

离子型稀土信息简报

Ionic Rare Earth Information Bulletin

2023年 第02期 总第112期

本期要闻

- ◎ 2022年我国十种有色金属产量同比增4.3% 今年有望突破7000万吨
- ◎ 江西：支持稀土储氢技术路线加快发展
- ◎ 耕地、生态、稀土保护将成为2023年卫片执法重点
- ◎ 首个稀土领域江西绿色生态标准发布

国家离子型稀土资源高效开发利用工程技术研究中心
江西离子型稀土工程技术研究有限公司

◆地址：江西省赣州市经济技术开发区黄金大道36号

◆电话：0797-8160602

◆E-mail: jxlzxtt_2016@163.com

◆邮编：341000

◆传真：0797-8160033

◆网址：<http://www.jxlzxtt.com/>

目次

◇ 行业动态 1-37

- ◎ 2022 年我国十种有色金属产量同比增 4.3% 今年有望突破 7000 万吨
- ◎ 江西：支持稀土储氢技术路线加快发展
- ◎ 中国新发现一种碳酸盐重稀土新矿物—毓川碳钇矿
- ◎ 耕地、生态、稀土保护将成为 2023 年卫片执法重点
- ◎ 中国稀土集团召开首届科技创新大会
- ◎ 荷兰推翻承诺开始配合美对华制裁 中方拟限制出口稀土技术
- ◎ 美前国务卿蓬佩奥加入美国稀土团队
- ◎ 蒙古霍特戈尔稀土资源量达 220 万吨

◇ 科技前沿 38-44

- ◎ 西安交大科研人员在磁性材料固态相变领域取得重要进展
- ◎ 中科院广州地化所揭示微生物对花岗岩风化过程中稀土元素活化和分异的影响

◇ 政策法规 45-45

- ◎ 首个稀土领域江西绿色生态标准发布

◇ 市场行情 46-50

- ◎ 2023 年 2 月稀土价格走势

◇ 稀土知识 51-68

- ◎ 稀土钇的开发及应用

2022年我国十种有色金属产量同比增4.3% 今年有望突破7000万吨

2月10日，中国有色金属工业协会以视频形式召开2022年有色金属工业运行情况新闻发布会。中国有色金属工业协会党委常委、副会长、新闻发言人陈学森通报2022年有色金属工业经济运行情况及对2023年有色金属工业走势预测，并回答相关提问。

陈学森表示，2022年，面对世界格局加速演变、新冠疫情冲击、世界经济下行等多重考验，我国有色金属行业以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，坚决贯彻落实党中央、国务院有关决策部署，沉着应对风险挑战，奋力完成改革发展稳定任务。总体看，2022年我国有色金属工业运行呈现出平稳向好的态势，体现在以下五个方面：

一是有色金属工业生产稳中有升。初步统计2022年，我国十种常用有色金属产量为6774.3万吨，按可比口径计算比上年增长（下同）4.3%，其中精炼铜产量1106.3万吨，比上年增长4.5%；原铝产量4021.4万吨，比上年增长4.5%。六种精矿金属量670.2万吨，比上年增长1.0%。氧化铝产量8186.2万吨，比上年增长5.6%。铜材产量（尚未扣除企业间重复统计约350万吨）2286.5万吨，比上年增长5.7%；铝材产量（尚未扣除企业间重复统计约1600万吨）6221.6万吨，比上年下降1.4%。2022年我国工业硅产量约为335万吨，同比增长24%左右。

2022年，规上有色金属企业工业增加值比上年增长5.2%，增幅比全国工业

增加值增幅高出1.4个百分点。新冠疫情以来，规上有色金属企业工业增加值呈现出稳定回升的态势，2020年至2022年间，分别增长2.1%、3.1%、5.2%。

二是固定资产投资实现两位数增幅。2022年，有色金属工业完成固定资产投资比上年增长14.5%，增速比上年增速加快10.4个百分点，比全国固定资产投资增速高出9.4个百分点，其中，矿山采选完成固定资产投资增长8.4%；冶炼和压延加工完成固定资产投资增长15.7%。2022年，民间完成有色金属固定资产投资比上年增长16.9%，增速比上年扩大5.7个百分点，比有色金属工业固定资产投资总投资增速高2.4个百分点。新冠疫情以来（2020年至2022年），有色金属工业完成固定资产投资增幅分别为：-1.0%、4.1%、14.5%，2022年增幅创近九年历史新高。

三是铜铝矿山原料进口及铝材出口创历史新高。根据海关数据统计，按照可比口径计算，2022年有色金属进出口贸易总额（含黄金）3273.3亿美元，同比增长20.2%。其中：进口额2610.5亿美元，增长18.7%；出口额662.8亿美元，增长26.7%。其中，我国铜精矿进口实物量为2527.1万吨，比上年增长8.0%；未锻轧铜及铜材进口量587.1万吨，比上年增长6.2%；铝土矿进口量1.25亿吨，比上年增长16.9%。2022年，我国未锻轧铝及铝材出口量660.4万吨，比上年增长17.6%；出口额260.0亿美元，比上年增长33.7%，增幅比出口量增幅高16.1个百分点。2022年，稀土出口量4.9万吨，比上年下降0.4%；出口额10.6亿美元，比上年增长62.8%，增幅比出口量增幅高63.2个百分点，首次实现量减额增的态势。

四是国内现货市场铜铝铅锌等主要有色金属价格基本运行在合理区间。

2022年，国内现货市场铜均价67470元/吨，比上年下跌1.5%；国内现货市场铝均价20006元/吨，比上年上涨5.6%；国内现货市场铅均价15260元/吨，比上年下跌0.1%；国内现货市场锌均价25154元/吨，比上年上涨11.4%；国内现货市场工业硅均价20125元/吨，比上年下跌11.5%；国内现货市场电池级碳酸锂均价46.64万元/吨，比上年上涨254.7%。总体看，2022年国内市场铝、锌、电池级碳酸锂年均价格上涨，尤其是电池级碳酸锂年均价格成倍上涨，但铜、铅、工业硅年均价格下降。

五是规上有色金属企业实现利润3315亿元。2022年，规上有色金属工业企业实现营业收入79971.9亿元，比上年增长10.5%。实现利润总额3315.0亿元，比上年下降8.0%，为历史第二高值。其中矿山企业实现利润增加，冶炼、加工企业实现利润下降。按金属品种分，铝、铜、铅锌、黄金、钨钼、稀土、镍钴几个主要品种利润分别为951.5亿元、693.4亿元、290.5亿元、179.4亿元、160.9亿元、154亿元、128亿元，铜、铅锌、黄金、稀土、锑、镁、白银等金属品种实现利润增长，铝、钨钼、镍钴、锡、工业硅等金属品种实现利润下降。

陈学森表示，2023年，我国有色金属工业生产总体仍会保持平稳运行。

从全球经济环境看，2023年美联储加息幅度放缓，但加息周期尚未结束，受世界流动性紧缩、需求放缓、地缘冲突、产业链重构等多重因素影响，全球经济下行压力加大，外需对中国经济的支撑进一步减弱，尤其是对具有金融属性较强，并且产业链、供应链与国际市场密切相关的有色金属的影响不可低估。

从国内经济环境看，2023年是全面贯彻落实党的第二十次代表大会精神的开局之年，中央经济工作会议明确了2023年做好经济工作的思路和重点任务，大力提振了市场信心。国家出台的扩大内需、稳定房地产等一系列稳增长政策在2023年将会逐步显效，支撑有色金属工业平稳运行，一是光伏、风电等可再生能源的发展进一步拉动铝、工业硅、稀土等有色金属需求；二是电动汽车、新能源电池及储能设备等产业的快速发展，也在不断提高铜、铝、镍、钴、锂等金属的应用；三是铝材消费有望回稳，2023年，房地产业下行的趋势有望缓解，建筑、家电等行业对铝材的需求，尤其是对建筑铝型材需求的收缩将有所改观，加上以新能源汽车、光伏为代表的新兴领域对铝材需求的增长，2023年我国铝材需求规模有望回稳。

在不出现“黑天鹅”事件的前提下，对2023年有色金属工业主要指标判断如下：

一是2023年有色金属工业生产总体仍会保持平稳运行，十种常用有色金属产量增幅在3.5%左右，有望突破7000万吨；工业增加值增速在4.5%左右。

二是2023年有色金属行业固定资产投资有望保持较快增长，增幅保持在5%~10%之间。

三是2023年有色金属产品进出口保持增长，铜铝等矿山原料进口有望保持稳定或略有增加，但2023年铝材出口增幅减缓是大概率事件。

四是预计2023年有色金属价格走势各金属品种间将会有所分化，部分金属品种受能源成本支撑价格将以宽幅震荡为主基调，部分金属价格或将出现高位回调。总体看，2023年有色金属价格或呈稳中有降的趋势。

五是 2023 年主要有色金属品种价格回调、能源等原材料成本上升，单位产品赢利能力收窄。预计 2023 年规上有色金属工业企业全年实现利润在 3000 亿元左右。

(来源：中国有色金属报)

江西：支持稀土储氢技术路线加快发展

江西省发改委、江西省能源局日前印发《江西省氢能产业发展中长期规划（2023-2035 年）》：依托稀土等矿产资源优势，大力发展储氢新材料产业，实现重点细分领域突破。充分利用省内丰富的稀土矿产资源，以及省内有关企业、高校、研究机构在稀土新材料方面领先的技术创新和产业化实力，在固态储氢领域加速布局，提高稀土新材料原始创新能力和高端应用水平，进而发展基于新型稀土储氢材料的高能量密度、快动态响应固态储氢装备产业。力争用 10-15 年时间，将江西省稀土储氢新材料技术及产业打造成为具有国内领先地位的细分领域。

发展规划原文如下：

江西省氢能产业发展中长期规划（2023-2035 年）

2023 年 1 月

前 言

氢能是一种来源丰富、清洁低碳、灵活高效、应用广泛的二次能源，可以与电能、热能等异质能源品种系统融合、互联互通，是清洁能源体系的重要组成部分，是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体。氢能产业是战略性新兴产

业和未来产业发展的重要方向。

江西正处于在加快革命老区高质量发展上作示范、在推动中部地区崛起上勇争先的关键跨越期。加快氢能产业高质量发展，并以氢能为支撑规模化发展可再生能源和构建新型电力系统，推动产业再电气化和终端用能清洁化，是我省实现能源结构低碳转型和重型产业深度减碳的重要路径。在我省奋力实现碳达峰碳中和目标和全面建设“六个江西”的新征程中，氢能产业具有广阔的发展前景和重要的战略意义。

本规划根据国家《能源技术创新行动计划(2016-2030)》《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》和《江西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等文件编制。规划期限为2023-2035年，是我省今后一个时期氢能发展的指导性文件。

一、发展现状与形势

（一）国际、国内现状

当前世界正经历百年未有之大变局，面对全球气候风险、环境危机和能源安全问题，新一轮科技革命和产业变革正在加速进行，碳达峰碳中和正逐渐成为国际社会共识与一致行动。在全球能源清洁低碳转型发展的大势下，氢能开发利用关键技术不断取得重大突破，展现出广阔的发展前景，受到了多个国家和地区的广泛关注。

从国际来看，全球氢能制取、储运和燃料电池等核心技术研发和关键材料制造日渐成熟，产业链逐渐完善，市场规模迅速扩大，氢能基础设施建设明显提速，终端应用成本呈现持续下降趋势，部分区域规模化推广条件基本具备。美国、日本、韩国、欧盟等主要发达国家和地区均将氢能纳入未来能源发展战

略，持续加大技术研发与产业化扶持力度，推动氢能清洁、经济、可靠发展和多元化、规模化应用，逐步扩大氢能在终端能源体系中的比重。

从国内来看，我国氢能发展已积累了一定的基础，初步掌握了全产业链主要技术和生产工艺，氢能产量居世界首位，可再生能源制氢基础条件领先，部分重点经济圈已出现氢能产业的区域化集聚，以氢燃料电池汽车应用为重点的氢能示范应用已在部分区域实现。近年来，国家高度重视引导氢能产业健康有序发展，氢能在构建清洁低碳、安全高效能源体系中的战略定位更加清晰，在实现碳达峰碳中和目标的进程中将发挥重要的作用。

（二）发展基础

从省内来看，我省氢能产业发展已初步涵盖制、储、输、用各个环节，并在相关技术研发和装备、材料制造等领域启动布局，为氢能产业发展打下了一定的基础。

一是氢气制备和应用初具规模。制氢方面，据初步统计，我省从事氢能制备的企业已有十余家，主要集中在九江、赣州等区域，氢气年产量约 30 万吨。其中，九江两个制氢项目分别年产氢 18.1 万吨和 7.5 万吨，为目前省内规模最大的制氢项目；其他年产氢 1000 吨以上的项目主要为氯碱工业副产氢和甲醇重整制氢，成本相对较低，具备进一步扩大规模的潜力。氢能服务方面，部分企业拥有氢气制备、提纯和管束车运输能力，已成熟运营市场化氢气供应服务。氢能应用方面，当前主要集中在石化、化工、有色领域，此外在医药、电子等领域也有一定规模的应用，氢能应用领域与我省传统优势产业的契合度较高，应用前景较好。基础设施方面，九江市已建成全省第一座日加氢 500 公斤的油电氢混合站，积极推进氢能船舶研制和应用，为氢能在水陆交通领域示范应用的启

动提供了先决条件。

二是氢能相关科技创新势头积极。省内重点高校和氢能产业骨干企业充分发挥创新主体作用，搭建了一批氢能科技创新和产品研发平台，在储氢合金材料研制、燃料电池电堆与材料制备、工业固废提取制氢剂等领域取得了积极进展。省内相关研究机构建立了稀土储氢合金研发试验线和镍氢电池研发试验线，完善了储氢合金及镍氢电池性能的测试平台，提升了我省在储氢材料领域的技术研发水平，提高了性能测试能力，加快了储氢合金粉新产品的产业化发展。南昌大学共青城光氢储技术研究院研发的工业固废提取制氢剂项目，能够以相对较低的成本从工业固废中提取制氢剂。部分企业在多种类型氢燃料电池电源系统的研发上取得了积极成果，已具备年产 1000 件以上相关产品的生产能力，并正在着力攻关具有更高水平的产品研发。重点高校和骨干企业的创新实践，为我省氢能产业聚集专业人才、探索产学研结合创新模式提供了有利条件。

（三）面临形势

从全国氢能产业政策导向来看，氢能产业正处于加速发展的重要机遇期，但也需认识到氢能作为新兴产业还面临许多有待解决的问题，尤其是不同区域氢能发展的实际条件差别较大，面临的问题也各不相同。总体来看，我省氢能产业还处于初期探索阶段，产业发展面临以下突出的问题。

一是能源资源禀赋不足。化石燃料制氢和电解水制氢是规模化制氢的重要方式。我省煤炭和常规油气资源匮乏，且地处国内能源流末端，运距较远导致煤价、电价、气价偏高，风电、光伏资源处于国家最弱、较弱地区，支撑氢能产业规模化发展的能源资源禀赋较为薄弱。在清洁电力进一步成为电量增量主体

前，我省氢能发展将面临着巨大的能源消耗压力和成本劣势。

二是产业发展基础薄弱。我省氢能制、储、输、用各环节统筹不足、布局分散，产业协调发展基础薄弱，现有为数不多的氢能相关企业以“自给自足”为主，上游制氢环节主要为化石燃料制氢，且和下游氢能应用重点领域联系不够紧密，缺乏集群协作效应。氢能基础设施建设和配套服务能力较为滞后，制约了一部分氢能应用的发展。

三是核心能力严重匮乏。我省在氢能产业相关领域的科研成果较少，技术研发领军人才及专业化团队紧缺，省内高校在氢能相关专业方面还没有一流专业，本土尚无相关龙头企业和有重要影响力的科研机构，核心技术、关键材料、重要装备制造水平与国内先进水平还有较大差距，氢能产业发展的核心能力严重匮乏。

四是制度体系尚未成形。我省氢能相关基础设施审批和运营管理缺乏总体政策设计和引导，行业安全规程、标准体系等发展滞后，示范项目数量和已探索领域较为局限，产业发展形态和发展路径尚需进一步探索。此外，各级政府、企业及公众对氢能产业发展的态度总体积极，但在氢能发展难点和安全方面的认知还存在不足。

综上，我省氢能产业率先全面发展的基础缺乏，与国内先进省份和地区相比处于相对劣势，在一定时期内仍将处于整体跟进的状态，需要充分结合省内资源、产业和应用需求实际情况，在整体跟进国内先进省份和地区过程中找准产业链比较优势环节，实现局部突破发展。

二、总体要求

（一）指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻落实党的二十大精神，立足新发展阶段，完整、准确、全面贯彻新发展理念，构建新发展格局，紧扣实现碳达峰碳中和目标，贯彻“四个革命、一个合作”能源安全新战略，聚焦“作示范、勇争先”的目标要求，积极融入国内统一大市场，结合省情实际推动氢能产业有力有序发展，以应用示范支撑技术创新，以规划布局引导产业聚集，以完善政策保障安全质量，稳步提高我省氢能消费量，推动氢能成为我省安全高效、清洁低碳能源体系和新兴产业的重要组成部分。

（二）基本原则

1.整体跟进，局部突破。充分借鉴国内外先进经验，发挥比较优势，坚持统筹布局、以点带面，逐步构建区域集聚、上下游协同的氢能产业体系，夯实产业发展基础，结合实际找准突破方向和环节，避免盲目追求全产业链发展和低水平重复建设等问题。

2.政府引导，开放发展。遵循氢能作为新兴产业的发展规律，在发挥市场在资源配置中决定性作用的基础上，加强规划引导和政策激励。加强氢能产业合作，吸引行业龙头、科技新锐落户，带动产业规模快速增长。找准区位定位，积极融入周边区域氢能产业大市场。

3.创新驱动，示范引领。坚持在引进消化吸收已有成熟技术的同时加强有差别的自主创新，支持高校、重点企业和科研机构加强人才引进和技术研发，突出氢能清洁化、低碳化发展导向，推动科研成果转化落地，加快氢能多元化示范应用，促进氢能产业有序迈向规模化、市场化发展。

