

离子型稀土信息简报

Ionic Rare Earth Information Bulletin

2024年 第06期 总第128期

本期要闻

- ◎ 海关总署：前5个月铜材进口增8.8% 稀土、钢材、铝材出口分别增14.3%、24.7%、10.8%
- ◎ 刘培勋：以法制化管理促进稀土行业高质量可持续发展
- ◎ 滇南发现超大规模离子吸附型稀土矿
- ◎ 稀土管理条例

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: jxlzxt_2016@163.com

◆邮编：341000

◆传真：0797-8160033

◆网址：<http://www.jxlzxt.com/>

目次

◇ 行业动态	1-11
◎ 海关总署：前5个月铜材进口增8.8% 稀土、钢材、铝材出口分别增14.3%、24.7%、10.8%	
◎ 刘培勋：以法制化管理促进稀土行业高质量可持续发展	
◎ 滇南发现超大规模离子吸附型稀土矿	
◎ 用海藻收集稀土或开辟生物采矿新路	
◎ 美国科学家首次揭示了钷的一种性质	
◎ 美国实现镨钕分离工艺商业化生产	
◇ 科技前沿	12-22
◎ 同济大学科研团队设计基于Tb ³⁺ 功能化的氢键有机框架(HOFs)杂化材料的智能多重光响应“舌”	
◎ 南京大学：面向二维材料逻辑电路和关联物态调控的新型超离子固态氟化物介电材料	
◎ 西安交通大学在高性能稀土永磁材料领域取得重要进展	
◎ 厦门稀土材料研究中心在稀土化合物协效阻燃聚乳酸研究取得进展	
◇ 政策法规	23-29
◎ 稀土管理条例	
◇ 市场行情	30-33
◎ 2024年6月稀土价格走势	
◇ 稀土知识	34-37
◎ 稀土材料：医疗领域大放光彩	
◇ 文章摘要	38-40
◎ 钐精矿与硫酸法钛白废液协同浸出分离钐	
◎ 集残留浸矿的离子型稀土浸-淋一体化工艺研究	
◎ Ce(NO ₃) ₃ 掺杂对Al-Zn-Mg-Y合金PEO涂层显微结构和耐磨性的影响	
◎ 沉渣溶液淋洗离子型稀土尾矿残留浸矿剂的研究	

◇ 期刊目录 41-42

- ◎ 中国稀土学报 (2024 No.3)
- ◎ 稀土化合物与应用 (2024 No.3)

◇ 专利简介 43-44

- ◎ 一种堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的方法
- ◎ 一种稀土金属等离子脱氧的方法和低含氧量稀土金属

◇ 专利目录 45-45

- ◎ 2024 年 6 月新增公开/公告专利 (部分)

海关总署：前5个月铜材进口增8.8% 稀土、钢材、铝材出口分别增14.3%、24.7%、10.8%

据海关统计，2024年前5个月，我国货物贸易（下同）进出口总值17.5万亿元人民币，同比（下同）增长6.3%。其中，出口9.95万亿元，增长6.1%；进口7.55万亿元，增长6.4%；贸易顺差2.4万亿元，扩大5.2%。按美元计价，前5个月，我国进出口总值2.46万亿美元，增长2.8%。其中，出口1.4万亿美元，增长2.7%；进口1.06万亿美元，增长2.9%；贸易顺差3372亿美元，扩大1.8%。

2024年前5个月我国进出口主要特点：

一、一般贸易、加工贸易、保税物流进出口均增长

前5个月，我国一般贸易进出口11.4万亿元，增长5.6%，占我外贸总值的65.1%。其中，出口6.56万亿元，增长7.9%；进口4.84万亿元，增长2.7%。同期，加工贸易进出口3.02万亿元，增长1.6%，占17.3%。其中，出口1.91万亿元，下降2.3%；进口1.11万亿元，增长9.1%。

此外，我国以保税物流方式进出口2.42万亿元，增长16.5%。其中，出口9163.9亿元，增长12.5%；进口1.51万亿元，增长19.2%。

二、对东盟、美国、韩国进出口增长

前5个月，东盟为我第一大贸易伙伴，我与东盟贸易总值为2.77万亿元，增长10.8%，占我外贸总值的15.8%。其中，对东盟出口1.67万亿元，增长13.5%；自东盟进口1.1万亿元，增长7%；对东盟贸易顺差5791.9亿元，扩大28.1%。欧盟为我第二大贸易伙伴，我与欧盟贸易总值为2.23万亿元，下降

1.3%，占 12.7%。其中，对欧盟出口 1.45 万亿元，下降 0.7%；自欧盟进口 7743.7 亿元，下降 2.5%；对欧盟贸易顺差 6780.2 亿元，扩大 1.5%。美国为我第三大贸易伙伴，我与美国贸易总值为 1.87 万亿元，增长 2%，占 10.7%。其中，对美国出口 1.39 万亿元，增长 3.6%；自美国进口 4804.5 亿元，下降 2.6%；对美贸易顺差 9111.8 亿元，扩大 7.2%。韩国为我第四大贸易伙伴，我与韩国贸易总值为 9274.3 亿元，增长 7.4%，占 5.3%。其中，对韩国出口 4238 亿元，下降 2%；自韩国进口 5036.3 亿元，增长 16.8%；对韩贸易逆差 798.3 亿元，去年同期为贸易顺差 15.4 亿元。

同期，我国对共建“一带一路”国家合计进出口 8.31 万亿元，增长 7.2%。其中，出口 4.64 万亿元，增长 7.9%；进口 3.67 万亿元，增长 6.4%。

三、民营企业、国有企业进出口增长

前 5 个月，民营企业进出口 9.58 万亿元，增长 11.5%，占我外贸总值的 54.7%，比去年同期提升 2.6 个百分点。其中，出口 6.45 万亿元，增长 10.2%，占出口总值的 64.8%；进口 3.13 万亿元，增长 14.2%，占进口总值的 41.5%。国有企业进出口 2.79 万亿元，增长 1.9%，占我外贸总值的 15.9%。其中，出口 7650.2 亿元，增长 1.4%；进口 2.02 万亿元，增长 2.1%。同期，外商投资企业进出口 5.09 万亿元，下降 0.1%，占我外贸总值的 29.1%。其中，出口 2.72 万亿元，下降 1.2%；进口 2.37 万亿元，增长 1.2%。

四、机电产品占出口比重近 6 成，其中自动数据处理设备及其零部件、集成电路和汽车出口增长

前 5 个月，我国出口机电产品 5.87 万亿元，增长 7.9%，占出口总值的 59%。其中，自动数据处理设备及其零部件 5544.6 亿元，增长 9.9%；集成电路

4447.3 亿元，增长 25.5%；汽车 3297 亿元，增长 23.8%；手机 3296.8 亿元，下降 2.8%。同期，出口劳密产品 1.69 万亿元，增长 7.1%，占 17%。其中，服装及衣着附件 4170.9 亿元，增长 3.5%；纺织品 4058.2 亿元，增长 6.1%；塑料制品 3116.7 亿元，增长 12.1%。出口农产品 2831.1 亿元，增长 3.9%。

此外，出口钢材 4465.5 万吨，增加 24.7%；成品油 2472.4 万吨，减少 7.7%；肥料 964.8 万吨，减少 2.3%。

五、铁矿砂、煤、天然气和大豆等主要大宗商品进口量增加

前 5 个月，我国进口铁矿砂 5.14 亿吨，增加 7%，进口均价(下同)每吨 860.7 元，上涨 8.1%；原油 2.29 亿吨，减少 0.4%，每吨 4310.9 元，上涨 6.8%；煤 2.05 亿吨，增加 12.6%，每吨 721.9 元，下跌 18.1%；天然气 5427.6 万吨，增加 17.4%，每吨 3504.6 元，下跌 12.6%；大豆 3736.9 万吨，减少 5.4%，每吨 3759.7 元，下跌 15.5%；成品油 2210.7 万吨，增加 20.1%，每吨 4265.9 元，上涨 5.2%。此外，进口初级形状的塑料 1197.6 万吨，增加 1.3%，每吨 1.07 万元，下跌 1.3%；未锻轧铜及铜材 232.7 万吨，增加 8.8%，每吨 6.44 万元，上涨 5.9%。

同期，进口机电产品 2.68 万亿元，增长 11.9%。其中，集成电路 2136.5 亿个，增加 14.9%，价值 1.05 万亿元，增长 17.1%；汽车 27.1 万辆，减少 4.5%，价值 1072.4 亿元，下降 13.4%。

SMM 根据海关总署公布的数据整理了金属行业部分产品进出口情况，具体如下：

表 1 金属行业部分产品进出口情况表

	品目	5月	2023年5月	同比	2024年1-5月	2023年1-5月	累计同比	单位
进口	铁矿砂及其精矿	10,203.30	9,617.50	6.1%	51,374.60	48,010.00	7.0%	万吨
	铜矿砂及其精矿	226.4	255.7	-11.5%	1,159.30	1,128.90	2.7%	万吨
	煤及褐煤	4,381.60	3,958.40	10.7%	20,496.90	18,204.50	12.6%	万吨
	稀土	13,746.70	13,390.30	2.7%	62,589.20	73,035.40	-14.3%	吨
	钢材	63.7	63.1	1.0%	304.30	312.80	-2.7%	万吨
	未锻轧铜及铜材	51.40	44.40	15.8%	232.70	213.80	8.8%	万吨
出口	稀土	6,217.00	4,576.00	35.9%	24,266.50	21,226.60	14.3%	吨
	钢材	963.1	835.6	15.3%	4,465.50	3,581.80	24.7%	万吨
	未锻轧铝及铝材	56.50	47.54	18.8%	256.20	231.20	10.8%	万吨

