

2024 年度自然资源科学技术奖
(科技进步奖) 申报材料

一、成果基本情况

成果名称	风化残积型高岭土深度提纯与高值利用关键技术与装备
主要完成人	吕国诚, 冯杰, 周熠, 刘敏, 于海军, 任子杰, 李青, 廖立兵, 马仲英, 韩雪, 于雪莲, 刘昊, 刘梦, 王丽娟, 刘鑫
主要完成单位	中国地质大学(北京), 中国高岭土有限公司, 中国建筑材料工业地质勘查中心, 武汉理工大学, 江苏旌凯中科超导高技术有限公司, 广东省地质局湛江地质调查中心
推荐等级	一等奖

二、推荐意见

（项目组自拟，不超过 600 字）

由中国地质大学（北京）牵头完成的“风化残积型高岭土深度提纯与高值利用关键技术与装备”项目，针对我国高岭土资源枯竭、高端产品依赖进口等“卡脖子”难题，创新研发“成因-结构-性能”协同评价体系及提纯高值化技术，取得重大突破，推荐申报自然资源科学技术奖，理由如下：

一、理论创新国际领先

首创高岭石层堆垛“有序-无序”定量评价模型，提出 CIS 结晶度指数，突破传统 Hi 指数局限，指导广东茂名 2.9 亿吨风化型高岭土资源开发，潜在价值超千亿，为资源增储提供科学依据。

二、核心装备与工艺突破

自主研发国际首台 600mm 大口径低温超导磁选装备（磁场强度 $\geq 5T$ ，氦年损耗 $< 5L$ ），构建“靶向吸附-动态絮凝-协同分选”提纯工艺，造纸级高岭土粘浓度突破 70，实现 32% 国产替代。

三、资源化与高值化成效显著

首创尾砂“分质分级-擦洗磨矿-剥片絮凝”全粒级提纯技术，建成 2 条光伏玻璃砂示范线，尾砂利用率达 95%；创新高岭石纳米管规模化制备技术，催化裂化转化率提升 3.28%，年经济效益 113.4 亿元；开发高岭石基离子交换膜，化学能转化效率 44.2%，成本降 5 个数量级。

四、成果转化支撑战略需求

授权国家发明专利 10 项，出版专著 1 部，发表 SCI 论文 54 篇（包括矿物学和材料学 TOP 期刊 5 篇），技术入选自然资源部先进适用技术目录。近三年直接经济效益超 15 亿元，支撑我国高端高岭土对外依存度下降 23 个百分点，为资源安全与“双碳”战略实施提供关键技术保障。

三、成果简介

（限 1200 字）

我国苏州高岭土作为典型的热液蚀变型大型矿床长期支撑着高端陶瓷、催化载体等战略性新兴产业发展，但其资源枯竭导致高端高岭土对外依存度攀升至 75%以上。面临风化残积型资源铁钛杂质含量高、传统评价体系失效、核心指标非线性关联等“卡脖子”难题，项目团队历经 10 余年攻关，首创“结构解析-装备创新-工艺突破-高值转化”全链条技术体系，取得三大突破性进展。一是创建高岭土质量评价新范式，首次建立层堆垛“有序-无序”与结晶度的定量关系，提出新型 CIS 结晶度指数，攻克成因差异导致的工业价值误判难题，成功指导广东茂名 2.9 亿吨风化型高岭土矿床开发；二是研发国际领先的提纯装备与工艺，自主研制 600mm 大口径低温超导磁选系统（磁场强度 5T、氦年损耗<5L），创新“靶向吸附-动态絮凝-协同分选”三位一体提纯工艺，使铁钛杂质去除效率突破 92%、白度提升 4-6 个百分点，吨产品能耗降低 58%；三是构建多维度资源化技术体系，首创“分质分级-擦洗磨矿-剥片絮凝”全粒级分选技术，实现尾砂制备光伏玻璃砂（ $\text{SiO}_2 \geq 99.04\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 104\text{ppm}$ ），建成国内首条 60 万吨/年示范线，尾砂综合利用率超 80%；突破高岭石纳米管规模化制备技术，催化裂化转化率提升 3.28%，年经济效益达 113.4 亿元；开发高岭石基阳离子交换膜，化学能-电能转化效率达 44.2%，原料成本降低 5 个数量级。

