

固废资源化·绿色矿山技术应用

物理场选矿技术与地聚物胶凝材料耦合应用

实现无废采选冶整体解决方案概要

中国工业固废管理股份有限公司·固废产业研究院

目录

执行摘要

- 一、引言：采选冶固废治理必须从“末端”转向“源头”
- 二、两项关键技术的原理与能力边界
- 三、耦合的内在逻辑：一条物质流的双向闭合
- 四、采矿环节的耦合应用分析
- 五、选矿环节的耦合应用分析
- 六、冶炼环节的耦合应用分析
- 七、综合效益分析
- 八、实践基础与产业化条件
- 九、结论与推广建议

执行摘要

Executive Summary

关键指标	量化结论	支撑环节
源头无效处理量削减	减少 30%—50%	物理场智能预选
后续全流程能耗水耗钢耗	降低约 40%	预选抛废 + 干式分选
胶凝材料用量（对比水泥）	降至 60%—70%	地聚物胶凝材料
充填综合成本	下降约 1/3	胶结充填替代水泥
碳排放	较水泥降低 60%—80%	免煅烧制备工艺
重金属固化率	普遍 90%—99% 以上	三维硅铝酸盐网络

我国每年产生固体废物超 110 亿吨，其中金属矿山尾矿年产生量超过 15 亿吨，历史堆存总量超过 200 亿吨；煤矸石年产生量约 7 亿吨，累计堆存超 50 亿吨；电力行业粉煤灰年排放约 6.5 亿吨。这些数字背后是一个长期未能破解的结构性矛盾：**固废治理长期停留在“末端堆存—事后处置”的被动模式**，而采矿、选矿、冶炼三大环节的物料在产生的那一刻，其资源属性就已经被浪费掉了。

2025 年 12 月 19 日，国务院常务会议部署开展固体废物综合治理行动，明确要求按照“减量化、资源化、无害化”原则，构建“**源头减量、过程管控、末端利用和全链条无害化**”的固体废物综合治理体系。这一表述的关键词是“源头”——治理的重心必须从“固废产生之后”前移到“固废产生之中”，甚至前移到“固废产生之前”。

本报告提出并分析一条与之高度契合的技术路径：**以物理场选矿技术完成源头分离与提纯，以地聚物胶凝材料完成末端胶结与再造，两者耦合构成一条物质闭环，实现“无废采选冶”**。

物理场选矿技术（重选、磁选、电选、光电 / 射线智能分选以及微波、超声、电场等外场强化手段）的本质特征是**分离过程中不改变矿物固有的物理和化学性质，无需化学药剂**。它把“能抛早抛、多碎少磨”的行业原则落到实处：在粗粒级阶段就把脉石和低品位废石分离出来，从源头削减后续无效处理量。公开工程数据表明，AI 光电智能预选在 10—80 mm 粗粒级可精准抛出废石，使源头无效处理量减少 30%—50%；30 余座低品位铁矿采用光电预选后平均抛废率超过 50%，后续全流程能耗、水耗、钢耗降低约 40%；干式磁选预选可节水 90% 以上。分离出来的废石、脉石、精矿，本身就是三类可以分别定向利用的物料。

地聚物胶凝材料的本质特征是**免高温煅烧、以固废为原料、可在常温或低温条件下形成三维硅铝酸盐网络**。相比传统硅酸盐水泥，其生产过程可减少约 80% 的 CO₂ 排放；粉煤灰基地聚物 28 d 抗压强度可达 55.6—136 MPa；在 1000—1200 °C 下不分解，5% 硫酸溶液中分解率仅为硅酸盐水泥的 1/12；对铅、锌、铬、镉等重金属的固化效率普遍超过 90%，部分体系达到 99% 以上。这意味着，**它不仅能“吃下”物理场分选产出的细粒尾矿、冶炼渣和粉尘，还能把其中的重金属永久锁在胶凝网络里**。

两者耦合的内在逻辑清晰而紧密：物理场技术负责把混合物料拆解为“**“有价精矿 / 可建材化骨料 / 活性硅铝细料 / 重金属富集相”**”四类料流，地聚物材料则为后三类提供规模化、高值化且稳定的出口，并把重金属锁定在类地质矿物的三维网络中。两者的接口是物料流本身，无需额外适配。

经济性已经得到工程验证。铜陵有色下属企业以高炉矿渣、钢渣、工业副产石膏制备新型低碳胶凝材料，同等条件下用量约为硅酸盐水泥的 60%—70%，可为矿山充填降本约三分之一；三年累计销售 113 万吨，协同处置矿山尾矿 1000 万吨，降低碳排放近 139.17 万吨，并入选联合国巴塞尔公约亚太区域中心“无废城市”减污降碳协同增效典型案例。柿树底金矿采用低碳固废胶凝材料替代水泥后，节约胶凝材料 50% 以上，尾矿利用量提高 10% 以上，充填成本降低 30% 以上，碳排放降低 90%。

政策环境已经成熟。《中华人民共和国资源税法》对开采共伴生矿、低品位矿、尾矿予以减免，尾矿减征比例可达 50% 甚至免征；充填开采置换出的煤炭资源税减征 50%；综合利用固废且符合环保标准的暂予免征环境保护税；相关产品收入在计算应纳税所得额时减按 90% 计入收入总额。绿色矿山建设已纳入地方政府绩效考核体系。**这条路径不再只是环保责任，而是一条可以算得过账的增长曲线。**

本报告的结论是：物理场选矿技术与地聚物胶凝材料不是两项彼此独立的技术，而是一套**物质闭环系统的两端**。前者解决“分得开、分得净、分得省”，后者解决“用得上、用得稳、用得住”。二者耦合，可以把采矿、选矿、冶炼三大环节的固废从“环境负担”还原为“二次矿产资源”，为“无废采选冶”提供一条**技术可行、经济合理、政策适配、可复制推广**的实现路径。

一、引言：采选冶固废治理必须从“末端”转向“源头”

采矿、选矿、冶炼是国民经济的基础产业，也是固废产生量最大的产业门类。理解这条技术路径为什么成立，需要先回到行业长期存在的结构性矛盾，以及政策方向已经发生的根本调整。

（一）一个被反复确认却长期未解的矛盾

我国矿产资源的一个基本特征是**共伴生组分多、贫矿多、嵌布粒度细**。这一特征决定了传统采选冶流程的先天缺陷：为了回收一两种主金属，必须把全部矿石磨细、全部物料过一遍长流程，而伴生组分与脉石在这个过程中被一并“处理”，最终以尾矿、废石、冶炼渣的形式排出。

数据印证了这一判断。截至“十五五”末，我国大宗固废累计堆存量巨大，金属矿山尾矿历史堆存总量超过 200 亿吨，煤矸石累计堆存超 50 亿吨。这些物料不仅是土地占用和安全风险——尾矿库溃坝风险长期居于矿山重大风险之首——更是**被浪费的二次资源**。

攀西红格钒钛磁铁矿的实践极具说服力：在开展尾矿再回收技改后，尾矿中 TiO_2 品位降至 4% 以下，每年从尾矿中新增钛精矿 5 万吨、铁精矿 2.17 万吨，相当于让堆存多年的尾矿库“变”成了一座持续产出的地上矿山。

问题并不在于尾矿里没有资源，而在于**传统流程的物料流向是单向的**：矿石→精矿→尾矿→尾矿库。一旦进入尾矿库，资源属性即被降级为环境属性，再想回收就要付出二次开采的成本与环境代价。

