐煤等；
- 特别适用于伴生多稀有元素矿床（稀有、稀土、稀贵、有色、非金属矿床）中低含量资源的综合回收利用，并可与冶金环节衔接，实现资源全方位综合回收。

四、技术先进性分析

（一）突破了沿用数十年的三稀矿物工业品位边界

我国铀资源开发利用的行业标准为含铀 0.05%以上方属可采资源（DZ/T 0199-2002），低于该标准的资源长期被排除在可采铀资源之外。本技术体系将可利用边界下探至 **0.0034%**，资源边界扩展约一个数量级以上。这意味着大量既往被定义为“非铀资源”的低品位含铀矿物、废石和尾矿，理论上均可重新纳入资源范畴，对我国“扩大铀资源储量与产能”具有战略性意义。这是本技术最具颠覆性的创新点。

（二）纯物理选矿路线，节能、环保、低成本优势显著

与常规“焙烧—浮选—酸法”路线相比，本技术的先进性体现在：

- 节能：永磁磁系不耗电，仅分选驱动耗能，能耗显著低于焙烧与浮选工艺；
- 环保：不使用浮选药剂、重介质和化学药剂，从源头避免低微毒药剂排放与酸性废水问题，契合当前趋严的放射性污染防治与矿山环保监管要求；
- 低成本：生产成本仅为以浮选为主选矿流程的 **1/5 左右**；大幅度富集抛尾后，后续冶炼的处理量与试剂消耗同步大幅下降；
- 适配低品位资源的经济性：传统化学法处理 0.05%以下资源在经济上不可行，物理选矿的低成本特性恰是低品位资源得以盘活的前提。

（三）上千倍富集与“一矿多收”的综合利用模式

本技术体系实现了铀最高约 3320 倍的富集比，并同步回收铈、钽、锆、稀土及有色、非金属矿物，回收率 75%以上。铀常赋存于烧绿石、锆石、独居石等稀有稀土矿物中，“铀—稀有—稀土”协同回收的路线，把单一提铀变为多金属综合开发，显著摊薄单位铀产品成本，这是单纯浸出提铀技术（地浸、堆浸、微波强化浸出等）不具备的优势——后者只能回收铀单一元素，且多适用于砂岩型铀矿。

（四）与国内外同类技术的比较定位

技术路线	适用对象	主要局限	本专利相对优势
------	------	------	---------

常规采冶（地浸 / 堆浸 + 水冶）	达到 0.05% 工业品位的铀矿床	对超低品位含铀资源无效；仅回收铀单一元素	品位边界下探约一个数量级；共伴生资源同步回收
强化浸出类（如微波活化焙烧强化浸出）	低品位铀矿石	仍以化学浸出为核心，能耗高、流程复杂、试剂消耗大	纯物理选矿，无药剂、低能耗、成本约为其 1/5 量级
海水提铀	海水（铀浓度约 3.3 毫克 / 吨）	目前仅实现公斤级提取，距产业化遥远	已有矿床级选矿实验数据，工程化路径清晰
本技术体系物理场选矿	0.0034%—0.05% 贫铀及共伴生资源	工业化连续生产数据已经中试验证	超千倍富集、一矿多收、绿色环保

（五）需要澄清与注意的技术事项

"低浓缩铀"概念辨析：本文所称"低浓缩铀（3%—10%）"是指铀元素在选矿产物中的**质量浓度（品位）**，即高品位铀精矿；它与核燃料循环中按铀-235 同位素丰度定义的"低浓缩铀（LEU，铀-235 丰度 2%—20%）"不是同一概念。本技术体系属于**选矿富集技术**，不涉及同位素分离。在准确表述为"铀的富集/高品位铀精矿制备"，避免概念误用引发歧义。

经济数据需谨慎引用：各种原矿和固废提取的有价矿物按"每吨/元"估算各种固废的潜在价值，引用时应以同期市场实际价格核算。

工程化验证程度：所有数据源自选矿中试，工业化连续生产的稳定性、处理规模放大后的指标保持情况，目前在拟建的四个示范工程进行验证。

五、市场优势分析

（一）市场背景：铀资源供需缺口持续扩大，对外依存度高企

- 需求端高速增长：**三稀矿产为稀土、稀有金属、稀散元素矿物的统称，属于国家战略性关键矿产，是新能源、半导体、高端装备、国防军工等产业不可或缺的基础原料。全球资源分布不均衡，我国三稀资源禀赋较好，是主要的资源供给与深加工国，但稀散元素多为伴生产出，独立矿床少，开采与提纯难度较高。
- 供给端严重失衡：**全球能源转型与科技升级持续拉动需求，风电永磁电机、新能源汽车、光伏、显示面板、芯片等领域对三稀金属消费稳步增长，各国纷纷出台关键矿产政策，推进供应链自主保障，国际资源博弈加剧。国内实施总量调控、开采配额、绿色开发等监管政策，严控无序开采，推动资源综合利用与再生回收产业发展，行业由粗放开采转向高品质、高附加值材料方向升级。

- **政策导向明确：**市场方面，三稀产品价格随供需、地缘政策波动明显。中重稀土、镓、锗等高价品种稀缺性更强。当前行业痛点在于低品位资源利用成本高，高端高纯材料仍存在短板。长期看，新能源与电子信息产业的增量需求，将持续支撑三稀矿物的战略价值，资源高效选冶与循环利用成为行业发展重点。

（二）本技术体系的市场价值点

1. **盘活巨量尾款、冶炼渣、贫瘦矿等边际资源，直接对冲进口依赖：**我国低品位矿产资源、含三稀矿物的共生矿床及历史堆存的尾矿体量巨大。比如铀矿工业品位边界从 0.05% 下探至 0.0034% 后，这部分“呆矿”可转化为有效供给。以本技术体系实施例涉及的新疆某矿床为例，单矿估算铀储量即达 10 万吨以上，相当于全国已探明储量的近三分之一，战略价值突出。
2. **成本优势构筑竞争壁垒：**生产成本约为浮选流程的 1/5，且无药剂、低能耗，在低品位资源开发场景下几乎无同类竞争技术；在多种精矿价高位运行的市场环境下，即使边际品位资源也具备可观盈利空间。
3. **“一矿多收”提升项目经济性：**铌、钽、锆、稀土均为战略性紧缺矿产且价格高企，同步回收使项目收入结构多元化，抗价格周期波动能力强，对矿山业主与合作方吸引力显著。
4. **绿色工艺契合监管与 ESG 趋势：**无化学药剂、低排放的物理选矿路线，在《放射性污染防治法》修订后趋严的环保标准下，环评通过难度与环保投入均低于化学法路线，属于典型的绿色矿山技术。
5. **与固废资源化产业高度协同：**含有价元素尾矿、共生资源等均属“工业固废协同资源化”范畴。本技术体系可为固废资源化综合利用项目提供“固废处置+战略金属回收”的双重收益模式，商业模式复制空间大。

2026 年 9 月 18 日