出口：

2024年5月未锻轧铝及铝材出口56.5万吨，同比2023年5月增加18.8%。

2024年1-5月累计出口256.2万吨，同比2023年1-5月增加10.8%。

2024年5月钢材出口963.1万吨，同比2023年5月增加15.3%。2024年1-5月累计出口4465.5吨，同比2023年1-5月增加24.7%。

2024年5月稀土出口6217.0吨，同比2023年5月增加35.9%。2024年1-5月累计出口24266.5吨，同比2023年1-5月增加14.3%。

进口：

2024年5月铜矿砂及其精矿进口226.4万吨，同比2023年5月减少11.5%。

2024年1-5月累计进口1159.3万吨，同比2023年1-5月增加2.7%。

2024年5月未锻轧铜及铜材进口51.4万吨，同比2023年5月增加15.8%。

2024年1-5月累计进口232.7万吨，同比2023年1-5月增加8.8%。

2024年5月铁矿砂及其精矿进口10203.3万吨，同比2023年5月增加6.1%。

2024年1-5月累计进口51374.6万吨，同比2023年1-5月增加7%。

2024年5月煤及褐煤进口4381.6万吨，同比2023年5月增加10.7%。2024年1-5月累计进口20496.9万吨，同比2023年1-5月增加12.6%。

2024年5月钢材进口量达到63.7万吨，同比2023年5月增加1%。2024年1-5月累计进口304.3万吨，同比2023年1-5月减少2.7%。

2024年5月稀土进口量达到13746.7吨，同比2023年5月增加2.7%。2024年1-5月累计进口62589.2吨，同比2023年1-5月减少14.3%。

(来源：上海有色)

刘培勋：以法制化管理促进稀土行业 高质量可持续发展

《稀土管理条例》首次以行政立法形式规范稀土资源的开发利用，是贯彻落实习近平总书记对稀土产业发展重要指示精神的关键举措，是推动稀土产业高质量发展的必然要求，凝结着我国多年来行业治理经验，既适应时代所需，又符合行业之盼，是一部具有里程碑意义的统领性、综合性基础法规，让我们深切感受到党和国家保护好、开发好、利用好稀土资源，发展好稀土产业的坚强意志和坚定决心。

我国作为稀土资源储量以及稀土生产、应用、出口量均居世界首位的国家，持续加强稀土资源保护开发和合理利用，产业规模不断扩大，发展质量不断提升，为科技进步和经济社会发展作出了突出贡献。

近年来，新能源、新材料等新兴产业迅速崛起，稀土在迎来黄金发展期的同时，也面临一些新情况、新问题。2019年5月份，习近平总书记在考察江西时，对稀土产业发展作出重要指示。《稀土管理条例》全面深入贯彻落实习近平总书记重要指示精神，为解决制约产业高质量发展的堵点、难点开出了法制良方。一是完善了生态环境保护、资源储备的有关规定，形成了更加科学有效的管理方式，更有利于稀土资源的保护性开发；二是明确提出国家鼓励科技创新和人才培养，支持稀土新产品新材料新工艺的研发和产业化，更有利于稀土资源的高质化利用；三是建立起从国家到地方再到企业分层管理、各司其职、各负其责的治理体系，

并首次对违法违规行为设定处罚标准，进一步加压引导行业秩序整顿，更有利于稀土行业的规范化管理。可以说，《稀土管理条例》既符合行业高质量发展的客观规律，也寄托着上下游企业对行业健康可持续发展的共同心愿，极具战略意义和时代价值。

(来源：中国有色金属报)

滇南发现超大规模离子吸附型稀土矿

日前，以中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所王学求团队研究成果为依托，滇南地区首次发现潜在资源量达超大型规模、富含轻稀土和重稀土的离子吸附型稀土矿。

快速圈定富含中重稀土矿床是新一轮找矿突破战略行动中急需解决的科学难题。为此，王学求团队通过中国地球化学基准研究，发现轻稀土矿轻重稀土比值大于 5.0、重稀土矿轻重稀土比值小于 3.5，可作为中重稀土矿找矿判别标志。根据这一判别标志，团队将云南省红河哈尼族彝族自治州作为中重稀土找矿靶区。

针对稀土离子易被黏土矿物吸附的特性，研究团队在区域调查阶段研发了水系沉积物微细粒地球化学调查技术；针对地表淋滤作用难以发现富矿层位难题，在矿区勘查阶段研发了穿透性地球化学土壤剖面测量方法。经 260 个钻孔验证，165 个钻孔达到工业品位，确定了云南省红河哈尼族彝族自治州马锅底超大型、勐桥大型、贾沙大型、大寨中型 4 个离子吸附型稀土矿，潜在资源量（稀土氧化物）达 100 万吨。

这是在滇南地区首次发现潜在资源量达超大型规模、富含轻稀土和重稀土的离子吸附型稀土矿，形成了从区域战略选区到矿区普查和详查的地球化学勘

查技术系列，填补了离子吸附型稀土矿地球化学勘查技术空白，对重新认识我国稀土矿的分布规律和高海拔区稀土元素超常富集机理具有重要的科学意义，对完善我国稀土产业布局、助力西南地区乡村振兴具有重大的经济价值。

（来源：自然资源部）

用海藻收集稀土或开辟生物采矿新路

从化石燃料到清洁能源的转型正席卷全球，势不可挡。在这场波澜壮阔的能源革命中，全球对于制造电池、太阳能电池板等绿色技术所需的新矿物资源的争夺愈发激烈。现在，一条绿色的开采道路出现在科学家眼前——用海藻收集稀土。

英国《新科学家》网站近日刊文称，某些海藻品种拥有一种特殊能力——能够大量积聚海水中的稀土元素。目前，多个国际研究小组正在探索如何从海藻中收集这些珍贵的稀土元素，这一创新思路在“生物采矿”领域尚属前沿。

利用藻类收集稀土

在美国阿拉斯加东南部威尔士王子岛上的博坎山，蕴藏着丰富的稀土元素。然而，由于潜在的环境影响，传统的开采方法在这里饱受争议。

为了解决这一问题，阿拉斯加大学费尔班克斯分校的谢里·乌曼佐及其团队计划在不进行破坏性开采的情况下，采集海藻以获取稀土矿藏。

这一方案得到了美国能源部能源高级研究计划局(ARPA-E)近 200 万美元的资助。乌曼佐团队计划在博坎山周边水域培育海藻。这些海藻吸收并积聚稀土元素。然后，他们通过一系列提纯工艺将这些稀土元素提取出来，以供利用。

乌曼佐刚从实地考察中返回，并采集了水样。她认为，该地区暴雨产生的径流会将矿床中侵蚀出的稀土元素带入周围的海湾，海藻有潜力在此地积聚稀

土元素。但问题在于，海藻真的能收集这些矿物吗？

如果成功就是奇迹

乌曼佐的项目是由 ARPA-E 的“藻类开采”项目支持的几个项目之一。在技术支持下，“藻类开采”项目将研究如何用植物或微生物提取稀土元素和其他关键矿物。

国际能源署 5 月发布的一份报告中预测，到 2040 年，稀土元素的需求将接近翻倍。为了满足这一需求，同时减少环境污染，海藻提取或许是一个新途径。

乌曼佐表示，目前尚不清楚这些藻类本身是否会因积聚稀土或其他矿物而受益，其主要机制可能在于，海藻产生的带负电荷的碳水化合物可以吸引特定的带正电荷的稀土元素。例如，在棕色海藻中，一种名为藻酸盐的天然多糖已被证明可以吸引钇等重稀土元素。

除了乌曼佐的项目外，其他研究人员和机构也在探索类似的生物采矿方法。例如，美国太平洋西北国家实验室人员表示，一些生长在水箱中的大型藻类可以从海水中积累稀土元素。

与陆地植物相比，海洋中的大型藻类具有独特的优势。流动的海水为海藻提供了源源不断的新物质供应，这些物质可以在整个有机体中积累，而不仅仅局限于根部。“超级积聚体”海藻是否有希望提供有价值的稀土供应？哪种大型藻类积累最多，它们生长得如何？提取矿物质的最佳方式是什么？博坎山的实践可能告诉人们答案。

失败不算意外，但成功就是奇迹。乌曼佐说：“如果一切按计划进行，密集的海藻农场将从博坎山周围的水域收获稀土。一旦成功，这将对传统采矿业的有力补充。”

海藻具有多元价值

美国爱达荷大学的阿明·米尔库伊表示，即使积累和提取被证明是可行的，从海藻中提取的稀土元素也可能相当有限。不过，结合其他技术，这些宝贵的资源依然可以被高效利用。例如，这些海藻可用于回收采矿废物中的有价值材料。

在 ARPA-E 支持的一个项目中，研究团队正研究如何从海藻中提取矿物质，同时还能巧妙地保留其余的生物物质，这些生物物质可以被转化为肥料、燃料或食物蛋白质。一家名为 Umaro Foods 的美国初创公司正使用海藻蛋白制作培根替代品，这将进一步延长海藻相关的产业链。

研究人员相信，大型藻类在采矿领域的应用潜力远不止于此。海藻的生物多样性非常惊人。即使不直接用于积聚稀土元素，种植海藻也有助于净化海水、去除大气中的二氧化碳。

(来源：科技日报)

美国科学家首次揭示了钷的一种性质

据《自然》杂志报道，美国橡树岭国家实验室(ORNL)的科学家首次揭示了钷的一种性质。约 80 年前，这一稀土元素也是由该实验室科学家发现。尽管钷被用于医学研究和长寿命核电池，但它的一些特性仍难以捉摸。最新发现标志着稀土研究取得重大进展，并可能改写化学教科书，为探索现代技术中的关键元素开辟了新途径。ORNL 研究团队制备了一种钷的化学络合物，首次在溶液中对其进行表征。他们通过一系列详细实验，揭开了这种原子序数为 61 的极其稀有的镧系元素的秘密。

研究人员解释说，稀土元素中大部分都是镧系元素，从周期表中第 57 号元素镧到第 71 号元素镥，镧系元素共有 15 种。其中的钷非常稀有，就算找遍地球

每个角落，自然存在于地壳中的钷也只是一磅左右。与其他稀土元素不同的是，钷没有稳定的同位素，它是最后一个被发现的镧系元素，也是最难研究的。

研究团队将放射性钷与一种称为二甘醇酰胺的特殊有机配体分子结合在一起，然后用 X 射线光谱学确定了该络合物的性质，包括与邻近原子环的化学键长度。

在实验中，研究团队造出了半衰期为 2.62 年的同位素钷-147。其数量充足，纯度足够高，可用于研究其化学性质。

利用研究反应堆、热室和超级计算机，团队首次展示了整个镧系元素（包括钷）在溶液中收缩的特征。镧系收缩是指随着原子序数增加，镧系元素的原子半径逐渐缩小的现象。由于相同的电荷被限制在缩小的空间中，从而产生了独特的化学和电子性质。团队得到了清晰的钷信号，使他们能够更好地确定整个系列的趋势形状。