（二）政策已经明确把治理重心前移到“源头”

2025 年 12 月 19 日国务院常务会议部署开展固体废物综合治理行动，提出要**坚决遏制住固废增长势头**，按照减量化、资源化、无害化的原则，构建“源头减量、过程管控、末端利用和全链条无害化”的固体废物综合治理体系。“源头减量”排在四项之首，这不是修辞顺序，而是治理逻辑的根本调整。

与之配套的政策工具已经形成合力：

- **总量目标**：2025 年大宗固废综合利用率达 57%，2030 年资源化率超 60%；
- **税收激励**：资源税法对共伴生矿、低品位矿、尾矿减免征，充填开采置换煤炭资源税减征 50%，综合利用固废暂予免征环境保护税，相关产品收入减按 90% 计入应税所得；
- **考核约束**：绿色矿山建设纳入政府绩效考核和领导干部自然资源资产离任审计评价指标体系，多地要求“十五五”末持证在产 95% 大中型矿山建成省级以上绿色矿山；

- **价值导向：**生态环境部持续推进“无废城市”建设，113个城市实施建设项目3000余项，并推动“无废集团”试点向大型产业集团延伸。

政策指向非常清楚：**谁先把固废在源头变成产品，谁就先拿到成本优势和绿色溢价。**

（三）本报告的分析框架

本报告不孤立讨论单项技术，而是把物理场选矿技术与地聚物胶凝材料作为一个**耦合系统**来分析。全篇遵循如下逻辑主线：技术原理 → 耦合机理 → 分环节应用 → 综合效益 → 实践基础 → 结论建议。

其中第四至第六章分别对应采矿、选矿、冶炼三个环节，逐一回答同一个问题：**在这个环节，物理场技术切出了哪几股料，地聚物材料分别把它们变成了什么。**

二、两项关键技术的原理与能力边界

耦合系统的两端分别是“分离”与“胶结”。理解耦合为什么成立，需要先把两项技术各自的能力边界讲清楚——它们各自能做什么、不能做什么，决定了耦合的接缝在哪里。

（一）物理场选矿技术：不改变矿物本性的高效绿色分离

物理场选矿是耦合系统的“入口”。它的能力上限由物理性质差异决定，其价值上限则由分离时机决定——越早分离，节约的后续环节越多。

1. 技术原理与门类

物理选矿的分选依据是矿物之间**密度、磁性、导电率、表面光学特征**等物理性质的差异，其本质特征是**分选过程中丝毫不改变矿物本身固有的物理和化学性质**。这与浮选等依赖化学药剂的工艺形成根本区别，也是它被称为“绿色分离”的原因。

技术门类	分选依据	主要用途	适用粒度
重力选矿（重选）	矿物密度（比重）差异	钨锡矿、煤炭主要选别方法	几百毫米至 1 mm 以下
磁力选矿（磁选）	矿物磁性差异	铁锰矿石选别、有色稀有金属精选、非金属除	干式适用粗粒，湿式适用细粒

		铁、重介质回收	
电力选矿（电选）	矿物导电率等电性差异	有色 / 黑色 / 稀有金属精选，金刚石、石墨分选	需预先干燥脱泥
智能拣选	光学、X 射线、放射性特征	预选丢弃废石（块矿阶段）	10—80 mm （XRT）
摩擦选矿、弹跳选	摩擦系数、碰撞恢复系数差异	特定非金属矿物分选	视矿种而定

在这些门类之上，**外场强化技术**正在把分离精度推向新的层级：微波利用选择性加热与“微爆裂”效应促进晶格包裹体杂质释放；超声波通过空化效应强化界面反应与杂质剥离，相同条件下超声浸出金属量较常规方法可增加 20%；电场则通过改变颗粒表面电荷分布、促进颗粒碰撞与晶格破坏来提升分离效率。

多物理场的**协同**（如磁选—酸洗、微波—酸浸、超声—浮选、温压—化学）已成为处理复杂难选物料的主流方向。

2. 核心工程价值：“能抛早抛”带来的结构性降本

物理场选矿技术在采选冶领域最直接的价值，是支撑“**多碎少磨、能抛早抛**”这一行业原则落地。预选抛废是在细碎、磨选或精选作业**之前**丢弃部分低品位废石，从而降低后续作业负荷。其效益已经在多个矿种上得到验证：

- **源头减量效果显著**：采用 X 射线透射（XRT）或高清视觉技术的 AI 光电智能预选，可在 10—80 mm 粗粒级精准识别并抛除废石，**直接减少无效处理量 30%—50%**；
- **规模效益可复制**：30 余座低品位铁矿采用 AI 光电预选后，平均抛废率超过 50%，后续全流程能耗、水耗、钢耗降低约 40%；
- **节水效果突出**：磁铁矿采用高效干式磁选预选，可较传统湿法**节水 90% 以上**，特别适合干旱缺水矿区；
- **具体矿山指标**：大吉山钨矿选矿厂对 +80 mm 矿石人工正反手选、-80+16 mm 采用 XRT 预选，2021 年全年平均废石选出率 52.87%，矿石合格率 92.77%；对手选而言，丢废率可达 40%—60%；

- **提高回采率：**大块干式磁选技术在攀西四大矿区应用实践表明，其在**降低采矿贫化率、提高矿石回采率**方面效果非常显著；
- **提升回收率：**攀西红格钒钛磁铁矿通过外磁式磁选机预选工艺革新，选铁总回收率较国家示范基地规划目标高出 5.96 个百分点。

3. 固废端的分离能力

物理场技术的能力并不限于原矿预选，它在固废端同样构成关键分离手段：磁选可从钢渣中回收废钢、从赤泥中回收铁铝资源；电选可从城市固体废物中回收铜、铝等有价值金属；物理选矿工艺处理工业废料具有**低能耗、低污染**的优势。

以委托方华筑绿建（北京）科技有限公司为例，其核心的“物理法物质分离技术”采用**磁、重、声、电、光等多物理场除杂工艺**，通过自主研发的物理场矿物分离设备实现固废中有价组分的精准分选与提纯，**无需化学药剂，环境友好、能耗低、效率高**，并配套拥有《超纯石英永磁强磁选矿提纯机控制软件》等自主知识产权。

其中最具代表性的是 **3T（特斯拉）聚磁永磁强磁技术**。该技术源于中国地质科学院王裕先等人 1996—2000 年完成的国家攻关项目课题，自行研制的聚磁永磁强磁选矿设备磁场强度达到 **2.8—3.0 T**，国家科委委托地矿部进行成果评审，评审委员会结论为“**聚磁永磁强磁选矿技术达到国际先进水平**”。

其工程数据具有很强的说服力：

验证方向	工况与数据	数据来源
脱硫	首钢动力电厂大同动力煤：原煤含硫 1.57%、硫铁矿硫 0.97% 降至精煤含硫 0.63%， 全煤脱硫率 61% ，无机硫脱硫率 81%	国家煤炭检验中心
提质（一期）	大唐电力锡盟褐煤尾煤（灰分 44%、约 2800 大卡）提升至 5500 大卡	2018 年中试
提质（二期）	锡盟褐煤（原样 4000 大卡以上）提升至 6000 大卡以上 ，达到普通动力煤标准	2023 年送样试验

成本优势	生产成本约为重介质法、浮选法的 1/2—1/3；燃前脱灰脱硫成本约为电厂湿法石灰烟气脱硫的 1/7—1/10	技术报告
适用粒度	13 mm—200 目的末煤粉煤及尾煤煤泥可采用 干式初抛尾	技术报告

