

# 关键金属冶金的科学基础重大研究计划

## 2026 年度项目指南

关键金属是指新能源、电子信息等战略性新兴产业发展必需、供应风险较大且需要重点保障的稀有、稀散、稀土与稀贵等金属。基于冶金产业升级与战略性新兴产业供应链安全，推进实施“关键金属冶金的科学基础”重大研究计划项目，设立本指南。

### 一、科学目标

面向国家重大战略需求，聚焦新能源、电子信息等领域用关键金属，探索关键金属元素富集分离与纯化的新机制，建立关键金属元素超常富集、相似分离、超纯制备的新方法，形成强选择性的冶金技术体系与科学基础，构建关键金属冶金的研究新范式，推进冶金产业升级，保障关键金属供应链安全。

### 二、核心科学问题

本重大研究计划围绕以下三个核心科学问题展开研究：

（一）关键金属元素的富集提取机制。

关键金属元素的富集提取新体系；复杂溶液体系中关键金属元素的富集提取新机制；熔盐分离体系中关键金属元素超常富集新过程。

（二）关键金属相似元素的高效分离原理。

关键金属元素的相似性、“主客体”作用与靶向识别新机制；关键金属相似元素的高选择性分离新原理及过程调控。

（三）关键金属超纯制备过程调控规律。

关键金属制备过程中杂质元素迁移规律、多场耦合纯化机理与过程强化机制；超纯关键金属材料的晶相演变与遗传阻断新机制。

### **三、2026 年度资助研究方向**

基于科学目标与核心科学问题，设立培育项目、重点支持项目、集成项目，形成关键金属冶金的新思路，建立关键金属冶金理论与技术新体系，推动关键金属冶金的重大工程实施与重点产品开发。

#### **（一）培育项目。**

超越传统冶金研究范式，强调形成“强选择性”冶金反应新机制、新原理、新思路。优先支持思路新颖、颠覆性理论与方法探索项目，研究方向如下：

#### **1. 关键金属元素的富集提取新机制。**

主要包括但不限于：1) 关键金属元素选择性提取原理与新方法；2) 复杂混合分散相的物理、化学、生物等超常富集新机制；3) 关键金属冶金过程热力学、动力学及过程强化新方法。

#### **2. 关键金属相似元素的分离新方法。**

主要包括但不限于：1) 关键金属相似元素、同位素分离原理与新方法；2) 共伴生关键金属相似元素的多尺度分离新机制；3) 关键金属相似元素分离过程动力学与 AI 赋能制造。

#### **3. 关键金属的超纯制备与检测新体系。**

主要包括但不限于：1) 关键金属超纯制备过程中杂质相间迁移与过程强化原理；2) 关键金属的多物理场超纯制备新技术；3) 超纯关键金属中痕量杂质检测新方法。

## (二) 重点支持项目。

超越大宗冶金研究范式，强调形成“强选择性”冶金反应理论创新与新体系构建。优先支持科学问题明确、学术思想新颖、能够形成技术与产品支撑，有望在新能源、电子信息产业及重大工程领域实现突破的项目，研究方向如下：

### 1. 稀溶液/大宗固废的提取冶金与资源开发。

(1) 关键金属稀溶液的超常富集。针对稀溶液（如海水/工业废液）中关键金属超常富集的要求，创新金属离子的溶液化学特性强化、分离过程平衡与调控、药剂新构型设计等超常富集方法，构建稀溶液提取冶金新体系并实现资源有效开发。如稀溶液的关键金属离子回收率达 99%，单级富集比大于 100。

(2) 大宗固废的关键金属超常富集。针对大宗固废（如乏燃料/赤泥/高炉尘泥）关键金属元素富集资源化难题，创新关键金属元素诱导转化与氧化-还原反应机制、选择性提取与特异性识别方法，建立基于大宗固废的高选择性富集提取新机制，推动大宗固废高质化资源开发工程实践。如乏燃料的铀收率 $\geq 99\%$ ， $\text{UO}_2$ 纯度 $\geq 95\%$ ；赤泥的钪收率 $\geq 65\%$ ，氧化钪纯度 $\geq 3\text{N}$ 。

(3) 外空/海洋的关键金属资源开发。针对外空/海洋金属资源开发能力建设的布局要求，研究月球或金属质小行星的关键金属类型与赋存特点，或我国海域及深海区块的镍/钴/稀土资源禀赋，探索极端环境条件的关键金属冶金方法与机制，形成专属性技术体系与装备，为国家战略实施提供基础支撑。

## **2. 相似元素分离的方法创新与过程保障。**

(1) 元素特性强化的相似分离新方法。针对复杂体系的相似元素分离强化难题,探索如激光激发、热场驱动、溶液相化学调控等分离强化方法,揭示其本征差异性放大机理,创新能质转化与传递方法,突破靶向驱动的分  
离极限。以高纯碲中相似元素分离新方法为例,5N 级碲中相似元素杂质含量 0.5 ppm 以下。

