

关键金属高纯原料精深加工技术发展研究

何季麟^{1,2,3*}, 刘炯天^{1,4}, 杨斌⁵, 刘向宏⁶, 何金江⁷, 李光辉⁸, 韩桂洪^{1,2}, 赵红运⁹,
肖阳^{1,2}, 李军义¹⁰, 李庆奎^{1,2}, 孙本双^{1,2}, 赵红亮^{1,2}, 周小军¹¹, 蒋文龙⁵, 车玉思^{1,2}

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 中原关键金属实验室, 郑州 450001; 3. 稀有金属特种材料全国重点实验室, 郑州 450001; 4. 关键金属选冶与高纯制程全国重点实验室, 郑州 450001; 5. 昆明理工大学, 昆明 650031; 6. 西北有色金属研究院, 西安 710016; 7. 有研亿金新材料有限公司, 北京 102200; 8. 中南大学资源加工与生物工程学院, 长沙 410083; 9. 中色创新研究院(天津)有限公司, 天津 300380; 10. 西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司, 宁夏石嘴山 753000; 11. 宁夏东方钽业股份有限公司, 宁夏石嘴山 753000)

摘要: 关键金属高纯原料精深加工技术是衔接矿产资源与高端制造的核心环节, 对保障国家战略资源安全具有重要意义。本文系统梳理镓、铟、锗、钛、钨、钼、钒、钽、铌、铈等典型关键金属高纯加工技术的国内外进展, 对比分析其工业应用、技术水平、技术差距与难点。结果表明, 我国已形成4N~5N级常规纯度产品完整工业体系与规模化产能, 但在6N级以上超高纯产品制备稳定性、痕量杂质精准脱除、高端核心装备自主化等方面, 与国际先进水平均存在明显差距。经技术成熟度评估, 未来关键金属高纯原料精深加工技术将呈现产品纯度向极限化提升、材料组元向复杂化拓展、粉体向纳米化与复合化发展、分离机制向多场耦合演进四大趋势。面向2040年, 本文提出了关键金属高纯原料精深加工技术的中长期发展路径, 聚焦超高纯制备、复杂体系分离、纳米与复合粉体制备、多场耦合靶向分离、智能化绿色化冶金五大主攻方向; 从夯实产业基础、优化资源配置、强化基础研究、攻克装备短板、深化人工智能赋能五个方面提出了对策建议, 为我国关键金属产业链自主可控与中长期战略谋划提供科学支撑。

关键词: 关键金属; 高纯原料; 精深加工; 冶金工程科技; 供应链安全

中图分类号: TF 84 **文献标识码:** A

Deep Processing Technology for High-Purity Raw Materials of Critical Metals

He Jilin^{1,2,3*}, Liu Jiongtian^{1,4}, Yang Bin⁵, Liu Xianghong⁶, He Jinjiang⁷, Li Guanghui⁸,
Han Guihong^{1,2}, Zhao Hongyun⁹, Xiao Yang^{1,2}, Li Junyi¹⁰, Li Qingkui^{1,2}, Sun Benshuang^{1,2},
Zhao Hongliang^{1,2}, Zhou Xiaojun¹¹, Jiang Wenlong⁵, Che Yusi^{1,2}

(1. School of materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhongyuan Critical Metals Laboratory, Zhengzhou 450001, China; 3. State Key Laboratory of Special Rare Metal Materials, Zhengzhou 450001, China; 4. State Key Laboratory of Critical Metals Beneficiation, Metallurgy and Purification, Zhengzhou 450001, China; 5. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China; 6. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China; 7. GRIKIN Advanced Materials Co., Ltd., Beijing 102200, China; 8. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China; 9. China Nonferrous Metals Innovation Research Institute (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300380, China; 10. Northwest Rare Metal Materials Research Institute Ningxia Co., Ltd., Shizuishan 753000, Ningxia, China; 11. Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, Ningxia, China)

收稿日期: 2026-03-23; **修回日期:** 2026-04-10

通讯作者: *何季麟, 郑州大学材料科学与工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为有色金属冶炼加工理论及工程化技术; E-mail: hejilin@zzu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向2040的关键材料产业链上游高纯原料精深加工技术发展战略研究”(2023-ZCQ-18), “广西战略矿产与全产业链开发发展战略研究”(2023-XZ-92); 国家自然科学基金项目(U23A20609, U25A20283, 52274357, 92575206)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

Abstract: The deep processing technology for high-purity raw materials of critical metals serves as a vital technical link that connects mineral resources and high-end manufacturing industries, bearing great significance for safeguarding the security of national strategic resources. This study reviews the progress of high-purity processing technologies for typical critical metals including gallium, indium, germanium, titanium, tungsten, molybdenum, vanadium, tantalum, niobium and scandium, and conducts a comparative analysis of their industrial application status, technical maturity, international benchmark levels, and existing technical shortcomings. The results indicate that China has established a complete industrial system and large-scale production capacities for conventional critical metal products with a purity of 4N–5N grade. However, there remain prominent gaps between China and international advanced levels in terms of preparation stability of ultra-high-purity products above 6N grade, precision removal of trace impurities, and independent research and development of high-end core equipment. Based on a technical maturity evaluation, it is projected that future deep processing technologies for high-purity raw materials of critical metals will exhibit four major development trends: an extreme elevation in product purity, diversified and complex development of material components, nanocrystallization and compounding of powder materials, and an evolution of separation mechanisms toward multi-field coupling. Oriented toward 2040, a medium- and long-term development roadmap for the industry is proposed, focusing on five key development directions: ultra-high-purity preparation, complex system separation, nano and composite powder preparation, multi-field-coupled targeted separation, and intelligent green metallurgy. Corresponding countermeasures and suggestions are proposed from five dimensions: consolidating industrial foundation, optimizing resource allocation, strengthening basic research, overcoming equipment technical bottlenecks, and advancing artificial intelligence empowerment. This study can provide scientific support for the independent development and strategic planning of China's critical metal industrial chain.

Keywords: critical metals; high-purity raw materials; deep processing; metallurgical engineering science and technology; supply chain security

一、前言

关键金属是对国家安全保障具有战略意义、供应风险较高或资源禀赋突出的金属元素及其矿床的总称，作为支撑国家战略科技力量建设的战略性基础资源，具有战略储备价值亟待释放、应用场景高度专属性等特征。在国际层面，欧盟2024年正式生效、2026年全面实施的《关键原材料法案》与美国2025年发布的《2025年关键矿产最终清单》均从经济重要性和供应风险两大维度，明确了关键金属的战略定位^[1]；在国内层面，我国2025年发布了《有色金属行业稳增长工作方案（2025—2026年）》等相关政策，逐步强化关键金属的战略布局^[2]。关键金属涵盖稀有金属（镓、铟、锗、铊、硒、碲等）、稀有金属（钨、钼、钒、钽、铌、铍、锆、铪等），其纯度与加工水平直接决定高端制造产业的发展上限^[3]。

随着全球能源转型深入推进与新兴产业快速发展，关键金属作为经济技术转型的基础保障，其安全稳定供应已成为各国政府和跨国企业高度关注的重要议题，也日益成为材料科学与资源科学领域的研究热点^[4-6]。作为引领我国高端制造领域未来20年发展的先导型战略物资，关键金属的技术体系兼具颠覆性创新特质与产业先发优势，在保障国防安全、推动能源转型与支撑先进制造等领域发挥着不可替代的作用。其中，关键金属高纯原料精深加工作为其核心技术环节，以金属初级原料为基础，