他们发现，这种收缩沿着原子序列加速，但在钷之后，收缩速度相当慢。这是了解化学元素的化学键性质及其沿元素周期表结构变化的一个重要里程碑。镧系元素和锕系元素在癌症诊断与治疗、可再生能源技术和用于深空探索的核电池中具有广泛应用。

（来源：CBC 金属网）

美国实现镨钕分离工艺商业化生产

据 Mining.com 网站报道，能源燃料公司(Energy Fuels, EF)日前宣布，其在美国犹他州的怀特梅萨(White Mesa)冶炼厂镨钕分离工艺已经实现商业化生产。

能源燃料公司新的第一阶段稀土分离工艺可年产镨钕 850-1000 吨，这两种

稀土氧化物是生产电动汽车以及军事和国防技术所需永磁的关键材料。

公司希望在月底能够大量供应镨钕分离产品。

能源燃料公司正在用佛罗里达州和佐治亚州的重砂厂开采的独居石来提取、精炼和分离镨钕产品。

该公司称，这是数十年来美国公司首次从独居石规模生产特定规格的分
离稀土产品。

2021年，能源燃料公司开始稀土分离试点，随后在2022年和2023年实现部分稀土分离。

2024年1季度，公司完成了第一阶段稀土分离工艺工程建设工作，总投资大约1600万美元，此前控制预算为2500万美元。

二季度，公司希望能够生产特定规格的镨钕分离产品25-35吨。

能源燃料公司声称，“新增稀土分离工艺并没有影响公司在这个冶炼厂的铀生产，已准备好在2024年第三季度开始铀矿石和含铀材料加工计划”。

“2024年二季度完成镨钕生产后，公司希望能够加工库存铀矿石和替代原料，2024年全年有望生产铀(U_3O_8)15-50万磅，2025年产量有望进一步增加。”

通过新工艺，能源燃料公司还希望生产钐等稀土精矿，同时还可以从独居石原料中回收铀。

公司希望能够利用钐精矿继续试生产镝和铽，并在冶炼厂设计工艺来生产这些稀土产品。

目前在西半球，还没有企业能够商业化生产特定规格的镝铽以及其他重稀土产品。

(来源：全球地质矿产信息系统)

同济大学科研团队设计基于 Tb^{3+} 功能化的 氢键有机框架(HOFs)杂化材料的 智能多重光响应“舌”

人对溶解在唾液中的食物分子和离子产生的感觉称为味觉。人类的味觉系统能够识别五种基本味道：酸味、甜味、苦味、咸味和鲜味。在品尝食物时，味蕾细胞中的感受器会对味觉刺激做出特异性响应，不同的响应信号传递到大脑的味觉皮层后，大脑会根据响应模式对该味觉刺激做出判断。过去几十年来，人们一直致力于设计基于电响应信号的仿生传感器阵列，而光学传感器因其简单、快速、实时监测和便携等优点在味觉传感领域具有广阔的研究前景。

为了模仿人类味觉的感知过程，实现多种不同味觉的化合物的区分，我院闫冰教授团队近期通过将荧光和磷光信号结合，开发了一种具有多模式光响应的智能味觉传感器，可以有效识别出鲜味、酸味和苦味，相关研究成果以“Smart Multiple Photoresponsive Tongue for Sensing Umami, Sour and Bitter Tastes Based on Tb^{3+} Functionalized Hydrogen-Bonded Organic Frameworks”为题在线发表于国际知名期刊《先进功能材料》(Advanced Functional Materials, 2024, 34, 2316195)。

研究人员将 Tb^{3+} 离子和有机磷光粉(均苯三酸, TMA)原位组装到由三聚氰胺和三聚氰酸构建的 MCA 氢键有机框架中制备成 $Tb@MCATMA$ ($Tb@1$)。 $Tb@1$ 基于荧光和磷光双输出信号，能有效区分鲜味(5'-肌苷酸二钠和 5'-鸟苷酸二钠)、酸味(草酸和柠檬酸)以及苦味(5-羟甲基糠醛和 2-糠醛)化合物，同时将六种化合物成功划分为三类 TYPE A, TYPE B 和 TYPE C，这三种类别与鲜味，酸味和苦味相对应。此外，通过调制激发波长， $Tb@1$ 传感器能对每种风味化合

物产生独特的“指纹信息”，无需复杂的数据处理就能识别每种分析物。经过探索，该课题组发现同类分析物的相同响应模式归因于同样的传感机制。研究工作通过引入荧光和磷光双输出信号，克服了传感器阵列中每个探针专一性响应的限制，并通过开发智能多重光响应舌，进一步实现了对鲜味、酸味和苦味的感知。

闫冰教授为论文的独立通讯作者，博士研究生张孜硕为论文的第一作者，该研究工作得到国家自然科学基金项目的支持。

(来源：同济大学)



南京大学：面向二维材料逻辑电路和关联物态调控的新型超离子固态氟化物介电材料

近日，南京大学现代工程与应用科学学院袁洪涛教授团队与合作者们开发出了一系列具有极低扩散势垒的超离子导体氟化物介电薄膜材料，展示了超离子导体电介质的强大的界面电容耦合能力，在系列氟化物体系中获得极高的界面电双层电容耦合($>20 \mu\text{F}\cdot\text{cm}^{-2}$)和极小的栅极漏电流密度($\sim 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$)等优异介电性能，为开发先进的电子器件应用和调控强关联材料的电子态提供了全新的介电材料平台。相关研究工作以“Superionic fluoride gate dielectrics with low diffusion barrier for two-dimensional electronics”为题发表在期刊《Nature Nanotechnology》上。

随着现代电子学的迅猛发展和半导体器件超大规模集成化趋势，二氧化硅等传统氧化物电介质由于介电击穿场强的限制，阻碍了场效应晶体管尺寸的进一步缩小。与传统氧化物电介质不同，近年来基于胶体化学“界面电双层”概念发展

起来的新型离子液体电双层调控技术,能够在电子材料表面构筑电双层结构从而实现巨大的电容耦合,在低工作电压下大范围地调控材料表面的载流子浓度(高达 10^{15} cm^{-2}),已被开发为一种调控材料电子态和凝聚态物理中强关联量子现象的有效技术手段。例如,利用界面电双层场效应能够实现高导通低电压的场效应电子器件以及场效应诱导的绝缘体-超导相变、顺磁/反铁磁-铁磁相变、界面自旋极化等丰富的界面物理和量子调控现象。然而,这些有机离子电解质通常以液体或者凝胶形式存在,与当前的半导体制造工艺无法兼容,使得基于界面电双层效应的电介质难以集成到现代电子器件中。因此,开发具有高电容耦合、并且与传统半导体制造工艺相兼容的固态电双层介电材料,对于实现先进电子器件和大规模集成电路具有重要意义。然而,如何从实验上找寻到这样的电介质材料,仍是极具挑战性的科学难题。

针对上述科学问题和技术挑战,南京大学袁洪涛教授课题组与合作者们,开发出了以氟化镧为代表的超离子固态氟化物介电薄膜材料家族,其表现出介电常数大(~ 30)、电容耦合强($> 20 \mu\text{F cm}^{-2}$)、击穿场强高($> 100 \text{ MV cm}^{-1}$)和等效氧化层厚度薄(EOT $\sim 0.15 \text{ nm}$)的优异性能,展示了其在大规模逻辑电路和量子材料关联物态调控中的卓越潜力。具体而言,通过将固态超离子氟化物作为电介质与二维半导体材料 MoS_2 相结合,构建了高性能的电双层场效应晶体管,其表现出极高的开/关电流比($\sim 10^8$)、接近热力学极限的亚阈值摆幅(65 mV dec^{-1})和极低的栅极漏电流密度($\sim 10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$)等优异性能,并进一步实现了超高电压增益(~ 167)的逻辑反相器和具有极低静态功耗的与非(NAND)、或非(NOR)、与(AND)、或(OR)等逻辑门电路。同时,通过氟化物栅控 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 中二维洁净极限下的超导体-绝缘体相变进一步证实了氟化物介电材料在调控量子材料电子态中

的卓越能力。作者们发现，稀土金属氟化物介电材料中的高离子电导率和大电容耦合来自于 F 离子在金属阳离子四面体通道中的快速迁移，这种氟离子的迁移过程能垒非常低，从而能够在电场作用下实现 F 离子或 F 空位在界面处的大量累积，形成巨大的界面电双层电容耦合。该研究工作所展示的超离子导体固态氟化物电介质薄膜材料，为先进电子器件的大规模集成开发和各种关联电子现象的场效应调控提供了新的介电材料平台，也为人们理解超离子导体中的离子传输机制、寻找更多大电容耦合的新型超离子导体介电材料提供了新的启示。

众所周知，基于离子液体的界面电双层效应能够在电子材料表面诱导产生超高浓度的电荷累积，能够实现高性能的半导体场效应晶体管甚至强关联材料体系中各种关联电子态的调控。作者们设想，如果能够在固态电介质中实现类似于离子液体的巨大电双层电容耦合特性，就能为大规模集成电路的发展提供一种栅控能力极强的介电材料，对于先进电子器件的发展具有重大意义。基于此，作者们找到了一种新型超离子导体金属氟化物介电材料，其中氟离子因其极小的迁移能量势垒(~ 0.1 eV)可以在金属阳离子的四面体晶格框架内自由移动，从而能够在电场下在电子材料的界面处形成类似于离子液体的电双层结构和巨大电容耦合。更重要的是，这种氟化物介电材料能够通过低成本的热蒸镀工艺制备成具有纳米级表面粗糙度的晶圆级高质量均匀薄膜，而且能够和二维材料形成原子级高质量的界面。氟化物介电材料中的高界面电容耦合以及与传统半导体工艺的兼容性使其有望成为先进电子器件中极具竞争力的候选介电材料。

为了探究氟化物薄膜电介质的基本介电性能，作者们进行了电化学阻抗谱(EIS)测量并获得了频率依赖的电容。如图 1 所示，氟化物薄膜在低频下的电双层电容能达到 $20 \mu\text{F cm}^{-2}$ ，与广泛使用的液态有机电解质的电双层电容值相当。