(2) 分离过程强化的相似分离动力学。针对多元多相多尺度分离强化及其动力学问题,创新基于流体动力学适配的界面反应与离子输运的协同强化方法,揭示流动、界面反应与动态传质耦合机制,阐明元素分离传质动力学与过程强化机制,开发相似元素分离新方法  
与过程模型软件。

(3) 复杂相似元素分离体系与新方法。针对复杂体系的分离与纯化及其系统难题,创新相似元素分离的溶液化学方法,融合金属材料纯化要求与特点,构建超常富集、相似分离的溶液化学分离与纯化新机制,实现相似元素分离与纯化的过程与工艺创新(短流程)。以锆钪分离新方法为例,优先萃钪体系分离系数不小于 10,钪纯度 5N5。

## **3. 关键稀散金属的高纯化与材料制备。**

(1) AI 赋能的材料设计与高纯制造。针对稀散金属基础材料的电子级纯化与装备难题,发展数据驱动的材料设计与 AI 赋能制造,通过智能解构明晰电子级材料的构效关系,明晰敏感杂质迁移脱除与纯化方法的映射关系,开发关键稀散金属的材料设计与高纯化制造的智能体。

(2) 电子级纯化的敏感杂质检测突破。针对电子级纯化的敏感杂质和高纯检测难题,揭示激光激发的杂质元素聚集-分散规律,明晰敏感杂质与

性能定量映射关系，鼓励基于大科学装置的系统性研究，实现如激光检测方法、方法与装备的突破（打破国外垄断）；方法与装备的杂质成分检测限达到 ppb 级。

（3）**稀散金属纯化制程与高纯材料制造。**针对稀散金属电子材料高纯化、敏感杂质脱除与组织调控难题，揭示冶金分离的杂质迁移与配分规律，创新材料纯化过程敏感杂质的扩散与有效脱除机制；构建基于溶液相分离与材料端纯化协同的稀散金属纯化新方法，并实现稀散金属的电子级高纯材料开发。

### （三）集成项目。

以重大工程与重点产品为背景或依托，在推进“强选择性”冶金反应的系统集成与产品突破基础上，突出强调学术思想与体系创新。优先支持顶层设计完备，研究基础扎实，学术思路与体系清晰，产学研结合，负责人协调组织能力强，依托单位（包括必要的技术实施单位）的支持与保障能力强的项目，研究方向如下：

#### **1. 复杂关键金属矿产分离富集与资源化突破。**

针对长期难利用的风化氧化钨钼矿、（低铁）钒钛磁铁矿、白云鄂博铌-稀土矿、非传统铍矿的“有矿难利用”问题，创新复杂矿石/矿物分离方法，推进超常富集的冶金体系变革，形成复杂关键金属矿产分离富集与资源化突破。主要科学问题与研究包括但不限于：揭示复杂矿产元素赋存及矿物学赋存规律，发展有效的矿物分离新方法；明晰元素多元共伴生特点及溶液化学特征，创新大规模元素富集分离方法，推进选冶一体化协同，形成长期难利用关键金属资源开发与材料制备新体系。主要目标与指标包

括：指导实施风化氧化钨钼矿开发中试试验，钼选冶回收率 70%，钨选冶回收率 50%，三氧化钼产品纯度 3N5；指导实施（低铁）高钒钛磁铁矿冶金协同提取工程 30 万吨/年，铁/钒/钛回收率 90%，开发 3N 五氧化二钒产品；指导实施白云鄂博铈-稀土矿铈开发中试试验，铈回收率 70%，开发 4N 氧化铈粉末；铍精矿品位 6%，冶金综合回收率 75%，铍纯度 3N5。

## **2. 铀/钚等核级关键金属冶金与高纯材料支撑。**

针对快中子堆/钚基熔盐堆的关键金属分离与纯化难题，构建铀-钚循环与钚-铀循环支撑的冶金科学基础与材料支撑体系。主要科学问题与研究包括但不限于：核级关键金属的冶金物理化学与分离纯化理论；多物理场耦合下关键金属形态的原位表征与转化调控机制；固/液态核燃料制备及纯化，明晰高强度铀基合金的构效关系与强韧化机理，建立核级钚-铀循环熔盐体系的分析方法；核级锆铪、核级石墨等辅助材料的制备与纯化，揭示间隙元素纯化与相似元素分离调控；乏燃料中镅锔元素及其合金的分离与纯化新方法，明晰其提取动力学及控制机理。主要目标与指标包括：铀基合金，除主合金元素外纯度达 3N，碳/氮/氧含量均小于 50 ppm；钚纯度 5N，氟化物的氧含量小于 20 ppm，硼当量小于 5 ppm；核级锆/铪纯度 5N5，氧含量小于 30 ppm，石墨灰分小于 20 ppm，硼当量小于 0.9 ppm；非水介质中铀钚等锕系元素回收率不低于 99%，镅锔系元素分离因子不低于 500。