通过物理或化学方法进行深度提纯与改性处理，旨在显著提升产品纯度、附加值与终端应用性能，是关键金属战略价值实现的关键技术支撑，也是衔接矿产资源与高端制造的核心枢纽。当前，超纯金属产业正呈现需求极致化与供应安全化两大趋势，先进制程芯片、化合物半导体等领域对金属纯度的要求持续攀升，进一步凸显了高纯原料精深加工技术的战略意义^[7]。

在全球产业链加速重构的背景下，关键金属从高纯原料制备到终端产品制造的全链条安全保障，已成为大国战略博弈的核心议题^[8-10]。主要经济体正通过立法保障与创新体系重构，强化对关键金属供应链的战略控制：美国关键材料研究院（CMI）依托《国防生产法案》修订案，系统推进“矿山—材料—器件”的全链条本土化战略^[11]；欧盟《关键原材料法案》明确将降低对外进口依赖作为核心目标，并设定至2030年战略原材料加工产能占欧盟消费量比例达到40%的量化基准^[12]；日本在《稀有金属保障战略》框架下，将35种矿物明确列为战略性稀缺矿物，同步构建国家储备制度与前沿技术研发体系。以“去全球化”为特征的关键金属供应链重构趋势，对我国关键金属产业链安全构成了系统性挑战，也推动国内学界与产业界加大对关键金属相关领域的研究力度。

在产业宏观研究层面，聚焦全球关键矿产供应链重构、战略性矿产资源全产业链配置效率等主

题, 现有研究梳理了全球关键矿产供应的新趋势与新热点, 分析了我国关键矿产产业的发展现状与风险特征; 提出我国冶金工程科技发展愿景, 明确关键金属资源保障与高纯加工技术的发展方向^[13-14]。在技术研究层面, 主要集中于单一关键金属的提纯工艺优化, 如镓、铟等稀散金属的萃取分离技术, 钨、钼等稀有金属的真空冶金提纯技术以及高纯金属制备过程中的痕量杂质检测方法等^[15-18]。面向 2040 年产业高端化、绿色化、智能化发展需求, 我国关键金属高纯原料精深加工产业仍存在三大核心发展瓶颈, 严重制约产业链自主可控与高端应用落地: 一是高端高纯原料纯度指标较国际领先水平存在 1~2 个数量级差距, 超高纯产品稳定性不足, 难以满足航空航天、半导体等高端领域刚需; 二是核心智能化制备装备国产化率不足 30%, 高端装备高度依赖进口, 形成明显的产业“卡脖子”短板; 三是产业整体绿色低碳水平滞后, 全生命周期碳足迹较国际先进水平偏高 40%~60%, 不符合“双碳”战略与高端制造准入要求, 亟需聚焦纯度极限提升、核心装备自主攻关、低碳冶金技术革新三大方向精准突破, 补齐产业发展短板。

本文聚焦于纯度要求极高、精深加工技术发展受限的关键金属, 主要包括: 镓、铟、锗、钛、钨、钼、钒、钽、铌、钨等, 这些金属是制备第三代半导体、红外光学材料、高纯溅射靶材、航空航天高温合金、新能源电池材料等高端产品的核心基础原料^[19-21], 其 6N 级以上超高纯产品的自主保障能力, 直接关系国家战略科技力量的建设成效。本文在对已有研究成果进行对比分析的基础上, 系统梳理国内外上述关键金属高纯原料精深加工技术的发展现状; 基于技术成熟度评估, 研判未来技术发展趋势, 提出面向 2040 年的中长期发展思路与“两步走”发展路径; 从产业链布局角度, 提出高纯原料精深加工关键技术的发展举措, 以期为我国关键金属材料产业链的中长期系统谋划与前瞻部署提供参考。

二、关键金属高纯原料精深加工技术现状及发展趋势

(一) 关键金属高纯原料精深加工技术现状

21 世纪以来, 随着新材料、新能源、新一代信

息技术等战略性新兴产业快速发展, 市场对 6N 级以上高纯金属原料需求呈现指数级增长^[22]。过去十年间, 我国重视高纯金属原料精深加工基础研究领域的投入, 如国家自然科学基金委员会的“战略性关键金属超常富集成矿动力学”“关键金属冶金的科学基础”等重大研究计划, 系统布局了从关键金属选冶分离到高纯制备全链条的基础科学问题研究, 为产业技术突破奠定了理论根基^[23]。

在工艺流程上, 关键金属资源通常需经历矿物加工、冶金富集等环节, 在获得粗金属或初级化合物后, 再通过精馏、区域熔炼、电解精炼等物理或化学提纯手段, 逐步去除杂质元素, 最终制备出满足高端应用要求的高纯金属材料^[24]。根据提纯原理与技术路径的差异, 现有精深加工技术可系统划分为化学提纯与物理提纯两大方向, 二者协同构建了高纯金属原料制备的技术矩阵^[25]。① 化学提纯方法主要利用不同元素在化学反应行为(如络合能力、氧化还原电位、离子交换选择性等)上的差异实现分离纯化, 典型技术包括溶剂萃取法、离子交换法、沉淀法及电解精炼法等。该类方法在元素初步分离至中等纯度(通常为 4N~6N)产品的制备阶段应用广泛, 具备处理量大、工艺连续性强的优势, 但存在试剂消耗量大、工艺流程长及易引入二次杂质的局限性。② 物理提纯方法则基于不同元素在蒸气压、溶解度、迁移速率等物理性质上的差异, 实现痕量杂质的深度去除, 代表性技术涵盖区域熔炼法、真空蒸馏法、电子束熔炼法及悬浮区熔炼法等。此类方法主要应用于痕量杂质的深度去除及超高纯(通常为 6N~8N)产品的制备, 具有纯化效率高、无化学试剂污染的优势, 但存在设备投资高、能耗大及生产效率相对较低等问题。

表 1 从成熟工业应用技术、国内技术现状、国际领先水平、技术差距与难点 4 个维度进行对比分析, 系统展示了 10 种典型关键金属原料纯化精深加工技术的国内外发展现状^[26-31]。① 在常规高纯金属完整工业体系与规模化产能方面: 镓、铟、锗、钛、钨、钼、钽、铌、钨均已实现 4N~5N 级工业化生产, 钒实现 2N 级工业化与 3N 级突破, 整体形成覆盖前端富集分离-后端深度提纯的成套工艺与稳定产能, 能够满足传统工业领域的主流应用需求。② 6N 级及以上超高纯产品与国际先进水平存在显