这组数据说明，物理场分离技术已经在煤炭这一最典型的大宗物料上跑通了“源头提质—减量—资源化”的完整链条，其方法论向金属矿和非金属矿的迁移具备坚实的技术基础。

（二）地聚物胶凝材料：免煅烧、可固废化的低碳胶结体系

地聚物是耦合系统的“出口”。它的原料广谱性决定了它能吃下多少种固废，它的网络结构决定了它能把污染物锁得多牢。

1. 反应机理：从硅铝原料到三维网络

地质聚合物（Geopolymer）由法国科学家 Joseph Davidovits 于 20 世纪 70 年代首次发现并命名，最初以高岭土为原料通过碱激活反应制备。其形成过程可概括为三个核心阶段：

1. **溶解阶段**：在强碱激发剂（如 NaOH、水玻璃）作用下，固废中的硅铝酸盐玻璃体发生 Si—O、Al—O 键断裂，解离出活性硅、铝离子；
2. **单体重构阶段**：解离出的硅、铝离子重新组合，形成低聚硅氧四面体和铝氧四面体单体；
3. **缩聚阶段**：低聚单体通过共用氧原子缩聚，形成三维网络状无机聚合物结构，碱金属离子（Na⁺、K⁺）参与电荷平衡与骨架构建。

最终形成的 **N—A—S—H（钠铝硅酸盐水合物）或 N—S—H 网状凝胶**，是本材料承担力学承载和污染物固化的关键物相。正是这种三维网络结构，赋予地聚物一系列区别于传统水泥的独特性能。

2. 原料端的“广谱性”：与固废品类的天然匹配

地聚物的原料是富含硅、铝且具备反应活性的物料。随着研究深入，原料范围已从高岭土、火山浮石等天然矿物，扩展到**粉煤灰、煤矸石、矿渣、钢渣、锰渣、赤泥、各类尾矿、建**

筑废弃物粉尘等工业固体废弃物，实现“以废治废”。这一点与采选冶行业的固废谱系高度吻合：

采选冶固废	主要化学组成	作为地聚物原料的适配性
煤矸石	SiO ₂ 45%—69%， Al ₂ O ₃ 12%—39%	高硅铝，宜作硅铝校正料与主原料
粉煤灰	SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、FeO、Fe ₂ O ₃ 、CaO	经典地聚物原料，活性好
高炉水渣（矿渣）	硅酸盐玻璃质	提供钙源，加速反应、提高早期强度
钢渣	含钙铁硅酸盐	提供钙源与骨料功能
各类尾矿	视矿种而异，多含硅铝	经活性激发后可作骨料或原料
冶炼渣（铜渣、铅锌渣等）	含铁硅酸盐，Ca、Al 及玻璃相含量偏低	需碱活化激发，但其重金属自胶结固化性能突出
赤泥	高碱、含铁铝	可与矿渣、粉煤灰协同

值得特别指出的是，**有色冶金渣虽然潜在胶凝活性较低**——其 Ca、Al 元素含量和玻璃相含量普遍低于水淬高炉矿渣——**但其重金属自胶结固化性能非常突出**，这恰恰是冶炼环节最需要的功能。

3. 性能特征：四项指标全面优于传统水泥

(1) 碳排与能耗。免高温煅烧，生产过程相比传统水泥可减少约 **80%** 的 CO₂ 排放。这一点在“双碳”目标下具有战略意义——水泥行业碳排放约占全球人为温室气体排放的 7%—8%，而地聚物路线从根本上规避了石灰石分解这一主要碳源。

(2) 力学性能。早强快硬特征显著：粉煤灰基地聚物 28 d 抗压强度可达 **55.6—136 MPa**；熔融还原炉渣基地聚物 28 d 抗压强度达 93.4 MPa；在 20 ℃ 固化 28 d 条件下，地聚物抗压强度约 69 MPa，普通硅酸盐水泥约 46 MPa。以低硅铁尾矿为主要原料、偏高岭土为硅铝校正料，在硅铝摩尔比 2.75、液固比 0.30、碱激发剂模数 1.4、室温封袋养护条件下，制备出的地聚物 28 d 强度达到 **72.3 MPa**。

(3) **耐高温与体积稳定性。**在 1000—1200 °C 高温下不分解；400 °C 线收缩率仅 0.1%，800 °C 线收缩率 0.2%—2%，可保持 60% 以上原始强度，明显优于传统水泥。

(4) **耐腐蚀与抗渗性。**耐硫酸盐侵蚀，在 5% 硫酸溶液中分解率仅为硅酸盐水泥的 1/12，抗酸腐蚀性能约为普通硅酸盐水泥的 5 倍；结构致密，抗渗性和耐冻融循环能力优异。

(5) **重金属固化能力。**这是地聚物最契合采选冶场景的性能。碱激发地聚物凝胶对重金属的固化机理包括**静电吸附、物理封装和生成稳定化合物**三类。实测数据表明：

- 以粉煤灰和偏高岭土为原料时，当 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 添加量小于 5%，**超过 99.5% 的铅被固定在胶凝材料中**，渗滤液中铅浓度小于 5 mg/L；
- 铅锌矿渣以 Na_2O 为碱活化材料制备胶凝材料，经 HJ/T 299—2007 硫酸硝酸法检测，锌、铬、铅的浸出液浓度分别由原渣中的 183.10、7.66、26.13 mg/L 降至 **0.84、0.07、0.12 mg/L**，重金属固化效率超过 90%；
- 铜渣 / 粉煤灰地聚物体系对 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 五种重金属的固化率均达到 **99% 以上**；
- 碱活化铅锌冶炼渣固化铬渣，Cr 固化效率超过 95%，28 d 抗压强度 28.35 MPa，浸出浓度全部低于 5 mg/L 安全限值。

4. 委托方在地聚物方向的技术积累

华筑绿建的“**硅基纳米胶凝材料技术**”是原创性开发的新型无机纳米胶凝材料体系，可替代传统水泥用于混凝土、灌浆料、地坪材料等，实现固废基建材的高性能化。该技术在 2024 年 5 月由 20 个省（市）硅酸盐学会共同主办的“第十六届国内外水泥粉磨新技术交流大会暨展览会”上，获大会“**2024 水泥粉磨系统最佳实用技术（BAT）**”称号。

配套的“**固废无害化稳定化技术**”针对含重金属及有毒有害元素的工业固废，开发专用胶凝固化材料，可有效固锁铊、铍等污染物，**固化率达 99% 以上**，在实现资源化利用的同时彻底消除环境风险。

代表性专利成果包括：

- **一种用于耐火重组石材的物理粘合剂及其制备方法与应用（CN118026709B）**：实现煤矸石等固废的 100% 资源化利用，是公司核心独家技术；

- **一种固化锂云母渣胶凝材料及其制备方法和应用**：稳定固锁锂云母渣中 99% 以上有毒有害元素，制备高附加值绿色建材；
- **钢渣基双组份高强灌浆料（CN113636820B）**：以钢渣为主要原料制备高性能灌浆材料；
- **PHC 管桩用免水泥固废基混凝土配方及其制备方法**：完全替代水泥的固废基混凝土技术。

三、耦合的内在逻辑：一条物质流的双向闭合

物理场选矿技术与地聚物胶凝材料分属“分离”与“胶结”两个看似不同的技术方向，但当它们被放入采选冶全流程中考察时，会发现二者的接口是**天然吻合**的。以下从物质流、成本能量流、环境风险三个维度逐一说明。