4.安全为先，稳慎应用。牢牢把握氢能安全生命线，合理把握产业发展节

奏，因地制宜拓展氢能应用场景，稳妥有序推进氢能基础设施建设，加强氢能制、储、输、用全过程安全标准和规范体系建设，稳慎推动氢能在电力、交通、工业等领域的应用。

（三）发展目标

当前到 2025 年，全省氢能产业制度政策环境逐步完善。氢能产业发展基础日益夯实，产业发展跟进战略取得积极成效。氢能技术研发领军人才及专业化团队加快积聚，产业创新能力逐步提高。可再生能源制氢量达到 1000 吨/年，成为新增氢能消费和新增可再生能源消纳的重要组成部分。氢能应用试点、示范项目有序多元化增加，全省燃料电池车辆保有量约 500 辆，投运一批氢动力船舶，累计建成加氢站 10 座。氢能在钢铁、有色、合成氨等工业领域示范项目扎实开展。燃料电池发动机产能进一步扩大，燃料电池应用场景进一步丰富。全省氢能产业总产值规模突破 300 亿元。

2026 年到 2030 年，基本掌握氢能产业核心技术和关键设备制造工艺，产业链基本完备，区域集聚、上下游协同的产业体系逐步成形。产业发展主要特征与国内先进水平差距快速缩小，部分领域比较优势初步显现，多种清洁制氢路线齐头并进发展，电-氢及氢-电系统综合能效显著提高，燃料电池分布式发电、氢储能、氢冶炼、绿氨等示范应用广泛开展，氢能在交通、工业等领域再电气化和深度减碳进程中发挥重要作用，有力支撑碳达峰目标实现。

2031 年到 2035 年，氢能产业发展安全形势稳定，氢能产业规模、质量效益、创新能力进一步提升，产业局部取得重大突破并形成国内领先优势，氢能与电力、交通、工业等多领域广泛实现较高水平融合，可再生能源制氢基本实现市场化，成为全省能源和产业脱碳的重要保障，在能源和产业绿色低碳转型

发展中起到有力的支撑作用。

三、产业布局

(一) 空间布局

结合省内能源、交通、经济等资源和基础设施布局，统筹各地氢能产业发展的综合条件和已有基础，着力建设以“九江-南昌-吉安-赣州”为轴线的“赣鄱氢经济走廊”，贯通链接内部、融入周边的氢经济主动脉，北面融入长江经济带，南面对接粤港澳大湾区，带动东西两翼各地结合自身优势积极发展氢能相关产业，形成全省氢能产业大局协调、分区集聚、多元共生的发展格局和产业生态体系，打造“氢清江西”绿色发展新动能。

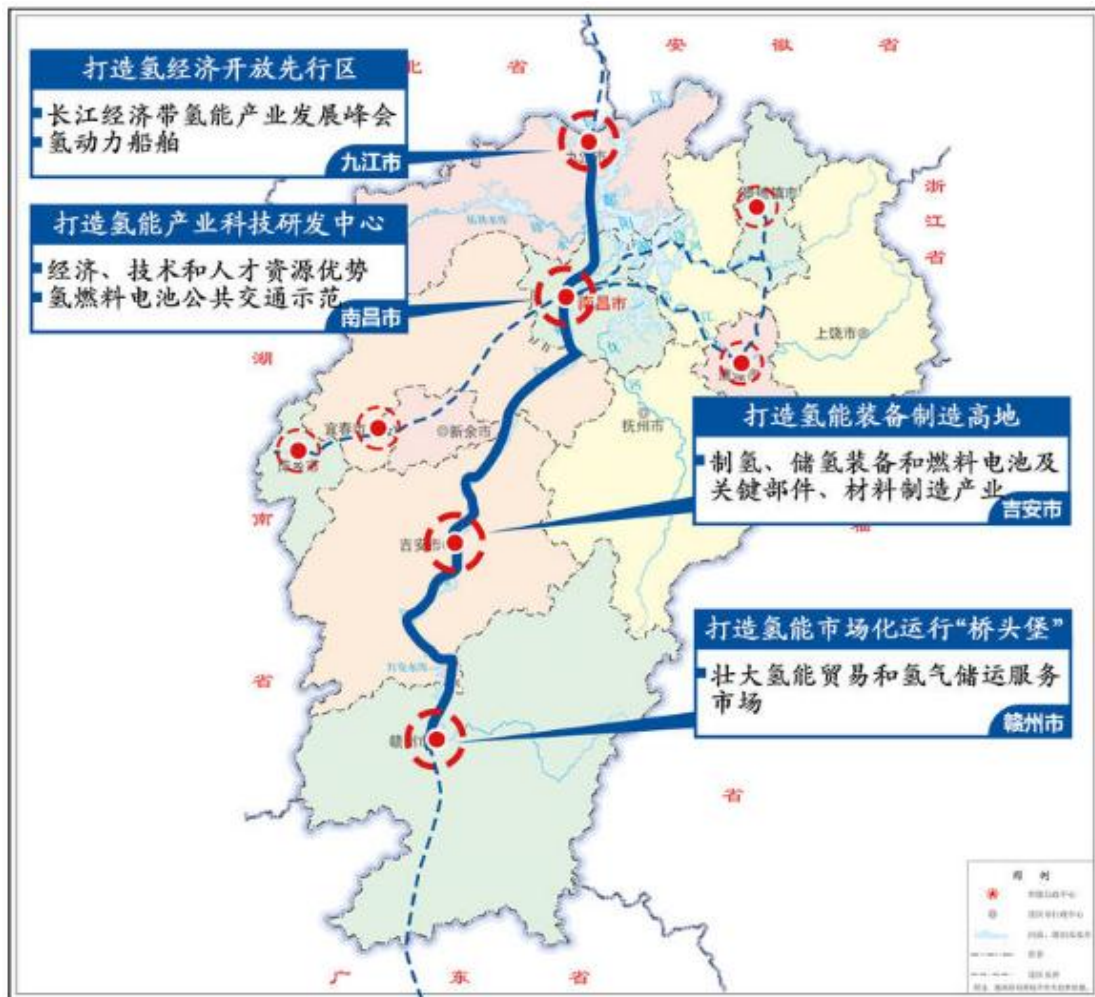


图1 “赣鄱氢经济走廊”产业功能定位布局图

1.北部片区

积极支持九江发展以氢动力船舶为特色的沿江沿湖氢能产业，在产业引领政策方面先行先试，建设“长江经济带氢能产业发展峰会”交流平台，探索氢能在石化、有色冶金等方面应用，发展氢能产业储运环节高端装备制造，打造江西省氢经济开放先行区。

充分发挥南昌作为省会城市的经济、技术和人才资源优势，打造全省氢能产业科技研发中心，集中力量推进产业技术跟进和突破能力。

在南昌开展城市氢燃料电池公共交通示范，以及“南昌-九江”开展城际氢动力物流重卡示范。依托南昌已有汽车产业优势，积极推进氢燃料电池整车研发和生产。加快氢能在交通领域示范，引领建设氢燃料电池汽车环鄱阳湖示范城市群。加强航空领域氢燃料动力应用研究和应用示范。

2.南部片区

积极支持赣州对接周边氢能发展先进省份和地区，进一步壮大氢能贸易和氢气储运服务市场，探索氢能产业市场机制，建设全省氢能市场化运行的“桥头堡”。

积极支持吉安加大氢能产业招商引资力度，加快落地制氢、储氢装备和燃料电池及关键部件、材料等氢能装备制造产业，打造氢能装备制造高地，为全省氢能基础设施建设筑牢基础。

依托赣州、吉安丰富的可再生能源资源，加强可再生能源制氢和氢能在电力领域的示范应用，探索以氢能支撑可再生能源发电大规模、高比例发展，提升氢能在能源体系中的作用。结合国家和省级天然气管网规划布局，稳妥探索管道输氢和天然气掺氢试点示范。

3.东西两翼片区

支持鹰潭、萍乡、景德镇、宜春等结合有色产业、铜产业集群发展规划和钢铁产业、陶瓷生产绿色转型、锂电产业融合等，探索氢能规模化应用，推进氢冶炼技术。

支持其他地区结合本地优势资源，加强氢能与本地特色产业融合发展，因地制宜推进氢能在电力、交通、工业等领域的应用，共同融入全省氢能发展总体格局。

（二）突破方向

结合省情实际，我省氢能产业一方面在制、储、输、用环节实施整体跟进，以逐步扩大氢能供给、提升储运便利性、降低用氢成本、保障用氢安全。另一方面，结合省内能源资源禀赋、产业结构和区位条件，从具有比较优势的领域入手实施局部突破。

一是依托稀土等矿产资源优势，大力发展储氢新材料产业，实现重点细分领域突破。稀土储氢材料是氢能利用的重要功能材料和储氢载体，具有广阔的发展和应用前景。稀土矿产是我省的优势资源，也是发展稀土储氢新材料的重要基础。充分利用省内丰富的稀土矿产资源，以及省内有关企业、高校、研究机构在稀土新材料方面领先的技术创新和产业化实力，在固态储氢领域加速布局，提高稀土新材料原始创新能力和高端应用水平，进而发展基于新型稀土储氢材料的高能量密度、快动态响应固态储氢装备产业。力争用10-15年时间，将我省稀土储氢新材料技术及产业打造成为具有国内领先地位的细分领域。

二是把握好重要区域发展战略机遇，积极壮大氢能一般装备制造业，实现氢能产业规模突破。目前，国内已经形成了以燃料电池车辆为主要和驱动的四大

产业集群，包括京津冀、华东（山东、上海、浙江、安徽、福建）、华南（佛山-云浮）、华中（武汉）。我省东面、北面、南面与氢能高地毗邻，在全面参与长江经济带建设和对接粤港澳大湾区等国家重大区域发展战略中，发挥区位优势 and 基础工业能力优势，积极承接沿海省份氢能产业一般装备制造产能扩张，扩展氢能产业发展的纵深空间，融入区域氢能产业链和国内氢能产业统一大市场。力争以氢能装备制造为重点突破口，快速做大我省氢能产业总体规模，为氢能在其他方面的突破创造有利条件。

三是结合关联产业特点，积极拓展氢能产业化应用场景，实现氢能应用模式突破。我省新能源项目以分布式开发和就近利用为主，渗透率较高，部分区域电力送出和消纳形势日趋紧张，积极发展风电、光伏电解水制氢和“氢电耦合”项目，以及结合智能微网的氢能综合利用项目，在新能源和氢能相互支撑发展中发挥重要的作用。我省钢铁、石化和化工产业规模较大，以焦炉煤气、丙烷脱氢、氯碱尾气等工业副产气制氢具备较好的前景，相关产业作为谋划氢能近期产业布局的重要参照，为以可接受成本启动氢能产业发展打好基础。结合我省航空工业和学科优势，集中力量推进氢燃料涡轮发动机、氢燃料电池和混合氢动力装置在航空器、无人机方面的应用研发，打造未来空中交通领域实现碳中和的核心技术。尝试从多方面推进氢能应用，力争在电力等2-3个产业化应用场景取得重要突破，实现氢能与相关产业深度融合发展。

四、重点任务

（一）稳妥探索氢能示范应用

1.重点引导电力领域试点应用

实施“氢企燎原”计划，鼓励有实力的能源企业在赣搭建氢能产业投资平

台，重点开展氢能在电力领域应用试点和投资，积极推广试点成效，促成赣鄱大地氢能燎原之势。重点促进可再生能源与氢能相互支撑、高效发展相关应用。结合新能源规模化发展和新型电力系统建设，鼓励开展“氢电耦合”和氢储能等示范应用，发挥氢能在促进可再生能源消纳、电网调峰等方面的作用。开展“新能源+氢能”专项试点，引导建设一批与风电、光伏发电配套的“氢电耦合”综合利用示范项目，培育一批具有相关产品研发、设计、生产和工程建设能力的本土骨干企业。鼓励在通信基站、数据中心、铁路通信站点、电网变电站等基础设施场所使用氢能作为应急备用电源，提升设备供电可靠性。因地制宜布局氢燃料电池分布式发电和热电联供设施，推动在有需求、有条件的区域开展“冷、热、电、氢”多能融合互补利用示范，提升终端能源效率和低碳化水平。

2.有序推进交通领域示范应用

结合加氢网络建设和氢燃料电池技术发展，以对缩短燃料装填时间、延长终端续航能力要求高的应用场景为重点，有序开展氢燃料电池车辆示范应用。鼓励新增城市公交、环卫车和中重型货运车辆使用氢能。鼓励有条件的风景旅游区、会展中心等使用氢能接驳客车，探索在工矿区、港口、物流园、重点产业区示范应用其他类型的氢动力作业车辆，支持以氢能和其他清洁能源利用为重点打造氢能示范小镇、产业园等。支持氢燃料电池和氢燃料混合动力在轨道交通、船舶领域应用。鼓励依托现有航空产业基础开展氢动力在航空器、无人机领域示范应用。支持吉安、九江、南昌等城市结合本地及周边区域氢能产业建设情况，与省内外有关城市合作申报国家氢燃料电池汽车应用示范城市群。

3.逐步探索工业领域替代应用

在经济性可承受的基础上，以化工、冶金、炼化等高耗能行业为重点，探索利用氢能替代化石能源提供高品质热源，有效扩大工业领域能源消费清洁替代，实现产业再电气化和深度脱碳。鼓励基于可再生能源和绿氢的“零碳新工业”“零碳产业园”建设。支持现有用氢较为集中的石化、化工项目有序实施CCS“蓝氢”和可再生能源“绿氢”替代，支持合成氨、合成甲醇等传统化工企业新增电解水制氢装置或新建绿氢化工项目，实现绿色化工示范。密切跟进国内氢冶炼工艺发展，鼓励开展以氢作为还原剂的冶金技术研发应用，依托江西钢铁产业基础进行高炉改造，探索建设气基还原工厂进行氢能炼钢，降低传统冶金工艺中碳还原导致的二氧化碳排放。

专栏 1 氢能产业创新应用示范工程

电 力	<p>实施“氢企燎原”计划，着力培育4-5家在氢能电力应用方面具有突出实力的骨干投资企业，重点开展以下应用示范工程。</p> <p>在可再生能源富集、消纳受限区域，开展集中式可再生能源制氢、非并网型可再生能源制氢等示范应用，探索氢储能与可再生能源发电协同运行的示范模式。</p> <p>开展“新能源+氢能”专项试点，安排100万千瓦以上风电、光伏发电项目，配套建设一批具有调峰、调频能力的“电-氢-电+X”模式“氢电耦合”综合利用示范项目。</p> <p>支持吉安市开展调峰电解水制氢工程示范。支持南昌大学推进第二代光氢储独立智能微网系统产业化。</p> <p>鼓励结合新建和改造通信基站、数据中心、铁路通信站点、电网变电站等工程，开展氢燃料电池备用电源示范应用，并逐步替代原有电池系统。</p>
交 通	<p>结合公共交通低碳要求，引导有条件的设区市开展氢燃料电池公交车试点应用，促进技术创新和产业发展。</p> <p>以南昌为核心，开展氢燃料电池城市公共交通示范运行线路，引领建设氢燃料电池汽车环鄱阳湖示范城市群。</p> <p>支持吉安、九江、南昌以灵活合作的方式与省内外有关城市共同申报国家氢燃料电池汽车应用示范城市群。</p> <p>鼓励在旅游景区新增观光、接驳等客运车采用氢燃料汽车。</p> <p>支持吉安规划运营吉安-井冈山氢能公交（旅游）专线，打造“绿色出行+红色旅游”特色示范项目。</p> <p>在矿区、工业园、物流园和城际物流等行驶路线固定的场景，探索氢燃料电池中重型运输车辆示范应用，满足物流运输需求。</p> <p>在有条件的工矿区、港区、重点产业区，开展氢动力作业车辆示范应用。</p> <p>支持九江在江河、湖泊等场景探索氢能船舶等示范应用。</p>

	支持省内有关航空企业和南昌航空大学积极开展无人机、航空器氢燃料动力研发和应用示范。
工业	<p>结合省内化工、冶金、炼化等行业发展情况，积极探索氢能作为高品质热源的清洁替代作用。</p> <p>支持现有用氢较为集中的石化、化工项目有序实施 CCS “蓝氢” 和可再生能源 “绿氢” 替代，支持合成氨、合成甲醇等传统化工企业新增电解水制氢装置或新建绿氢化工项目，实现绿色化工示范。</p> <p>鼓励基于可再生能源和绿氢的 “零碳新工业” ” 零碳产业园” 建设。鼓励省内有关石化企业等化工企业逐步调整配套氢源，以蓝氢、绿氢替代灰氢。</p> <p>支持鹰潭开展氢能在有色产业和铜产业的示范利用。鼓励九江、萍乡开展钢铁、有色产业氢还原剂的示范利用。</p>

（二）统筹氢能产业设施布局

4.有序引导氢能产业集聚

统筹全省氢能产业布局，科学规划氢能产业整体发展路线，依托已有产业基础和重大项目，着力培育产业“硬核”环节。引导氢能产业集群化发展，加强氢能产业与电力、交通、工业等产业协同，打通中间环节，有序推动氢能产业固强补弱，降低产业生产和流通成本，提高产业整体效能水平。发掘省内氢能相关产业比较优势，发挥江西省区位优势，加强面向氢能产业发展领先的沿海省份承接相关产业扩张，加大氢能产业招商引资力度，加快培育省内产业力量，积极“链入”长江经济带、长三角、粤港澳大湾区等氢能产业高地集群。

5.合理布局氢气制备设施

结合我省化石燃料和能源资源禀赋相对薄弱的实际，根据产业发展的阶段，分阶段合理选择制氢技术路线，逐步构建清洁低碳、经济高效的多元制氢体系。优先利用现有化工企业工业副产氢资源，加强配套设施建设，提升氢气纯化能力，提高工业副产氢品质和回收利用率。在氢能应用聚集区域，合理布局成熟的商业化制氢项目，满足规模化就近利用氢能需要，降低氢能供给和应用成本。鼓励在风能、太阳能等能源资源条件好的区域，利用可再生能源和低谷电力电解水制氢，

