稀土冶金全流程智能仿真实验教学指导书

本指导书面向承担本项目实验教学的教师，用于组织课前准备、课堂实施、AI 助教使用、过程评价和课后拓展。实验以两类稀土矿到单一钕金属的连续工艺链为主线，强调矿物差异、参数优化、物料衡算、安全环保和数据解释之间的联系。

一、课程基本信息

项目	内容
课程名称	稀土冶金全流程智能仿真实验
实验类型	综合设计型、研究探索型、虚拟仿真实验
适用专业	冶金工程、矿物加工工程、化学工程与工艺、材料化学及相关专业
建议学时	课堂实验 4 学时，课前预习和课后复盘另计
实验主线	矿物识别—选矿—分解或浸取—净化—萃取—沉淀—灼烧—熔盐电解—产品检测

二、实验教学定位

本实验将稀土冶金典型工段组织为可反复运行的数字化实验流程。学生根据矿样组成、赋存状态和环境约束选择工艺路线，输入过程参数，观察动态结果，完成产品质量评价和全流程分析。平台中的 AI 助教负责状态检查、数据解释、异常诊断和学习建议；工艺计算、物料衡算、产品检验和安全联锁由仿真核心执行。

本实验中“单一钕”是教学目标产品名称，具体纯度、允许杂质和合格阈值由课程数据包配置。学生不得将仿真预测值、AI 建议值或合成教学数据表述为真实企业生产数据。

三、教学目标

1. 知识目标

- 掌握独居石、氟碳铈矿、磷钇矿、混合型稀土精矿和离子吸附型稀土矿的主要特征。
- 理解破碎、磨矿、浮选、磁选、重选和离子交换浸取的基本原理。
- 掌握分解、浸出、净化、沉淀、萃取、灼烧和熔盐电解的工艺逻辑。
- 掌握分配比、萃取率、分离系数、浸出率、电流效率和全流程回收率的计算方法。
- 理解放射性物料、酸碱废液、含氟废气、有机废液和高温熔盐的安全管理要求。

2. 能力目标

- 根据矿物组成、元素赋存状态和目标产品要求选择工艺路线。
- 合理设定 pH、药剂浓度、相比、萃取级数、灼烧温度和电解参数。

- 能够阅读 AI 反馈中的曲线、报警、物料账和产品检测结果。
- 能够解释实验偏差，设计对照实验并提出可验证的优化方案。
- 能够完成逐元素物料衡算、成本分析和全流程环境指标评价。

3. 素养目标

- 形成全流程系统思维、证据意识、工程决策意识和安全环保责任意识。

四、教学重点与难点

类别	内容
教学重点	矿种决定工艺路线；浸出率、纯度、回收率、能耗和环保指标的权衡；串级萃取设计；熔盐电解过程控制；全流程物料衡算。
教学难点	区分硬岩矿与离子吸附型矿路线；理解理论级数与实际级数差异；解释 AI 反馈的因果关系；正确处理放射性和危险废物。

五、教学内容与步骤安排

教学模块	对应步骤	主要内容
矿物识别与选矿	1—8	矿样识别、破碎磨矿、浮选、磁选、重选、离子型矿浸取与路线比较
分解、浸出与放射性处理	9—14	独居石碱分解、优溶、Th/U 分离、离子型矿净化、废物处置
溶剂萃取与串级分离	15—24	萃取剂选择、单级萃取、洗涤、反萃、串级设计、运行优化
沉淀、灼烧与工段衔接	25—30	沉淀剂选择、过滤洗涤、灼烧制备氧化物、产品质量检验及工段衔接
熔盐电解制备金属钕	31—38	电解质配制、预热脱水、电极装配、电解运行、铸锭、检测和优化
全流程分析与答辩	39—40	总回收率、桑基图、敏感性分析、项目总结和创新答辩

说明：本表按现有 40 步实验模块组织。若平台采用 30 次有效交互统计，可将工段总结、安全环保培训、流程衔接和答辩标记为支持性步骤，不改变其教学任务。

六、教学实施流程

1. 课前准备

- 教师发布实验任务书、矿样数据包、产品规格和预习资料。
- 教师检查平台账号、浏览器、网络、数据记录和 AI 知识库版本。
- 学生复习矿物加工、湿法冶金、溶剂萃取、电化学和实验室安全知识。
- 学生完成课前测试，绘制初步流程图并提出至少一个可检验的工艺假设。