（一）物质流耦合：每一股料流都有对应出口

传统流程中，物理分选只承担“选出精矿”这一个任务，其余全部成为尾矿；地聚物只在建材场景中被动消纳固废。而在耦合系统中，物理场分选**主动地把物料拆解成三类**，地聚物则为每一类提供出口：

物理场分选产出的料流	特征	地聚物 / 胶凝体系的处置出口
高品位有价精矿	金属富集	进入冶炼流程，提高入炉品位，减少渣量
中品位可建材化骨料 / 砂石	粒度较粗、成分稳定	直接作为建筑砂石、井下充填骨料
细粒活性硅铝料（尾矿微粉、废石粉）	富含硅铝、比表面积大	作为地聚物胶凝材料原料或活性掺合料
含重金属富集相	污染物集中	由地聚物胶凝网络固化，浸出浓度远低于限值

这种拆解的关键意义在于：**物理场分选把“混合污染”转化为“分类资源”**。混合状态下，尾矿中的重金属会污染整个物料体；而一旦通过物理场把重金属富集相分离并定向固化，其余物料便可无障碍地进入建材和充填渠道。**分离是资源化的前提，胶结是分离的落点。**

以水口山有色的实践为例：选矿环节采用智能分选工艺预先抛出部分低品位废石，年产废石 9.5 万吨**全部作为建材原料综合利用**；采用浓缩过滤工艺将尾矿矿浆含水率降至 15% 以下形成干尾砂，年产 20 万吨**直接销售至建筑材料生产商**；剩余尾矿以**高浓度膏体充填**方式回填井下采空区。三条出口并行，实现尾矿库零排放、废水 100% 循环利用。

（二）成本与能量耦合：两端同时降本

耦合系统在成本结构上形成“双降”效应。

选矿端的降本来自“减量”。物理场预选把 30%—50% 的无效处理量在粗粒级阶段就抛除，直接减少磨矿、浮选、浓缩、输送环节的电耗、水耗和钢耗。30 余座低品位铁矿的实践数据显示，后续全流程能耗、水耗、钢耗可降低约 **40%**。

充填端的降本来自“替代”。胶结充填成本可占采矿总成本的 **20%**，其中水泥成本约占胶结充填成本的 **75%**。这意味着胶凝材料是充填成本的绝对大头。以地聚物基低碳胶凝材料替代水泥后：

- 铜陵有色下属企业的新型低碳胶凝材料，同等条件下**用量约为硅酸盐水泥的 60%—70%**，可为矿山充填**降本约三分之一**；
- 柿树底金矿低碳固废胶凝材料替代水泥，**节约胶凝材料 50% 以上**，尾矿利用量提高 10% 以上，**充填成本降低 30% 以上**，碳排放降低 90%；
- 天星铁矿新型胶凝材料在灰砂比 1:10 的条件下 28 d 单轴抗压强度达 3.14 MPa，优于普通硅酸盐水泥和矿渣微粉，年降低充填成本约 **1300 万元**。

两端降本叠加，加上资源税减免（尾矿减征 50% 或免征、充填开采置换煤炭资源税减征 50%）和产品收入减按 90% 计入应税所得的政策红利，耦合系统的经济性已经越过盈亏平衡点。

（三）环境风险耦合：把“移动污染”变为“稳定固化”

采选冶固废最棘手的环境风险来自重金属和有毒有害元素的可迁移性。尾矿库的渗漏、废石堆场的淋溶、冶炼渣的扬散，本质上都是污染物在“移动”。耦合系统从两个方向同时封堵这一风险。

其一，物理场分离把污染物集中到可控的少量物料中。通过磁选、电选等物理手段分离出重金属富集相，使污染物的处理量级从“万吨级”降至“百吨级”，大幅降低固化成本。

其二，地聚物胶凝网络把污染物永久锁定。地聚物凝胶对重金属的固化通过静电吸附、物理封装和生成稳定化合物三条路径实现，浸出浓度可降低至限值的十分之一以下。铁尾矿碱激发固化体系的实测数据表明，**重金属浸出降低最高可达 95%**；同时相比硅酸盐水泥，环境影响（全球变暖潜势与能耗）**降低约 35%**。

更值得注意的是，天然岩石中大量存在的就是铝硅酸盐矿相。**地聚物固化产物在化学本质上与地质矿物同源**，其长期稳定性远高于依赖水化硅酸钙的波特兰水泥体系——这是“以地质方法解决环境问题”的底层逻辑。

（四）系统级耦合示意

综合以上三个维度，耦合系统的全流程物料走向可按下表逐环节对应理解：

环节	物理场分选动作	产出的料流	地聚物 / 胶凝体系的出口
采矿	大块干式磁选、XRT 智能分选	有价矿石 → 选矿；废石 → 三类物料	废石作建筑砂石骨料、井下充填骨料、活性粉体原料
选矿	磁选 / 重选 / 电选 / 多场协同精选	精矿 → 冶炼；中矿与粗粒尾矿 → 骨料；细粒尾矿微粉 → 胶凝原料	细粒尾矿作地聚物胶凝材料主原料；尾矿库零排放成为可能
冶炼	磁选回收废钢、电选回收有价金属	有价金属 → 回炉；冶炼渣、粉尘 → 辅料	冶炼渣作钙源与重金属固化载体，粉尘协同固化
末端	—	充填体、绿色建材、功能性材料	回到矿山与工程现场，物质闭环形成

四、采矿环节的耦合应用分析

采矿环节是耦合系统的第一道闸门。这一环节的固废问题根源是“贫化”——围岩混入得越多，后续所有环节的无效负荷就越大。因此，在采矿端就完成分离，是整条闭环中性价比最高的动作。

（一）痛点

以石英脉型钨矿为例，矿脉较薄、急倾斜，开采过程中围岩混入率高，矿石贫化率最高可达 90%。围岩一经混入，就要随矿石一起经历破碎、磨矿、选别全过程，不但推高成本，还会稀释入选品位、降低选矿回收率。同时，中深孔爆破法的推广在提升采矿效率的同时，进一步加剧了矿石贫化。

（二）物理场技术的切入点：把分选动作前移到采矿

（1）大块干式磁选预选。在粗碎之后、中碎之前对大块矿石进行干式磁选，直接抛除围岩。攀西四大矿区（攀枝花、白马、红格、太和）的应用实践表明，大块干式磁选技术在降低采矿贫化率、提高矿石回采率方面效果非常显著。

（2）XRT 智能光电预选。在 10—80 mm 粗粒级采用 X 射线透射或高清视觉识别，精准判识并抛除废石。大吉山钨矿选矿厂采用“人工手选（+80 mm）+ XRT 预选（-80+16 mm）”组合工艺，2021 年全年平均废石选出率 52.87%，矿石合格率 92.77%。

（3）干式预选的节水价值。对缺水矿区而言，干式磁选预选可较湿法节水 90% 以上，这不仅降低了水费和新水取用指标压力，也避免了湿式工艺带来的细粒尾矿和废水处理问题。

（三）地聚物材料的接续：废石的三条出口

物理预选抛出的废石，在耦合系统中不再是“废弃物”，而是三条产品线的原料。

出口一：直接作为建筑砂石骨料。成分稳定、粒度合适的废石经筛分整形后即可作为合格建筑用砂石，实现“矿石采出即成品”。辽宁翁泉沟硼铁矿优化选矿后端工艺流程，将尾矿加工为合格建筑砂石推向市场，既缓解了尾矿库库容紧张压力，又让工业副产物转化为可市场化流通的产品。