优先在新能源消纳困难区域开展弃电制氢，探索可再生能源分布式就近制氢、就地利用。在农林生物质废弃物资源丰富的区域，因地制宜开展多种生物质资源制氢实证研究，有序推进生物质制氢产业化。

6.稳步构建氢能储运体系

坚持安全可控、高效流通的原则，稳步推动规范化、高效率的氢能储运体系建设。积极加强固态储氢领域布局，支持稀土储氢技术路线加快发展。结合产业发展需求，进一步提高高压气态储氢和长管拖车运输运输能力，在保障安全的前提下，合理提高氢气压力，有序促进储运环节降本增效。稳妥开展氢气储运新装备、新技术、新材料应用，探索深冷高压、液氢和深部地下盐穴储氢等多种储运方式实践。稳妥推进管道输氢和天然气掺氢技术示范应用。

7.统筹规划加氢服务网络

总结省内已有加氢站示范项目建设运营经验，坚持安全为先、需求导向，统筹推进加氢网络体系建设。在氢能产业发展较快的区域，支持利用现有符合条件的加油站、加气站，按照国家法规和标准改扩建成具备油、气、氢供给能力的一体化综合交通能源服务站。鼓励依托高速公路网络，在有条件的服务区配套建设公共加氢站。鼓励利用物流园区、工业园区内存量土地新建加氢站。探索分布式制氢、储氢、加氢一体化的加氢站等新模式。

8.积极落地氢能装备产能

围绕省内外氢能基础设施建设和氢能应用市场需要，积极引进和发展氢能装备制造产业。积极发挥省内工业优势，发展碱性电解槽、储氢长管、储氢瓶（罐）和小功率氢燃料电池等氢能成熟装备制造。加强氢燃料电池龙头企业招商引资，落地氢燃料电池以及电堆、双极板等核心部件、关键材料生产项目，快速壮大氢

能产业总体规模。加大力度培育本土氢能装备制造优势企业，进一步增强制氢电解槽、储氢容器和储氢合金材料的制造能力，着力提高生产技术水平，强化产品品质和市场竞争力。加快布局氢燃料电池发动机和燃料电池乘用车、物流车、特种作业车整车制造项目，积极推进氢动力船舶制造项目。

专栏 2 氢能产业发展布局重点项目

1. 副产氢综合利用项目：积极推进九江濂溪区化纤工业基地、吉安新干工业园工业副产氢和萍乡旭阳焦玻焦炉煤气综合利用项目，加强工业副产氢提纯、压缩、充装设施建设，提高工业副产氢利用率。

2. 可再生能源制氢和多种清洁制氢：以赣州、吉安等可再生能源资源丰富、规划项目集中的区域为重点，推进一批可再生能源水电解制氢项目。探索可再生能源分布式就近制氢、就地利用。在农林生物质废弃物资源丰富的区域，因地制宜开展多种生物质资源制氢试点示范项目。

3. 氢储运和加注设施：以南昌、九江为重点，在环鄱阳湖区域利用符合条件的加油站、加气站，建设一批日加氢能力 500 公斤到 1000 公斤的综合能源站，同步加强氢气储运配套设施建设。依托九江港建设长江流域绿色甲醇、合成氨等综合集散贸易基地。在吉安市大型物流园开展公铁联用输氢示范运营，逐步探索氢储运由低压到高压、由气态到多相态、由近距离到中远距离的运输。

4. 氢能装备制造项目：建设吉安氢能装备制造高地，依托井冈山经济技术开发区打造“先进氢能装备产业园”，加快落地氢储能四元材料、氢燃料电池金属双极板电堆生产线落户。以南昌市汽车产业为基础，引进氢燃料相关配套产业，开展氢燃料电池整车研制。支持九江、鹰潭引进氢气储运设备、加氢装备和氢能发电设备研发和制造项目。加快九江氢能船舶研究和应用。支持南昌大学共青城光氢储技术研究院研发培育氢燃料电池核心材料与部件制造产业。

（三）加强氢能产业技术创新

9. 持续提升关键核心技术水平

充分发挥后发优势，做好整体跟进提升，对标国内外先进技术，围绕氢能产业薄弱环节，加强技术引进、消化和吸收，努力缩小技术储备差距，夯实产业创新发展基础。强化以氢能为媒介的电、热能、燃料等异质能源互联互通技术研究，不断提高电-氢及氢-电系统综合能效，推动氢能深入融入现代能源体系，不断扩大氢能高效应用范围。集中优势力量开展氢能产业颠覆性技术创新，重点推进基于生物质超临界水气化制氢发电多联产技术和适应可再生能源波动性的质

子交换膜（PEM）制氢技术研究，在充分论证的基础上推动产业化示范。持续提高碱性电解水制氢效率，进一步降低制氢综合成本。着力提升氢能产业关键核心技术水平，加快推进高效可再生能源制氢、高回收率氢气纯化、氢燃料电池、安全高效储氢、氢冶炼和氢能安全监测保障等关键技术研究，促进氢能产业规模化、商业化发展条件逐步成熟。

10.着力打造产业创新支撑平台

聚焦氢能产业重点领域和关键环节，汇聚省内外重点科研机构、高等院校和龙头企业的创新资源，打造高水平氢能技术创新平台，为全省氢能产业加速示范试点、实现整体跟进、寻求局部突破形成合力。推进以院校为支撑、企业为主体、市场为导向、产学研相结合的产业创新中心、工程研究中心、技术创新中心、重点实验室和前沿交叉研究平台，依托首批氢能综合利用示范项目建设科技创新创业孵化基地和成果转化、知识产权运营、产品检测认证等氢能创新支撑平台。培育一批具有自主知识产权的技术创新型企业，在氢能产业重要技术取得突破的基础上，积极引导企业整合资源、协同发展，打造具有领先优势的产业发展平台。

11.推动建设氢能专业队伍

立足氢能产业创新发展需要，落实人才引进政策，实施“氢赣领军”专项人才引进计划，主动对接引进氢能领域领军人才和高层次创新团队，提升氢能前沿技术研发领头动力。建立省级氢能产业专家智库，为全省氢能产业发展提供政策咨询、技术攻关、成果转化等方面的合作与服务。以首批氢能综合利用示范项目为载体开展重点科技项目研究和成果转化实证，聚集和培养一批氢能产业高端人才。支持国内外院校、研究机构和企业省内建立研究中心，夯实氢能产业发展的专业人才基础。建立健全人才培养培训机制，支持省内高校开设氢能相关专业，

加快氢能技术创新型人才培养，建立合理的产业人才梯队。

12.积极开展氢能技术创新合作

立足江西毗邻粤港澳大湾区、长三角的区位优势，鼓励省内院校、研究机构和企业加强与周边地区技术先进相关单位的交流，推进氢能产业核心技术、关键材料、重大装备研究创新合作。支持省内企业在国内外氢能产业研究高地设立研发机构，开展产业合作和技术引进。鼓励省内企业加入产业联盟和国际氢能委员会等国内外组织，参与氢能产业标准和发展路线图的制定。

专栏3 氢能产业技术创新重点工程	
关键核心技术研发	<p>加强质子交换膜（PEM）制氢技术、高效低成本碱性电解水制氢技术研发。</p> <p>加强光氢催化、光电氢转化、光热氢转化、氢医学、氢农学等氢能源和氢生物领域关键技术研究。</p> <p>支持九江学院长江绿色氢能研究中心推进太阳能光催化制氢、光电化学产氢研究。</p> <p>支持江西理工大学推进基于生物质超临界水气化制氢发电多联产技术产业转化，继续加强基于氢能的闪速冶金关键技术研究和中试项目建设。</p> <p>支持南昌大学氢能院进一步加强工业固废提取制氢剂研究。</p> <p>继续支持江西理工大学、省内有关企业和研究机构充分利用我省稀土资源优势，布局固态储氢技术路线，加强高性能低成本稀土储氢合金的研发与产业化，加快“固态储氢材料—氢气固态存储及利用—固态氢燃料汽车”等技术研究和应用示范。</p>
产业创新支撑平台	<p>以首批氢能综合利用示范项目，建设涵盖制氢、储运和氢能利用的科技创新孵化基地和成果转化、知识产权运营、产品检测认证等氢能创新支撑平台。</p> <p>支持南昌建设全省氢能产业科技研发中心，整合省内外高校优势学科、龙头企业、科研机构的创新资源，搭建江西省氢能技术创新平台和科技成果转化平台，集中力量突破制约氢能产业发展的重大基础理论研究和应用研究。</p> <p>支持南昌大学依托光氢储系统技术产教融合重点创新中心，推进氢燃料电池核心技术研发平台建设，积极打造有影响力的氢能技术研发与检测中心。</p> <p>支持吉安市、江西理工大学等合作建设氢能与碳中和科创中心，依托氢能装备产业园打造氢能技术研发实验基地。</p> <p>围绕氢能产业安全发展打造产业创新公共服务平台，推动建设氢能安全技术重点实验室，搭建氢能标准研究平台、氢能检测试验</p>

	平台、氢能安全运营监测平台，为氢能产业安全技术标准制定和相关产品检测试验提供服务，支撑氢能产业提升创新质量、安全健康发展。
专业人才队伍建设	<p>加强氢能技术研发领军人才及专业化团队的引进，建立省级氢能产业专家智库。</p> <p>依托首批氢能综合利用示范项目为载体，开展一批重点科技项目研究和成果转化实证，聚集和培养一批氢能产业高端人才。</p> <p>鼓励省内化学、材料、物理、电力等相关学科专业加强氢能领域研究。</p> <p>支持省内高校开办氢能相关专业，依托产学研结合平台，为氢能相关企业培养高层次研发人才。</p>

（四）完善氢能发展管理体系

13.建立健全氢能政策体系

创新氢能生产供应、储运等环节的体制机制，统筹好发展与安全、政府与市场之间的关系，聚焦产业引导和管理重要问题，在氢能规范管理、氢能基础设施建设运营管理、氢能产业多元应用试点示范等方面，制定出台相关政策。完善氢能产业化推进、财政扶持、土地规划、金融支撑等方面政策支持，建立健全覆盖氢能技术创新与产业化、氢能供应体系、终端应用、安全与应急管理领域的政策体系，引导氢能产业规范有序发展。以首批氢能综合利用示范项目建设为依托，探索制定小规模分布式能源用制氢项目、加氢站项目、氢气提纯和加压设施、储氢设施和氢气运输设施建设运营管理办法，明确选址规范、建设标准、审批程序、运营管理和监管方式。在确保安全的前提下，参照天然气和火电厂制氢车间管理政策，探索小规模分布式能源用制氢项目不纳入化工园区并可对外销售的管理机制。建立完善氢能产业示范项目、重点科研项目目录管理机制，优先支持具有引领性和可推广前景的项目纳入目录。

14.建立完善氢能产业标准体系

落实国家氢能产业标准，按照国家氢能产业标准体系建设指南，开展氢能产

业相关领域标准化建设。重点围绕制氢技术、氢安全、氢储运、加氢站和燃料电池等领域，科学制定完整的氢能制、储、输、用标准体系。推进氢能安全风险评估相关标准、临氢材料与设备质量和可靠性相关标准、氢能安全风险监测与防护相关标准的建立，切实保障氢能产业安全发展。推动开发氢能利用的碳减排量核算方法，实现氢能在控碳减排方面的价值量化，促进氢能产业发展与碳达峰碳中和相关政策和市场衔接。鼓励龙头企业积极参与各类标准研制工作，支持有条件的社会团体牵头发布相关标准，支持有实力的企业将关键技术转化为先进标准，争取在固态储氢等优势领域形成相关地方标准，积极推动江西优势产品、技术标准成为国家、行业标准。积极依托行业协会推动行业自律，推动产业标准有效执行，推动氢能产业规范化、高质量发展。

15.加强产业全过程安全监管

坚持把氢能产业安全放在重要位置，研究开展氢能安全法规标准体系建设，制定氢能安全发展相关配套法规标准，促进建立氢能产业安全管理长效机制。强化氢能制、储、输、用安全管控，明确安全监管责任分工，制定完善安全管理办法，落实企业安全生产主体责任，落实地方政府氢能产业发展属地管理责任，提高产业发展的安全管理能力水平。强化有关部门专业监管能力，细化管控措施，落实安全监管责任。强化氢能产品质量管控和安全管理体系建设，督促企业制定和完善产品质量管理体系，加大技术人员培训力度，增强产品质量检测水平。形成常态化安全情况综合督查机制，督促开展风险辨识和评估，强化监管力度。强化氢能产业风险监测感知和突发事件应急处置能力建设，推动建设氢能产业安全运行监测预警平台，积极利用互联网、大数据、人工智能等先进技术手段，及时预警氢能产业风险状态，及时采取相应处置措施，有效提升事故预防及处置能力。

五、环境影响和综合效益评价

（一）环境影响初步评价

氢气是清洁、绿色、低碳、无污染的二次能源。中长期规划实施支持氢能的有序健康发展，促进新能源大规模发展和消纳利用，减少化石能源消耗，提高资源利用效率，降低二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物的排放，有利于应对气候变化和生态环境保护。

规划编制过程中坚持生态优先、绿色发展理念，结合区域资源环境承载能力，识别项目环境敏感因素，纳入规划的重点实施项目不涉及生态保护红线等环境制约因素。

规划项目实施过程可能存在的对大气环境、水环境、声环境、土壤环境等不良环境影响，可通过相关工程措施、管理措施和技术手段等进行有效预防和减缓。

（二）综合效益评价

氢能作为零碳、零排放的能源形式，具有长周期、大规模储能优势，可实现异质能源跨地域和跨季节优化配置，是促进可再生能源规模化高效利用的重要载体。通过发展氢能产业，增加氢能和可再生能源应用，可有力推动能源结构的调整，促进关联产业绿色转型发展。

发展氢能产业，将带动交通运输、汽车制造、新材料、装备制造等行业的发展，增加地方税收、改善基础设施、拉动就业，促进地方经济社会可持续发展。

六、组织实施

（一）加强组织领导

建立由省人民政府统筹指导，各有关部门按职责协作的省级氢能产业发展促进协调机制，共同研究解决氢能产业发展重要问题，以产业规划为引领，制定完

善产业发展配套政策体系，指导各地、各相关领域结合实际合理布局氢能产业，推动产业稳慎有序发展。

（二）鼓励创新示范

在符合产业布局规划和安全发展要求的前提下，鼓励地方政府、有关企业和高校、科研机构稳步开展氢能产业技术、管理方式和商业模式创新。支持在产业基础较好、应用场景普遍的重点区域和领域开展先行先试，探索可行经验，促进完善相关政策体系、验证产业发展路径。重点抓好首批氢能综合利用示范项目，发挥好创新平台和载体作用。省级各有关部门对各地、各相关单位开展氢能创新示范的，在可再生能源项目建设规模、土地、财税、科技等方面予以倾斜支持。推动具备条件的氢能相关企业申报成为科技型企业。

（三）强化资金支持

积极争取中央有关资金支持，统筹现有渠道资金和企业、院校科研经费，用好绿色发展基金、省现代产业引导基金等，积极支持省内氢能相关产业发展。探索针对风电、光伏发电制氢的特殊电价，推动绿氢成本逐步下降。积极引导金融机构加大对氢能产业重点项目的资金支持。鼓励各类社会资本以市场化方式支持氢能创新型企业，促进科技成果转移转化。对符合省级科技计划项目的氢能产业，在省级科技专项资金中予以支持。支持符合条件的氢能企业在科创板、创业板等注册上市融资。

（四）深入宣传引导

积极开展氢能科普宣传，建设智能化氢能推广中心，定期举办“氢能周”等活动，加强相关安全法规和安全标准宣贯。依托省内氢能有关高校和研究机构，加强国际和国内氢能产业政策动态、技术前沿等信息的跟进、收集和整理，结合

我省实际定期形成汇编性成果，为相关招商引资和宣传工作提供信息支撑。开展氢能产业相关个人、企业、产品、项目先进评选和表彰宣传，树立行业标杆，引领行业发展。

（五）持续评估改进

建立完善氢能产业统计体系，持续跟踪规划实施情况。推动设立省氢能产业发展指导中心，科学指导氢能产业合理发展，定期开展全省氢能产业发展成效评估，发布氢能产业发展指导方案。针对规划实施过程中出现的新情况、新问题，根据产业发展需要，进一步制定规划阶段性实施方案。

（来源：江西省发展和改革委员会）



中国新发现一种碳酸盐重稀土新矿物—毓川碳钷矿

近日，经国际矿物学学会新矿物命名与分类专业委员会（IMA-CNMNC）评审投票，中国地质调查局矿产资源研究所（以下简称“资源所”）毛景文院士团队申请的新矿物正式获得批准。新矿物的国际矿物学编号为 IMA2022-120，英文名为 yuchuanite-(Y)，中文名为毓川碳钷矿，矿物缩写为 Ych-(Y)。该新矿物以我国著名矿床地质与矿产勘查学家，中国工程院陈毓川院士的名字命名。

毓川碳钷矿是由中国地质科学院矿产资源研究所毛景文院士团队的刘鹏副教授（西北大学地质学系）在粤东北玉水铜矿所发现，这也是继 2021 年发现景文矿($Y_2Al_2V^{4+}_2[SiO_4]_2O_4[OH]_4$) 后该团队再次在玉水铜矿发现新矿物。

据悉，最新发现的毓川碳钷矿是一种罕见的含水碳酸盐重稀土矿物。在显微镜下，毓川碳钷矿呈透明、亮灰色，多以 30-300 μ m 的板状或脉状晶体，与磷钷矿、氟碳钷矿、斑铜矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、硬石膏等共生。