由于稀土金属氟化物薄膜具有大的电容耦合和宽的带隙，因此表现出高介电常数 (~30) 和极低的漏电流密度 ($<10^{-6} \text{ A cm}^{-2}$)。此外，氟化物薄膜的优异介电性能还可以通过“阳离子工程”进行调节，通过选择不同的阳离子或者将两种异价阳离子进行掺杂，可以进一步提高氟化物薄膜的电容耦合性能。更有趣的是，有些氟化物材料还具有铁磁性或光学上转换等功能性质，可以用作新型的功能电介质材料。例如铁磁氟化物（如 NiF_3 、 YbF_3 和 GdF_3 ）可用于磁光器件，反铁磁氟化物（如 FeF_2 和 MnF_2 ）可以用于构建非易失性存储器等。

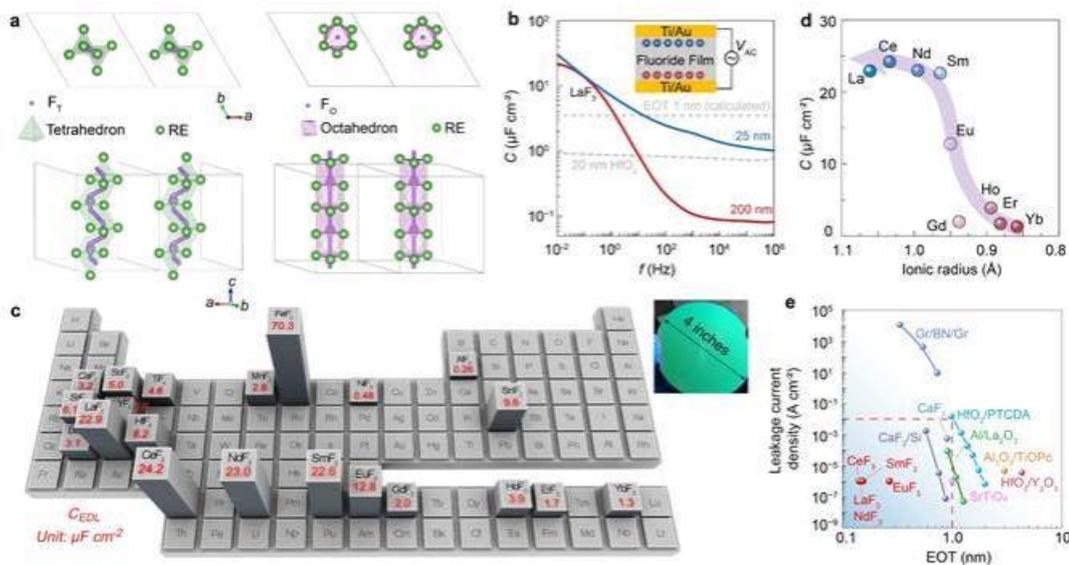


图1 氟化物的晶体结构、介电特性和氟离子迁移过程 (a) 稀土金属氟化物的晶体结构以及氟离子通过相邻四面体空隙（左图，T-T 路径）或八面体位点（右图，O-O 路径）的迁移路径；(b) 不同厚度 LaF_3 薄膜的频率依赖的电容耦合；(c) 二元金属氟化物薄膜电容耦合的“元素周期表”；(d) 稀土镧系氟化物的电容值与阳离子半径的依赖关系；(e) 使用金属/氟化物/金属结构测量的氟化物薄膜的漏电流密度与等效氧化物厚度总结

基于上述氟化物的优异栅介质性能，作者们进一步通过集成 n 型 MoS_2 和 p 型 WSe_2 晶体管构建了基于氟化物电介质的 CMOS 反相器。如图 2 所示，基于氟化物电介质的 CMOS 反相器展现出优异的输出性能，在预置电压为 2.6 V 时，该反相器的直流电压增益高达 167，这是迄今为止报道的基于过渡金属二硫化物的同类反相器中的最高值。此外，基于氟化物电介质的 CMOS 反相器还具有出色

的噪声容限特性，对于不同的预置电压，CMOS反相器的总噪声容限始终超过90%，具有极高的噪声稳定性。为了验证基于氟化物电介质的二维半导体器件的高频性能，作者们对其进行了不同频率的响应测试，其中单个场效应晶体管的响应时间快至250 ns，可以与目前经过系统器件结构优化的离子液体场效应晶体管的最快响应速度相比拟。对于复杂一些的CMOS反相器也仍然可以具有快至13 μ s的响应时间。通过对于器件结构的系统优化如进一步减小氟化物栅介质厚度、改善源漏接触电阻、提高通道材料迁移率、减小寄生电容等，基于氟化物电介质的二维逻辑电路器件有望实现GHz以上的高频响应。

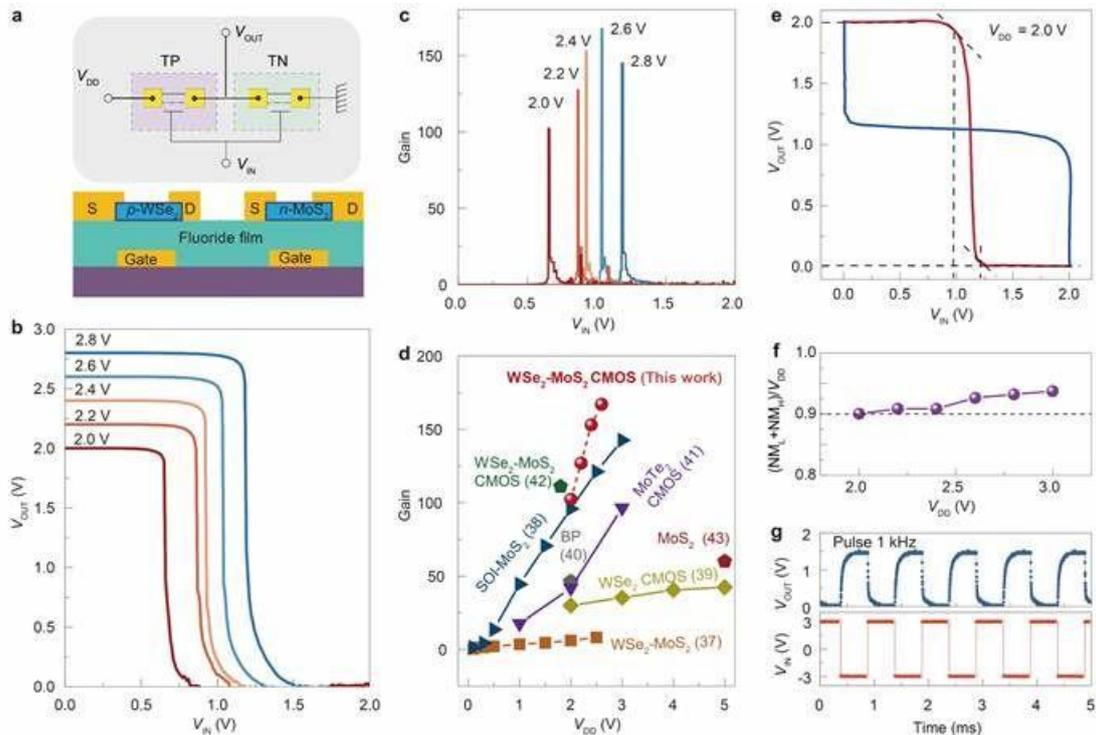


图2 基于n型MoS₂和p型WSe₂晶体管的CMOS反相器(a) CMOS反相器的等效电路和结构示意图，TP和TN分别代表p型晶体管和n型晶体管，栅极电压作为输入信号，两个晶体管的公共端电压作为输出信号；(b) CMOS反相器在不同预置电压下的电压传输特性；(c) 直流电压增益随输入电压的变化；(d) 基于氟化物与基于其它电介质的二维半导体CMOS反相器的电压增益比较；(e) 基于氟化物电介质CMOS反相器的稳态电压传输特性。(f) 总噪声容限随预置电压的函数；(g) CMOS反相器在施加频率为1 kHz的方波输入电压下的响应

为了进一步探究固态超离子氟化物电介质在调节量子材料中关联电子态方

面的能力，作者们基于高温超导体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) 构筑了氟化物门控的 Bi-2212 器件并调控了其高温超导电性。通过施加正向栅极电压引入电子掺杂，能够实现 Bi-2212 从超导态到绝缘态的连续转变。可以看到，随着栅压逐渐上升，Bi-2212 样品的空穴掺杂浓度 p 不断降低，从而导致其超导转变温度不断下降，最终超导电性被完全抑制。有趣的是，通过临界指数分析获得的临界指数 $z\nu$ (1.47) 接近洁净极限下的理论值 1.5，说明这种氟化物栅控 Bi-2212 的超导-绝缘体转变是处于二维洁净极限下的量子相变。为了进一步验证氟化物电介质栅控能够作为调控 Bi-2212 超导特性的一种干净和有效的手段，作者们测试了 $\text{LaF}_3/\text{Bi-2212}$ 器件的高分辨扫描透射电子显微 (STEM) 图像。可以看到 $\text{LaF}_3/\text{Bi-2212}$ 形成了高质量的原子级界面，这说明氟化物薄膜的蒸镀和后续的栅压调控过程并不会对 Bi-2212 材料造成损伤，证明了氟化物介电薄膜用于调控强关联材料的内在关联电子态的卓越能力。

综上所述，作者们展示了一系列具有高电容耦合的稀土金属氟化物固态超离子电介质材料。得益于超离子导体界面电双层特有的巨大电容耦合性能，氟化物栅介质材料不仅能够实现与传统半导体器件工艺高度兼容的低功耗、高增益逻辑门电路器件，而且可以实现高温超导体二维洁净极限下的栅控超导-绝缘体相变，体现了超离子固态氟化物介电薄膜材料在电子器件以及关联物态调控中的卓越能力。此研究作为开发先进电子器件和探索场效应调控的各种关联电子现象提供了一个全新的介电材料平台，也为人们理解氟离子导体中的离子传输机制、寻找更多大电容耦合的新型超离子导体介电材料提供了重要参考。

(来源：南京大学)

西安交通大学在高性能稀土永磁材料领域 取得重要进展

稀土永磁材料能向外界提供强磁场，在交通、能源、信息等领域应用广泛；稀土永磁材料同时也是消耗稀土战略资源最多的领域，因此，一直是稀土产业大国博弈的核心领域。随着稀土永磁材料领域国际竞争日益激烈，研发具有自主知识产权的、符合我国稀土资源特色的高性能稀土永磁材料及制备技术，对推动我国稀土永磁产业发展和稀土资源高效利用意义重大。前沿院马天宇教授团队长期从事稀土永磁材料基础研究和技术开发，近期在轻稀土永磁材料领域取得了重要进展。