出口二：作为井下充填骨料。这是废石最直接的“原位消纳”路径。将废石与细粒尾矿、地聚物胶凝材料配合，制成充填料浆或膏体回填采空区，既消纳固废，又控制地压活动、防止地表塌陷，同时**提高矿石回收率**——新田岭钨业建成尾砂膏体充填系统后，**资源回采率提升 10% 以上**。金川集团的“全尾砂+膏体充填”技术每年将约 20 万吨尾矿制成膏体安全回填采空区，实现资源的原位循环利用。

出口三：加工为活性粉体原料。废石细粉经粉磨和活性激发后，可作为地聚物胶凝材料的硅铝原料或活性掺合料。这一路径把低值废石转化为高值材料组分，是“高值化利用”的关键通道。

（四）耦合效果

指标	传统模式	耦合模式	改善来源
采矿贫化率	高（钨矿可达 90%）	显著降低	大块干式磁选预选
入磨处理量	100%	减少 30%—50%	XRT / 光电预选抛废
选矿新鲜水耗	基准	降低 90% 以上（干式预选）	干式磁选技术
废石去向	废石场堆存	建材 / 充填 / 活性粉体	地聚物胶结体系
资源回采率	基准	提升 10% 以上	充填采矿法 + 膏体充填

五、选矿环节的耦合应用分析

选矿环节是固废产生量最大的环节，也是耦合系统真正发挥规模效益的主战场。这一环节的关键命题有两个：把微细粒有色组分抢回来，把细粒尾矿规模化送出去。

（一）痛点

选矿环节是固废产生量最大的环节，也是资源浪费最集中的环节。三个结构性问题尤为突出。

一是微细粒物料难以回收。传统浮选机很难对 20 μm 以下的细粒矿物有效回收；微细粒钛铁矿（ -0.019 mm ）缺乏有效选别方法，导致大量有价值组元随尾矿流失。

二是共伴生组分利用率低。多元素共生是我国诸多矿床的典型特征，受传统选冶技术条件限制，过去矿山大多只能高效回收 12 类主矿产，大量极具战略价值的伴生组分随尾矿流失，形成“隐性资源损耗”。

三是尾矿粒度细、体量大、处置成本高。细粒尾矿不仅占用库容、增加安全风险，其脱水、输送、堆存成本也居高不下。

（二）物理场技术的切入点：分质分选与深度提纯

（1）复合力场设备提升微细粒回收。悬振锥面选矿机适宜分选 0.100—0.005 mm 的矿泥；SSS 型湿式双频双立环高梯度磁选机能高效回收 -0.020 mm 微细粒级钛铁矿，较常规高梯度磁选机精矿品位和回收率分别提高 6.71% 和 9.68%；离心高梯度磁选机可广泛用于细粒级磁性矿石选别。这些设备的共同特点是**以复合力场扩大分选窗口，把原本进入尾矿的微细粒有价值矿物重新拉回产品流。**

（2）多物理场协同用于深度提纯。在高纯石英砂制备中，磁场、微波场、超声场、温度场及压力场的协同应用已取得进展：微波的选择性加热与微爆裂效应促进包裹体杂质释放，超声的空化效应强化界面反应与杂质剥离，温压场诱导多态相变与晶格重构，实现杂质的选择性迁移。这类“多场协同”思路，同样是处理复杂难选金属矿和固废提纯的重要方向。

（3）分质分选，优料优用。湖北兴发树岭坪磷矿的做法极具借鉴价值：在 120 万吨/年重介质选矿项目基础上，搭建完整的矿料分级利用体系——高品位块矿定向供给精细磷化工产业，中低品位矿料经选别加工用于湿法磷酸生产，开采产生的副产粉矿则加工制作磷复肥与饲料钙产品，**让不同品级的矿料各得其所，每一份资源都匹配适配的下游应用场景。**该矿还将入选粒度下限由 3 mm 降至 1 mm，成功释放千万吨级呆滞磷矿资源。

（三）地聚物材料的接续：细粒尾矿的规模化出口

细粒尾矿是选矿固废的主体，也是传统建材渠道最难消纳的部分。地聚物胶凝材料恰恰为这一类物料提供了大规模出口。

(1) 井下胶结充填——体量最大的出口。以细粒尾矿为骨料、地聚物胶凝材料为胶结剂制备充填料浆，可以消纳极大规模的尾矿。实测数据显示，以矿渣粉、钢渣粉及 F-石膏为主要原材料制备的低碳固废胶凝材料，以黄金尾矿为骨料时，在达到相同技术指标前提下**可节约胶凝材料 50% 以上、尾矿利用量提高 10% 以上、充填成本降低 30% 以上、碳排放降低 90%**。铜陵有色的低碳胶凝材料三年间**协同处置矿山尾矿达 1000 万吨**，充分证明了其规模化消纳能力。

(2) 尾矿基地聚物建材。低硅铁尾矿添加偏高岭土作为硅铝校正料，在 NaOH 和水玻璃复合碱激发下，28 d 强度可达 72.3 MPa，试样内部存在大量无定形 N—A—S—H 和 C—S—H 凝胶相，将矿物晶体紧密胶结并填充颗粒孔隙，形成结构致密的整体。这类材料可直接用于制砖、砌块、路面材料、灌浆料等。

(3) 尾矿固化堆存与地表覆盖。对暂时不具备规模化利用条件的尾矿，可采用地聚物胶凝材料进行固化处理。以磷渣基地聚物胶凝材料固化 65% 微细粒尾矿浆体，胶凝材料掺量 3%（质量分数）时，固化 28 d 后尾矿固化体抗压强度可达 0.2 MPa，满足尾矿固化堆存要求。对矿山尾矿开展的地聚物稳定化研究显示，在 30%—50% 胶结剂掺量下可获得稳定微结构并有效固定重金属，适用于**矿井充填和地表覆盖**两类场景。

(4) 尾矿再选与增值。对历史堆存的尾矿，物理场技术可开展“二次回收”。攀西红格钒钛磁铁矿持续开展尾矿再回收铁钛资源技改，项目投运后尾矿中 TiO₂ 品位降至 4% 以下，每年从尾矿中新增钛精矿 5 万吨、铁精矿 2.17 万吨。超微细粒钛铁矿强化回收项目建成投产后，更是盘活了近 **8700 万吨**钛资源，相当于新探明 3 座超大型钛矿。这类实践表明，**尾矿库本身就是一座“地上矿山”**，只需要合适的分选技术和经济可行的回收窗口。

(四) 耦合效果

指标	传统模式	耦合模式	改善来源
微细粒有价矿物回收	大量流失	复合力场设备有效回收	高梯度磁选、悬振锥面选矿机
尾矿去向	尾矿库堆存	充填 / 建材 / 固化堆存 / 再选	地聚物胶凝体系

尾矿库排放	持续入库	有望实现零排放	全量资源化 + “一矿一策”胶凝方案
尾矿库服务年限	持续缩短	延长 5—6 年	尾砂综合利用率提升
伴生金属回收	随尾矿流失	规模化回收	分质分选 + 深度提纯

六、冶炼环节的耦合应用分析

冶炼环节的固废特点是“渣量大、成分复杂、环境风险高”，也正是地聚物材料“自胶结固化”优势最能体现的场景。这一环节同时是危废内部协同利用的主战场。

（一）痛点

冶炼环节固废的特点是“**渣量大、成分复杂、环境风险高**”。每炼 1 吨生铁产生 0.3—0.9 吨高炉渣，生产 1 吨钢排出 0.1—0.3 吨钢渣，1 吨氧化铝产出 0.6—2 吨赤泥。有色冶金渣种类多、成分复杂、结构差异性大、火山灰活性低——其 Ca、Al 元素含量和玻璃相含量普遍低于水淬高炉矿渣，这是导致有色冶金渣潜在胶凝活性低的本质原因。