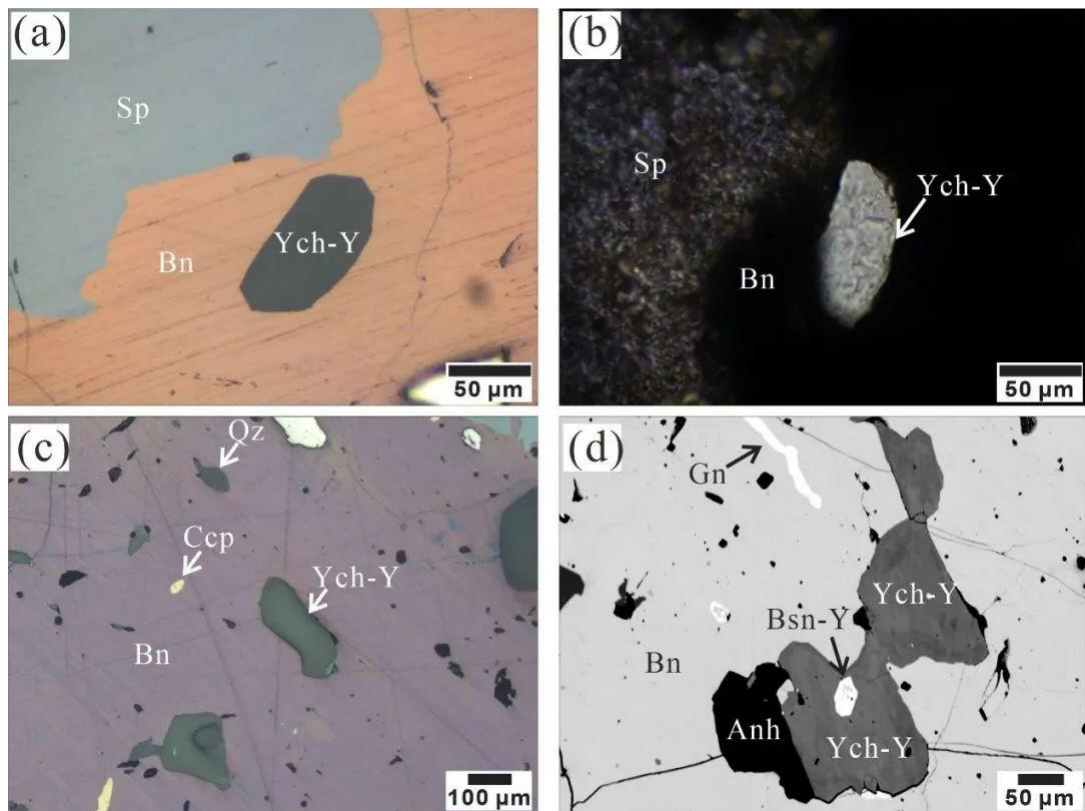


图2 毓川碳钇矿镜下照片 Ych-Y = 毓川碳钇矿

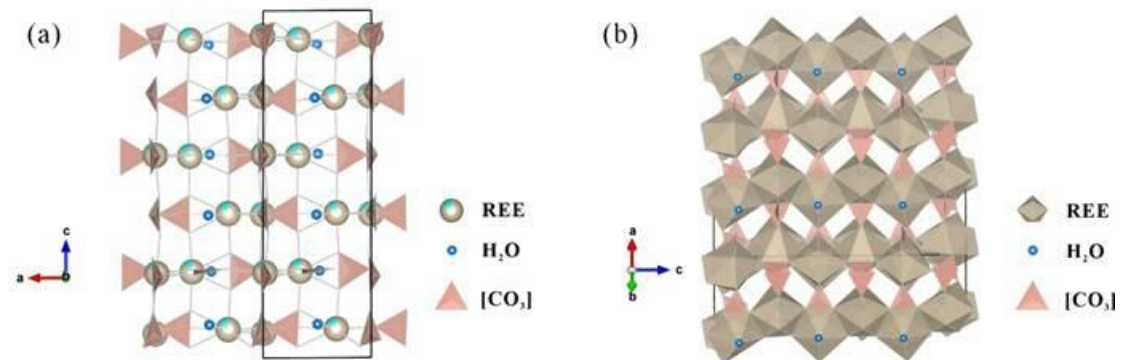


图3 毓川碳钇矿晶体结构图

值得一提的是，上述玉水铜矿中发育有多种重稀土矿物，包括氟碳酸盐、砷酸盐、磷酸盐、硅酸盐、复酸盐等重稀土矿物。初步研究表明，玉水铜矿重稀土矿物形成于晚三叠世（223Ma），为华南地区首次识别出的三叠纪重稀土矿化。矿物学与Nd同位素研究表明，其形成可能与盆地卤水有关，重稀土来源于下部的红色砂岩。

玉水铜矿中多种重稀土新矿物的发现不仅为拓展重稀土成矿新类型提供了重要启示，也为拓展我国华南重稀土找矿新方向提供了重要支撑。

(来源：中国地质科学院)

耕地、生态、稀土保护将成为 2023 年卫片执法重点

为重点打击违法占用耕地、非法侵占生态保护红线、非法开采稀土等战略性矿种，自然资源部决定开展 2023 年卫片执法工作。

此次卫片执法工作将聚焦耕地保护，重点打击恶意违法占用耕地特别是违法占用永久基本农田的新增非农建设行为；聚焦生态保护，重点打击生态保护红线内违法违规采矿严重破坏生态环境行为；聚焦保护能源资源安全，重点打击违法开采稀土等战略性矿种行为。

针对 13 个粮食主产区省份和 5 个耕地保有量较大省份，此次卫片执法工作将实现年度内上、下半年各一次耕地范围全覆盖亚米级遥感影像监测。对长期未能采集到光学卫星遥感影像的地区，将探索采取雷达卫星、无人机等方式补充监测。

据悉，土地卫片执法成果将为自然资源离任审计、土地管理水平综合评估、自然资源节约集约示范县（市）创建、全域土地综合整治试点实施、粮食安全党政同责等多项考核评估工作提供相关监测指标和数据成果。

卫片执法，通俗来说就是通过卫星拍照，如同“天眼”对各种非法占地、采矿情况进行监测，发现和查处违法行为并依法问责，督促地方各级政府落实自然资源保护主体责任。

(来源：新华社)

中国稀土集团召开首届科技创新大会

2月22日，中国稀土集团首届科技创新大会在江西赣州隆重召开。

江西省人民政府副省长、党组成员夏文勇出席大会并讲话。严纯华、沈保根、邱冠周、李卫、黄小卫等“两院”院士现场出席会议，干勇院士、张洪杰院士视频参会。中国科学技术协会党组成员、书记处书记张桂华，国务院国资委副秘书长庄树新，教育部科学技术与信息化司司长雷朝滋，工信部原材料工业司副司长张海登，自然资源部矿业权管理司一级调研员王史堂，国防科工局六司副司长孙军伟，赣州市委常委、副市长杜飞轮出席大会并致辞。科技部高新技术司、全国稀土标准化技术委员会向大会致贺信。中国稀土集团党委书记、董事长敖宏致开幕辞，中国稀土集团党委副书记、总经理刘雷云主持会议。



图4 首届科创大会开幕式

夏文勇首先代表江西省人民政府向大会的召开表示热烈祝贺。他在讲话中指出，近年来，江西省委、省政府深入贯彻落实习近平总书记视察江西重要讲话精

神，强化科技赋能，全力推动稀土产业转型升级和高质量发展，引进了中国稀土集团有限公司和中国科学院赣江创新研究院两大“国字号”平台，推动赣州稀土新材料及应用集群入选了全省唯一的国家先进制造业集群，初步形成特色鲜明的稀土产业体系，全省稀土产业呈现出强劲的发展势头。夏文勇强调，稀土资源是全球竞争的关键矿产资源，江西下步将积极应对全球稀土产业发展的机遇与挑战，以科技创新为驱动力，着力提升科研能力，加大研发投入，推动产业发展，引育高端人才，加快稀土全产业链发展。他希望中国稀土集团立足资源优势和产业优势，瞄准未来稀土科技和产业发展的制高点，强化科研资源整合，建设跨领域、大协作、高水平的创新基地，坚决打赢稀土产业关键核心技术攻坚战，加快推进一批新技术、新产品产业化，助推赣州建设革命老区高质量发展示范区。

国务院国资委副秘书长庄树新表示，中国稀土集团自成立以来，坚决贯彻落实习近平总书记关于稀土产业绿色可持续发展的重要指示精神，高效推动资源保障战略项目实施，聚力推进科研项目攻关，锻造了一支特别能吃苦、特别能战斗的稀土行业创新人才队伍，企业的科技实力和核心竞争力明显提升。他希望中国稀土集团以党的二十大精神为引领，贯彻落实中央经济工作会议部署和中央企业负责人会议要求，牢记“国之大者”，坚持“四个面向”，聚焦高水平科技自立自强，进一步完善创新体系、提高创新能力、激发创新活力，勇做全球稀土产业发展引领者，为稀土强国、科技强国建设贡献更大力量。

与会单位在致辞和贺信中对中国稀土集团科技创新工作取得的成绩表示肯定，希望中国稀土集团进一步深化创新合作、强化技术攻关、夯实人才基础，推进科技创新工作取得更大突破、实现更大成效。

中国稀土集团党委书记、董事长敖宏表示，集团公司组建一年多来，深入贯彻落实习近平总书记重要指示批示精神，坚决落实党中央、国务院决策部署，坚持“政治建企、党建强企、资源立企、改革活企、科技兴企”，深入推进强根铸魂、资源保障、整合融合、产业优化、科技创新等工作，取得积极进展和显著成效。下一步，中国稀土集团将全面学习、把握、落实党的二十大精神，积极响应党中央号召，围绕科技攻关和产业培育两大使命，以协同集成与自主创新双轮驱动，加强体系化科技攻关布局，推进多层次科技平台建设，构建全方位创新机制保障，加快建设创新驱动的世界一流稀土产业集团，争当行业高质量发展的实干者、示范者、引领者，为推进我国从“稀土大国”迈向“稀土强国”作出新的贡献。



图5 研究院揭牌仪式

会上，中国稀土集团与兰州大学签署战略合作框架协议；中国稀土集团研究院、中国稀土集团有限公司科学技术协会揭牌成立。



图6 与兰州大学签署战略合作框架协议

会上还发布了中国稀土集团有限公司科技创新政策、“揭榜挂帅”项目和中长期激励政策，举行了科技创新先进表彰和中国稀土集团研究院学术委员会委员聘任仪式。



图7 研究院技术委员会委员聘任仪式

干勇、严纯华、沈保根、张洪杰、李卫、黄小卫、杨斌等院士专家围绕稀土产业重点领域创新、稀土科技未来发展趋势等方面作了报告，对产业创新发展进

行了积极探索并提供了方向指引。中国稀土集团党委副书记、总经理刘雷云致大会闭幕词，号召广大稀土科技工作者深化协同合作、奋力攻坚克难，共同书写稀土产业高质量发展新篇章。

此次中国稀土集团首届科技创新大会集聚了 200 多位稀土领域科技工作者，与会人员聚焦稀土科技自立自强，谈认识、碰思路、谋合作，进一步深化了产业协同创新共识，启迪了发展智慧，激发了广大稀土科技工作者创新创业动能，为促进我国稀土科技自立自强、加快稀土产业高质量发展贡献智慧和力量。

（来源：中国稀土集团）

荷兰推翻承诺开始配合美对华制裁 中方拟限制出口稀土技术

近些年来，美国加大了对中国的打击力度，涉及的领域也比原先更多。在去年，美国政府就出台的半导体芯片对华禁售的政策。当然，美国政府并不满足于此，拉拢其他盟友也成为了美国的工作重心之一。由于与中国进行贸易脱钩将损害他国利益，荷兰一直扛着美国的重压。然而最近荷兰突然转变风向，开始配合美国。作为回应，中方或将限制出口稀土技术。

荷兰推翻原本承诺

在去年美国芯片法案出台之后，荷兰政府一直遭到美国方面的施压。众所周知，荷兰是世界先进芯片制造商 ASML 的所在地，一直与中国保持紧密的贸易合作。为了利益不受损，荷兰政府一直在尽量无视美国的压力，但在最近，荷兰突然推翻原本的承诺。

据美国媒体报道，近日，据两名知情人士透露，美国和荷兰官员在对华限制芯片出口问题上达成一致，这将阻止荷兰芯片巨头 ASML 向中国销售高端半导体芯片。据悉，这一禁令并不会那么快实施，而将是在几个月之后。

荷兰态度的突然转变，或许与荷兰首相吕特与美国总统拜登的会面有关系。据 ASML 的首席财务官达森表示，该公司的财务状况已经处于边缘，而中国每年能为 ASML 提供 18% 的订单，但世界其他国家的需求仍旧很大，甚至超过了 ASML 的生产能力。

中国拟定限制稀土技术的出口

作为西方国家对华联合打压的反击，中国政府于近日拟定了禁止出口商品的目录，其中就包括稀土技术的出口。对于芯片制造业来说，稀土是必不可少的。而荷兰的也需要相关的资源。

在世界经济局势动荡的情况下，各国更是应该加强合作，荷兰需要明白这个道理。如果一味的跟随美国，不仅会失去战略自主，将来的利益也将受损。荷兰的决定也暴露了欧洲国家的在全球贸易以及技术战中正处于下风。

(来源：CBC 金属网)



美前国务卿蓬佩奥加入美国稀土团队

据外媒，垂直一体化磁铁技术公司美国稀土公司近日宣布，美国前国务卿迈克 蓬佩奥已加入美国稀土公司，担任战略顾问。首席执行官汤姆·施奈德伯格表示，蓬佩奥在政府任职，加上他的航空航天制造背景，将为该公司建立完全整合的美国供应链提供宝贵的视角。

美国稀土公司正在美国重新调试一个可扩展的烧结稀土磁铁制造系统，同时开发第一个国内重稀土生产厂。

“我很高兴加入美国稀土团队，我们正在为稀土元素和永磁体建立一个完全整合的美国供应链。稀土供应对于减少对外国的依赖，同时为美国创造更多就业机会至关重要。”蓬佩奥评论道。

(来源：产业前沿)

蒙古霍特戈尔稀土资源量达 220 万吨

帕拉贝伦资源公司（Parabellum Resources）在蒙古南戈壁省的霍特戈尔（Khotgor）稀土矿床宣布首个资源量。

按照 0.4%的稀土氧化物-钇（TREO-Y）边界品位，霍特戈尔目前矿石资源量为 2.75 亿吨，TREO-Y 品位 0.91%。2004 年，该项目估算矿石资源量为 3.50 亿吨，品位 0.96%。

按稀土氧化物计算，该项目稀土金属量为 220 万吨，钕镨含量占稀土金属总量的 20%。

公司计划首先开采高品位矿段（TREO-Y 边界品位 1.5%），其矿石资源量为 1700 万吨，平均品位 1.92%，即稀土氧化物-钇含量为 32.82 万吨。

去年 12 月份，公司称，根据以前的工作，整个项目高品位资源量估计为 4000-5000 万吨，稀土氧化物品位 2%。如果达到这个水平，那么该项目就可以与阿拉弗拉稀土公司（Arafura Rare Earths）和哈斯丁高技术金属公司（Hastings

Technology Metals) 相比, 但是其钆镨比例偏低。

虽然资源量低于预期, 但帕拉贝伦公司还是希望在年中完成概略研究。随后将进行加密钻探和槽探工作, 以便为 2024 年完成最终可行性研究做好准备。

公司正在建造一个试验厂, 为选冶实验做准备。初步实验采用一个 1.3 吨的大体积样, 稀土萃取率在 85% 以上, 与之前的工作结果相近。乌兰巴托试验厂将在本季度末试产, 对流程进行优化并生产可销售样品。

除稀土外, 该项目还含有磷等其他可分离的有用元素。帕拉贝伦公司认为, 霍特戈尔是“世界最大未开发稀土矿床之一”。

霍特戈尔稀土矿位于乌兰巴托西南 530 公里。

(来源: 全球地质矿产信息网)

西安交大科研人员在磁性材料固态相变领域 取得重要进展

磁性材料广泛应用于信息、交通、能源和国防等领域，是国民经济与国防建设的重要物质基础之一。调控磁性材料的固态相变使之处于双相或多相状态，可实现磁性相间的磁性或弹性相互作用，从而获得显著优于单相材料的磁性能；将磁性材料与压电材料进行复合，还可使磁性材料在电场中发生固态相变，实现磁电耦合，从而拓展材料的功能范围。因此，基于固态相变研发高性能磁性材料及多功能材料成为当前该领域国际上的前沿方向。近期，通过理工交叉与合作研究，西安交通大学前沿科学技术研究院马天宇教授团队在磁性材料固态相变方面取得了重要进展。

针对高温磁性最强的永磁材料——2: 17 型钐钴磁体的长期争议问题“胞状相还是胞壁相为析出相”，研究团队与东北大学高建荣教授和香港城市大学任洋教授合作，采用原位高能 XRD 技术和高分辨 TEM 技术清晰地揭示了胞壁相的形核与长大过程，从而确认胞壁相为析出相。该团队还发现在材料混合型固态相变的早期阶段，胞壁 1: 5H 相的有效形核温度远高于位错的开动温度(图 8)。基于该发现，团队在有效形核温度附近进行预时效处理，提高了析出相的形核率，在终态磁体中形成了更多的胞壁相，增强了畴壁钉扎作用，从而使磁体具备更好的硬磁性能。该工作以《2: 17 型钐钴永磁体早期分解阶段的原位高能 X 射线衍射研究》(In-situ high-energy X-ray diffraction study of the early-stage decomposition in 2: 17-type Sm-Co-based permanent magnets)为题在金属材料领域旗舰刊物《材料学报》(Acta Materialia) 在线发表，前沿院博士生宋欣为论文第一作者。