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型轻稀土永磁材料是高温磁性最强的永磁材料，也是使用温度超过 300°C 的新一代轨道交通和电动飞机等永磁驱动系统的首选。历经40多年发展，该类材料的剩磁（充磁后向外界提供的磁感应强度）已接近理论值，但是其矫顽力和膝点磁场（反映抗退磁能力的指标，值越大抗退磁能力越强）却远低于理论值。马天宇教授团队在前期深入研究该类材料显微组织演变和反磁化机制的过程中，发现一种由结构缺陷聚集所形成的 $2:17\text{R}'$ 新相，这个相对磁性能有害，是导致矫顽力和膝点磁场低于理论值的重要原因（《Acta Materialia》202, 2021, 290-301; 244, 2023, 118580）。最近，团队发展了一种提高 $2:17$ 型钕钴永磁材料矫顽力和膝点磁场的新方法。与传统的等温时效和慢冷处理工艺不同，该团队在等温时效处理之前引入了额外的快速升降温（RTP）预处理（图3），通过增多点缺陷和同时保持高密度线缺陷（位错），有效提高了对矫顽力起关键作用的 $1:5\text{H}$ 析出相的形核率，同时加快了等温时效过程中结构缺陷的分解速

度。对比结果显示,在后续的全程热处理之后,1:5H析出相显著增多,同时2:17R'明显减少,从而使矫顽力(H_{cj})提高近20%、膝点磁场(H_k)提高30%以上,磁体综合磁性能超过成分相近的商业磁体。相关工作已申报国家发明专利(公开号 CN2023105067717)。

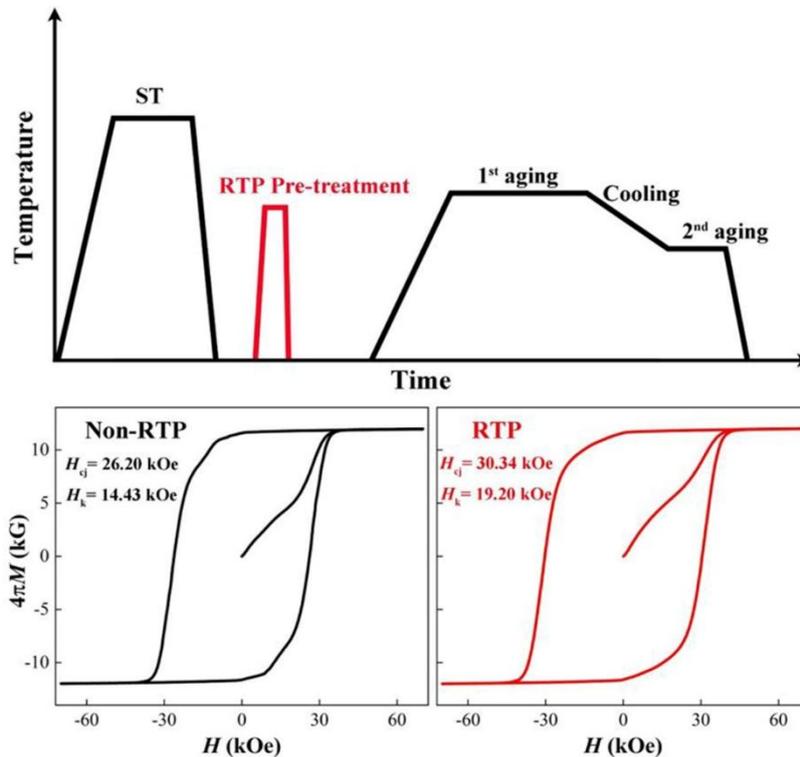


图3 采用传统工艺和引入快速升降温预处理制备磁体的热处理流程和磁性能

相关论文以“Rapid-thermal-process pre-treatment promoted precipitation towards strengthening hard magnetism of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -type magnets”为题发表在金属材料领域旗舰刊物《Acta Materialia》(274, 2024, 119966, doi:10.1016/j.actamat.2024.119966)。

前沿院助理教授宋欣为论文第一作者,马天宇教授为论文通讯作者,合作者包括东北大学黄丹博士、中国科学院赣江创新研究院周相龙博士、杭州电子科技大学赵利忠教授和刘孝莲博士、香港城市大学任洋教授及西北工业大学刘

峰教授。西安交通大学前沿院为上述论文的通讯单位。研究得到了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目及金属材料强度国家重点实验室的支持。

(来源：交大新闻网)

厦门稀土材料研究中心在稀土化合物协效阻燃 聚乳酸研究取得进展

在双碳背景下，聚乳酸(PLA)具有强度高、可完全降解的特点，是替代石油基聚合物的优良材料。但 PLA 的极限氧指数(LOI)仅 20%，易燃烧，这极大限制了其在电子电器、汽车等领域的应用。目前商业阻燃剂存在着明显的缺点和不足。如卤系阻燃剂阻燃效率高，但是燃烧过程会释放有毒气体，对环境及人体造成危害；无机阻燃剂阻燃效率低，用量大，与聚合物相容性差，高添加量时对聚合物力学性能影响大；有机磷系及氮系阻燃剂与聚合物相容性好，但是阻燃效率不及卤系阻燃剂，同样存在低效高添加的问题。稀土因其独特的 4f 电子轨道，其化合物通常表现出丰富的反应活性，如催化酯化作用和高热稳定性，因此稀土化合物在阻燃领域逐渐受到人们的关注。

中国科学院海西研究院厦门稀土材料研究中心宋立军团队在之前稀土 DOPO 衍生物阻燃基础上，集成有机含磷配体 2-羧乙基苯基次磷酸(CEPPA)和稀土铈元素的优点，设计合成了兼具高热稳定性和相容性的新型片层状稀土配合物 Ce@CEPPA。将其与商业化阻燃剂 APP 以 1:4 的比例复合，总添加量仅需 5% 即可使 PLA 复合材料的垂直燃烧等级达 V-0 级，极限氧指数达 29.4%。研究发现，在燃烧过程中，配合物在热分解时形成 $Ce_2P_2O_x$ 簇或纳米颗粒，显著加速催化 PLA 分子链成碳和 APP 的脱氢分解成酸；同时配合物的层状结构本身也诱导

碳层取向生长，从而形成了含铈交联密集富磷碳层，有效隔绝空气、热量和可燃气体。此外，配合物和 APP 分解及 PLA 分子链成碳过程中，产生大量的氨气、水汽及其它不可燃气体，稀释可燃性气体和氧气。通过在凝聚相和气相共同作用，Ce@CEPPA 大幅提升了 PLA 复合材料的火安全性能，拓宽了 PLA 的应用范围。该研究为稀土阻燃高分子材料研发提供了新思路，为拓展稀土下游应用提供了理论基础。

该成果以“Synthesis of cerium-based flame retardant containing phosphorus and its impact on the flammability of polylactic acid”为题发表在 SCI 一区期刊《International Journal of Biological Macromolecules》(2024, 271, 132636, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132636)。硕士研究生曾军玮为第一作者，宋立军研究员为通讯作者。

(来源：厦门稀土材料研究中心)

稀土管理条例

中华人民共和国国务院令

第785号

《稀土管理条例》已经2024年4月26日国务院第31次常务会议通过，现予公布，自2024年10月1日起施行。

总理 李强

2024年6月22日

第一条 为有效保护和合理开发利用稀土资源，促进稀土产业高质量发展，维护生态安全，保障国家资源安全和产业安全，根据有关法律，制定本条例。

第二条 在中华人民共和国境内从事稀土的开采、冶炼分离、金属冶炼、综合利用、产品流通、进出口等活动，适用本条例。

第三条 稀土管理工作应当贯彻落实党和国家的路线方针政策、决策部署，坚持保护资源与开发利用并重，遵循统筹规划、保障安全、科技创新、绿色发展的原则。

第四条 稀土资源属于国家所有，任何组织和个人不得侵占或者破坏稀土资源。

国家依法加强对稀土资源的保护，对稀土资源实行保护性开采。

第五条 国家对稀土产业发展实行统一规划。国务院工业和信息化主管部门会同国务院有关部门依法编制和组织实施稀土产业发展规划。

第六条 国家鼓励和支持稀土产业新技术、新工艺、新产品、新材料、新装备的研发和应用，持续提升稀土资源开发利用水平，推动稀土产业高端化、智能化、绿色化发展。

第七条 国务院工业和信息化主管部门负责全国稀土行业管理工作，研究制定并组织实施稀土行业管理政策措施。国务院自然资源主管部门等其他有关部门在各自职责范围内负责稀土管理相关工作。

县级以上地方人民政府负责本地区稀土管理有关工作。县级以上地方人民政府工业和信息化、自然资源等有关主管部门按照职责分工做好稀土管理相关工作。

第八条 国务院工业和信息化主管部门会同国务院有关部门确定稀土开采企业和稀土冶炼分离企业，并向社会公布。

除依照本条第一款确定的企业外，其他组织和个人不得从事稀土开采和稀土冶炼分离。

第九条 稀土开采企业应当依照矿产资源管理法律、行政法规和国家有关规定取得采矿权、采矿许可证。

投资稀土开采、冶炼分离等项目，应当遵守投资项目的法律、行政法规和国家有关规定。

第十条 国家根据稀土资源储量和种类差异、产业发展、生态保护、市场需求等因素，对稀土开采和稀土冶炼分离实行总量调控，并优化动态管理。具体办法由国务院工业和信息化主管部门会同国务院自然资源、发展改革等部门制定。