更棘手的是危险废物。含铅物料、银浮渣、白烟灰、阳极泥等危废若不能内部协同利用，只能委外处置，成本高、风险大、资源价值大量流失。

（二）物理场技术的切入点：渣中有价组分的回收与危废的减量

（1）从渣中回收金属。磁选法可用于从冶炼生产的钢渣中回收废钢；电选法可用于从固体废物中回收铜、铝等有用金属。物理选矿工艺（磁选、重选）处理工业废料具有**低能耗、低污染**的优势，已成为资源回收与环境保护领域的重要手段。

（2）危废的物理预处理与富集。对成分复杂的危废物料，物理场分选可实现有价组元的预富集和污染物相的集中，为后续冶金处理提供品位更高、更均一的原料，同时减少进入处置环节的物料总量。

（三）地聚物材料的接续：冶炼渣的“自胶结”优势

冶金渣在地聚物体系中的表现，是耦合系统在冶炼环节最大的亮点。

(1) **重金属固化率高、稳定性好。**铅锌矿渣以 Na_2O 为碱活化材料制备胶凝材料后，锌、铬、铅浸出浓度分别由 183.10、7.66、26.13 mg/L 降至 **0.84、0.07、0.12 mg/L**，固化效率超过 90%。铜渣 / 粉煤灰地聚物对 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 五种重金属的固化率均达 **99% 以上**，其中铜的固化效果最佳。

(2) **固化机理明确。**研究表明， Zn^{2+} 和 Pb^{2+} 会参与地聚物结构的形成并替代 Ca^{2+} 或 Na^+ 的位置，从而被**化学固化**在地聚物骨架体系中；而 Cu、Pb、Cr 等元素较少参与水化反应，主要通过**物理固化**保存于胶结体内。C—S—H 凝胶对铜和铬的物理固化效果明显优于锌。这种“化学+物理”双重固化机制，是地聚物处理冶炼渣的独特优势。

(3) **强度满足建材要求。**以铜渣、粉煤灰为主要原料，在铜渣掺量 20%、碱激发剂加入量 25%、水玻璃模数 1.2、80 °C 养护 12 h 的条件下，地聚物 28 d 抗压强度达到 **47.53 MPa**。碱活化铅锌冶炼渣固化铬渣体系，在铬渣掺量 30% 时 28 d 抗压强度 28.35 MPa，满足建筑材料 10 MPa 的强度要求。

(4) **钢渣与矿渣的协同利用。**钢渣、矿渣作为钙源可加速地聚物反应动力学，提高早期强度和长期耐久性。以钢渣、粉煤灰加一定量碱激发剂制备地聚物胶凝材料、以铁矿尾矿为骨料，当尾矿加入量为 50%—55% 时，可制备出 3 d 强度均在 **10 MPa 以上**的免烧制品。

(四) 危废的内部协同利用：产业级的“无废集团”实践

地聚物胶凝体系在冶炼环节的价值不仅体现为渣的处理，还体现为**危废的内部协同利用**。

湖南有色作为湖南省首批“无废集团”试点，通过建立**冶炼废渣内部直供通道、危废利用共享中心、固废全生命周期智能管控平台**，在水口山铜铅锌产业基地内实现跨企业、跨环节固废协同利用，**固废循环利用率从不足 30% 提升至 90%**；2025 年内部协同利用危险废物 14 种、总量 6.7 万吨，年创效超 1 亿元。

水口山有色的具体做法同样值得关注：建立含铅危险废物利用设施内部共享中心，累计接收含铅物料 57470 吨，其中铅渣、银浮渣、吹炼白烟灰、铜阳极泥浸出渣等分别进入底吹炉、侧吹炉进行粗铅冶炼和稀贵金属回收，实现**危险废物的全量资源化利用**。

这些实践说明，冶炼环节的“无废”目标可以通过“物理场分选提纯 + 胶凝体系稳定固化 + 集团内协同配置”三位一体的路径实现。

(五) 耦合效果

指标	传统模式	耦合模式	改善来源
冶炼渣去向	堆存 / 低值外销	胶凝材料原料 / 建材	地聚物碱活化
重金属浸出浓度	高 (如铅锌渣锌 183.10 mg/L)	降至 0.84 mg/L	地聚物化学 + 物理固化
重金属固化率	—	90%—99% 以上	三维网络锁定
固废循环利用率	不足 30%	提升至 90%	内部协同 + 胶凝利用
危废处置	委外，成本高	内部共享利用，年创效超亿元	危废共享中心

七、综合效益分析

耦合系统的价值需要落在可核算的账面上。以下从环境、经济、安全、资源四个维度汇总已公开的量化数据，供项目测算与决策参考。

(一) 环境效益

效益项	量化数据	来源场景
CO ₂ 减排	胶凝材料生产较传统水泥减少约 80%	地聚物制备
碳排放降低	充填环节碳排放降低 90%	黄金尾矿充填
降碳总量	三年降低碳排放近 139.17 万吨	铜陵有色低碳胶凝材料
环境影响降低	全球变暖潜势与能耗较硅酸盐水泥降低约 35%	铁尾矿碱激发固化
重金属浸出降低	最高 95%	铁尾矿 GGBFS 固化体系

废水循环	100% 循环利用，尾矿库零排放	水口山康家湾矿
节水	干式预选较湿法节水 90% 以上	磁铁矿干式磁选

（二）经济效益

效益项	量化数据
胶凝材料替代降本	用量约为水泥的 60%—70%，充填降本约 1/3
节约胶凝材料	50% 以上（柿树底金矿）
充填成本降低	30% 以上；年降充填成本约 1300 万元（天星铁矿）
尾矿库成本节约	年节约成本超 2500 万元（安徽开发矿业）
尾矿综合利用创效	废石 9.5 万吨 / 年 + 干尾砂 20 万吨 / 年，直接经济效益达 565 万元
尾矿再选增值	年新增钛精矿 5 万吨、铁精矿 2.17 万吨
危废内部利用创效	年创效超 1 亿元（湖南有色）
税收减免	尾矿免征 / 减征资源税、充填置换煤炭减征 50%、产品收入减按 90% 计入
资源税下降案例	某矿业公司资源税由 2021 年 188 万余元降至 2026 年上半年 9.4 万元

（三）安全效益

- **消除尾矿库风险：**安徽开发矿业尾矿库实现**连续多月零排放**，从源头化解尾矿库环境与安全风险；水口山康家湾矿技术升级改造项目自投产以后，尾矿未排放至尾矿库，降低库坝安全风险。
- **控制地压活动：**尾砂用于井下充填，有效控制地压活动，降低井下采空区安全风险，提高矿山生产效率。
- **延长矿山寿命：**新田岭钨业尾砂综合利用率超 60%，累计减少尾砂入库约 370 万吨，**延长尾矿库服务年限 5—6 年**；智慧充填系统降低矿柱周边资源开采风险，延长矿山生命周期。