## **3. 锆超常富集及其同位素/半导体材料纯化制程。**

针对低品位锆的超常富集、半导体材料的纯化制程以及制备难题，形成高选择性锆冶金原理及纯化材料体系，开发多场景高纯锆（或同位素）

重点材料（产品）。主要科学问题与研究包括但不限于：探索锆高纯化制程原理与新方法，揭示不同应用场景的敏感杂质类型及其脱除机制，实现高纯制备以及检测突破；揭示高纯锆单晶的生长规律，创新组织均匀化及其控制方法，实现晶体尺寸与长晶速度突破；明晰锆同位素赋存丰度与组分输运机理，创新锆同位素分离方法及应用；揭示低品位锆煤的锆赋存富集规律，开发热解锆煤的冶金方法，推动锆煤开发突破。主要目标与指标包括：锆纯度 12N~13N（可检），净杂质低于  $1\text{E}10/\text{cm}^3$ ，位错密度  $100\sim4000\text{ cm}^{-2}$ ；核探测级用锆单晶（须满足载流子浓度要求）大于 8N，直径 110 mm、高度 150 mm； $^{76}\text{Ge}$  丰度 85%以上，百克量级  $^{70}\text{Ge}$  同位素丰度不低于 99.9%；指导实施低品位锆煤开发中试工程，锆煤品位 150 ppm，产品锆大于 5%，作业综合回收率大于 80%。

#### **4. 高温难熔金属铌/钨/钛的纯化冶金与材料（器件）制造。**

针对四代核堆、深海舰船等国家重大工程的铌/钨/钛高纯化材料的迫切需求与挑战，推进高温难熔金属铌/钨/钛的关键金属冶金、高纯化结构材料与器件制造，形成高温难熔关键金属高纯化冶金新方法 with 产品（材料/器件）。主要科学问题与研究包括但不限于：阐明铌/钨/钛矿物学与元素化学特征、特定场景高纯化材料的性能特点与要求；揭示间隙元素与敏感杂质的赋存及影响，高纯铌/钨/钛纯化方法与过程强化；揭示铌效应强韧化机制及织构调控，推进核用钨铌合金开发并支撑四代核堆发展；推进核聚变堆用钨材与钨基电子材料开发，阐明结构演变与性能失效关系，明晰复杂服役环境的性能提升机制；推进深海舰船用新型钛材开发，揭示高强高冲击韧性钛合金的组织结构与材料性能关系。主要目标与指标包括：开

发 4N5 钛材，指导建设百吨级工程示范；开发 6N 铌材，支撑百吨级核铌铌合金制造；强韧铌铌合金  $R_m \geq 600$  MPa、 $A \geq 40\%$ ，高温钨铌合金  $R_m \geq 1000$  MPa@900°C、 $A \geq 25\%$ ；核聚变堆用钨材再结晶温度  $\geq 1550^\circ\text{C}$ 、单批次钨坯  $\geq 300$  kg，钨基电子发射材料直流 50 A/cm<sup>2</sup>、寿命超过 250 h；高强韧钛合金  $R_m \geq 950$  MPa、 $A \geq 12\%$ 、 $aKV_2 \geq 50$  J。

### **5. 先进材料导向的稀土分离纯化与材料（器件）开发。**

针对原子先进磁动力、精准医疗、聚变-裂变能源等对稀土材料及高端产品的需求，创新稀土分离纯化新范式、高端材料可控制备，形成高纯原料-高性能材料-高端器件的方法与过程变革。主要科学问题与研究包括但不限于：探索稀土及其化合物、稀土同位素的分离与纯化原理，形成高纯稀土原材料的高效制备新体系；基于 4f 电子结构与多尺度物性融合，揭示稀土元素微观特性与宏观物性关联机制，推进材料功能设计理论与高通量筛选；揭示纳米尺度界面结构调控机制，实现关键材料的性能提升与应用；揭示稀土抗癌生物响应与作用调控机制，推进复杂服役条件下稀土功能材料性能衰减机制与可靠性提升。主要目标与指标包括：生物检测及药用稀土化合物纯度 6N 以上，<sup>160</sup>Gd、<sup>176</sup>Yb 稀土同位素丰度  $> 98.5\%$ ；镧、铈、镨、钕金属纯度 5N 以上；富镧铈稀土永磁材料，镧铈占稀土总量  $\geq 40$  wt.%，最大磁能积  $\geq 40$  MGOe、矫顽力  $\geq 18$  kOe；新型药用抗肿瘤稀土纳米材料一次粒径小于 50 nm；医疗级稀土永磁粉剩磁  $\geq 10$  kG；稀土基中子吸收控制材料的十年燃耗中子吸收损失小于 10%，耐 100 dpa 辐照。