稀土开采企业和稀土冶炼分离企业应当严格遵守国家有关总量调控管理规定。

第十一条 国家鼓励和支持企业利用先进适用技术、工艺，对稀土二次资源进行综合利用。

稀土综合利用企业不得以稀土矿产品为原料从事生产活动。

第十二条 从事稀土开采、冶炼分离、金属冶炼、综合利用的企业，应当遵

守有关矿产资源、节能环保、清洁生产、安全生产和消防的法律法规，采取合理的环境风险防范、生态保护、污染防治和安全防护措施，有效防止环境污染和生产安全事故。

第十三条 任何组织和个人不得收购、加工、销售、出口非法开采或者非法冶炼分离的稀土产品。

第十四条 国务院工业和信息化主管部门会同国务院自然资源、商务、海关、税务等部门建立稀土产品追溯信息系统，加强对稀土产品全过程追溯管理，推进有关部门数据共享。

从事稀土开采、冶炼分离、金属冶炼、综合利用和稀土产品出口的企业应当建立稀土产品流向记录制度，如实记录稀土产品流向信息并录入稀土产品追溯信息系统。

第十五条 稀土产品及相关技术、工艺、装备的进出口，应当遵守有关对外贸易、进出口管理法律、行政法规的规定。属于出口管制物项的，还应当遵守出口管制法律、行政法规的规定。

第十六条 国家按照实物储备和矿产地储备相结合的方式，完善稀土储备体系。

稀土实物储备实行政府储备与企业储备相结合，不断优化储备品种结构数量。具体办法由国务院发展改革、财政部门会同工业和信息化主管部门、粮食和物资储备部门制定。

国务院自然资源主管部门会同国务院有关部门根据保障稀土资源安全需要，结合资源储量、分布情况、重要程度等因素，划定稀土资源储备地，依法加强监管和保护。具体办法由国务院自然资源主管部门会同国务院有关部门制定。

第十七条 稀土行业组织应当建立健全行业规范，加强行业自律管理，引导

企业守法、诚信经营，促进公平竞争。

第十八条 工业和信息化主管部门和其他有关部门(以下统称监督检查部门)应当依照有关法律法规和本条例规定，按照职责分工对稀土的开采、冶炼分离、金属冶炼、综合利用、产品流通、进出口等活动进行监督检查，对违法行为及时依法处理。

监督检查部门进行监督检查，有权采取下列措施：

- (一) 要求被检查单位提供有关文件和资料；
- (二) 询问被检查单位及其有关人员，要求其对于与监督检查事项有关的情况作出说明；
- (三) 进入涉嫌违法活动的场所进行调查和取证；
- (四) 扣押违法活动相关的稀土产品及工具、设备，查封违法活动的场所；
- (五) 法律、行政法规规定的其他措施。

被检查单位及其有关人员应当予以配合，如实提供有关文件和资料，不得拒绝、阻碍。

第十九条 监督检查部门进行监督检查，监督检查人员不得少于2人，并应当出示有效的行政执法证件。

监督检查部门的工作人员，对监督检查中获悉的国家秘密、商业秘密和个人信息负有保密义务。

第二十条 违反本条例规定，有下列行为之一的，由自然资源主管部门依法予以处罚：

- (一) 稀土开采企业未取得采矿权、采矿许可证开采稀土资源，或者超出采矿权登记的开采区域开采稀土资源；
- (二) 稀土开采企业之外的组织和个人从事稀土开采。

第二十一条 稀土开采企业和稀土冶炼分离企业违反总量调控管理规定进行

稀土开采、冶炼分离的，由自然资源、工业和信息化主管部门按照职责分工责令改正，没收违法生产的稀土产品和违法所得，并处违法所得5倍以上10倍以下的罚款；没有违法所得或者违法所得不足50万元的，并处100万元以上500万元以下的罚款；情节严重的，责令停产停业，对主要负责人、直接负责的主管人员和其他直接责任人员依法给予处分。

第二十二条 违反本条例规定，有下列行为之一的，由工业和信息化主管部门责令停止违法行为，没收违法生产的稀土产品和违法所得以及直接用于违法活动的工具、设备，并处违法所得5倍以上10倍以下的罚款；没有违法所得或者违法所得不足50万元的，并处200万元以上500万元以下的罚款；情节严重的，由市场监督管理部门吊销其营业执照：

（一）稀土冶炼分离企业之外的组织和个人从事冶炼分离；

（二）稀土综合利用企业以稀土矿产品为原料从事生产活动。

第二十三条 违反本条例规定，收购、加工、销售非法开采或者非法冶炼分离的稀土产品的，由工业和信息化主管部门会同有关部门责令停止违法行为，没收违法收购、加工、销售的稀土产品和违法所得以及直接用于违法活动的工具、设备，并处违法所得5倍以上10倍以下的罚款；没有违法所得或者违法所得不足50万元的，并处50万元以上200万元以下的罚款；情节严重的，由市场监督管理部门吊销其营业执照。

第二十四条 进出口稀土产品及相关技术、工艺、装备，违反有关法律、行政法规和本条例规定的，由商务主管部门、海关等有关部门按照职责依法予以处罚。

第二十五条 从事稀土开采、冶炼分离、金属冶炼、综合利用和稀土产品出口的企业不如实记录稀土产品流向信息并录入稀土产品追溯信息系统的，由工业和信息化主管部门和其他有关部门按照职责分工责令改正，对企业处5万元

稀土二次资源，指经加工可使含有的稀土元素重新具有使用价值的固体废物，包括但不限于稀土永磁废料、废旧永磁体以及其他含稀土废弃物。

稀土产品，包括稀土矿产品、各类稀土化合物、各类稀土金属及合金等。

第三十一条 对稀土之外的其他稀有金属的管理，国务院相关主管部门可以参照本条例的有关规定执行。

第三十二条 本条例自2024年10月1日起施行。

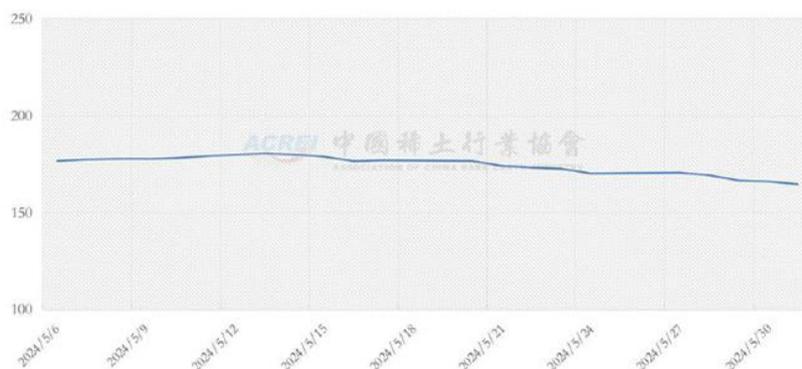
（来源：人民日报）

2024年6月稀土价格走势

一、稀土价格指数

6月份，稀土价格指数基本保持平稳。本月平均价格指数为160.6点。价格指数最高为6月3日的164.6点，最低为6月25-27日的158.2点。高低点相差6.4点，波动幅度约为4.0%。

2024年5月稀土价格指数走势图



二、中钇富铈矿

中钇富铈矿6月份均价为16.91万元/吨，环比下跌9.3%。

三、主要稀土产品

(一) 轻稀土

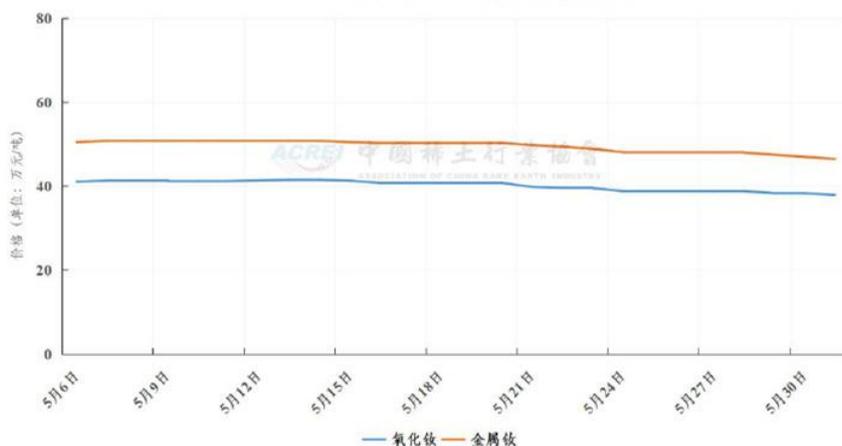
6月份，氧化镨钕均价为36.42万元/吨，环比下跌7.8%；金属镨钕均价为44.95万元/吨，环比下跌8.2%。

2024年5月氧化镨钕、镨钕金属价格走势



6月份，氧化钕均价为 37.04 万元/吨，环比下跌 7.8%；金属钕均价为 45.84 万元/吨，环比下跌 7.5%。

2024年5月氧化钕、金属钕价格走势



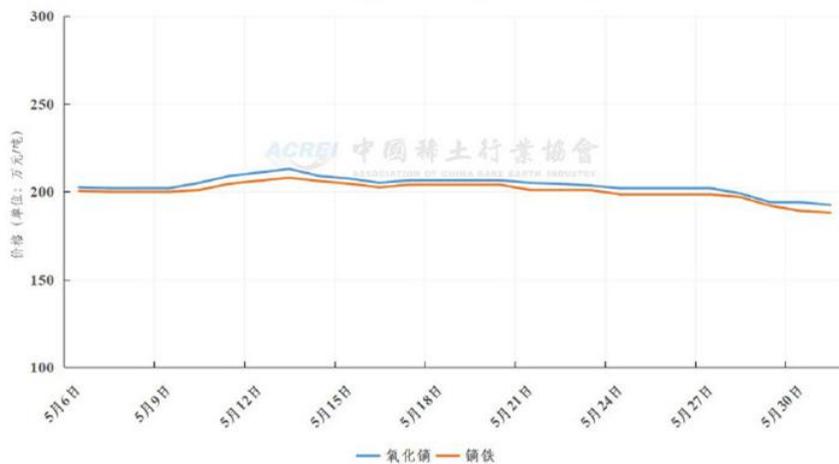
6月份，氧化镨均价为 37.14 万元/吨，环比下跌 7.7%。99.9%氧化镧均价为 0.40 万元/吨，环比与上月持平。99.99%氧化铈均价为 19.50 万元/吨，环比与上月持平。