- **减少运输环节风险**：铜陵有色建成超 10 公里的尾矿输送管道，将多余尾矿砂通过管道输送用于生态充填修复，替代车辆运输，减少扬尘与交通安全隐患。

(四) 资源效益

- **提升资源综合利用率**：龙佰攀枝花矿产品有限公司自主研发选钛捕收剂，钛资源综合利用率提升至 **45%**，大幅高于攀西地区 29% 的行业平均水平；硫钴精矿回收技改落地后，钴、镍、铜等稀散金属实现规模化回收。
- **盘活呆滞资源**：树崆坪磷矿将入选粒度下限由 3 mm 降至 1 mm，释放千万吨级呆滞磷矿资源；攀西红格超微细粒钛铁矿强化回收项目盘活近 8700 万吨钛资源。
- **形成“地上矿山”**：尾矿再回收让历史堆存的尾矿库成为持续产出资源的“地上矿山”。
- **延伸产业链**：通过尾矿制备新型建材，实现从传统矿业向新材料产业的转型。

八、实践基础与产业化条件

一条技术路径能否推广，取决于三个条件：技术供给是否完整、产业化载体是否具备、行业是否已有可对标的成功案例。以下逐项说明当前的实际状态。

(一) 技术供给端：完整的技术体系

华筑绿建（北京）科技有限公司成立于 2010 年 6 月，是专注于大宗工业固体废弃物资源化综合利用领域的国家高新技术企业、国家创新型中小企业和科技型中小企业。公司依托国家建材所、地质科学院等专业学术机构的科研平台，在物理法物质分离、新型硅基纳米胶凝材料、干法纳米粉磨等关键技术领域取得多项突破性成果。其技术体系与本报告提出的耦合路径高度对应：

耦合系统所需能力	华筑绿建对应技术	关键指标
物理场分离与提纯	物理法物质分离技术（磁重声光电多物理场除杂）	无需化学药剂；3T 聚磁永磁强磁，磁场强度 2.8—3.0 T，评审“国际先进水平”
胶结与建材化	硅基纳米胶凝材料技术	可替代水泥；2024 年水泥粉磨

		系统最佳实用技术（BAT）
污染物固化	固废无害化稳定化技术	固锁铊、铍等污染物，固化率达 99% 以上
品类覆盖	覆盖煤矸石、钢渣、水渣、煤气化渣、锂云母渣、赤泥、工业废石膏、各种尾矿	全部可实现 100% 资源化利用

公司累计拥有各类专利技术 23 项，发明专利占比高，覆盖固废分选、胶凝材料、绿色建材、专用设备等多个技术方向。作为全国冶金渣专业委员会副主任单位，公司持续在尾矿废石、煤基固废、冶炼渣等固废资源化利用领域进行技术攻关与产业化应用。

（二）产业化载体：可复制的落地模式

中国工业固废管理股份有限公司（CIWM）作为华筑绿建的全球技术产业化运营平台，以“科技 + 资本 + 产业”协同发展作为战略，科研基地设立于江西南昌经济技术开发区，已在江西南昌、内蒙古包头设立研发基地和中试工厂，并在内蒙古、江西、山西、陕西、河北、云南、四川、黑龙江等 **27 个省区** 布局固废资源化项目，形成覆盖全国重点产废区域的产业网络。重点示范项目包括：

- **包头泓景煤系固废分选利用项目：**规划建设包含磁重光除杂车间、高岭土生产车间、洁净煤生产车间、矿物土壤改良剂生产车间共 4 组生产车间，配套公用工程及辅助设施，建成后将成为包头市首个全产业链固废处理标杆项目；
- **山西山阴县年处理百万吨级煤矸石综合利用项目：**公司以“全球领先的 3T 永磁 + 硅基凝胶”技术路线承担煤矸石等固废提质工作，2025 年 4 月 15 日开工，该工程获联合国环境署相关部门“**山阴模式**”命名；

公司与鸡西市滴道区人民政府、宜春市人民政府等多地签署战略投资框架协议，总签约额 **66.2 亿元**，并中标多个百万吨级工业固废资源化项目。

（三）行业实践印证：多个可对标的成功案例

本报告提出的耦合路径，在行业内已有多个环节性验证：

实践主体	核心做法	关键成效
------	------	------

中国五矿	采—选—冶—废一体化布局，“5F+ 双循环”模式	厂矿内循环、集团内循环、社会外循环三维发力
安徽开发矿业	尾砂全量循环利用体系	尾砂综合利用率 91.61%—98.33%，尾矿库连续多月零排放，年节约成本超 2500 万元
新田岭钨业	“充填 + 建材化”双轮驱动	资源回采率提升 10% 以上，尾砂综合利用率超 60%，累计减少尾砂入库约 370 万吨
水口山有色	智能分选预抛废 + 干尾砂外销 + 膏体充填 + 废水循环	废石 9.5 万吨 / 年全部建材化，干尾砂 20 万吨 / 年外销，尾矿库零排放
铜陵有色	新型低碳胶凝材料替代水泥	用量为水泥 60%—70%，充填降本 1/3，三年消纳尾矿 1000 万吨
湖南有色	废渣内部直供通道 + 危废共享中心	固废循环利用率由不足 30% 提升至 90%，年创效超 1 亿元
龙佰攀枝花	外磁式磁选机预选 + 高效选钛捕收剂	选铁回收率高出规划目标 5.96 个百分点，钛资源综合利用率提升至 45%

这些案例共同证明：“物理场分离 + 固废基胶凝材料”的技术组合，已经在不同矿种、不同区域、不同所有制企业中得到验证，具备大规模复制的工程条件。

（四）标准与政策配套

类别	主要内容
国家战略	固体废物综合治理行动（2025 年 12 月国务院常务会议部署）
量化目标	2025 年大宗固废综合利用率 57%；2030 年资源化率超 60%
税收激励	尾矿免征 / 减征资源税；充填置换煤炭减征 50%；综合利用固废暂予免征环境保护税；产品收入减按 90% 计入应税所得
绿色矿山	建设纳入政府绩效考核；多地要求“十五五”末

	95% 大中型矿山建成省级以上绿色矿山
无废建设	113 个城市实施 “无废城市” 建设项目 3000 余项； “无废集团” 试点持续推进
行业标准	《道路用固废基胶凝材料》《铜尾矿作道路材料应用技术规程》《尾矿微粉综合利用技术标准》等已在多地形成

九、结论与推广建议

综合技术原理、工程数据与产业条件，可以给出四条结论和六条推广建议。这些内容既是对本报告分析结果的收束，也可直接作为项目立项与商务沟通的依据。

（一）主要结论

结论一：耦合系统在技术上成立，且逻辑严密。

物理场选矿技术解决“分得开、分得净、分得省”，地聚物胶凝材料解决“用得上、用得稳、用得住”。前者以物理方式把混合物料拆解为有色精矿、可建材化骨料、活性硅铝细料和重金属富集相；后者为后三类物料提供规模化、高值化、稳定的出口，并把重金属永久锁定在类地质矿物的三维网络中。**两者的接口是物料流本身，无需额外适配。**

结论二：经济性已经越过盈亏平衡点。

充填端，低碳胶凝材料替代水泥可使充填成本降低约三分之一，节约胶凝材料 50% 以上；选矿端，源头预选抛废可减少 30%—50% 的无效处理量，后续全流程能耗水耗钢耗降低约 40%；政策端，资源税减免、环境保护税免征、所得税减计形成叠加红利。矿山的尾矿库不再只是成本中心，而正在成为利润来源。