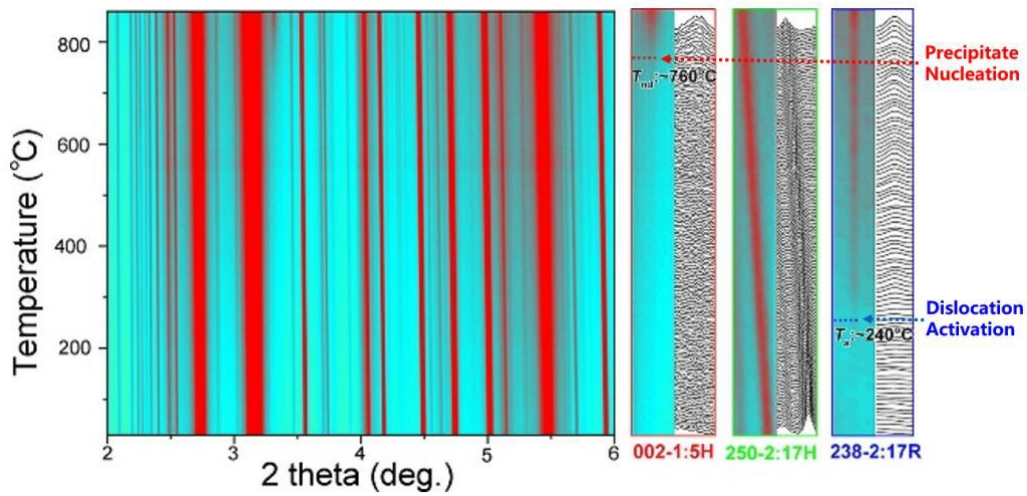


图8 2: 17型 Sm-Co 磁体的原位升温高能 XRD 图谱: 1: 5H 析出相形核温度 T_{nd} 高于位错开动温度 T_a

在前期“铁磁合金中析出共格第二相可实现高灵敏磁致伸缩效应”工作的基础上，该团队系统研究了大磁致伸缩 Fe-Ga 合金早期脱溶阶段的时效时间-温度-相变 (Time-Temperature-Transformation, TTT) 关系，明确了四方结构析出相由共格转变为非共格以及有害的次生相析出的临界热处理条件，并建立了基于磁致伸缩性能的非平衡 TTP (Time-Temperature-Property) 相图 (图 9)。在非平衡 TTT 相图指导下，采用优化的热处理工艺将材料的磁致伸缩性能提高到单相状态的 3 倍。该工作以《增强 Fe-Ga 合金磁致伸缩效应的时间-温度-转变非平衡相图》“Non-equilibrium time-temperature-transformation diagram for enhancing magnetostriction of Fe-Ga alloys”为题在《材料学报》(Acta Materialia) 在线发表，前沿院博士生张艺群和青年教师苟峻铭博士为论文第一作者。此外，该团队与中国工程物理研究院张昌盛研究员合作，采用原位磁化小角中子散射 (SANS) 技术研究了共格析出相在磁化过程中的响应，发现两相交换耦合长度大于析出相尺寸，两相间自旋过渡区先于基体磁畴而发生翻转，从而阐明了纳米异质结构产生高灵敏磁场响应的物理机制。相关论文《大磁致伸缩 Fe-Ga 合金纳米异质相的响应：原位磁化小角中子散射研究》(Nanoheterogeneity response in

large-magnetostriction Fe-Ga alloys: an in-situ magnetic small-angle neutron scattering study)发表于《材料学报》(Acta Materialia)。

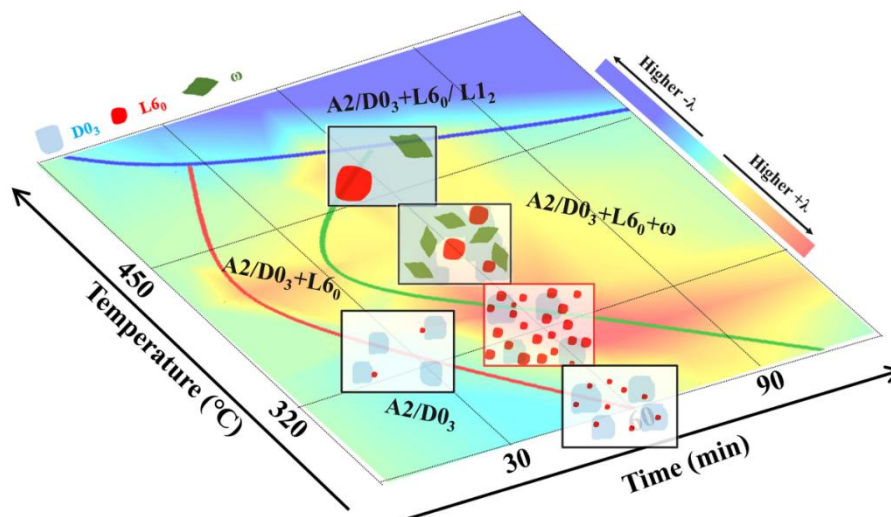


图9 大磁致伸缩 Fe-Ga 合金的非平衡 TTT 及 TTP 相图

为阐明氧空位对稀土氧化物强关联体系磁性和输运性质的作用机制,研究团队采用高温原位高分辨 TEM 技术,从原子尺度揭示了 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ (NSMO) 薄膜随氧空位浓度增加从钙钛矿 (perovskite) 结构到形成层错再到钙铁石 (brownmillerite) 结构的拓扑相变过程(图 10), 并通过调节氧空位浓度实现了对薄膜结构、磁性和电阻的精确调控。该工作以《轨道有序 $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ 薄膜中氧空位诱导拓扑相变的原位研究》(In-situ investigation on the oxygen vacancy-driven topotactic phase transition in charge-orbital ordered $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ films) 为题在《材料学报》(Acta Materialia) 在线发表, 前沿院博士生肖安冬和青年教师刘瑶副教授为论文第一作者。此外, 该团队与中科院物理所胡凤霞研究员团队合作, 在 PMN-PT 压电单晶衬底上成功制备了(110)外延 NSMO 薄膜, 利用衬底的电致伸缩效应向 NSMO 薄膜传递面内各向异性应变, 使薄膜在小电场下发生铁磁金属态向反铁磁绝缘态的一级相变, 获得了高灵敏电致阻变效应(图 11), 为发展高性能异质结自旋器件提供了重要候选。该工作以《电场灵敏调控外延多铁异质结的

一级相变》(Sensitive electric field control of first-order phase transition in epitaxial multiferroic heterostructures) 为题发表于《材料学报》(Acta Materialia), 前沿院刘瑶副教授为第一作者。

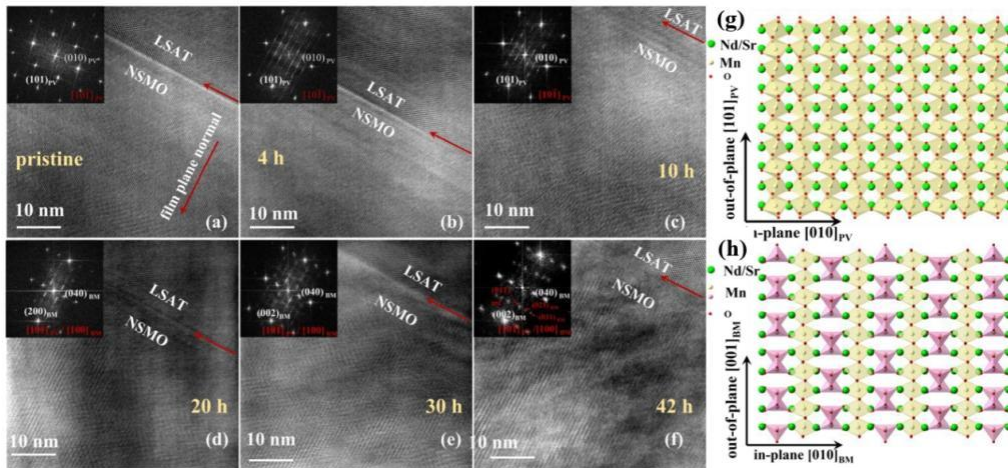


图 10 NSMO 薄膜的原位等温(500°C)HR-TEM 表征结果: 由氧空位浓度增加诱发的拓扑相变过程

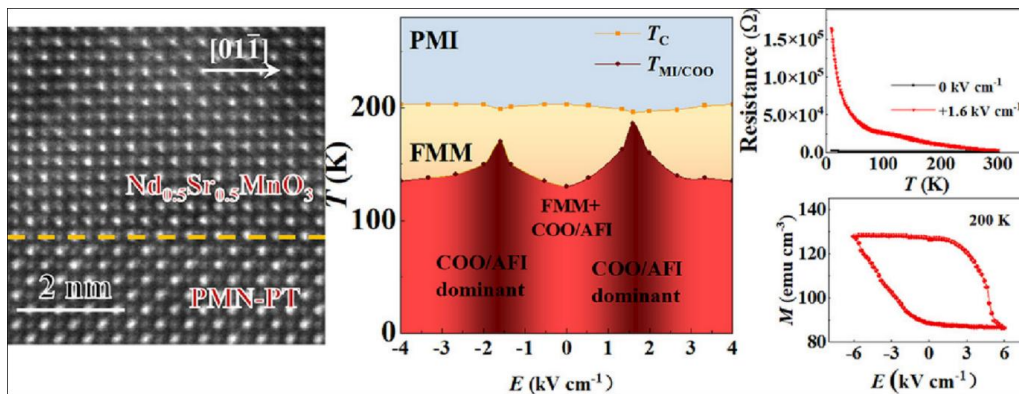


图 11 (011)NSMO/PMN-PT 外延异质结的原子结构、温度-电场相图、电致阻变和电控磁性

(来源: 西安交大新闻网)

中科院广州地化所揭示微生物对花岗岩风化过程中 稀土元素活化和分异的影响

离子吸附型稀土矿床主要发育于富含稀土元素的花岗岩风化壳中。风化过

程中稀土元素的活化、迁移和再富集是形成此类矿床至关重要的环节。尽管越来越多的研究已经认识到，微生物和其他地球化学因素共同控制着风化过程中的稀土元素地球化学行为，但具体的微生物效应及作用机制仍未明晰。为了探究微生物对花岗岩风化过程中稀土元素活化和分异的影响，以及了解微生物对离子吸附型稀土矿床成矿的潜在贡献，中国科学院广州地球化学研究所何宏平研究员团队利用江西省大埠离子吸附型稀土矿床的花岗岩基岩和矿床风化壳中的野生微生物菌株开展了微生物溶解花岗岩的实验研究。

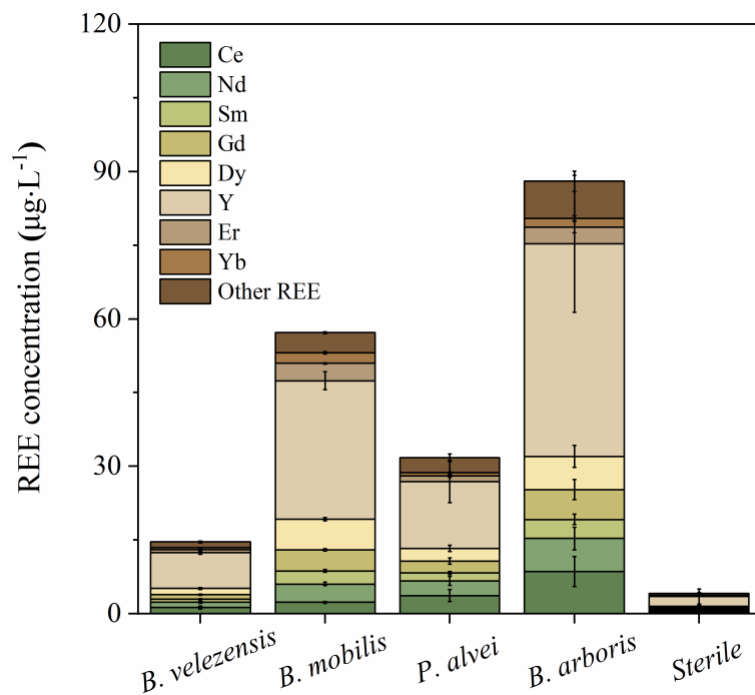


图 12 30 天反应结束时不同反应条件下溶液中的稀土元素浓度

研究发现，在常温常压及寡营养条件下，实验菌株均能显著促进花岗岩中稀土元素的活化。30 天反应结束时，微生物将总稀土元素表观溶解量提升约 4-21 倍（图 12）。而在实际反应过程中，部分溶解的稀土元素会被微生物细胞和胞外代谢物再次吸附固定，这使得稀土元素的表观溶出率被降低约 25%-82%。微生物生长代谢导致溶液酸化并分泌丰富的小分子有机酸，从而对

花岗岩溶解产生积极影响。在实验菌株溶解花岗岩的过程中，溶液 pH 在弱酸性至近中性范围内。此条件下，有机酸配体的络合作用是微生物促进稀土元素释放的主导机制（图 13）。

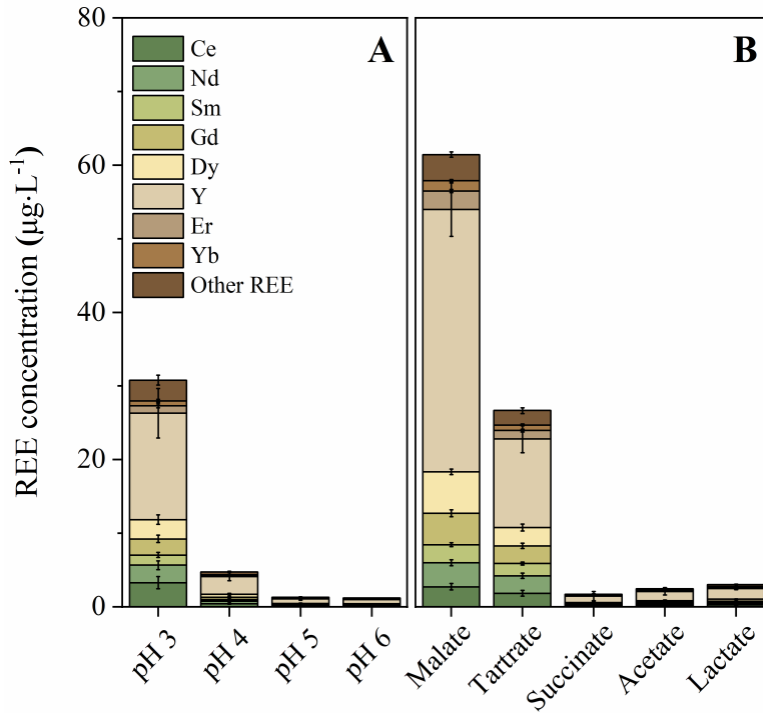


图 13 (A) 盐酸和 (B) 有机酸 (pH 6) 作用下花岗岩中稀土元素的溶出量

花岗岩溶解过程中的稀土元素分异主要受稀土元素赋存矿物的物理化学性质的制约，但同时也受微生物作用的影响（图 14）。在花岗岩溶解的初始阶段，抗风化能力弱的氟碳钙铈矿和氟碳钙钇矿优先溶解，导致不同反应条件下轻稀土和中稀土元素均具有较高的溶出率（图 14）。微生物分泌的小分子有机酸与不同稀土元素的络合稳定性差异也是影响稀土元素分异的重要因素。实验使用的两株芽孢杆菌分泌的丰富有机酸，尤其是苹果酸和酒石酸，可能是导致花岗岩溶解过程中稀土和重稀土元素优先释放的关键（图 14 和 15）。

以上认识为理解离子吸附型稀土矿床成矿生物地球化学过程提供了新视角。

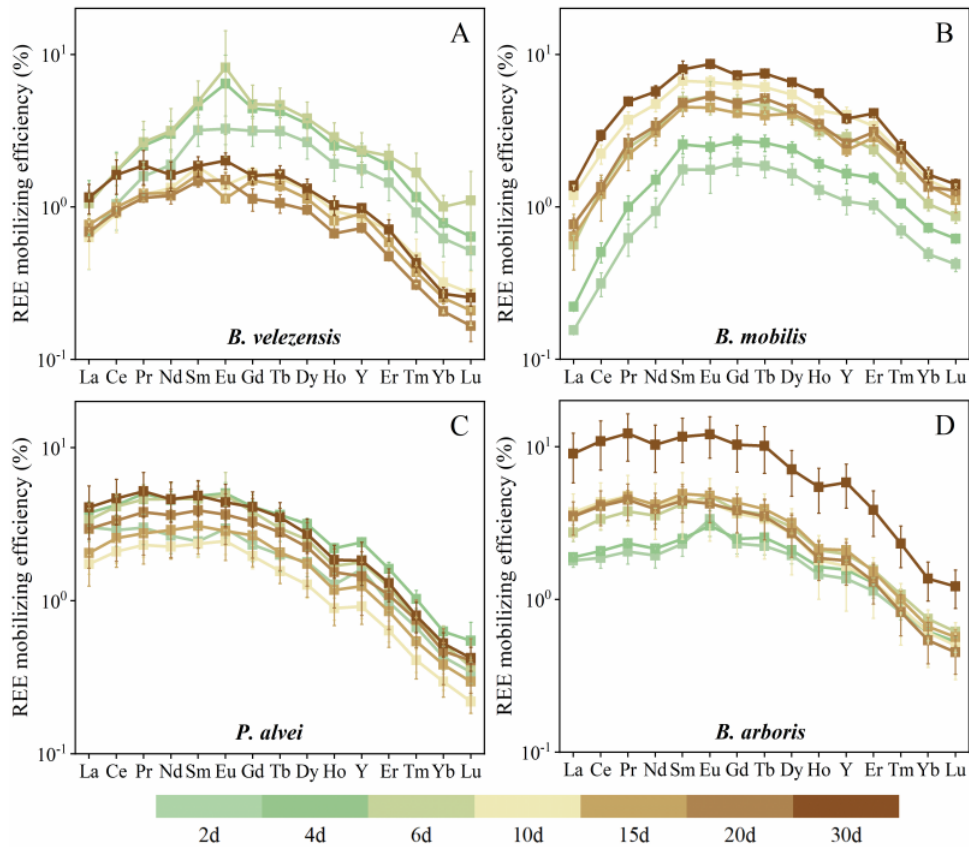


图 14 不同菌株作用下反应 30 天花岗岩中稀土元素的溶出率

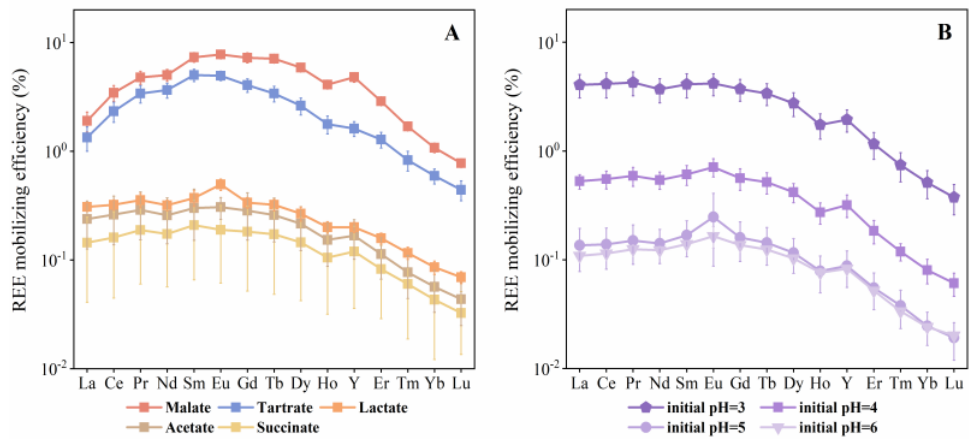


图 15 pH 6 有机酸 (A) 和盐酸 (B) 溶液溶解花岗岩的稀土元素的溶出率

该研究得到国家重点研发计划 (2021YFC2901701) 和中国科学院地球科学
 研究院重点部署项目 (IGGCAS-201901) 等项目的联合资助。相关研究成果近期在
 线发表于 *Geochimica et Cosmochimica Acta* 期刊。