(二) 重稀土

6月份，氧化镨均价为 186.58 万元/吨，环比下跌 8.2%；镨铁均价为 182.29

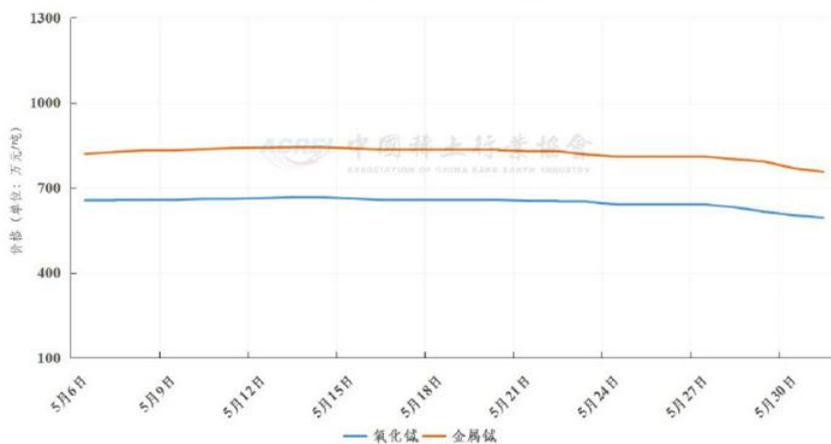
万元/吨，环比下跌 8.9%。

2024年5月氧化镨、镨铁价格走势



6月份，99.99%氧化铽均价为 564.97 万元/吨，环比下跌 12.8%；金属铽均价为 708.05 万元/吨，环比下跌 13.7%。

2024年5月氧化铽、金属铽价格走势



6月份，氧化钪均价为 49.53 万元/吨，环比下跌 9.7%；钪铁均价为 50.84 万元/吨，环比下跌 9.1%。



6月份, 99.999%氧化钬均价为4.40万元/吨, 环比与上月持平。氧化铽均价为31.14万元/吨, 环比下跌3.3%。

表2 2024年6月我国主要稀土氧化物平均价格对比 (单位: 元/公斤)

产品名	纯度	2024年5月平均价	2024年6月平均价	环比
氧化镧	≥99%	4.00	4.00	0.00%
氧化铈	≥99%	7.00	7.00	0.00%
氧化镨	≥99%	402.33	371.42	-7.68%
氧化钕	≥99%	401.81	370.37	-7.82%
金属钕	≥99%	495.62	458.37	-7.52%
氧化钐	≥99.9%	15.00	15.00	0.00%
氧化铈	≥99.99%	195.00	195.00	0.00%
氧化钐	≥99%	184.71	167.11	-9.53%
钐铁	≥99%Gd75%±2%	180.05	161.89	-10.09%
氧化铽	≥99.9%	6475.48	5649.74	-12.75%
金属铽	≥99%	8203.57	7080.53	-13.69%
氧化镱	≥99%	2031.67	1865.79	-8.16%
镱铁	≥99%Dy80%	2000.48	1822.89	-8.88%
氧化钬	≥99.5%	548.81	495.32	-9.75%
钬铁	≥99%Ho80%	559.00	508.37	-9.06%
氧化铒	≥99%	322.19	311.42	-3.34%
氧化镱	≥99.99%	101.00	101.00	0.00%
氧化镨	≥99.9%	5500.00	5500.00	0.00%
氧化钕	≥99.999%	44.00	44.00	0.00%
氧化镨钕	≥99%Nd ₂ O ₃ 75%	395.14	364.21	-7.83%
镨钕金属	≥99%Nd75%	489.48	449.47	-8.17%

(来源: 中国稀土行业协会)

稀土材料：医疗领域大放光彩

稀土材料作为一类金属材料，拥有独特的物理性质和化学性质。近年来，稀土材料在医学领域的应用日益广泛。

日前，厦门市稀土光电功能材料重点实验室与厦门大学医学院、汕头大学医学院附属肿瘤医院通过多学科交叉合作，研发出基于稀土近红外二区发光的前哨淋巴结转移精准成像技术。该技术不仅能让癌细胞更早被发现，还能在手术中精准定位癌细胞，为医生“导航”。

从疾病早期诊断到精准治疗，稀土材料正在助力医疗水平的进一步提升。

多种诊疗技术“强助攻”

稀土是元素周期表中镧系（镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铟、铊、铋、镱、镱、铟、铊、铋）15个元素和21号元素铪、39号元素钇共17个元素的总称。一直以来，科学家不断探索稀土元素的生物学效应。早在20世纪50年代，诺贝尔化学奖得主、美国化学家格伦·西奥多·西博格及其团队就通过实验验证了某些稀土化合物的安全性，并发现它们对生物具有独特效用。

稀土元素拥有特殊的电子层结构，能够有效吸收和发射特定波长的光，从而能与其他类型材料结合，形成性能各异、品种繁多的新型光功能材料。这一特性为其在医学影像学中的应用提供了理论支撑。同时，部分稀土离子具有良好的稳定性和与生物分子结合的能力，为相关药物设计开辟了新途径。

随着稀土分离技术进步，自20世纪60年代以来，稀土元素开始应用于医学领域。在医学治疗方面，以钆为基础的造影剂广泛应用，极大提高了图像对比度和诊断准确性；含有铕的荧光探针，则被用于细胞追踪和生物标志物检测；

钐对于缓解骨转移癌患者疼痛，也能起到显著效果。

此外，稀土在提高生物医用材料性能方面有得天独厚的优势。例如铈掺杂的磷酸钙可被用于骨骼修复，镧系元素掺杂的二氧化钛表面拥有优异的抗菌性能。不仅如此，陆续被发现的稀土化合物还具有一系列特殊药效作用，可用于治疗烧伤、炎症、皮肤病、血栓病等。

“在精准医学免疫治疗领域，稀土材料有广阔前景。”厦门市稀土光电功能材料重点实验室副主任朱浩淼介绍，利用稀土材料有望研发出像导弹一样的靶向药物。目前，该团队正在研究采用稀土中的镭、钷等放射性同位素精准定位肿瘤细胞，再利用其放射性特质发射出高能粒子，定向杀死肿瘤细胞。

取得诸多研究成果

近年来，我国在稀土材料的诊疗应用方面取得诸多研究成果。

提高药物的生物利用率、靶向定位准确度，以及降低毒副作用，一直是药物载体领域的研究重点。基于稀土元素开发的多功能复合材料作为药物载体，能精确控制药物在体内的释放，实现药物缓释，在提升疾病治疗效果方面展现出较大潜力。

不久前，中国科学院福建物质结构研究所研究员卢珊、陈学元等研发出新型稀土纳米光学诊疗材料，在肺部感染小鼠模型中实现了非侵入性光学诊疗。研究人员介绍，这种新型材料采用独特的富集—包覆策略，将数百个超小纳米颗粒封装在介孔二氧化硅内核中，形成尺寸约 220 纳米的均匀、单分散性好、介孔负载量大的纳米杂化材料。其作为药物载体更易递送到肺部，提高了生物利用度。

此外，以活体荧光成像法替代癌症病理诊断使用的活检样本体外检测技

术，成为一种新型无创肿瘤病理诊断方法，受到临床医生青睐。其中，成像的关键一环离不开稀土。

稀土材料之所以能在成像方面表现突出，主要得益于其优异的光学特性、高稳定性、多功能性以及深组织穿透能力等。厦门大学附属第一医院核医学科副主任医师、教授陈皓鋆介绍：“稀土元素特别是某些稀土同位素，如镧-177，具有独特的物理和化学性质，非常适合用于癌症靶向治疗和成像。”

以上述基于稀土近红外二区发光的前哨淋巴结转移精准成像技术为例，该研究团队负责人、中国科学院海西研究院厦门稀土材料研究中心研究员张云介绍，他们研发的这种神奇的纳米探针并非一种针状物体，而是一种化学合成物质。研究团队利用近红外 II b 区发光的稀土下转换纳米颗粒作为发光元件，以肿瘤特异性靶点 CXCR4 的拮抗肽作为靶向元件，成功合成出新型近红外 II b 区纳米探针。在临床应用时，只需注射这种会发光的纳米探针，即可自动定位肿瘤；通过光学成像仪器，就能隔着皮肤和肌肉组织直观清晰观察到肿瘤的边缘、细胞的游走。

为了提升肿瘤靶向能力，陈皓鋆团队尝试利用稀土纳米材料多光谱发射的特性，设计合成多色、多指标肿瘤免疫微环境精准识别探针，开展纳米刀治疗下肿瘤免疫微环境的多指标精准动态识别研究，实现对肿瘤免疫微环境的多层次多指标精准动态检测。“目前，我们已经搭建了纳米刀治疗平台，正在推进后续基于稀土纳米探针的纳米刀消融治疗诱发机体免疫效应动态识别研究。”陈皓鋆说。

加快推动应用落地

稀土材料在医学领域的应用并非没有挑战。如何确保这些材料在人体内安

全使用，避免潜在生物毒性和不良反应，是科学家们必须面对的问题。此外，稀土材料的提取和制造过程相对复杂，成本较高，这也限制了其在一些资源有限地区的普及。

推动更多安全可靠的稀土应用在医学领域落地，无疑需要大量扎实的基础试验数据。为此，一些科研团队及医疗机构纷纷布局，致力于探索稀土在医学领域的新用途，期望通过开发更多稀土新型材料，提升疾病诊断准确性与治疗有效性。

2022年，长期从事无机化学研究的中国科学院院士洪茂椿与厦门大学附属第一医院合作成立中国稀土学会稀土医学临床研究中心，携手开展医工交叉创新合作，启动稀土元素在医学诊疗技术上的系列研究。

洪茂椿表示，稀土的独特功能在生物医学领域有着广阔的应用前景，“我们希望研究出更多稀土离子或稀土化合物在生物体内的作用机理，用以开发医用材料和药物，实现疾病的精准诊疗。”

（来源：产业前沿）

钽精矿与硫酸法钛白废液协同浸出分离钽

含钽钒钛磁铁尾矿经过分选工艺富集至含钽量为 66.24 g t^{-1} 的钽精矿；含钽钛白废酸采集于四川德阳地区，其钽含量为 3.661 mg L^{-1} 。钽精矿采用焙烧改性处理后，利用含钽钛白废液作为协同浸出分离钽的浸出剂。研究结果表明：在无盐焙烧、焙烧温度为 850°C ，焙烧时间 2.0 h ，浸出温度 80°C ，浸出时间 2.0 h ，浸出液固比 8 mL/g ，助剂为 NH_4F ，助剂用量为 12% 条件下浸出效果最佳，钽的浸出率可达到 83.90% ，浸出渣钽含量下降到 11.50 g t^{-1} 。钽精矿、焙烧矿和浸出渣的 SEM-EDS，XRD 表征表明：主要含钽矿物辉石类、长石类等经过焙烧改性后，为钛白废液浸出钽创造了有利条件，钽离子在酸浸时能够被有效地释放，实现了从废渣和废酸中协同强化浸出钽的目的。同时热重分析显示钽精矿在焙烧时会有两次失重现象。浸出过程中的热力学分析证明了浸出反应的可行性。