2. 课堂实施

1. 说明任务背景、目标产品、参数范围和安全边界。
2. 完成矿样识别、前端选矿、分解或浸取及料液质量评价。
3. 选择一股合格料液进入萃取和串级分离。
4. 完成沉淀、灼烧、氧化物检测和熔盐电解。
5. 完成金属钕检测、全流程衡算、成本分析和敏感性分析。
6. 提交实验报告，完成 AI 提问和教师集中点评。

3. 课后拓展

- 分析一次失败操作或异常报警。
- 完成一次参数对照或优化实验。
- 提交全流程物料衡算表、产品检测单和改进方案。

七、AI 助教使用规范

反馈层级	AI 功能	教师引导
即时约束	检查单位、范围、前置步骤和安全联锁。	要求学生先修正输入，再解释原因。
机理解释	根据状态变量解释回收率、纯度、能耗和污染物变化。	要求学生引用检测数据或曲线证据。
探究建议	推荐下一组对照实验或参数调整方向。	要求学生说明假设、变量和预期结果。
课后评价	生成报告反馈和能力画像。	复核评分证据，不以 AI 文本替代教师判断。

AI 反馈应遵循“结果—原因—建议”结构。AI 不应直接替学生完成参数选择，不应更改物料衡算、检测结果或评分记录，也不应把模型预测值表述为真实工业数据。

八、核心计算模型

1. Bond 磨矿能耗模型

$$W=10W_i(1/\sqrt{P_{80}}-1/\sqrt{F_{80}})$$

W 为单位质量磨矿能耗，Wi 为 Bond 功指数，F_{80} 和 P_{80} 分别为给料和产品 80%通过粒径。

2. 浸出率

$$\alpha=m_{RE,liquor}/m_{RE,ore}\times100\%$$

也可根据初始稀土量和残渣稀土量计算。

3. 萃取分配比和萃取率

$$D=C_{org}/C_{aq}；\ E=D(O/A)/(1+D(O/A))\times100\%$$

多元素分离还需要计算分离系数βA/B＝DA/DB。

4. 稀土草酸盐沉淀平衡

$$K_{sp}=[RE^{3+}]^2[C_2O_4^{2-}]^3$$

沉淀完全度受溶度积、草酸根浓度和 pH 共同影响。

5. 熔盐电解理论产量

$$m=\eta MIt/zF$$

Nd^{3+}还原为 Nd 时 z＝3；η为电流效率。实际产量还受投料、氧化损失和机械夹带影响。

6. 全流程总回收率

$$R_{total}=R_1R_2\cdots\ R_n$$

各工段回收率应以小数形式代入。

九、过程评价方案

评价项目	分值	评价依据
矿样识别与路线选择	15	识别正确，路线与矿物组成、目标产品相匹配。
选矿、分解和浸取	20	参数合理，能够解释回收率、品位和环保指标变化。
萃取与串级分离	25	萃取剂、相比、级数和进料位置选择合理。
沉淀、灼烧和产品检测	15	产品质量达标，检测和质量评价规范。
熔盐电解与安全操作	15	完成干燥、保护气、电极和异常控制。
衡算、报告和创新分析	10	数据闭合，论证有证据，建议具有可行性。

产品最终不合格不等于实验成绩为零。学生能够准确定位问题、给出数据证据并完成有效修正时，应获得相应的过程能力分。安全联锁违规须扣分并要求重新完成安全操作。

十、教师评价注意事项

- 评价学生的首次尝试、修正过程和最终结果，不只评价最后一次运行。
- 对超出模型标定范围的参数，要求学生标注“不确定性”或“探索性结果”。
- 要求学生用原始检测数据、曲线和物料账支持 AI 反馈的解释。
- 不将生成式 AI 文本直接作为实验报告结论。
- 不把教学合成数据描述为企业真实生产数据。

十一、推荐参考资料

- Jordens A, Cheng Y P, Waters K E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. Minerals Engineering, 2013, 41: 97—114.
- Zhang J, Zhao B, Schreiner B. Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements. Springer, 2016.
- Xie F, Zhang T A, Dreisinger D, Doyle F. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. Minerals Engineering, 2014, 56: 10—28.
- Zhu H. Rare Earth Metal Production by Molten Salt Electrolysis. Encyclopedia of Applied Electrochemistry, 2014.