## **四、项目遴选的基本原则**



（一）紧密围绕核心科学问题，注重需求及应用背景约束，鼓励原创性、基础性和交叉性的前沿探索。

（二）优先资助能够解决关键金属冶金的科学难题或超出冶金学传统研究范式的研究项目。

（三）重点支持项目应具有良好的研究基础和前期积累，对总体科学目标有直接贡献与支撑，有望在重大工程领域形成支撑。

（四）集成项目既要有工程背景与材料目标，推动重大工程实施与重点产品开发，同时要强化核心科学问题凝练以及高选择性冶金体系的形成与创新。

## **五、2026 年度资助计划**

拟资助培育项目 10 项，直接费用资助强度约为 60 万元/项，资助期限为 3 年，培育项目申请书中研究期限应填写“2027 年 1 月 1 日 - 2029 年 12 月 31 日”；拟资助重点支持项目 5 项，直接费用的资助强度约为 280 万元/项，资助期限为 4 年，重点支持项目申请书中研究期限应填写“2027 年 1 月 1 日 - 2030 年 12 月 31 日”；拟资助集成项目 3 项，直接费用的资助强度 800 万元/项，资助期限为 4 - 5 年，研究期限起始为 2027 年 1 月 1 日。

## **六、申请要求及注意事项**

（一）申请条件。

本重大研究计划项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题的经历；
2. 具有高级专业技术职务（职称）。

在站博士后研究人员、正在攻读研究生学位以及无工作单位或者所在单位不是依托单位的科学技术人员不得作为申请人进行申请。

(二) 限项申请规定。

执行《2026 年度国家自然科学基金项目指南》“申请规定”中限项申请规定的相关要求。

(三) 申请注意事项。

申请人和依托单位应当认真阅读并执行本项目指南、《2026 年度国家自然科学基金项目指南》和《关于 2026 年度国家自然科学基金项目申请与结题等有关事项的通告》中相关要求。

1. 本重大研究计划项目实行无纸化申请。申请书提交日期为 2026 年 3 月 1 日 - 2026 年 3 月 20 日 16 时。

(1) 申请人应当按照科学基金网络信息系统(以下简称“信息系统”)中重大研究计划项目的填报说明与撰写提纲要求在线填写和提交电子申请书及附件材料。

(2) 本重大研究计划旨在紧密围绕核心科学问题,对多学科相关研究进行战略性的方向引导和优势整合,成为一个项目集群。申请人应根据本重大研究计划拟解决的核心科学问题和项目指南公布的拟资助研究方向,自行拟定项目名称、科学目标、研究内容、技术路线和相应的研究经费等。

(3) 申请书中的资助类别选择“重大研究计划”,亚类说明选择“培育项目”、“重点支持项目”或“集成项目”,附注说明选择“**关键金属冶金的科学基础**”,受理代码选择 T01,根据申请的具体研究内容选择不超过 5 个申请代码。

**培育项目和重点支持项目的合作研究单位不得超过 2 个，集成项目合作研究单位不得超过 4 个。集成项目主要参与者必须是项目的实际贡献者，合计人数不超过 9 人。**

(4) 申请人在申请书“立项依据与研究内容”部分，应当明确说明申请符合本项目指南中的资助研究方向，以及对解决本重大研究计划核心科学问题、实现本重大研究计划科学目标的贡献。

如果申请人已经承担与本重大研究计划相关的其他科技计划项目，应当在申请书正文的“研究基础与工作条件”部分论述申请项目与其他相关项目的区别与联系。

2. 依托单位应当按照要求完成依托单位承诺、组织申请以及审核申请材料等工作。在 2026 年 3 月 20 日 16 时前通过信息系统逐项确认提交本单位电子申请书及附件材料，并于 3 月 21 日 16 时前在线提交本单位项目申请清单。**未按时提交项目清单的申请将不予接收。**

3. 其他注意事项。

(1) 为实现重大研究计划总体科学目标和多学科集成，获得资助的项目负责人应当承诺遵守相关数据和资料管理与共享的规定，项目执行过程中应关注与本重大研究计划其他项目之间的相互支撑关系。

(2) 为加强项目的学术交流，促进项目群的形成和多学科交叉与集成，本重大研究计划将每年举办 1 次资助项目的年度学术交流会，并将不定期地组织相关领域的学术研讨会。获资助项目负责人有义务参加本重大研究计划指导专家组和管理工作组所组织的上述学术交流活动，并认真开展学术交流。

(四) 咨询方式。

国家自然科学基金委员会交叉科学部交叉科学一处

联系电话：010-62328382