(来源：中国稀土学报)

集残留置浸矿的离子型稀土浸-淋一体化工艺研究

离子型稀土经 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浸矿后尾矿内有大量的铵盐残留，在闭矿后长期缓释对矿区环境造成污染，制约了 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 浸矿剂的应用和离子型稀土的高效开采。试验通过室内柱浸模拟试验，对浸矿与集中淋洗工艺的组合优化工艺进行了小试条件探索和扩大化试验验证。结果发现，在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 加入量为 $4.53 \text{ g g}^{-1} \text{ REO}$ ， MgSO_4 加入量为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 加入摩尔量的 120% 的工艺条件下，均配制成 2% （质量分数）的溶液先后进行浸矿和淋洗，小试和扩大化试验中铵浸+镁淋的稀土浸出率分别为 96.81% 和 98.61% ，稀土混合浸出液中的 Mg^{2+} 浓度分别

为 57.24 和 77.34 mg L^{-1} , NH_4HCO_3 沉淀得到的碳酸稀土精矿中镁含量均小于 15 mg kg^{-1} ; 结合一倍柱内矿土孔隙体积纯水淋洗, 镁淋+水淋洗的尾矿氨氮淋出率在 90%左右, 尾矿中残留的氨氮含量小于 200 mg kg^{-1} , 符合绿化种植土壤要求。采用浸-淋一体化工艺在利用淋洗药剂淋洗和推动离子型稀土尾矿中铵根向下浸矿的同时并未对浸出液质量造成影响, 同等稀土浸出率条件下, 可大幅降低浸矿剂 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的用量, 缩短浸矿和淋洗周期, 具有较好的工业推广价值。

(来源: 中国稀土学报)

Ce(NO₃)₃ 掺杂对 Al-Zn-Mg-Y 合金 PEO 涂层 显微结构和耐磨性的影响

针对航空用途的铝合金耐磨性差问题, 利用等离子体电解氧化(PEO)技术在 Al-Zn-Mg-Y 合金表面形成陶瓷涂层, 研究电解液中 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂量对铝合金 PEO 涂层性能的影响作用。利用 XRD、SEM、金相显微镜、共聚焦显微镜和摩擦磨损试验机等仪器对铝合金 PEO 涂层的相组成、金相组织、表面形貌、显微硬度、摩擦因数等参数进行表征。研究表明, Al-Zn-Mg-Y 合金表面的 PEO 涂层主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 两相构成。随着 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂量增加, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相衍射峰加强, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相比例含量增加。掺杂 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 后获得的 PEO 涂层覆盖较为均匀。在基础电解液中制备的 PEO 涂层, 表面存在“火山口”状的放电微孔通道。增加 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂量, 则涂层中放电微孔通道尺寸减少。当 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂量过高时, 涂层表面出现腐蚀坑和少量微裂纹。随着 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂量增加, PEO 涂层的显微硬度呈现为先增加后降低的趋势, 最大值出现在 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 掺杂

量为 3.9‰时，约为 335.8 HV₁。掺杂适量的 Ce(NO₃)₃ 能够提高涂层的致密性，但过高 Ce(NO₃)₃ 掺杂量下，PEO 涂层的摩擦因数增加，表面粗糙度增加。

(来源：稀土)

沉渣溶液淋洗离子型稀土尾矿残留浸矿剂的研究

以硫酸铵为浸矿剂的离子型稀土尾矿残留大量水溶态和可交换态的铵离子，严重威胁周边流域的水资源安全。本文以稀土开采产生的沉渣作为淋洗剂淋洗尾矿，建立了沉渣阳离子解吸铵离子的数学模型，探讨了淋洗效率随沉渣溶液用量的变化关系，分析了石灰水的护尾效果。结果表明，可以采用 Langmuir 方程量化沉渣阳离子解吸铵离子的过程，在此基础上，确定 PN 和 XW 尾矿的合理淋洗剂浓度分别为 8.27 mmol/L 和 12.64 mmol/L；淋洗效率随着沉渣溶液用量的增加而增加，当沉渣溶液用量大于 2.5 倍孔隙体积时，水溶态和可交换态铵离子的总淋洗效率大于 95.0%；淋洗结束后，采用石灰水护尾，PN 和 XW 尾矿柱内吸附态无机羟基铝分别占 80.6% 和 85.1%，绝大部分铝离子被石灰水固定。由此可见，沉渣溶液能高效去除离子型稀土矿残留的浸矿剂，且避免产生二次污染，该方案也能用于硫酸镁等其他残留浸矿剂的淋洗，为离子型稀土绿色矿山的建设提供技术支持。

(来源：稀土)

中国稀土学报 (2024 No.3)

主编年评

2023 年中国稀土研究综合评述

综合评述

典型稀土材料催化氧化挥发性有机物研究进展

无机荧光温敏材料的研究进展及性能提升策略

铈对铝合金微观组织与性能的影响

微生物技术在稀土资源利用中的研究进展

稀土发光

基于 $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 三掺杂 $\text{Ba}_3\text{In}_2\text{F}_{12}$ 荧光粉的光学温度传感性能研究

稀土催化

相关实验因素对以酸性染料为碳源制备 $\text{CeO}_2@\text{C}$ 光催化效率的影响

稀土新材料

固体氧化物燃料电池 $\text{Sr}_{2-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1.5}\text{Mo}_{0.5}\text{O}_{6-\delta}$ 阴极材料的制备与性能

硅掺杂石榴石型 $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ 固体电解质的制备及性能表征

$\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ 纳米复合粉体的原位自组装法制备及表征

$(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ti}_{0.3})_2\text{O}_7$ 陶瓷材料的热物理性能研究

一种作为潜在热障涂层材料的新型高熵铈酸盐氧化物热物理性能研究

喷涂法制备 ZnAl-ER 复合涂层结构与性能研究

稀土化学与湿法冶金

钪精矿与硫酸法钛白废液协同浸出分离钪

集残留置浸矿的离子型稀土浸-淋一体化工艺研究

喷雾热解法直接制备微泡中空结构铈锆固溶体的研究

稀土金属学与火法冶金

锌对固溶态 Mg-Y-Nd-Zr 合金显微组织及力学性能的影响

稀土地矿

贵州早寒武世磷块岩型稀土矿地球化学特征及其对沉积环境和成矿物质来源的指示

滇中老街子 Pb-Ag 矿床稀土元素富集特征及其赋存状态

(来源: 中国稀土学报)



稀土化合物与应用 (2024 No.3)

进展与述评

我国稀土聚异戊二烯橡胶研究进展及市场分析

稀土电催化剂研究进展

研究与开发

镧吡啶硫酮配合物/聚丙烯抗菌复合材料的制备与研究

稀土配合物催化的乙烯、环烯烃和 1-辛烯三元共聚

陈化时间对铈锰碳烟颗粒物催化剂性能的影响

2, 6-双(咪唑-2-基)吡啶的铈(III)和铕(III)配合物的合成、结构及其水溶性发光性能

(来源: 稀土化合物与应用)

一种堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的方法

发明名称：一种堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的方法

公开（公告）日期：2024-06-07

公开（公告）号：CN116770103B

发明人：刘名清，王雄元，康军，袁茂泉，罗建国

摘要：本发明公开了一种堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的方法，涉及到稀土回收技术领域，所述堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的方法通过堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的设备实现，所述堆浸浸取含稀土酸解渣回收稀土的设备包括处理釜，所述处理釜内部设置有驱动机构，所述驱动机构外侧由上至下依次设置有封堵机构、过滤烘干机构和封闭机构；所述驱动机构包括驱动轴、驱动电机、负压排液管、热风输入管、排液孔、进风孔和拨杆；所述驱动轴贯穿处理釜且通过轴承与处理釜转动连接。本发明在对浸提液进行过滤的同时，可以由上方对浸提液中的上清液进行同步抽取，进而有效加快浸提液的过滤速度，提高稀土的回收提取效率。

（来源：专利公布公告）



一种稀土金属等离子脱氧的方法和低含氧量稀土金属

发明名称：一种稀土金属等离子脱氧的方法和低含氧量稀土金属

公开（公告）日期：2024-06-04

公开（公告）号：CN115821087B

发明人：余建波，吴佳岳，李霞，张振强，任忠鸣

摘要：本发明提供了一种稀土金属等离子脱氧的方法和低含氧量稀土金属，

属于稀土金属提纯技术领域。本发明提供的稀土金属等离子脱氧的方法，包括以下步骤：将稀土金属和活性金属混合后进行熔炼，得到稀土合金铸锭；对所述稀土合金铸锭依次进行氢等离子体熔炼和真空挥发，得到低氧含量稀土金属。本发明通过将稀土金属中的氧杂质与活性金属形成氧化物，然后利用氢等离子体熔炼，使氧化物与氢等离子体中的氢发生还原反应生成活性金属和水，实现氧杂质的去除；利用稀土金属和活性金属的蒸汽压相差较大的特点将活性金属与稀土金属分离，从而得到了氧含量低的稀土金属。实施例的结果显示，本发明提供的低氧含量稀土金属中的氧含量 $\leq 60\text{ppm}$ 。

（来源：知呱呱）

2024年6月新增公开/公告专利（部分）

一种覆盖式上插阴极稀土电解槽

一种稀土回收生产线及其实现方法

降低稀土铁硼废料盐酸优溶铁渣中稀土含量的方法

一种从含稀土铀钼的硫酸浸出液中分离稀土铀钼的方法

一种稀土电解槽用稀土氮化物材料及其制备方法和应用

利用稀土尾矿中的回收物制备稀土复合永磁铁氧体的方法

一种硅酸稀土矿的生产方法

R-T-B系稀土类烧结磁铁及R-T-B系稀土类烧结磁铁的制造方法

离子型稀土智能矿山管控系统

一种可调节式稀土矿石破碎装置

碱式氯化稀土颗粒及其制备方法

一种稀土合金耐磨钢管铸造系统

（来源：知嘟嘟）