(来源: 中科院新疆理化所)

首个稀土领域江西绿色生态标准发布

近日，由江西省钨与稀土研究院联合赣州嘉源新材料有限公司制定的《江西绿色生态 亚微米氧化钇粉(物理法)》发布，是首个稀土领域江西绿色生态团体标准。

亚微米氧化钇粉是一种重要的功能型稀土材料，通过物理法制备的粒度均匀，分散性、流动性良好的高品质亚微米氧化钇粉可满足功能陶瓷、生物医药、新能源等领域的需求。该标准从资源节约、环境保护、生态协同和质量引领属性等4个一级指标以及分散度、能耗等9个二级指标，规定了江西绿色生态亚微米氧化钇粉产品指标要求，尤其是规定了产品质量引领方面中二级指标“离散度”及其计算方法的要求，以确保亚微米级氧化钇粉体的品质，这一技术指标目前在氧化钇产品相关国家、行业标准中还未见明确规定，该标准填补了行业内标准空白。

该标准的实施可促进采用物理法生产氧化钇等稀土氧化物粉体的企业，加强生产工艺和技术研究，进一步提升产品质量，促进行业更高质量发展。

（来源：江西省钨与稀土研究院）

2023年2月稀土价格走势

一、稀土价格指数

2月份，稀土价格指数呈缓慢下行趋势。本月平均价格指数为291.3点。价格指数最高为2月1日的305.8点，最低为2月28日的274.5点。高低点相差31.3点，波动幅度为10.7%。

2023年2月稀土价格指数走势图



二、中钇富铈矿

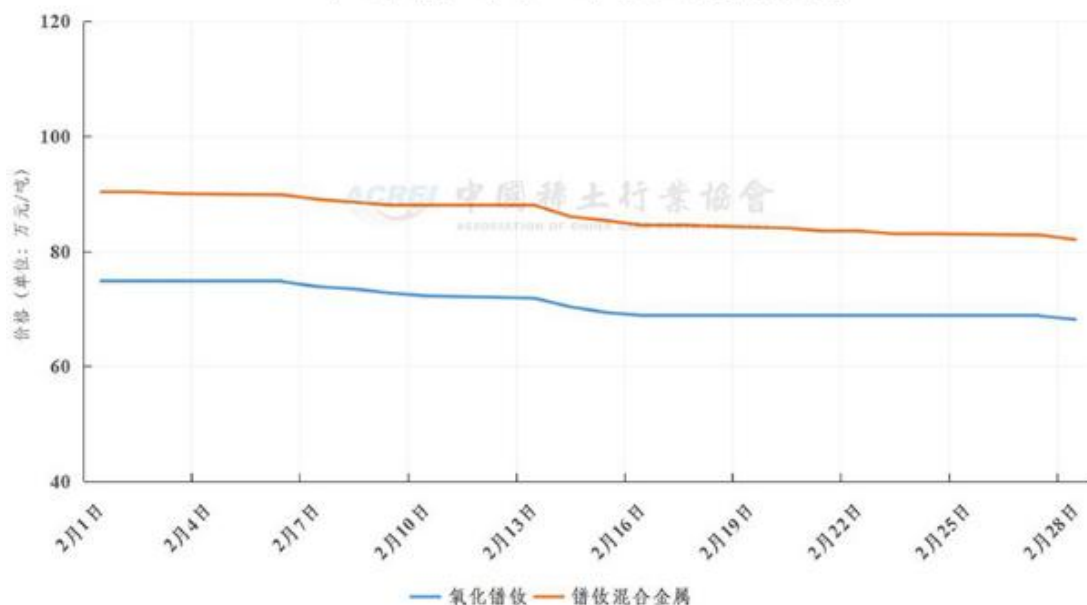
中钇富铈矿2月份均价为30.39万元/吨，环比下跌3.4%。

三、主要稀土产品

（一）轻稀土

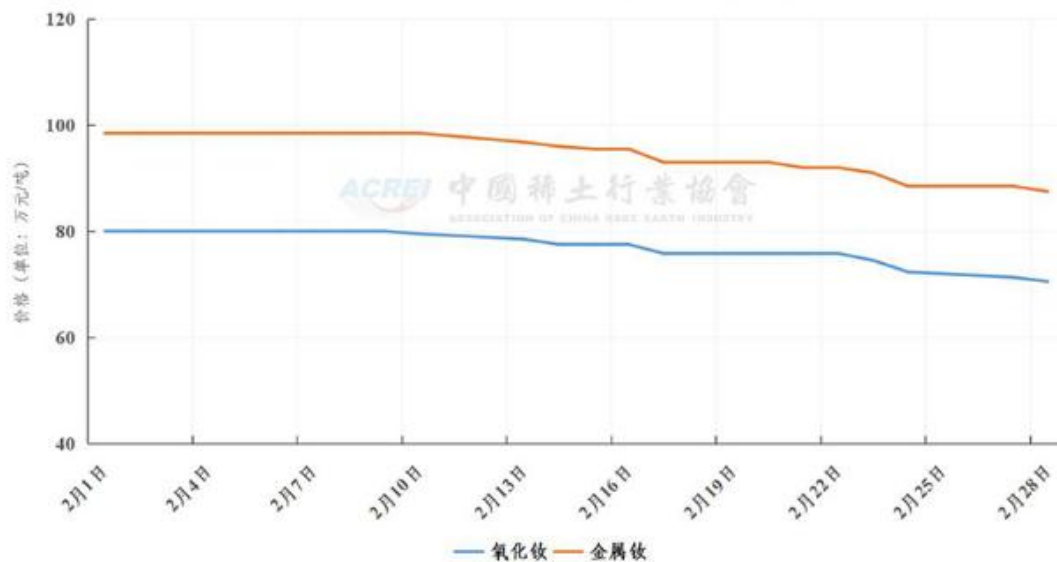
2月份，氧化镨钕均价为71.05万元/吨，环比下跌1.7%；金属镨钕均价为86.20万元/吨，环比下跌1.8%。

2023年2月氧化镨钕、镨钕金属价格走势



2月份，氧化钕均价为 77.12 万元/吨，环比下跌 2.0%；金属钕均价为 94.87 万元/吨，环比下跌 1.5%。

2023年2月氧化钕、金属钕价格走势



2月份，氧化镨均价为 69.70 万元/吨，环比下跌 0.9%。99.9%氧化镧均价为 0.70 万元/吨，环比与上月持平。99.99%氧化铈均价为 19.80 万元/吨，环比与上月持平。

(二) 重稀土

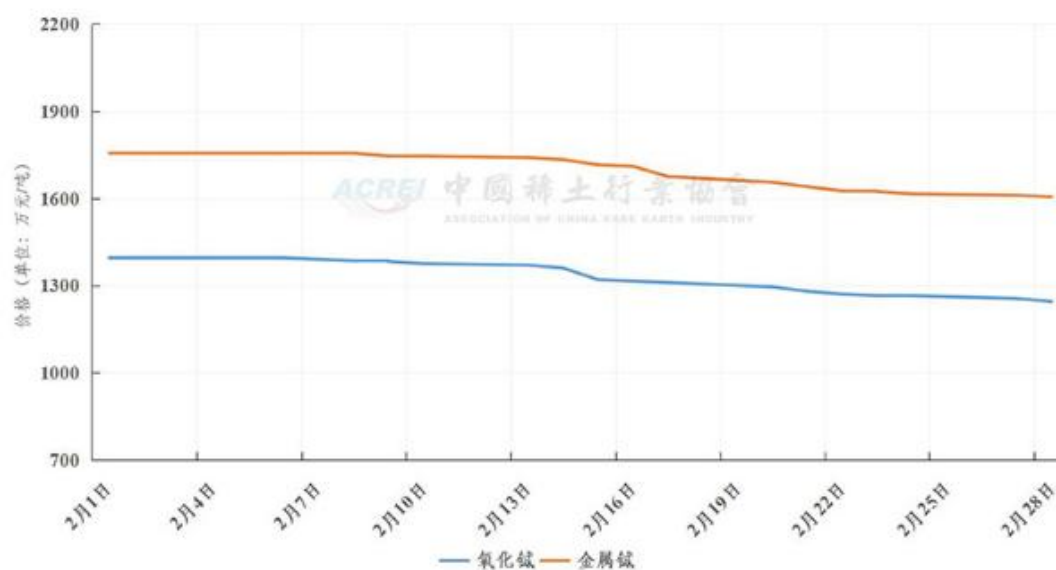
2月份，氧化镝均价为232.48万元/吨，环比下跌5.8%；镝铁均价为232.05万元/吨，环比下跌5.7%。

2023年2月氧化镝、镝铁价格走势



2月份，99.99%氧化铽均价为1333.13万元/吨，环比下跌4.4%；金属铽均价为1698.30万元/吨，环比下跌3.2%。

2023年2月氧化铽、金属铽价格走势



2月份，氧化钬均价为82.75万元/吨，环比下跌11.9%；钬铁均价为84.32万元/吨，环比下跌11.2%。

2023年2月氧化钬、钬铁价格走势



2月份，99.999%氧化钷均价为5.30万元/吨，环比与上月持平。氧化铽均价为28.91万元/吨，环比下跌2.0%。

表1：2023年2月我国主要稀土氧化物平均价格对比（单位：公斤）

产品名	纯度	2023年1月平均价	2023年2月平均价	环比
氧化镧	≥99%	7.00	7.00	0.00%
氧化铈	≥99%	8.00	7.50	-6.25%
氧化镨	≥99%	703.33	696.95	-0.91%
氧化钆	≥99%	787.06	771.15	-2.02%
金属钆	≥99%	963.33	948.65	-1.52%
氧化钷	≥99.9%	17.00	16.90	-0.59%
氧化铈	≥99.99%	198.00	198.00	0.00%
氧化钇	≥99%	444.67	408.05	-8.24%
钇铁	≥99%Gd 75%±2%	423.94	392.55	-7.40%
氧化铽	≥99.9%	13950.00	13331.25	-4.44%
金属铽	≥99%	17550.00	16983.00	-3.23%
氧化镱	≥99%	2467.78	2324.75	-5.80%
镱铁	≥99%Dy80%	2460.83	2320.50	-5.70%
氧化钬	≥99.5%	939.61	827.50	-11.93%

市场行情

钬铁	≥99%Ho80%	949.72	843.20	-11.22%
氧化铒	≥99%	295.00	289.05	-2.02%
氧化镱	≥99.99%	96.00	96.00	0.00%
氧化镨	≥99.9%	5850.00	5850.00	0.00%
氧化钕	≥99.999%	53.00	53.00	0.00%
氧化镨钕	≥99% Nd ₂ O ₃ 75%	722.50	710.50	-1.66%
镨钕金属	≥99%Nd75%	878.17	862.00	-1.84%

(来源：中国稀土行业协会)

稀土钇的开发及应用

• 引言

在目前已知的 14 种稀土元素中，钇元素是被人类发现的第一种稀土元素。

如图 1 所示，1784 年，瑞典人卡尔·阿克塞尔·阿伦尼乌斯(Carl Axel Arrhenius)在斯德哥尔摩附近的伊特比村(Ytterby)意外发现了一块致密的黑色矿石，便以村名将其命名为“Ytteeite”。直至 1794 年，芬兰化学家约翰·加多林(Johan Gadolin)成功从此矿物中分离出含稀土 Y 元素的氧化物混合物。随后，安德斯·古斯塔夫·埃克贝格(Anders Gustav Ekeberg)在此矿物中发现了一种新元素钇，将其命名为 Yteelium；并且为纪念加多林作出的贡献，将此矿石命名为硅铍钇矿。1828 年，德国化学家弗里德里希·沃勒(Friedrich Wöhler)使用钾加热氧化钇的方法首次提取出纯度较低的金属钇。随后，研究者逐渐在加多林发现的氧化物中发现了近八种新元素，占有所有稀土元素的 1/2 以上。

金属钇是一种化学性质较活泼的银白色金属，它主要通过金属钙热还原氟化钇获得，在空气中易氧化失去金属光泽。如图 17 所示，在外部环境条件下，金属钇通常以 Y_2O_3 、 YCl_3 、 YH_3 、 $Y(OH)_3$ 和金属间化合物等形式存在，这些衍生物具有重要的应用和经济价值。其中，氧化钇由于具有耐高温、高熔点等优异的物理化学性能，被广泛应用于冶金、医疗、光学、电池等领域。例如，氧化钇能够作为耐火材料、高温合金和原子反应堆中盐的主要添加剂，通过调控材料的微观组织改善其各项性能；掺杂氧化钇制成的荧光粉也已经被广泛应用

于LED照明、等离子显示板(PDP)、荧光光谱(FL)等光学材料中,也是目前国内稀土钇的主要应用领域;同时氧化钇还具有抗菌杀毒、药物运输、生物成像等功能,在医学领域具有巨大的应用前景。除了氧化钇的重要应用外,稀土钇元素制成的超氢 YH_{10} 可用于制备超导材料,还能够与 Mg、Al、Fe 等有色金属通过合金化的手段明显改善不同种类合金的力学性能、磁性、耐蚀性等,满足航空航天、军事等领域所需新材料的性能要求。

目前,世界上的氧化钇主要产自中国、澳大利亚、加拿大和印度,由于我国钇资源较为丰富,其中大部分的氧化钇产量来自于中国,超过 7000t/年。虽然近年来中国作为主要的稀土原材料出口国,但我国对稀土钇的加工利用率仍较低。在美国进口的含钇材料或氧化钇产品中,约 65%产自日本,而中国仅占 35%,如何充分使用我国稀土钇资源,是目前亟需解决的巨大难题。为了能够对钇资源的开发利用提供帮助,本文就稀土钇在耐火材料、医疗、超导材料、冶金、光学等领域中的开发应用进行了概述。

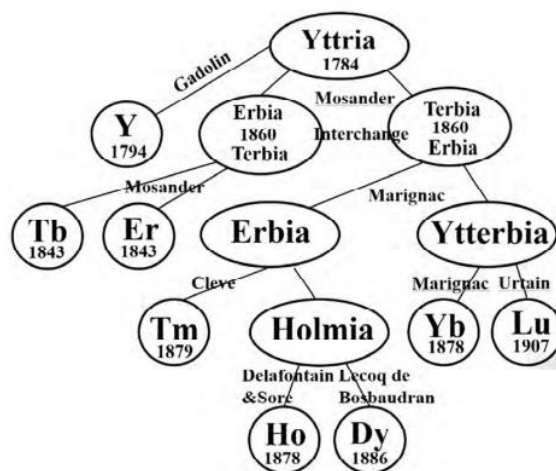


图 16 金属钇元素起源简化史

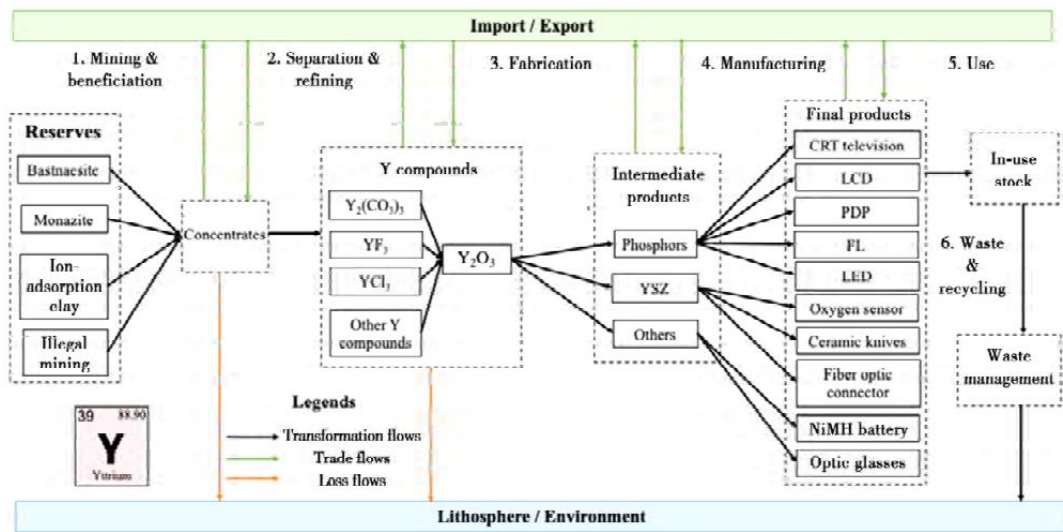


图 17 稀土钇的主要用途

1 稀土钇在不同材料中的应用

1.1 稀土钇在发光晶体材料中的应用

目前，稀土钇元素在晶体材料方面的应用最为广泛，如钇铝石榴石 ($Y_3Al_5O_{12}$)、钒酸钇 (YVO_4) 单晶、硅酸钇晶体 ($YSiO$) 等。其中，YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) 作为一种人工合成的无色透明状晶体，具有硬度高、熔点高、物理化学性质稳定的特点，成为了目前应用最广泛的一类激光晶体材料。研究者通常采用掺杂 Nd、Yb、Ce 等稀土元素的方法来获得掺钕钇铝石榴石、掺铽钇铝石榴石等产品，以提高其应用范围。例如，掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光晶体具有优异的光学均匀性、高机械强度、良好的激光性能及成熟的生长工艺等，在室温下可实现连续脉冲运转，是目前固体激光材料中用量最大的激光晶体，被广泛用于激光打孔与焊接、激光测距、激光制导和医用激光手术刀等方面。