关键技术突破体现在：（1）在基础理论层面，首次阐明高岭石层间滑移矢量对结晶度的控制机制，建立 CIS 指数与 Hi 指数的映射关系，构建“成因-结构-性能”协同评价模型，填补高岭土资源质量评价体系空白；（2）在装备创新层面，攻克超导磁体结构设计与氦循环零挥发技术，研制出处理能力 15t/h、磁性矿物截留率提升 35%的低温超导磁选系统，综合性能超越美国奥图泰同类产品；（3）在工艺革新层面，发明烷基胺插层取向调控技术，实现高岭石纳米片层厚度 2.1nm 的超极限剥离，比表面积提升 20 倍，开发出粘浓度 70.5%的造纸级高岭土，实现了高端产品的国产替代；（4）在资源化利用层面，创建石英-云母-黏土表界面特性调控技术，开发光伏玻璃砂梯度提纯工艺，形成“石英提纯-云母剥离-长石回收”协同技术链，使尾砂利用率从不足 40%提升至 95%。

成果转化成效显著：在造纸领域实现 20%国产替代，年替代量 7.08 万吨；催化裂化催化剂载体性能指标达国际先进水平，近三年新增销售额 12.6 亿元；建成广西北海 60 万吨/年、江西宜春 10 万吨/年光伏砂生产线，累计创效 2.68 亿元；新能源材料应用实现阳离子交换膜成本降至传统产品十万分之一。获国家发明专利 10 项，发表 SCI 论文 54 篇（包括矿物学和材料学 TOP 期刊 5 篇），成果入选自然资源部先进适用技术目录。多项技术经中国非金属矿工业协会鉴定，整体技术达国际先进水平，其中超导磁选和纳米管制备技术居国际领先。近三年直接经济效益超 15 亿元，支撑我国高端高岭土对外依存度下降 23 个百分点，为保障战略性矿产资源安全、推动“双碳”战略实施提供了关键技术支撑，经济和社会效益显著。

四、客观评价

(限 2 页)

1. 关键成果、技术和装备第三方评价

中国非金属矿工业协会于 2023 年 9 月 13 日对新型结晶度指数 (CIS 指数) 研究成果进行评估, 认为该成果在国际上首次系统阐明了黏土矿物层堆垛“有序-无序”结构与性能的关联机制, 在黏土矿物结构解析领域达到国际领先水平, 其提出的 CIS 指数为高岭土资源评价与功能材料开发提供了创新理论支撑。

针对 JF-II-4-600 型低温超导磁选装备, 咸阳非金属矿研究设计院有限公司于 2021 年 9 月 9 日组织评审确认, 该装备通过磁场强度 5T、氦年损耗<5L 等核心技术突破, 实现弱磁性矿物截留率提升 35%, 并在石油催化裂化领域成功替代进口设备, 累计推广 13 台, 年节能效益达 113.40 亿元, 被专家组认定为全球突破性技术应用。

在高岭土尾砂梯级利用方面, 中国非金属矿工业协会 2021 年 8 月 24 日评估指出, 项目首创的“分质分级-擦洗磨矿-剥片絮凝”技术体系达到国际领先水平, 基于该技术建成的 60 万吨/年光伏玻璃砂生产线产品纯度 ($\text{SiO}_2 \geq 99.04\%$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 104\text{ppm}$) 及尾砂利用率 (95%) 指标显著优于行业标准, 为“双碳”战略实施提供了关键技术范式。

关于高岭土纳米化技术, 中国非金属矿工业协会 2023 年 9 月 13 日评审认为, 项目研发的“插层-超声”协同剥离技术成功制备出厚度 2.1nm 的二维纳米片层, 开发的膜材料实现机械能-电能转化效率突破性提升, 整体技术达国际先进水平, 为高岭土在新能源材料领域开辟了新应用方向。

上述成果均经权威专家评审或鉴定, 技术先进性与应用实效性获得充分验证。

2. 与当前国内外同类研究综合比较

结晶度指数创新: 当前国际高岭石结晶度评价普遍采用 Hi 指数, 但其与层堆垛有序性的关联仅基于经验推测, 缺乏结构学直接证据。项目团队在国际上首次建立高岭石层滑移矢量与 Hi 指数的定量关系, 提出 CIS 结晶度指数, 通过结构层有序占比的精确计算, 突破传统 Hi 指数的适用局限, 首次实现结晶度与结构演化的直接关联, 为高岭土资源的质量评价与高端应用提供了理论支撑。