表1 典型关键金属原料纯化精深加工技术现状

金属名称	成熟工业应用技术	国内技术现状	国际领先水平	我国的技术差距与难点
镓	电解精炼法+真空蒸馏+区域熔炼联合工艺	已全面掌握7N级高纯镓规模化制备核心技术，具备成熟的工业化生产能力；中国铝业股份有限公司、西安蓝晓科技新材料股份有限公司、有研新材料股份有限公司等企业均实现7N级高纯镓稳定量产，整体技术体系成熟，产业配套完善	稳定实现7N~8N超高纯镓批量制备，产品纯度稳定性、杂质控制精度行业顶尖；代表性企业为日本同和电子株式会社、德国PPM精密金属公司、加拿大5N Plus高纯材料公司	痕量杂质检测与控制的稳定性不足；区域熔炼装备依赖进口；多道熔炼工艺参数优化缺乏理论指导
铟	电解精炼+真空蒸馏+区域熔炼联合工艺	已攻克5N~6N级高纯铟规模化制备技术，形成稳定工业化产能；6N级以上超高纯铟制备技术已完成技术攻关，目前处于中试验证阶段，逐步推进产业化落地	掌握7N级超高纯铟稳定量产技术，产品纯度均匀性、批次一致性优异，可满足高端半导体、光电材料领域严苛需求；代表性企业为日本RASA工业株式会社、日本同和电子株式会社、美国ALB新材料公司	镉/铟的深度分离仍是难点；真空蒸馏过程的温度场精确控制不足；产品批次稳定性有待提高
锗	氯化蒸馏+区域熔炼联合工艺	已成熟掌握5N~6N级高纯锗规模化制备技术，实现工业化稳定生产；同时突破13N超高纯金属锗单晶研制核心技术，具备超高纯锗材料自主研发能力	实现13N级超高纯金属锗单晶稳定、规模化量产，产品精度、良品率处于全球顶尖水平，占据全球主要高端市场份额；代表性企业为比利时优美科新材料科技公司	大直径锗锭的区域熔炼均匀性控制困难；氯化蒸馏过程的环保压力大；高纯区熔装备自主研发能力薄弱
钛	熔盐电解+电子束熔炼联合工艺	4N级高纯海绵钛制备技术成熟，已实现全流程规模化工业生产；5N级超高纯钛制备关键技术成功突破，现阶段正推进生产线扩建与产业化普及	掌握5N级超高纯钛稳定量产技术，工艺成熟度高、生产成本可控、产品综合性能优异，垄断全球高端高纯钛市场；代表性企业为日本东邦钛业株式会社、美国霍尼韦尔国际公司	电子束熔炼核心装备依赖进口；熔炼过程杂质挥发机理不清晰；成本较国际先进水平高
钨	氢还原+电子束区域熔炼联合工艺	4N级高纯钨粉制备技术完全成熟，实现规模化量产，5N级超高纯钨粉具备小批量定制化供应能力，已攻克6N级超高纯钨粉制备核心技术；厦门钨业股份有限公司建成全球首条6N级高纯钨粉专业化生产线，实现技术领跑	具备6N级超高纯钨粉稳定规模化量产能力，产品纯度、粉体均匀性、成型性能更优，高端深加工产品体系完善；代表性企业为美国ALM先进材料公司、日本东芝集团	钨中难熔杂质钼的深度去除困难；超细纳米钨粉的制备技术落后；高端钨靶材市场被国外垄断
钼	氢还原+电子束区域熔炼联合工艺	4N级高纯钼粉实现成熟工业化、规模化生产；5N级超高纯钼制备关键技术已完成攻关，但产业化稳定性不足，高端产品仍存在进口依赖	掌握6N级超高纯钼稳定量产技术，产品纯度高、杂质可控性强，可满足高端显示、半导体器件制备需求；代表性企业为德国斯达克公司、奥地利普兰西金属集团	钨与钼的性质相近，分离困难；高端显示用钼靶材依赖进口
钒	铝还原/熔盐电解精炼+真空熔炼工艺	2N级金属钒制备技术成熟，实现稳定工业化生产；3N级高纯钒制备核心技术取得突破性进展，完成实验室及中试技术验证	可实现3N级高纯钒稳定、规模化量产，对间隙杂质元素的控制精度优异，产品一致性好；代表性企业为俄罗斯耶弗拉兹钢铁集团	铝还原法引入铝杂质难以去除；间隙元素（O、N、C）控制困难
钽	电子束熔炼+真空电弧熔炼+区域熔炼法	4N级高纯钽粉制备技术成熟，具备规模化工业化生产能力；宁夏东方钽业股份有限公司成功突破6N级超高纯钽制备核心技术，实现技术层面突破	国际可稳定实现5N5级超高纯钽规模化量产，产品纯度、颗粒均匀性、电化学性能优异，适配高端电容器核心应用场景；代表性企业为美国卡博特公司、德国斯达克公司	钽、铌共生杂质深度分离为行业共性难题；电子束熔炼装备依赖进口；高端电容器钽粉市场被国外垄断
铌	电解精炼法+电子束熔炼	4N级高纯铌粉已实现成熟规模化生产，产业体系完善；5N~6N级超高纯铌制备技术处于持续研发迭代阶段，尚未实现产业化应用	掌握5N级高纯铌稳定量产技术，工艺稳定性高、杂质控制精准，产业化体系成熟；代表性企业为德国斯达克公司、巴西矿冶公司	铌与钽性质相似，分离困难
铈	钙热还原+真空蒸馏	已掌握4N级金属铈批量制备技术，实现稳定工业化生产；5N及以上级别超高纯铈制备技术仍处于研发攻关阶段，未实现产业化	稳定量产4N5级高纯铈，还通过分段式真空蒸馏创新技术，成功实现6N级超高纯铈制备，技术迭代领先；代表性企业为俄罗斯索利卡姆斯克镁业公司、俄罗斯铝业联合公司	铈的提取流程长、回收率低；钙热还原引入的钙杂质难以彻底去除；全球铈市场由俄罗斯主导

著差距,国际领先企业已在镓、铟、锗、钨、钼、钽、铌等品种实现 6N~13N 级超高纯稳定量产,而国内多数金属 6N 级以上仍处于技术突破、中试或研发阶段,在纯度上限、痕量杂质精准控制、批次稳定性方面明显不足,难以进入半导体、航空航天等高端认证市场。③ 相似元素深度分离困难与核心装备高度依赖进口:钨/钼、钽/铌、钨/钼、钒/铁/钛等性质相近元素深度分离困难;电子束熔炼炉、区域熔炼炉、超高真空设备等核心精炼装备的国产化率低于 30%,其关键部件(如电子枪、真空泵、温控系统)仍依赖德国 ALD 真空工业有限公司、日本真空技术株式会社、美国赛默飞世尔科技公司等国际企业,存在明显的“卡脖子”风险。④ 基础研究支撑能力不足,对多元杂质协同迁移机理、复杂界面反应动力学、多物理场耦合传质规律等基础科学问题的认知尚不深入,导致新工艺开发缺乏理论指导,技术突破多依赖“试错法”经验积累,制约了技术创新效率。

(二) 关键金属高纯原料精深加工技术发展趋势

1. 纯度要求向极限化迈进,杂质控制向痕量化发展

当前,半导体制程持续向 2 nm 及以下节点推进、红外光学器件对探测精度与响应速度的要求不断提升、航空航天材料需适应超高温/超低温/强辐射等极端服役环境,对关键金属原料的纯度与杂质控制要求已进入“极限化”与“痕量化”并重的新阶段。未来 15 年,关键金属单质、合金及化合物产品的目标纯度将整体提升 1~2 个数量级(如 8N 级向 10N 级迈进),特定敏感杂质(如过渡金属、碱金属等)的浓度控制将从 ppb 级向 ppt 级跨越,以满足下一代高端制造对材料本征性能的极致要求。

2. 材料组元向复杂化演变,多元体系占比显著提升

随着高端应用对材料综合性能要求的不断提高,单一元素的高纯化已难以满足复杂服役环境下的多功能需求,材料体系正从单元向多元、从简单向复杂加速演变。高熵合金、多元化合物半导体、复杂氧化物陶瓷等多组元材料体系成为发展热点,预计未来三元及以上体系在关键金属精深加工产品中的占比将显著提升至 60% 以上。