然而，商用的 YAG 材料通常为定向凝固生长制备的单晶，此单晶在尺寸、形状、生长速度和稀土元素掺杂量等方面受到很大限制，生产成本较高。近年

来，透明钇铝石榴石晶体因其几何形状的多样性、掺杂的灵活性以及相对较快的生产制造等而备受研究者的关注，并且此多晶体不存在孔隙和二次相等光散射位点，可有效避免材料的能量耗散。另外，透明钇铝石榴石晶体已经被证实光学、电子和闪烁器件等领域具有极强的竞争力，可作为固态激光器、荧光粉和闪烁体的一种主材料。

在制备透明钇铝石榴石晶体方面，研究者主要采用真空烧结、热等静压或使用特定的纳米级粉末进行等离子烧结；然而这些工艺需要在高温高压下完成，工艺复杂且再现性较难，实现工业化仍具有一定的挑战性。Ikesue 等在 1800℃ 下通过无压铸造和真空烧结制备出透明陶瓷，但其晶粒尺寸较大(40~60μm)，仍不能完全满足激光晶体所需求的光学和力学性能指标，如何制备小尺寸甚至纳米级透明钇铝石榴石晶体是研究者面临的巨大挑战。Li 等在室温下制备了 Al₂O₃-YAG 复合陶瓷，该陶瓷由完全致密的 77%(质量分数，下同)YAG 和 23%Al₂O₃ 的纳米晶体组成；此双相陶瓷结构不仅展现出从可见光到近红外(6μm)范围内的优异光学性能，也具有硬度比 YAG 单晶高 10%的力学性能，如图 18 所示。当掺杂 Ce³⁺时，YAG-Al₂O₃ 纳米陶瓷的量子效率达 87.5%，与商用 Ce³⁺:YAG 荧光粉(75%~90%)相当；凭借其优异的力学性能、光学性能与热稳定性相结合，以及可室温制备的工艺条件，该复合透明陶瓷材料在透镜、宝石、高功率白光 LED 磷光体转化器和激光二极管等光学领域具有巨大的潜在应用价值。

稀土钇除了在激光晶体材料领域得到了广泛关注外，其最主要的应用仍是

在发光材料方面，尤其是荧光粉；由其制备的荧光粉具有吸收能量的能力强、转化率高、优异的物理化学性能，常被应用于电脑显示器、平板显示器、三色荧光灯、发光二极管(LED)和X射线增强屏幕等。目前，主流的产品主要有灯用三基色荧光粉、长余辉荧光粉和信息显示用荧光粉。例如， $\text{Eu}^{3+}:\text{YVO}_4$ 、 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$ 红色荧光粉被广泛应用于彩色电视显像管、稀土节能灯等；尤其掺铈钇铝石榴石($\text{Ce}:\text{YAG}$)晶体制作的荧光粉体能够实现白色 LED 照明，我国的这种荧光体制作技术已达到国际先进水平。

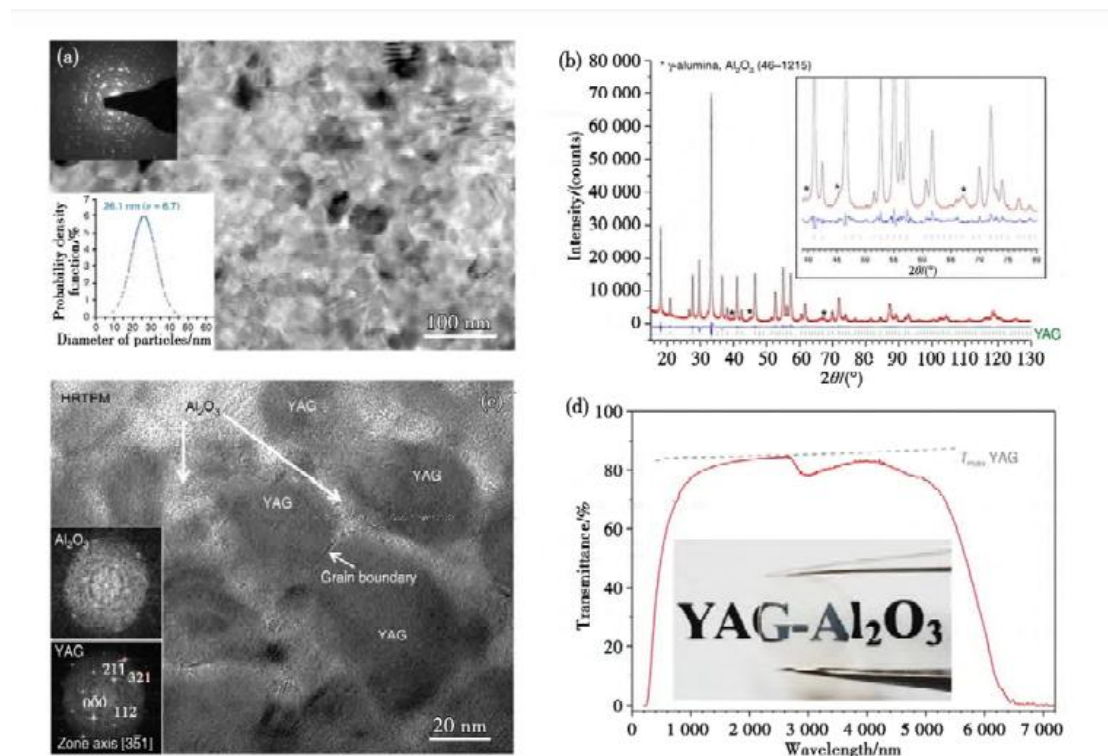


图 18 透明 $\text{YAG-Al}_2\text{O}_3$ 纳米陶瓷结构: (a) 明场 TEM 显微图片; (b) $26\%\text{Y}_2\text{O}_3\text{-}74\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 玻璃结晶的 $\text{YAG-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷 X 射线衍射; (c) $\text{YAG-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷 HRTEM 显微图片; (d) $\text{YAG-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷的 UV-VIS-NIR 和 MIR 区域的透射光谱

然而，目前 $\text{Ce}:\text{YAG}$ 大部分应用常以粉末或者单晶的形式出现，忽视了其在纳米级领域的制备技术和应用。随着芯片尺寸减少到 $100\mu\text{m}$ 以下，用于制备荧光粉的微米级晶粒会导致部分光学问题，如表面亮度降低等。当高质量纳米

级 Ce:YAG 实现大规模制备时, 将会打开其在光学领域的新应用。例如, 微型 LED($<100\mu\text{m}$)可以直接构成红、绿、蓝发射器, 能够有效避免与液晶显示器相关的光学损失; 同时, 与 OLED 显示器相比, 微型 LED 在亮度和色域方面也具有极大优势。此外, 基于小型 LED 矩阵的可转向、自适应汽车头灯也正在被研发, 这一类新 LED 的应用将会极大推动照明领域的快速发展。除了微型 LED 能够受益于纳米级 YAG 的出现, 该纳米级材料还能够推进我国生物医疗方面的快速发展, 如生物标记和成像系统等。近年来, 纳米级 Ce:YAG 由于具有明显的商业价值, 已吸引了世界各生产商的广泛关注, 但仅法国 Baikowski 公司能够制造尺寸约 150nm 的 YAG 材料, 这种纳米晶的尺寸比钙钛矿纳米晶或其他稀土掺杂材料高一个数量级, 远不能满足市场需求。目前, 市场上的纳米级 YAG 材料质量较差, 并且控制纳米级 YAG 材料尺寸和形态方面的制备技术的相关文献报道较少, 远低于其他纳米级稀土离子掺杂材料(如 $\text{LaPO}_4:\text{RE}$ 、 $\text{Y}(\text{VP})\text{O}_4:\text{Eu}$ 等); 但同尺寸的纳米级材料中, Ce:YAG 的光学性能和物理化学性能相对优异。因此, 探究和开发纳米级发光材料, 尤其是 Ce:YAG 材料, 对我国光学领域的发展具有重要意义。

1.2 稀土钇在不同合金中的应用

近年来, 稀土 Y 元素作为冶金领域的添加剂, 在钢和有色金属合金中得到了广泛应用。微量的 Y 元素可以有效改变夹杂物含量、尺寸和形貌; 其形成的稀土相能够细化晶粒, 抑制元素偏析, 改善微观组织均匀性; 并且还能够提高合金氧化膜的致密度等; 显著改善不同合金的力学性能、磁性、耐蚀性、导电

性等物理化学特性，满足航空航天、军事等领域所需新材料的性能指标。

在镁合金发面，如图 19 所示，Chen 等最近研究了稀土 Y 对 Mg-Al-Zn-Mn-Y 镁合金的强化机理，发现 $\text{Al}_8\text{Mn}_4\text{Y}$ 相比 $\alpha\text{-Mg}$ 基体优先形核，且 Al_2Y 相几乎与合金中的 $\alpha\text{-Mg}$ 基体同时形成。其中， $\text{Al}_8\text{Mn}_4\text{Y}$ 和 Al_2Y 沉淀相会附着在初生 $\alpha\text{-Mg}$ 表面并沿晶界或亚晶界分布，从而阻止 $\alpha\text{-Mg}$ 晶粒生长，实现晶粒细化。然而，随着 Y 含量的增加， $\text{Al}_8\text{Mn}_4\text{Y}$ 和 Al_2Y 相的形成会消耗大量 Al，导致晶界析出的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相逐渐由网状结构转变为不规则的岛状和颗粒状，与 RE 颗粒 ($\text{Al}_8\text{Mn}_4\text{Y}$ 和 Al_2Y) 共同起到复合强化的作用。因此，稀土 Y 元素在镁合金中不仅可以有效细化晶粒，还能够形成高度稳定的稀土颗粒，并改变 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相形态，实现双重强化作用，此发现为设计高性能镁合金提供了一种新思路。

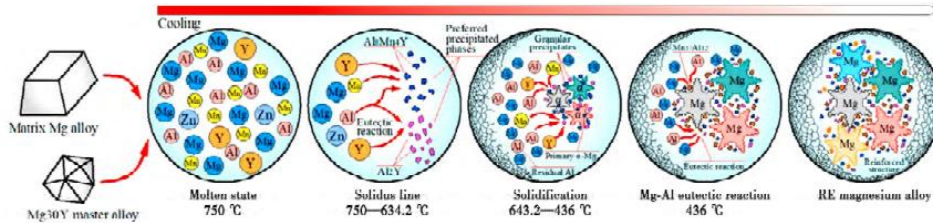


图 19 稀土 Y 在镁合金中的混合强化机制

在镁腐蚀方面，Li 等发现稀土 Y 能够提高 AZ63 镁合金的耐腐蚀性能，它不仅能够促进氧化层 Al_2O_3 的形成，也能够形成 Al_2Y 相破坏网状结构的 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相，降低金属相与 Mg 基体间的电偶腐蚀；且形成的腐蚀产物相对致密，一定程度上能阻碍电解质的渗入。Jiang 等报道了镁合金表面形成的 Y_2O_3 膜的皮林-贝德沃斯(PB)比大于 1，其可全覆盖镁合金表面阻碍腐蚀。Zhang 等通过第一性原理计算发现固溶在 Mg 表面的 Y 原子能够提高周围近邻镁原子的稳定性以及抑制析氢反应，提高镁的耐腐蚀性能。

此外，稀土 Y 元素在铝、铜、钢等合金中也具有相同的作用。Mei 等发现 Y 元素能够提高 Al-Cu-Mg-Ag 合金的高温强度，然而 Y 元素的添加会形成块状 (Cd、Ag、Ti、V、Y) 金属间化合物，消耗强化相(Ω 相)所需的 Ag，导致 Ω 相密度减少，影响合金室温下的力学性能。Li 等报道了稀土 Y 元素能够改变 Al-20Si 合金初生硅和共晶硅的形态和尺寸；前者从粗糙不规则的板状和星状转变为细小的块状，后者由粗大的片状和针状转变为纤维状和颗粒状，稀土 Y 元素有效提高了 Al-20Si 合金的抗拉强度和延伸率。Wang 等研究发现，在 90Cu10Ni 合金中添加稀土 Y 不仅能够促进层错和孪晶的形成，析出的 Ni_2Y 颗粒还会阻碍位错运动，在变形过程中增加位错密度；并且随着 Y 含量的增加，可以有效减少夹杂物含量，改善夹杂物的分布形态，有效降低富 Y 的氧硫化物且使其均匀分布在晶界处，从而调控合金的力学性能。Liu 等报道了稀土 Y 可以提高 Fe-6.5%Si 热变形的活化能，细化晶粒并改善热变形过程中的微裂纹。据林河成报道，Y 能够去除钢中的夹杂物 Al_2O_3 和 MnS，形成 Y_2O_3 、YS 等，从而提高钢的综合力学性能。

另外，稀土 Y 元素也能够显著改善磁性材料性能。Hsiang 等报道了硝酸钇可以改善 FeSiCr 合金表面氧化铬层的厚度，从而调控合金的磁性。研究表明，0.02%(质量分数)硝酸钇可以显著提高合金的饱和磁化强度、初始磁导率等性能，是功率芯片电感应用中一个具有极大前景的候选材料。Jia 等研究发现添加小于 2%(原子分数)稀土 Y 到 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9$ 合金中，Y 固溶在 α -Fe 的枝晶间隙中，可显著提高合金粉末的磁导率和介电常数，其中 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_{13}\text{B}_9\text{Y}_2$ 合金粉末具有优良

的电磁干扰吸收能力。Li 等同样发现 0.64%(原子分数)的 Y 能够改变 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 合金的晶粒形状和取向, 其不仅能够显著改善合金的磁致伸缩性, 同时形成的 $\text{Y}_2(\text{FeGa})_{17}$ 相沿晶界和晶粒内分布, 也可以明显提高其力学性能。

除了上述稀土 Y 元素的作用外, 稀土 Y 元素凭借特殊的物理化学特性, 还能够作为反应堆的特殊结构材料。这主要是因为 Y 元素的热中子捕获截面值较小, 可使热中子顺利通过。同时, 稀土 Y 还可制成 Y 基燃料元件和抗腐蚀能力较强的 Y 管道, 被广泛应用于军事武器等领域。

1.3 稀土钇在超导材料中的应用

1986 年, Bednorz 等首先发现了温度为 35K 的 La_2CuO_3 超导体, 并因此获得了诺贝尔物理学奖。1987 年, Wu 等发现 $\text{Y}_{1.2}\text{Ba}_{0.8}\text{CuO}_4(\text{YBCO})$ 在 93K 下具有超导性, 是首个超导转变温度高于液氮沸点(77K)的高温超导材料, 具有重要的实用价值和应用前景。稀土钇超导体也逐渐成为高温超导体的重要组成部分, 引起了研究者的广泛关注。经过近些年的发展, YBCO 成为超导材料的核心, 但其制备技术相对薄弱, 实现商业化仍需进一步提高其工艺和性能稳定性。

稀土超氢化物在高压下表现出接近室温的超导性, 这开创了高压超导研究的新时代。超氢钇化物由于具有丰富的化学计量和优异的超导性, 在超导研究领域备受研究者关注。Wang 等在 140~300GPa 的压力内对钇超氢化物进行了全面研究, 成功合成了 YH_4 、 YH_6 、 YH_7 和 YH_{10} 等超氢化物, 研究发现在压力不超过 300GPa 和温度不超过 2000K 的条件下, 合成的 YH_{10} 具有室温下的超导能力。Semenok 等报道了 YH_6 和 YH_{10} 中的部分金属原子在超高压力下可分别被

La(70%，原子分数)和Y(25%，原子分数)取代并形成临界温度达253K的三元超氢化合物 $(La, Y)H_6$ 和 $(La, Y)H_{10}$ ，其超导性能与商用NbTi、 Nb_3Sn 等线材相近。值得注意的是，虽然这种三元氢化物是近年来最具应用前景的超导材料之一，但是如何降低压力实现室温超导仍是目前超导材料领域的卡脖子问题。

2 氧化钇颗粒在不同材料中的应用

2.1 氧化钇耐火材料中的应用

近年来，随着我国科学技术的不断发展，钛、铀等高温合金的综合性能已无法满足军事、航空航天等领域的装备需求，如何提高各类合金的性能已成为我国开发新材料的巨大挑战。目前大部分合金在高温下活性较大，会与耐火材料发生不同程度的化学反应，造成钛、铀合金等材料的污染，不仅会降低合金的力学性能，也会缩短耐火材料的使用寿命。因此，制备热稳定性强的耐火材料是目前亟需解决的难题。

在高温合金工业生产中，陶瓷坩埚由于具有耐高温、耐侵蚀以及抗热震冲击的特性，尤其是在熔炼过程中不会与合金熔体发生化学反应，成为了各大生产部门的首选。目前常用于熔铸高温合金的陶瓷坩埚主要是氧化铝、氧化镁、氧化锆、氧化钇等。其中，氧化钇作为稀土氧化物，吉布斯形成能较低，理论上具有更高的高温稳定性和耐侵蚀性，被认为是较为理想的耐高温陶瓷材料。赵超等报道了熔体与坩埚材料中氧的相互作用是造成坩埚失效、熔体污染的重要因素。Cui等研究发现，相较于氧化钙、氧化镁等常见氧化物耐火材料，氧化钇坩埚熔炼的钛铝合金具有更低的氧含量。Feder等研究了氧化钇、氧化铝、氧