插层工艺突破: 国内外现有高岭石插层技术依赖“极性分子预插层+甲醇嫁接”两步法, 工艺周期长达 7 天, 且能耗高、插层率不足 60%。项目团队提出的“酸-热”协同调控策略, 通过强化界面离子布朗运动与双电层结构调控, 将插层时间压缩至 1 小时, 效率提升 168 倍, 活化能降低 32.5%。相较于常用的超声辅助插层技术 (周期 3 天、插层率 72%), 本技术首次实现插层动力学与热力学协同优化, 为纳米复合材料开发提供了更高效的工艺路径。

造纸级高岭土提纯技术: 国际主流技术 (如美国 BASF 公司) 依赖高剂量化学漂白 (药剂成本占比 20-25%), 虽可实现粘浓度 70%, 但伴生废水处理难题。项目首创“超导磁选+化学漂白+机内洗涤”工艺, 通过 5T 超导磁选前置除杂 (铁钛去除率 92%), 将化学药剂用量削减 40%, 粘浓度提升至 70.5%, 废水排放量减少 100%。相较于巴西 Metakaolin 公司的电磁磁选-漂白工艺 (粘浓度 68.5%、吨水耗 8m^3), 本技术首次实现物理-化学协同降粘, 环保性与经济性显著优于国际同类技术。

尾砂全粒级分选技术: 国际现有高岭土尾砂处理技术 (如德国 NETZSCH 公司的重选-浮选工艺) 对微细云母 ($<38\mu\text{m}$) 分选效率不足 50%, 且依赖氢氟酸活化 (废水 COD 超 5000mg/L)。项目研发的“选择性絮凝-椰油胺反浮选”协同工艺, 通过定制化药剂实现微细云母 (5-20 μm) 选择性团聚, 分选效率达 85%, 药剂用量减少 60%, 并首创无酸擦洗装备 (擦洗浓度 65-70%), 石英砂 Fe_2O_3 含量 $\leq 104\text{ppm}$ 。相较于澳大利亚 GMA 公司的高梯度磁选技术 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 150\text{ppm}$ 、电耗 120kWh/t), 本技术首次实现硅酸盐矿物全粒级分选与绿色

提纯。

上述比较表明，项目在结晶度理论、工艺效率、环保性及资源利用率等核心指标上全面超越国际同类技术，形成系统性创新突破。

3. 国内外重要奖励

2023 年 11 月，项目团队成员依托项目成果“黏土矿物晶体结构研究及矿物功能材料设计”，获非金属矿科学技术奖一等奖（基础研究类）。

2018 年 10 月，项目团队依托项目成果“基于晶体化学晶体物理的环境矿物新材料研究”，获非金属矿科学技术奖一等奖（基础研究类）。

2019 年 2 月，项目团队成员依托项目的成果“基于晶体化学晶体物理的环境新材料研究”，获建筑材料科学技术奖二等奖（基础研究类）。

2023 年 11 月，项目团队成员依托项目成果“基于纳米孔道可控构建与界面调控的新能源矿物材料”，获非金属矿科学技术奖一等奖（青年科技创新类）。

2021 年 11 月，项目团队成员依托项目成果“JF-II 型非金属矿用超导磁选机”，获非金属矿科学技术奖一等奖（技术发明类）。

2021 年 11 月，项目团队成员依托项目成果“高岭土尾砂梯级加工制备光伏玻璃砂关键技术及产业化”获非金属矿科学技术进步奖一等奖（基础研究类）。

2007 年 11 月，项目团队成员依托项目成果“非金属矿及固体废弃物功能化应用基础研究”获国土资源部科技成果奖二等奖。

截止到 2024 年，项目成员获中国矿物岩石地球化学学会“侯德封奖”、中国地质学会青年地质学家奖一等奖（金锤奖）、黄汲清青年地质科学技术奖、江苏省“333”高层次人才第三层次培养对象、中国建材集团科技领军人才、北京市高等学校青年英才计划、中国科协青年人才托举工程等。