材料组元的复杂化对精深加工技术提出了全新挑战。一是在多元体系中需实现目标组元的精准富集与非目标杂质的选择性分离,使传统分离方法的选择性面临瓶颈;二是需深入理解不同元素间的交互作用与分离效率的构效关系,为工艺优化提供理论指导;三是多元体系的热力学稳定性与动力学过程更为复杂,对过程控制精度要求更高。因此,亟需发展新的分离理论和技术体系,以应对材料组元复杂化带来的技术挑战。

3. 粉体原料向纳米化与复合化发展,功能集成度持续提升

在增材制造、粉末冶金、高性能催化剂等前沿领域的推动下,关键金属粉体原料正加速向纳米化与复合化方向演进。纳米级(粒径 ≤ 100 nm)金属粉体凭借其独特的小尺寸效应、表面效应及量子尺寸效应,可显著提升材料的烧结活性、催化效率和电磁性能,成为高端制造的“性能倍增器”。同时,通过包覆、掺杂、合金化等复合化手段设计的多功能粉体,能够实现力学、热学、电学等多性能的协同调控,满足复杂工况下的多功能集成需求。未来,多功能复合粉体在关键金属粉体原料中的占比将突破 40%。在此背景下,纳米粉体的规模化制备、表面精准改性、安全储运等关键技术将成为产业竞争的核心焦点。

4. 分离机制向多场耦合发展,靶向有序分离成为研究前沿

传统单一提纯技术(区域熔炼、溶剂萃取、真空蒸馏等)各有其适用范围与技术边界:区域熔炼对分凝系数远小于 1 的杂质去除效果显著,但存在效率低、能耗高的瓶颈;溶剂萃取处理容量大、连续性优,却面临试剂消耗大、易引入二次污染的难题;真空蒸馏擅长分离挥发性杂质,但对难挥发性杂质去除能力有限。单一技术路线难以兼顾高效率、低成本、超纯化、绿色化的制备要求,因此,构建化学-物理冶金多场耦合的靶向有序分离理论与技术体系,成为关键金属原料制备领域的重要研究方向。其科学问题核心在于揭示多元杂质在复杂场域中的迁移转化规律,建立跨尺度(原子-介观-宏观)的理论模型与多物理场耦合模拟方法,这将成为未来 15 年关键金属冶金领域的重大科学前沿与技术制高点。

三、关键金属高纯原料精深加工发展思路与技术主攻方向

(一) 关键金属高纯原料精深加工的发展愿景与思路

关键金属材料作为高新技术产业的战略基石，其发展水平直接影响全球科技竞争与绿色转型进程，而战略材料的突破，高度依赖高纯金属原料的技术支撑与供应链安全^[32]。从产业风险来看，2030—2040年新能源产业规模化发展中，铀、钍等关键金属原料供应呈极度危险等级，钍属中高风险等级，供应链脆弱性直接制约我国新能源产业自主可控发展^[33]。

基于愿景驱动的未来布局视角，结合我国关键金属高纯原料精深加工技术的现状差距、产业发展需求和未来趋势研判，关键金属高纯原料精深加工产业与技术发展的整体构思与核心愿景为：紧密围绕国家“十五五”重大战略需求与2040年远景目标，针对我国关键金属材料产业链上游高纯原料精深加工“卡脖子”技术支撑需求，重点面向新一代信息技术、新能源、航空航天等战略性新兴产业领域，充分发挥新型举国体制优势，整合高校、科研院所、龙头企业的创新资源，加速推进关键金属原材料全体系、全链条科技攻关与技术研发，建设国家战略关键金属原材料备份及精深加工基地，构建具有先导性、颠覆性特征的高纯关键金属原材料产业链保障体系，实现供应链从稳定可控向安全高效升级。通过一系列系统性举措，为我国关键金属原材料产业的可持续发展奠定坚实基础，确保在2040年前实现高纯金属/化合物超常富集提取与分离纯化过程的高效强化和核心技术突破，推动我国关键金属高纯原料精深加工技术从“跟跑”向“并跑”“领跑”跨越，全面满足国家战略需求并推动相关产业的技术进步，构建形成具有全球影响力的国际一流创新产业链，为全球关键金属产业的可持续发展提供系统性解决方案。

围绕上述整体构思与发展愿景，结合产业发展规律与技术突破周期，提出面向2040年的“两步走”发展路径，为各项重点举措落地提供清晰的方向指引。第一阶段（2025—2030年，强基固链期），以强基固链为核心目标，着力打通高纯原料精深加工产业链的“关键枢纽”，基本消除核心技术风险

与供应链短板，在若干核心冶金技术领域实现国际领先，初步构建智能化、绿色化的精深加工产业技术体系，推动高纯原料产品质量与产能稳步提升，满足国内中高端产业基本需求；第二阶段（2031—2040年，创新引领期），实现产业自迭代、主导行业变革，全面占领全球关键金属高纯原料产业战略制高点，主导关键技术的颠覆性变革，建立成熟完善的绿色低碳发展模式，打造引领全球工程科技发展的“中国范式”，推动我国从关键金属原料大国向强国跨越。

(二) 关键金属高纯原料精深加工技术主攻方向

面向2040年关键金属材料产业链上游高纯原料精深加工的战略目标，结合产业发展需求与技术瓶颈，重点聚焦以下五大关键技术方向开展集中攻关，推动关键金属高纯原料精深加工技术实现突破性发展，强化产业技术特质与前沿引领能力，为后续举措落地提供核心技术支撑。

1. 超高纯金属制备技术

针对6N级以上超高纯金属制备的核心需求，聚焦半导体、航空航天等高端领域对金属纯度的极致要求，重点突破以下核心技术。

一是区域熔炼深度提纯技术^[34-35]。研究多元杂质在固-液界面的微观行为机制，结合多物理场耦合理论建立杂质协同迁移模型，解决杂质脱除不彻底、分布不均的问题；开发大直径锗、硅、镓连续式区域熔炼工艺，破解大尺寸锭料径向纯度均匀性难题；研发智能化区域熔炼装备，集成机器视觉、实时检测及工艺参数闭环优化系统，推动技术向智能化、规模化转型。

二是电子束熔炼超纯化技术^[36-37]。研究难熔金属在电子束轰击下的熔池特性与杂质挥发规律；开发电子束扫描路径优化算法，采用分区扫描实现熔池温度精准调控，避免金属氧化与锭料缺陷；研发大功率电子枪及高稳定电源系统，突破核心部件“卡脖子”瓶颈，实现装备国产化。

三是超高真空蒸馏技术^[38]。测定金属蒸气压与温度的定量关系，建立多元合金组分挥发-冷凝热力学模型；开发选择性蒸馏分离工艺，实现有价元素高效分离提纯；研发极限真空系统及在线痕量杂质检测装置，集成质谱检测与实时反馈控制，提升产品纯度稳定性，适配高端电子器件需求。

四是单晶提拉技术^[39]。开展热场优化、晶体生长速率控制、径向与轴向均匀性调控研究；建立提拉速度、温度梯度、熔体流动与杂质分凝的耦合控制模型，实现低缺陷、高均匀、超高纯单晶稳定生长；重点突破大尺寸、高完整性单晶生长工艺，满足半导体晶圆、核探测、高端光学等对金属单晶的极致纯度要求。

五是真空电弧熔炼 / 悬浮区熔技术^[40-41]。开展无坩埚熔炼条件下杂质挥发与分凝行为研究，消除坩埚材料引入的外源污染；建立真空电弧熔炼与悬浮区熔耦合工艺，实现间隙杂质（O、N、C、H）的深度脱除；开发高真空、高稳定性熔炼装备，提升难熔金属锭料纯度均匀性与结构完整性，满足高温合金、半导体靶材等极端应用场景要求。