结论三：环境与安全风险得到根本性化解。

从“末端堆存”转向“源头减量”，意味着尾矿库的增量被从根上遏制。已有案例实现尾矿库连续多月零排放、废水 100% 循环、重金属浸出降低 95%、危废内部消化、固废循环利用由不足 30% 提升至 90%。**“无废采选冶”不是愿景表述，而是已被验证的工程状态。**

结论四：产业条件成熟，具备大规模复制基础。

技术供给端已形成从设备、材料到工艺包的完整体系；产业化载体已在全国 27 个省区布局项目；行业内已有涵盖黑色、有色、黄金、磷化工等多个领域的成功案例可供对标；标准与政策配套持续完善。这是一个“万事俱备”的推广窗口期。

（二）推广建议

建议一：以“一矿一策”方式推进，不做通用方案硬套。

不同矿种的固废化学组成、粒度分布、活性差异极大。铜陵有色的做法值得借鉴：建立针对不同矿山的**尾砂数据库**，基于数据库快速检索相适应的胶凝材料及利用方案，实现“一矿一策”。建议在项目前期开展系统的物料表征（化学组成、矿物组成、粒度分布、活性评价），据此定制物理场分选工艺与胶凝材料配方。

建议二：优先在“高污染风险 + 高运输成本”矿区落地。

判断标准有三条：一是尾矿中含有重金属等环境风险组分，堆存成本高、隐患大；二是矿区周边建材市场需求旺盛或井下充填需求大；三是运输半径短、本地消纳能力强。满足这三条的矿区，投资回收期最短、示范效应最强。

建议三：把“源头分选”作为投资的第一优先级。

在资金有限的情况下，优先投资物理场预选抛废系统，其投资小、见效快、回报周期短，且能立即产生“减量”效益。待预选系统稳定运行、物料性质掌握清晰后，再推进地聚物胶凝材料产线建设，形成完整闭环。

建议四：主动对接政策工具，把政策红利计入项目模型。

资源税减免、环境保护税免征、所得税减计、绿色矿山评价加分、绿色信贷支持等政策工具应当全额计入经济性测算。部分地区的实践表明，仅资源税减免一项即可使企业税负下降一个数量级。建议在项目立项阶段即与当地税务、自然资源、生态环境部门对接，明确适用条件与申报路径。

建议五：建立“分类分级”的产品体系，避免低价无序竞争。

物理场分选产出的物料应按品级定向匹配下游：高品位料流向精细化工、高值材料；中品位料流向传统建材；低品位料流向充填和路基材料。铜陵有色、树岭坪磷矿的“分质分选、优料优用”实践证明，分级利用是资源价值最大化的核心路径。

建议六：推动标准建设，抢占行业话语权。

建议联合行业协会、科研院所，在固废基胶凝材料的性能指标、检测方法、施工规范、环境风险评估等方向推动团体标准和地方标准立项，把成熟的项目经验转化为可复制的技术规则。

（三）结语

采矿、选矿、冶炼是人类获取物质财富的基础产业，也是固废产生量最大的产业。长期以来，这三个环节的固废治理依赖“堆存—封场—复垦”的线性模式，本质上是把问题从当代转移给未来、从企业转移给社会。

物理场选矿技术与地聚物胶凝材料的耦合应用，提供了一种不同的可能：**让每一吨矿石在离开地下的那一刻，就注定不会成为垃圾**。分离在源头完成，胶结在末端闭环，污染物在晶格中被锁定，碳排放在常温中被省略。这不是对传统采选冶流程的修补，而是对它的重新组织。

当尾矿库不再增长、当废石变成建材、当冶炼渣返回充填体、当固废综合利用率从不足30%提升至90%，**“无废采选冶”**所描绘的，其实是一个**资源效率更高的工业形态**。这条路已经有人走过，也已经有了可复制的图纸。

参考文献

1. 李思佑, 李丽匡, 张宏亮, 等. 钨矿预选抛废技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(3): 89–95.
2. 张礼, 王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023.
3. 物理选矿（百科条目）. 分选原理、方法分类与应用领域.
4. JXSC Mining. Waste to Wealth: Smart Tech Boosts Iron Ore Profits by \$100M.
5. JXSCTeam. Pre-Concentration: Cutting Costs by Rejecting Waste Early.
6. 国务院国有资产监督管理委员会. 中国五矿以资源节约循环利用推动冶金矿业高质量发展.
7. 湖南省工业和信息化厅. 水口山有色金属固废综合治理入选全省正面典型案例, 2026-04-15.

8. 衡阳市人民政府. 无废城市 | 科技赋能固废治理 产业协同绿色转型, 2026-04-13.
9. 中国经济网. 甘肃金昌 点“废” 成金深度循环, 2025-12-24.
10. 中国矿业报. 从挑肥拣瘦到吃干榨尽 (绿色矿业专题报道) , 2026-09-08.
11. 邓福南, 中国环保产业协会固体废物专业委员会, 中国散装水泥推广发展协会固废综合利用专业委员会. 固废协同资源化综合利用破解环资难题的探索, 2025.
12. 利用低硅铁尾矿制备地质聚合物的研究[J]. 中国矿业.
13. 磷尾矿、磷石膏和黄磷渣的地质聚合反应资源化利用研究进展. 固废研究中心.
14. 利用碱激发地质聚合反应固化尾矿研究进展[J]. 矿产保护与利用.
15. 有色冶金渣制备胶凝材料研究进展[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(5): 621.
16. 固废基地聚物胶凝材料: 理论、应用与发展. 工业副产石膏资源化利用工程技术中心.
17. Palma G, Bolaños H, Huamani R, et al. Optimization of Geopolymers for Sustainable Management of Mine Tailings[J]. Minerals, 2024, 14(10).
18. Stabilization and solidification of iron ore tailings using alkali-activated geopolymer[J]. Scientific Reports.
19. Geopolymer Technologies for Mine Tailings Valorization. Nature Index Topic Summary.
20. 铜、锰渣 / 粉煤灰地质聚合物的制备及固化机理研究 (学位论文) .
21. The Utilization of Alkali-Activated Lead-Zinc Smelting Slag for Chromite Ore Processing Residue Solidification/Stabilization[J]. IJERPH, 2021, 18(19): 9960.
22. 低碳固废胶结黄金尾矿矿山充填的研究[J]. 采矿技术.
23. Li S, Guo Z, Ma Y, et al. Preparation and Optimization of Backfill Slurry from Ultrafine Tailings in Tianxing Iron Mine[J]. Processes, 2026, 14(4).
24. 外场强化技术在高纯石英砂制备中的应用进展[J]. 金属矿山, 2026, 55(5): 237.
25. 含重金属尾矿的绿色资源化利用研究进展. 冶金废气资源化国家地方联合工程研究中心.
26. Ultrasonic Enhancement for Mineral Flotation: Technology, Device, and Engineering Applications[J]. Minerals, 2024, 14(10): 986.
27. 铜陵市人民政府. 【“无废城市” 建设】 “以废治废” 让矿山披绿重生.
28. 铜陵有色金属集团数字报. 蹚出尾砂 “变废为宝” 新路径, 2025-01-07.
29. 池州市自然资源和规划局. 关于市五届人大五次会议第 20 号建议的答复.
30. 陕西省自然资源厅等. 关于持续推进绿色矿山建设的通知, 2025-01-10.
31. 重庆市人民政府网. 资源税法实施六年 重庆企业累计减免资源税 8.8 亿元, 2026-09-02.
32. 华筑绿建 (北京) 科技有限公司. 褐煤的聚磁永磁强磁提质技术及其应用, 2025.
33. 中华人民共和国资源税法及相关地方实施细则.