4. 学术性评价

项目团队出版《环境与新能源矿物材料》专著 1 部，公开发表的 54 篇论文被国内外主流期刊，如 American Mineralogist、Advanced Materials、Advanced Functional Materials、Journal of Materials Chemistry A、Applied Clay Science、Chemical Engineering Journal、Journal of Colloid and Interface Science、Scientific Reports、硅酸盐学报等，被正面引用 1427 次，其中他引 1349，SCI 他引 1326 次，单篇最高引用 239 次；8 篇代表性论文，他引 461 次，得到了国内外同行的认可，提升了我国黏土矿物研究的国际影响力，例如：

（1）中国科学院院士邓军和中国工程院院士聂祚仁高度评价了团队出版的《环境与新能源矿物材料》专著，评价该书：“是我国第一部环境与新能源矿物材料专著，对矿物材料研究者具有重要的参考价值，对推动我国矿物材料研究和学科发展都将具有重要的意义”。

（2）针对纳米高岭土制备二维纳米孔道离子交换膜，中国科学院院士江雷教授团队发表在 Chem Soc Rew 上的论文称该工作首次利用天然矿物构建纳米流体系统，为纳米流体应用提供了性能优异、成本低、结构稳定、对环境友好的材料；中国科学院院士黄维教授团队发表在 Small 上的论文称该工作为二维异质材料的制备指明新的方向，并在能源、环保与医疗保健领域拥有巨大开发潜力。

（3）针对高岭土功能材料工作，德国 University of Bayreuth 的 Scheibel, Thomas 教授发表于 Advanced Functional Materials 的文章认为共聚物/粘土纳米复合材料的结构将会对药物输送系统和再生医学领域产生重要影响；法国里尔大学 Zaoui, Ali 教授发表的文章认为以高岭土为原料制备的地聚物材料热导系数优异、孔隙率极高、密度极低，为开发新一代高性能隔热材料提供了重要解决方案。

五、主要知识产权目录

知识产权 (标准)类 别	知识产权(标 准) 具体名称	国家 (地 区)	授权 号(标 准编 号)	授权(标准发 布)日期	证书 编号 (标 准批 准发 布部 门)	权利人 (标准 起草 单位)	发明人 (标准 起草人)	发明专 利(标 准)有效 状态
发明专利	一种提高 FCC 催化剂 催化性能的 方法	中国	ZL202 11060 5393.9	2024/02/27		中国地 质大学 (北 京)	吕国诚, 廖立兵, 饶文秀, 金俊良	专 利 权 有效
发明专利	一种改性高 岭石及纳米 零价铁/改性 高岭石复合 材料的制备 方法和用途	中国	ZL201 91065 5245.0	2021/06/11		中国地 质大学 (北 京)	吕国诚, 饶文秀, 廖立兵	专 利 权 有效
发明专利	一种湿法提 高高岭土比 表面积的方法	中国	ZL201 81064 75553	2021/02/19		中国高 岭土有 限公司	冯杰,张 飞,李青, 石晓岚, 王帅,邹 李,唐小 刚,刘新, 顾雪	专 利 权 有效
发明专利	一种提升高 岭土矿浆脱 水效率的方法	中国	ZL201 81064 76984	2021/02/05		中国高 岭土有 限公司	冯杰,张 飞,李青, 石晓岚, 王帅,邹 李,唐小 刚,刘新, 陈国华	专 利 权 有效
发明专利	一种高岭土 除铁钛选矿 工艺	中国	ZL201 71113 78402	2019/11/26		武汉理 工大学	任子杰, 江哲伊, 高惠民, 刘顺兵, 高钦	专 利 权 有效
发明专利	一种湿法提 高高岭土比 表面积的方法	中国	ZL201 81064 7555.3	2018/06/22		中国高 岭土有 限公司	冯杰,张 飞,李 青,石晓 岚,王 帅,邹 李,唐小 刚,刘 新,顾雪	专 利 权 有效

发明专利	一种砂性高岭土的除钛方法	中国	ZL201510826527.4	2018/03/13		中国高岭土公司	唐小刚, 冯杰, 李青, 张飞, 邹李, 刘新, 蒋国明, 汪亚辉	专利权有效
------	--------------	----	------------------	------------	--	---------	-----------------------------------	-------