六是熔盐电解精炼技术^[42]。构建低氧、低碳、低杂质熔盐体系，从源头抑制杂质引入；研究熔盐体系中金属离子的电化学反应与定向沉积机制，优化电解温度、电流密度、槽压等关键参数；开发高效、绿色、短流程电解精炼工艺，实现粗金属向 5N~6N 级高纯金属的直接转化，降低制备成本并提升规模化生产稳定性。

2. 复杂体系元素高效分离技术

针对多元组元体系中元素分离困难、分离效率低、能耗高的问题，聚焦复杂低质共生矿、多元合金等原料的高效利用，重点突破以下核心技术。

一是相似元素深度分离技术^[43-44]。研究钽 / 铌、锆 / 铪及相邻稀土元素的电子结构与络合机理，设计新型高选择性萃取剂和离子交换树脂，提升分离系数；研发萃取-色层耦合连续分离工艺，搭建连续生产线，降低试剂消耗与废水排放，满足高端合金、电子材料原料需求。

二是多元合金梯级分离技术^[45]。研究高熵合金、高温合金中各元素的挥发-凝聚特性，建立梯级分离工艺模型；开发“真空蒸馏-区域熔炼-电解精炼”梯级工艺，优化参数匹配并引入中间净化环节，实现有价元素梯级回收与杂质高效脱除，达成资源高效利用与节能降耗双重目标。

三是复杂低质共生矿分离技术^[46-48]。针对钨 / 钼共生矿、钒 / 钛磁铁矿等复杂低质资源，开发“选冶联合-梯级分离-定向富集”新工艺，整合选矿与冶金提纯技术，优化药剂配方与工艺参数；引入微波辅助浸出、超声强化分离等技术，提升钨、

钼、钒、钛等元素的开采回收率与综合利用率，有效降低对进口富矿的依赖，保障国家资源安全。

3. 纳米与复合粉体制备技术

针对增材制造、粉末冶金、新能源电池等领域对高性能粉体迫切需求，聚焦粉体粒径均匀性、分散性、功能性等核心指标，重点突破以下核心技术。

一是纳米金属粉体规模制备技术^[49-50]。研究等离子体蒸发冷凝、激光烧蚀、高能球磨等纳米粉体制备方法的粒径可控性与产率提升机制，建立粒径精准控制模型；开发连续化、规模化的纳米粉体生产线，集成粉体分散与防氧化处理工艺，通过添加新型表面活性剂、采用惰性气体保护等方式，从根本上解决纳米粉体易团聚、易氧化的难题；引入超快焦耳加热技术，利用其毫秒级超高温、快速淬火的优点，抑制颗粒团聚、稳定亚稳态结构，实现纳米粉体的规模化生产，适配增材制造、高端涂层等领域需求。

二是多功能复合粉体构筑技术^[51-53]。研究化学镀、气相沉积、机械融合等表面包覆技术的包覆机理，优化包覆层厚度与均匀性控制方法，采用精准调控的表面修饰技术，实现金属粉体的功能性修饰；开发核-壳结构、梯度结构复合粉体的可控制备工艺，精准调控核层与壳层的组分比例，结合表面活性剂的模板效应，制备兼具多种功能的复合粉体，满足增材制造、高端涂层、新能源电池等领域的个性化需求。

三是粉体安全性评价与储运技术。建立纳米金属粉体爆炸性、毒性等安全性评价体系，结合粉体粒径、比表面积等参数，制定粉体粒径、比表面积与安全性的关联标准，明确不同类型纳米粉体的安全阈值；开发防静电、防爆、防氧化储运装备，采用惰性气体密封包装与智能监测技术，实时监控储运过程中的温度、湿度与气体浓度，制定相关安全技术规范，保障粉体储存与运输安全，推动纳米粉体产业化应用。

4. 多场耦合靶向分离技术

针对单一提纯技术效率低、能耗高、杂质脱除不彻底的问题，依托多学科交叉融合优势，重点突破多场耦合靶向分离技术，实现关键金属的高效、低碳提纯，助力“双碳”战略落地。

一是“电-热-力”多场耦合区域熔炼技术^[54]。

结合电热力多物理场耦合仿真实验，深入研究电场、温度场、应力场协同作用下杂质元素的迁移行为与分凝规律，揭示多场耦合对杂质脱除效率的强化机制，建立多场参数协同优化模型；借鉴大型铝电解槽多场耦合优化经验，开发电迁移增强区域熔炼新工艺，优化电场强度与温度场的匹配关系，实现痕量杂质的定向迁移与高效脱除，适配高纯金属规模化提纯需求。

二是等离子体-还原耦合短流程技术^[55-56]。研究等离子体对金属氧化物的活化机制，明确等离子体能量对金属氧化物键能的破坏作用，建立等离子体活化还原的反应动力学模型；开发等离子体氢还原新工艺，缩短从氧化物到高纯金属的制备流程，优化等离子体功率、氢气流速等工艺参数，实现金属氧化物的高效还原与提纯一体化，契合绿色低碳发展需求。

三是磁场-电化学耦合精炼技术^[57]。深入研究磁场对电解液离子迁移、电结晶过程的调控机制，明确磁场强度与方向对电流效率、产品结晶质量的影响规律，建立磁场调控电结晶的理论模型；开发磁场辅助电解精炼新工艺，采用高强度稳恒磁场，优化电解温度、电流密度等参数，借鉴湿法炼锌电解优化控制技术经验，提高电流效率，改善产品结晶质量，降低杂质含量，实现高纯金属的高效制备。

5. 智能化与绿色化冶金技术

顺应产业数字化转型与“双碳”战略目标需求，聚焦节能降耗、清洁生产与循环利用，重点突破以下核心技术，推动关键金属高纯原料精深加工产业向绿色化、智能化转型。

一是数字孪生与智能控制技术^[58-59]。开发关键金属提纯过程的数字孪生系统，集成机理模型、数据驱动模型和在线检测数据，构建提纯过程的虚拟仿真场景，实现工艺参数的实时优化和自适应控制；借鉴有色金属冶金智能优化控制技术，集成机器学习算法，通过分析历史生产数据与实时检测数据，预测工艺异常与产品质量缺陷，提前预警并调整工艺参数，提升产品合格率，降低生产损耗，推动产业数字化转型。

二是短流程绿色冶金技术^[60]。研究从矿石直接到高纯产品的短流程工艺，整合选矿、冶炼、提纯等环节，减少中间环节的能源消耗和“三废”排

放；开发清洁生产新工艺，采用新型环保试剂与循环利用技术，优化废水、废气、固废处理工艺，实现废水近零排放、废气超低排放、固废资源化利用，提升固废综合利用率，降低单位产品能耗，契合“双碳”战略与绿色发展要求。

三是废旧金属循环利用技术^[61]。建立废旧半导体器件、光学元件、溅射靶材等含关键金属废弃物的分类回收体系，制定标准化回收流程，提高废弃物回收效率；开发高效分离-深度提纯一体化技术，整合物理分选、化学浸出、精馏提纯等工艺，优化回收工艺参数，实现关键金属的闭环循环，有效降低对原生矿产资源的依赖度，推动资源循环利用产业发展。