化镁、氧化锆、氧化铍和氧化钍等陶瓷氧化物在 1413~1603K 内熔融铀合金的过程，发现除了氧化钇外，其他陶瓷耐火材料得到的铀合金力学性能较差，甚至在氧化铝和氧化镁陶瓷坩埚中出现了 UO_2 沉积现象。

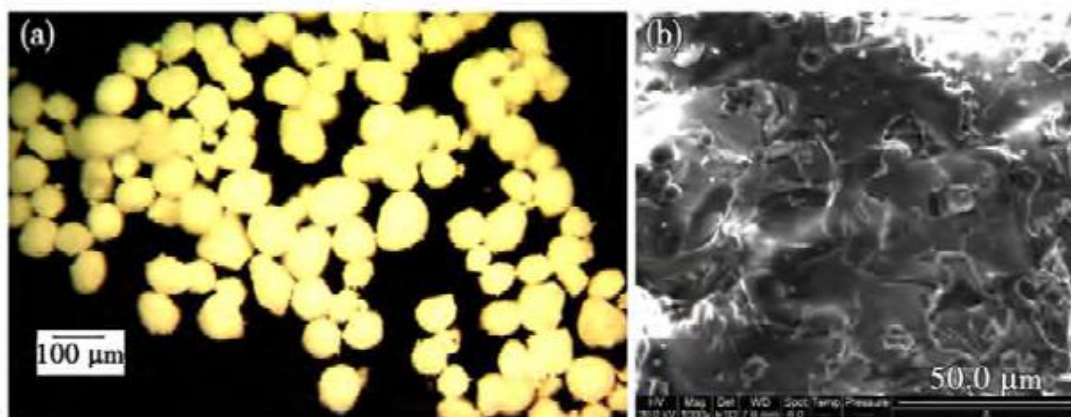


图 20 热喷涂/等离子喷涂氧化钇粉末：(a)热喷涂氧化钇粉末光学显微图；(b)石墨基体上等离子喷涂氧化钇的 SEM 图

虽然氧化钇具有较好的高温稳定性，但其抗震性较差、强度低，导致在感应熔炼过程中，受到电磁搅拌等外界条件作用，氧化钇颗粒会进入熔体中，降低铸锭质量。因此，如何解决氧化钇坩埚的脆性等问题，是耐高温陶瓷坩埚制备工艺优化的关键所在。目前，研究者常采用等离子或浆液热喷涂工艺在基体表面获得高稳定性的氧化钇保护层。如图 20 且流动性较好，可有效粘附在石墨基体上，并在 2h 内不与金属铀发生反应；但长时间高温环境下，涂层稳定性逐渐下降，基体与金属熔体接触，导致产品质量降低。

为了解决这一难题，研究者提出了一种制备表面复合陶瓷结构的制备技术，认为其是制备高质量陶瓷坩埚的有效途径。此方法不仅能够采用热力学性能良好且价格低廉的材料作为基体材料，也能够降低成本的同时保证坩埚的抗热震性能。例如，高纯石墨坩埚由于具有耐火性、高温强度和良好的抗热震

性等，被广泛用于金属的熔融铸造实验。然而，在温度超过 773K 时，石墨坩埚会与空气中的氧气反应，同时与熔融的铀等合金发生强烈的化学反应形成碳化物，使得合金性能大幅下降。为了解决这一难题，Jagadeeswara Rao 报道了在石墨坩埚表面建立的含 SiC 夹层的 Y_2O_3 涂层，该涂层可以有效避免铀合金等熔融过程中的碳污染，有效提高金属铀的性能以及坩埚的利用率，如图 21 所示。

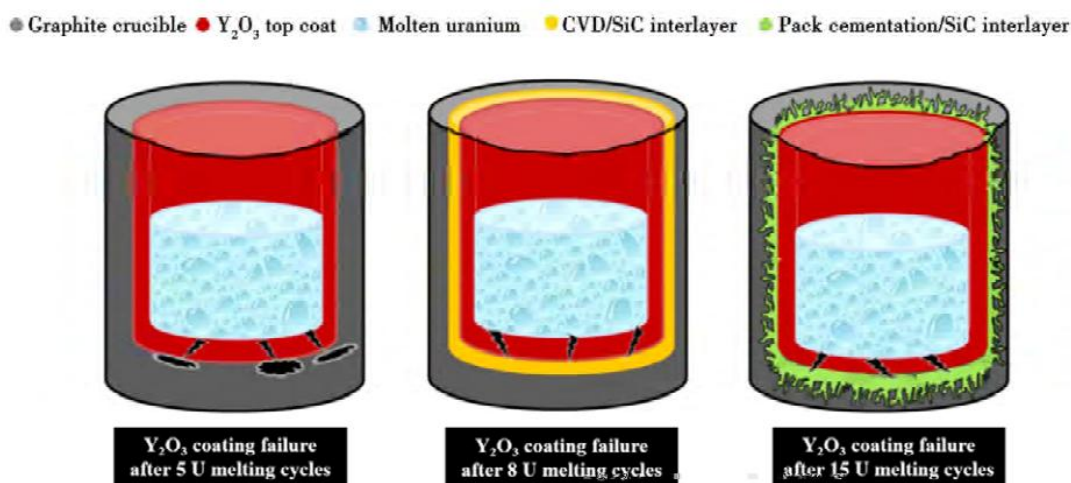


图 21 含有 SiC 夹层的 Y_2O_3 涂层石墨坩埚（电子版为彩图）

虽然氧化钇涂层能够提高坩埚的耐侵蚀性以及热稳定性，为工业生产高温合金提供了一种有效途径，但是氧化钇涂层存在孔隙且结合强度不高。Yuan 等也发现了较高的氧化钇涂层致密度才能有效阻止氧化钇颗粒剥落，使金属熔体侵入陶瓷内部。如何获得致密、均匀且与基体结合强度高的氧化钇涂层仍是复合陶瓷坩埚面临的难题，需进一步加强喷涂工艺、喷涂成分以及喷涂厚度的研究。

2.2 氧化钇生物医疗领域的应用

氧化钇也被广泛应用于生物医疗领域中。例如，氧化钇纳米颗粒由于具有优异的物理化学特性，被证明是一种有效的保护材料，在抗菌抗癌、肝脏保

护、药物输送、生物传感器、生物成像、荧光成像等医疗领域得到了广泛的应用，如图 22 所示。另外， ^{90}Y 微球也可以随血流到达肝脏肿瘤部位，通过释放 β 射线高效杀灭肿瘤，其放射能量高，治疗准确，可对肿瘤自内而外实施精确打击。

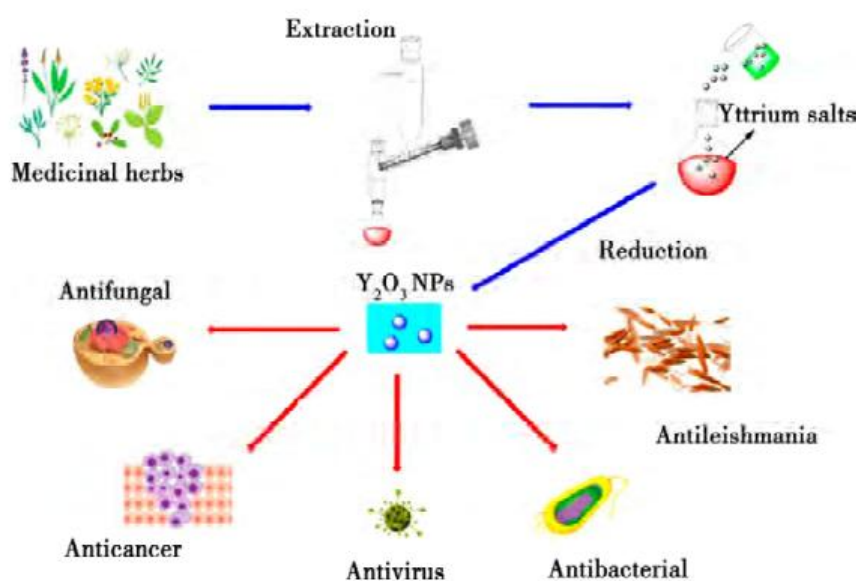


图 22 氧化钇纳米颗粒的生物学应用(蓝色箭头表示氧化钇的合成路线，红色箭头表示氧化钇的生物学应用)(电子版为彩图)

研究表明，氧化钇具有抑制细菌的能力，尤其是对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的有害病原体均具有抑制作用。首先，氧化钇能够直接进入细菌细胞壁，激活细胞内的活性氧，并使细菌酶失去活性；同时其会提高细胞过氧化氢的产出能力，造成细菌细胞死亡。Kannan 等的实验结果表明，氧化钇纳米颗粒能够抑制生物体的细胞代谢并使细菌死亡，其可以作为几种病原体的有效生长抑制剂，调节人体细菌数量。因此，氧化钇纳米颗粒作为抗菌剂的应用可能有助于建立一种以现有抗生素为靶向细胞器的创新模式。

此外，抗菌和抗氧化的 Y_2O_3 纳米颗粒还表现出极强的抗癌能力，并且具有

价格低、无毒、生物风险低等特点，吸引了许多研究者的关注。Nagajyothi 等报道了从连翘果中提取的 Y_2O_3 合成物能够有效抑制肾癌细胞株的生长。有趣的是，此纳米颗粒对正常的犬肾(MDCK)细胞没有毒性作用，而对肾癌细胞的毒性较大。这主要是因为氧化钇纳米颗粒不仅能够为健康细胞提供细胞保护，使其免受活性氧的影响，同时它们能通过增强活性氧的生成来吸引和杀死癌细胞。据 Song 等报道，30mg/kg 氧化钇纳米颗粒可提高肝脏抗氧化状态，并抑制脂多糖诱导小鼠的抗氧化应激和炎症反应，减缓肝脏细胞的损伤与死亡；研究者逐渐将其作为一种治疗暴发性肝衰竭的创新性治疗方法。

在组织工程中，研究者还发现嵌入聚己内酯支架中的金属氧化钇颗粒可以增强内源性细胞的增殖，促进血管的新生；实验表明支架中存在的 Y_2O_3 会上调细胞增殖相关分子的表达，如血管内皮生长因子和表皮生长因子受体。这些现象表明了氧化钇纳米颗粒在组织工程支架诱导增殖和血管生成中起着关键作用。因此，氧化钇纳米颗粒不仅是抑制癌细胞生长的潜在选择，而且能够保护、促进细胞新生。同时，氧化钇纳米颗粒也能够作为潜在的药物运输工具，并且其对癌细胞具有毒化作用，许多研究人员通过氧化钇进行药物传递来联合抗癌。

除了在生物细胞上的作用外，钇由于其特殊的配位和放射化学性质，还可以形成大量的配合物，展现出各种各样的特征，常被应用于放射治疗和医学影像中，如图 23 所示， ^{90}Y 微球常用于肝脏放射治疗、 ^{86}Y 用于癌变区域的显微成像等。这些方法突出了钇在生物医学研究和临床常规上为改善人类健康做出的

巨大贡献。随着科技的不断进步和深入研究，钇在生物医疗的应用范围正在扩大，预计不久的将来能够获得巨大市场空间。

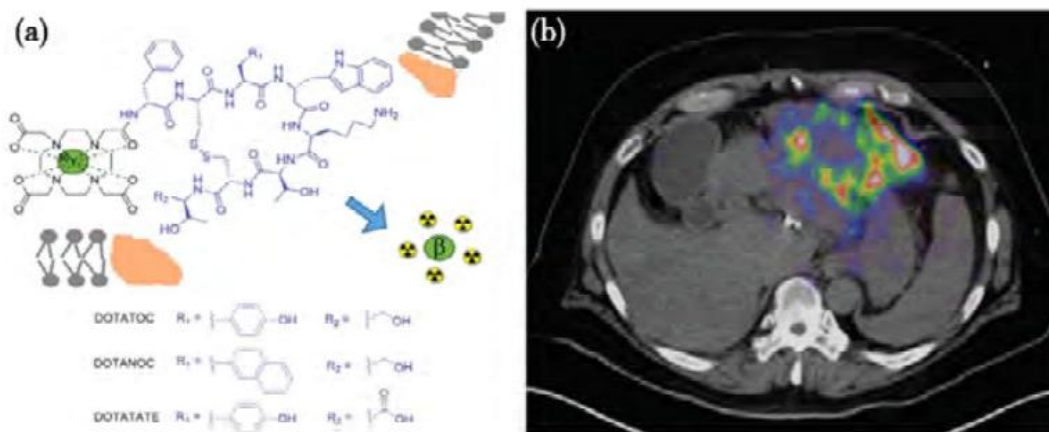


图 23 ^{90}Y 的应用：(a)靶向治疗的 ^{90}Y 复合物；(b)正电子发射计算机断层成像

3 稀土钇在其他材料中的应用

稀土钇材料除了在发光、超导、冶金、医疗、陶瓷耐火材料等领域的应用外，还在钇稳定陶瓷氧化锆、氧化钇陶瓷刀具、固体氧化物燃料电池、表面涂覆氧化钇复合材料、稀土靶材等方面引起了研究者的广泛关注。尤其在固体燃料电池方面，其常被用作多孔阳极材料，如 $\text{Ni}-(\text{Zr}, \text{Y})\text{O}_2\text{-X}$ 电能转换效率高达 60% 以上，对我国将来实现稀土钇的工业化应用具有重要作用。另外，在氧化锆陶瓷中掺杂氧化钇，可有效提高材料的强度、韧性和导电性能，掺钇氧化锆不仅作为汽车氧传感器的固体电解质获得了广泛关注，同时也在耐火材料、陶瓷电容器、二氧化锆纤维等方面得到了大规模应用。另外，在高温结构陶瓷氮化硅中掺杂氧化钇作为致密助剂，也可有效提高陶瓷材料的强度和韧性，这种具有优良耐磨和耐冲击韧性的陶瓷材料也可用于燃汽涡轮发动机、耐磨零部件等。

4 稀土钷/氧化钷的提取

稀土钷元素主要存在于褐钷铈矿、磷钷矿或高钷离子矿等矿物中，其分解所得的混合稀土溶液经萃取、酸溶、再萃取、浓缩、灼烧等过程可获得较粗的氧化钷产品。例如，磷钷矿在硫酸分解反应釜中于 200~300℃ 分解 3h，会转化为相应的硫酸盐；冷却后用冷水浸出反应产物，此时稀土硫酸盐溶解，过滤去除未反应的 SiO_2 、 ThO_2 等不溶物；然后加入 10% 的焦磷酸钠溶液，稀释后使用氨水调节 pH 值至 1.0，得到 ThP_2O_7 沉淀；通过固液分离，去除沉淀物，并向获得的溶液中加入草酸得到稀土草酸沉淀；离心脱水后在 800℃ 下焙烧，得到粗氧化钷粉体。除此之外，实验上也可通过高温固相合成法、高能球磨法、溶胶-凝胶法、喷雾热解法等有效控制氧化钷颗粒的大小，获得高纯度超细粉体。

然而，经过上述方法获得的氧化钷粉末在高温条件下容易收缩，从而导致陶瓷坩埚等产品开裂、使用周期缩短。因此，工业上主要采用烧结或电熔致密化结晶的方法获得氧化钷熟料来制备陶瓷材料。然而，烧结法结晶温度较高 (1700~2100℃)，时间长，工艺复杂，成本较高。电熔法由于操作简单、成本较低，在行业内得到了广泛应用，该方法主要是通过高温电弧化获得低碳白色透明晶体状熔块，熔块经过破碎形成氧化钷粉，即电熔氧化钷，其在工业生产上常被用于制备氧化陶瓷坩埚。

对于制备稀土钷金属，目前主要方法有熔盐电解法和热还原法等。其中，稀土氯化物熔盐电解具备生产连续、成本低、废渣少等优点，被广泛应用于混合稀土金属、富 La(少 Ce) 混合金属以及 La、Ce、Pr 单一稀土金属和稀土铝合

金、镁合金等金属的提纯。而金属热还原法按所用原料分为氟化物还原法、氯化物还原法和氧化物还原法；因此，可以针对不同原料来选择合适的金属还原剂及对应的还原工艺条件和设备等。

目前生产上常采用的还原剂主要有钙、镁和锂等，钙常用于稀土氟化物的还原，锂用于氯化物的还原，轻稀土金属用于氧化物的还原；其中稀土氟化物的钙热还原法制取的稀土金属具有反应速度快、金属回收率高的优点，该方法常用于制备致密稀土金属(Y、Gd、Tb、Er 等)。另外，钙/锂还原稀土氯化物也能制备高纯金属 Y(99.91%)以及纯度较高的 Dy、Ho、Er 等稀土金属。此外，还能通过中间合金化法制备纯度为 99.5%~99.7%的海绵状稀土钇金属，其与钙热还原法的区别是，在炉料中加入熔点低、蒸气压高的金属镁和氯化钙造渣剂能够降低还原温度，也可避免坍塌对金属材料的污染。在提纯金属钇方面，常用真空再熔炼的方法去除残留在稀土金属中的 Ca 等还原剂杂质，其方法是将蒸气压较低的稀土钇金属在真空度大于 0.133Pa 的条件下加热至 1850℃进行提纯，此时蒸气压较高的杂质(如氟化物、碱金属等)被蒸馏去除。

5 结语

与展望我国作为世界钇资源大国，本身就具有极大的物质基础，可实现稀土钇的大规模工业化生产。然而，我国稀土钇的利用仍处于原材料出口阶段，如何发展与高端稀土钇有关的新材料，开发稀土钇在发光、医疗等领域的应用产业，是目前我国稀土钇资源研发面临的巨大挑战。我国科研单位需加强并注重稀土钇在高科技领域的研发工作，尤其是 YAG 纳米激光晶体材料、生物医疗

用氧化钇纳米颗粒材料、室温超导材料等的大规模制备技术，积极与高科技企业合作，落实产学研相结合，实现相关稀土钇新材料的产业化升级，大力推动我国稀土钇材料的大规模应用。

（来源：材料导报）