四、推动关键金属高纯原料精深加工技术发展的重点举措

（一）筑牢产业根基，构建自主可控的产业链体系

强化关键金属从原料、材料到器件的全产业链协同，加速原料精深加工领域基础设施现代化升级，重点推进重大基础设施布局与能力提升，培育壮大一批适配2040年新兴产业发展需求的关键金属原料及泛半导体材料企业，构建自主可控、安全高效的产业体系。加强高纯原料生产企业与下游半导体、新能源等应用企业的战略合作，推动组建产业联盟，促进知识共享与协同创新，同时推动下游用户“早期介入”研发，形成“需求定义技术、技术支撑产品”的正向闭环。加快制定6N级及以上超高纯金属国家与行业标准，构建涵盖检测、杂质控制、包装储运的全流程标准体系，积极参与并主导国际标准制定，提升全球话语权。依托骨干企业与科研院所，布局战略储备与技术备份基地，针对镓、锗等供应风险突出的金属，建立分级分类储备制度，保障国家战略与产业安全。

（二）优化资源体系，保障关键金属原料供给安全

强化关键金属资源综合评价与系统性勘查，全面掌握国内储量与分布，为战略布局提供依据。在内蒙古、江西等资源富集区，推进绿色矿山与综合利用示范基地建设，提升钨、钼、稀土等优势资源开采回收率与伴生资源利用率，保障国内储备稳定。构建“国内国际双循环”相互促进的多元化供

应体系，在国内层面，完善高端紧缺资源开发配套政策，强化土地、能源等要素保障；国际层面支持企业通过股权投资、长期协议等方式，布局钴（刚果（金））、钼铌（巴西、澳大利亚）、锂（智利、澳大利亚）等海外供应基地，构建稳定多元的国际网络。建立含关键金属废弃物分类回收与循环利用体系，通过政策激励与技术攻关，推动关键金属的二次资源化利用，有效降低对原生矿产资源的依赖度，提升全社会的资源循环利用水平。

（三）发挥体制优势，建立国家关键金属高纯原料精深加工技术研究创新组织体系

强化基础理论探索，推动物理、化学、材料科学等多学科深度交叉，通过跨学科协作催生新的研究范式与创新成果，突破关键金属超常富集、相似元素分离等理论与技术瓶颈。加大研发投入，在国家重点研发计划、自然科学基金中设立“关键金属精深加工”重大项目，布局复杂低质共生钨 / 钼、钼 / 铌、钒 / 钛、铅 / 铋、铍等特色资源的高效提取与纯化等重大基础研究项目。组建由骨干企业或科研院所牵头的“关键金属精深加工技术研究”创新战略联盟，汇聚“产学研用”资源，组建跨学科顶尖团队，开展长期联合攻关。依托国家级战略科技力量，牵头建设国家关键金属冶金与高纯材料创新中心，构建从基础研究到工程应用的完整创新链条，加速成果转化。将节能降耗、清洁生产纳入国家“双碳”技术路线图，重点支持并研发短流程冶金、等离子体冶金、微波加热等具有颠覆性潜力的低碳 / 零碳冶金新工艺。

（四）突破装备瓶颈，实现核心装备自主可控

在国家重大技术装备攻关工程框架下，设立高端冶金装备专项，聚焦关键金属超常富集提取、高纯氢还原、等离子体冶金、人工智能数智化控制等精深加工关键技术领域，集中资源推动核心装备研发与产业化。构建“政产学研用”协同机制，组织装备制造、冶金企业与科研院所组建创新联合体，围绕“需求定义—联合设计—集成制造—应用验证”全链条协同攻关，加速国产装备迭代升级。依托骨干企业现有生产线，建设国产高端冶金装备应用验证平台，通过真实工况下的可靠性、稳定性及经济性测试，为装备的成熟化与产业化提供数据支撑与

应用场景，最终形成“技术突破—装备升级—产业引领”的良性发展闭环。

（五）深化人工智能赋能，提升精深加工技术创新效能

将人工智能技术深度融入关键金属高纯原料设计、制备、表征全流程，推动研发范式从经验驱动向数据驱动、知识引导转型，提升技术创新效率与精准度。依托高通量实验平台与深度神经网络，构建高质量高纯材料制备数据库，解析痕量杂质作用规律，为技术研发奠定数据基础。构建机器学习辅助材料反向优化设计模型，结合多目标优化算法，根据终端性能需求反向推导最优工艺路径与杂质控制范围，提升材料设计的精准度。突破多源异构大数据存储与分析技术，集成先进算法解析杂质、工艺与性能的构效关系，实现目标性能高效预测。依托大语言模型挖掘海量学术文献与专利知识，构建高纯材料知识图谱，发展智能逆向设计框架，推动研发模式从经验试错向精准创新转型，让人工智能成为关键金属高纯原料精深加工技术突破的核心赋能工具。

五、结语

关键金属高纯原料精深加工技术作为连接矿产资源与高端制造的核心枢纽，是保障国家战略资源安全、支撑新质生产力发展、实现科技自立自强的关键基石，也是落实“双碳”战略、推动冶金工业绿色低碳转型的重要支撑。当前我国正处于从资源大国向材料强国跨越的战略机遇期，既面临全球产业链重构带来的系统性挑战，也具备新型举国体制、超大规模市场和完整工业体系的独特优势。当前，6N级以上超高纯产品稳定性、痕量杂质精准控制及核心装备自主化等方面仍与国际领先水平存在差距。面向2040年，应以“强基固链、创新引领”为主线，按照“两步走”发展路径，重点攻关超高纯金属制备、复杂体系分离、纳米粉体制备、多场耦合分离、智能化绿色化冶金等五大技术方向的关键核心技术，通过筑牢产业根基、优化资源体系、完善创新机制、突破装备瓶颈、深化人工智能赋能等重点举措，有望在2030年前实现6N级高纯关键金属自主可控、2040年前迈入全球冶金科技创

新前列的目标, 为国家战略资源安全与产业升级提供支撑。

关键金属高纯原料精深加工技术正朝着极限纯度、多元组元、纳米结构、智能绿色的方向持续演进, 其研究与应用仍需聚焦重点领域持续发力。未来, 在研究层面, 需强化多学科交叉融合, 深化基础理论研究, 重点突破痕量杂质精准脱除、多元组分协同调控等核心瓶颈; 同时, 深化人工智能赋能, 持续拓展其在高纯原料设计、制备、表征全流程的应用场景, 推动技术从“跟跑”向“领跑”跨越。在应用层面, 需紧扣新质生产力内涵, 推动高纯原料技术与高端制造深度融合, 以绿色低碳工艺助力“双碳”目标实现, 全面提升产品附加值与国际竞争力。唯有以久久为功的战略定力, 持续推进基础研究与人工智能赋能深度融合, 才能在全球关键材料竞争中赢得主动, 为实现高水平科技自立自强和中国式现代化提供坚实的材料保障。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 23, 2026; **Revised date:** April 10, 2026

Corresponding author: He Jilin is a professor from School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is the theory and engineering technology of non-ferrous metal smelting and processing. E-mail: hejilin@zzu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering projects “Research on Development Strategy of High-purity Raw Material Deep-processing Science and Technology for Critical Metal Material Industry Upper Stream in China Toward 2040” (2023-ZCQ-18), “Research on the Development Strategy of Strategic Minerals and Full Industry Chain Development in Guangxi Zhuang Autonomous Region” (2023-XZ-92); The National Natural Science Foundation of China Projects (U23A20609, U25A20283, 52274357, 92575206)

参考文献

- [1] 王宇, 闫晶晶, 葛建平, 等. 我国关键金属矿产品储备体系建设研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(6): 143-152.
Wang Y, Yan J J, Ge J P, et al. Construction of critical metal mineral product reserve system in China[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(6): 143-152.
- [2] 有色金属行业稳增长工作方案(2025—2026年)[EB/OL]. (2025-09-28)[2025-10-08]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2025/art_e8a675f331eb4e8dbc742d67c097051f.html.
Work plan for stabilizing growth of the non-ferrous metals industry (2025—2026)[EB/OL]. (2025-09-28)[2025-10-08]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/wjfb/art/2025/art_e8a675f331eb4e8dbc742d67c097051f.html.

- 742d67c097051f.html.
- [3] 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 等. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 112-118.
Jiang S Y, Wen H J, Xu C, et al. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 112-118.
- [4] 唐金荣, 张宇轩, 徐利, 等. 全球关键矿产稳定供应研究新趋势、新热点与未来展望[J]. 中国地质, 2025, 52(2): 462-481.
Tang J R, Zhang Y X, Xu L, et al. Stability of global critical mineral supplies: Trends, hot topics, and further outlook[J]. Geology in China, 2025, 52(2): 462-481.
- [5] 刘刚, 刘立涛, 欧阳铨, 等. 绿色低碳转型背景下关键金属循环利用战略与对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1566-1576.
Liu G, Liu L T, Ouyang X, et al. Recycling of critical metals in green and low-carbon transition: Strategies and countermeasures[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1566-1576.
- [6] 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 等. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 2019, 38(5): 935-969.
Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, et al. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(5): 935-969.
- [7] 张心怡. 宁波江丰电子材料股份有限公司总工程师王学泽: 用核心材料支撑半导体产业创新升级[N]. 中国电子报, 2025-12-02(6).
Zhang X Y. Wang Xueze, chief engineer of Konfoong Materials International Co., Ltd.: Supporting innovation and upgrading of the semiconductor industry with core materials[N]. China Electronics News, 2025-12-02(6).
- [8] 李华姣, 李政, 郑欣欣, 等. 全球高技术矿产产业链供应链重构研究[J]. 资源科学, 2025, 47(7): 1393-1402.
Li H J, Li Z, Zheng X X, et al. Research on the reconstruction of global high-tech mineral industry chain and supply chain[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1393-1402.
- [9] 张海亮, 付晶. 我国战略性关键矿产资源产业链安全监测预警体系构建策略[J]. 云南大学学报(社会科学版), 2024, 23(6): 105-117.
Zhang H L, Fu J. Strategy on the construction of safety monitoring and early warning system of strategic key mineral resources industry chain in China[J]. Journal of Yunnan University (Social Sciences Edition), 2024, 23(6): 105-117.
- [10] 于宏源. 关键矿产的大国竞合分化、治理困境和中国选择[J]. 学术前沿, 2023(15): 83-90.
Yu H Y. Critical minerals: Major power co-opetition, polarization, governance dilemma and the Chinese approach[J]. Frontiers, 2023(15): 83-90.
- [11] “中国工程科技发展战略研究”项目组. 中国工程科技2035发展战略: 综合报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 112.
Project Team of the Development Strategy Research of China's Engineering Science and Technology. The development strategy of China's engineering science and technology for 2035: Synthesis report [M]. Beijing: Science Press, 2019: 112.

- [12] European Commission. Critical raw materials act[EB/OL]. (2023-03-16)[2025-12-08]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en.
- [13] 柴立元,王海鹰,闵小波,等. 面向2040年冶金工程科技前沿与创新研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 24-36.
Chai L Y, Wang H Y, Min X B, et al. Frontiers and innovative development of metallurgical engineering science and technology in China toward 2040[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(5): 24-36.
- [14] 柴立元,王云燕,孙竹梅,等. 绿色冶金创新发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 10-21.
Chai L Y, Wang Y Y, Sun Z M, et al. Innovative development strategy of green metallurgy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 10-21.
- [15] Li J H, Wang L B, Zhang B K, et al. Mechanochemical extraction of gallium from chemically akin metal mixtures via an atomic-scale low-entropy-increasing strategy[J]. Joule, 2026, 10(1): 102234.
- [16] 张灵恩. 固体废弃物中稀散金属锗、镓和铟的富集、真空分离提取机制与工艺研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018: 8-12.
Zhang L E. Extraction mechanism of enrichment and vacuum separation, and technology of scattered metal germanium, gallium and indium from solid wastes[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018: 8-12.
- [17] Teimouri S, Potgieter J H, Billing C, et al. Indium and gallium extraction using ionic liquids: Experimental and theoretical study[C]//European Metallurgical Conference 2023, 2023: 918-925.
- [18] 冀家越,杭乐,徐周毅,等. 高纯金属中痕量元素的快速测定——激光溅射电离飞行时间质谱法[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(4): 109-114.
Ji J Y, Hang L, Xu Z Y, et al. Rapid analysis of trace elements in high purity metal by high irradiance laser ablation and ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(4): 109-114.
- [19] 李京波,夏建白. 后摩尔时代第三代半导体材料与器件: 应用与进展[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1725-1726.
Li J B, Xia J B. The Third generation semiconductor materials and devices in the post Moore era: Applications and progress[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1725-1726.
- [20] Smith T M, Kantzos C A, Zarkevich N A, et al. A 3D printable alloy designed for extreme environments[J]. Nature, 2023, 617(7961): 513-518.
- [21] Zhang J Q, Bermingham M J, Otte J, et al. Ultrauniform, strong, and ductile 3D-printed titanium alloy through bifunctional alloy design[J]. Science, 2024, 383(6683): 639-645.
- [22] 宋建勋,何季麟. 稀有难熔金属提取与提纯[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023: 6-14.
Song J X, He J L. Extraction and purification of rare refractory metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023: 6-14.
- [23] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金“十四五”发展规划[EB/OL]. (2022-11-18)[2025-05-30]. <https://www.nsf.gov.cn/p1/2871/2875/2951/69697.html>.
National Natural Science Foundation of China. The 14th Five-
- Year Plan for the development of the national natural science foundation of China[EB/OL]. (2022-11-18)[2025-05-30]. <https://www.nsf.gov.cn/p1/2871/2875/2951/69697>.
- [24] 贾明星. 七十年辉煌历程新时代砥砺前行——中国有色金属工业发展与展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1801-1808.
Jia M X. A review of nonferrous metals industry achievements in China (1949—2019) and prospects for the future[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1801-1808.
- [25] 卢惠民. 高纯材料制备技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 3.
Lu H M. Pure Material preparation technology[M]. Beijing: Science Press, 2019: 3.
- [26] 刘左伟,许志鹏,郭学益,等. 镓的分离提取及高纯化制备方法[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(6): 747-755.
Liu Z W, Xu Z P, Guo X Y, et al. Extraction and purification process of gallium[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(6): 747-755.
- [27] Lee M S, Sohn K Y. Comparison of indium purification between vacuum refining and electrowinning[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(24): 4843-4848.
- [28] Tian Q H, Hu Z X, He Z Q, et al. Preparation of 7N high-purity indium by vacuum distillation-zone refining combination[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2025, 54(8): 1947-1955.
- [29] Curtolo D C, Friedrich S, Friedrich B. High purity germanium, a review on principle theories and technical production methodologies[J]. Journal of Crystallization Process and Technology, 2017, 07(4): 65-84.
- [30] Kozhevnikov O E, Pylypenko M M, Shcherban A P, et al. The refining of titanium by crucibleless zone melting method[J]. Problems of Atomic Science and Technology, 2021, 5(135): 70-76.
- [31] 郭学益,刘左伟,田庆华,等. 稀散金属高效分离提取及高纯化制备[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(11): 3685-3712.
Guo X Y, Liu Z W, Tian Q H, et al. Efficient separation and purification of scattered metals[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(11): 3685-3712.
- [32] 张希良,黄晓丹,张达,等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. 管理世界, 2022, 38(1): 35-51.
Zhang X L, Huang X D, Zhang D, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality[J]. Management World, 2022, 38(1): 35-51.
- [33] 梁扬扬,刘丽丽,贺克斌,等. “双碳”目标下我国新能源行业关键金属供应分析[J]. 中国工程科学, 2024, 26(3): 131-141.
Liang Y Y, Liu L L, He K B, et al. Supply of key metals for China's new energy industries under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(3): 131-141.
- [34] 田庆华,何志强,郭学益,等. 区域熔炼制备高纯金属研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(10): 3321-3336.
Tian Q H, He Z Q, Guo X Y, et al. Research progress of high purity metals prepared by zone melting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(10): 3321-3336.
- [35] Zhang X X, Friedrich S, Friedrich B. Production of high purity metals: A review on zone refining process[J]. Journal of Crystallization Process and Technology, 2018, 8(1): 33-55.

- [36] 张家豪,曹堂清,万迪,等. 电子束熔炼难熔合金的成分控制与纯化机制研究进展[J/OL]. 稀有金属材料与工程,2026-01-20. <https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250604>.
Zhang J H, Cao T Q, Di W, et al. Advances in Composition Control and Purification Mechanisms of Refractory Alloys by Electron Beam Melting[J/OL]. Rare Metal Materials and Engineering, 2026-01-20. <https://doi.org/10.12442/j.issn.1002-185X.20250604>.
- [37] Ning L D, Tan Y, Wen S T, et al. Numerical analysis and process optimization of electron beam melting for superalloys [J]. Energy, 2024, 300: 131481.
- [38] Meng C S, Cui X, Qiao J X, et al. Preparation of 5 N-grade high-purity tellurium *via* fractional vacuum distillation with mechanism of deep impurity removal [J]. Separation and Purification Technology, 2026, 388: 136838.
- [39] 赵青松,牛晓东,顾小英,等. 大尺寸超高纯锗单晶的生长和性能研究[J]. 人工晶体学报, 2025, 54(1): 34-39.
Zhao Q S, Niu X D, Gu X Y, et al. Growth and properties of large size ultra high purity germanium single crystals [J]. Journal of Synthetic Crystals, 2025, 54(1): 34-39.
- [40] Wang Y D, Zhang L F, Zhang J, et al. Simulation of solidification structure during vacuum arc remelting using cellular automaton - finite element method[J]. Steel Research International, 2022, 93: 2100408.
- [41] Vutova K, Vassileva V. Electron-beam melting and reuse of metallic materials[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2020, 62(5): 345-348.
- [42] De Silva U, Coons T P. Molten salt electrodeposition: Review[J]. Energies, 2024, 17(15): 3832.
- [43] 刘辉,王化军,许文,等. 核级铅铋溶剂萃取分离研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(4): 335-342.
Liu H, Wang H J, Xu W, et al. Research progress in solvent extraction and separation of nuclear grade zirconium and hafnium [J]. Materials China, 2023, 42(4): 335-342.
- [44] Traore M, Gong A J, Wang Y W, et al. Research progress of rare earth separation methods and technologies [J]. Journal of Rare Earths, 2023, 41(2): 182-189.
- [45] Li H, Yu D W, Raabe D, et al. Upcycling mixed alloy scraps *via* liquid metal dealloying for cross-alloy circular economy [J]. Advanced Materials, 2026, 38(14): e19951.
- [46] 唐雪峰,沈慧明,程征,等. 柿竹园钨铋硫化矿梯级分选强化回收工艺技术研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 63-67.
Tang X F, Shen H M, Cheng Z, et al. Enhanced recovery by stepwise separation of molybdenum-bismuth sulfide ore in Shizhuyuan [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 63-67.
- [47] 佟帅,艾立群,洪陆阔,等. 微波-氢气协同还原钒钛磁铁矿精矿的冶金效果[J]. 中国冶金, 2023, 33(11): 48-54.
Tong S, Ai L Q, Hong L K, et al. Metallurgical effect of microwave-hydrogen synergistic reduction for vanadium-titanium magnetite concentrate [J]. China Metallurgy, 2023, 33(11): 48-54.
- [48] Zhao W, Chen J, Chang X D, et al. Effect of microwave irradiation on selective heating behavior and magnetic separation characteristics of Panzhihua ilmenite [J]. Applied Surface Science, 2014, 300: 171-177.
- [49] 彭浩然,贾芳,张鑫,等. 等离子体技术制备纳米粉体研究现状[J]. 热喷涂技术, 2022, 14(2): 9-14, 75.
Peng H R, Jia F, Zhang X, et al. The research evolution and application of preparation of nano-powder by plasma [J]. Thermal Spray Technology, 2022, 14(2): 9-14, 75.
- [50] Liu Y Y, Lin R T, Guo B Y, et al. Ultrafast Joule heating technology for functional nanomaterials synthesis: Recent progress, challenges, and perspectives [J]. Materials Reports: Energy, 2025, 5(4): 100377.
- [51] Wu Y Q, Wang Y Y, Jin H, et al. Preparation and high-temperature performance of core-shell structured Cu@Ni-P@Ag composite powders [J]. JOM, 2025, 77(9): 6694-6710.
- [52] Ma Z Y, Liu W W, Li W Y, et al. Additive manufacturing of functional gradient materials: A review of research progress and challenges [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 971: 172642.
- [53] Gu D D, Shi X Y, Poprawe R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing [J]. Science, 2021, 372(6545): eabg1487.
- [54] Wang X L, Huang J, Chen D D, et al. Electro-thermal-stress multi-physical field coupling optimization design for coaxial through silicon *via* array [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2024, 14(11): 1978-1986.
- [55] Souza Filho I, Ma Y, Kulse M, et al. Sustainable steel through hydrogen plasma reduction of iron ore: Process, kinetics, microstructure, chemistry [J]. Acta Materialia, 2021, 213: 116971.
- [56] Dalaker H, Hovig E W. Hydrogen plasma-based reduction of metal oxides [C]//2023 TMS Annual Meeting & Exhibition, 2023: 85-94.
- [57] Luo S Z, Elouarzaki K, Xu Z J. Electrochemistry in magnetic fields [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2022, 61(27): e202203564.
- [58] Zhang J, Li C C, Deng C J, et al. Toward digital twins for intelligence manufacturing: Self-adaptive control in assisted equipment through multi-sensor fusion smart tool real-time machine condition monitoring [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 82: 301-318.
- [59] Huang Z Q, Fey M, Liu C, et al. Hybrid learning-based digital twin for manufacturing process: Modeling framework and implementation [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 82: 102545.
- [60] Li F, Zhao Q J, Chu M S, et al. Preparing high-purity iron by direct reduction-smelting separation of ultra-high-grade iron concentrate [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(4): 454-462.
- [61] 任萍,马海燕,程越伟,等. 废钨靶材回收处理工艺及其回收利用应用的研究 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(4): 71-74.
Ren P, Ma H Y, Cheng Y W, et al. Study on recovery process of waster tantalum target and its application [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(4): 71-74.