

2021 年
第 16 期

先进制造 与新材料

ADVANCED MANUFACTURING
& NEW MATERIALS BRIEFING



上海科学技术情报研究所
上海市前沿技术发展研究中心
技术与创新支持中心(TISC)

稀土材料助力高端制造业发展

编者按

稀土作为不可再生的全球稀缺战略资源，一直是全球关注的焦点。自中美贸易摩擦以来，稀土和稀土材料成为国内外媒体经常提起的“关键词”。尽管我国的稀土资源和稀土采选冶等工艺技术处于国际领先地位，同时也拥有一系列原创技术，但在整个稀土材料发展中仍然面临着不少困难和挑战。

本期《先进制造与新材料》简报重点关注稀土材料。政策方面：我国政府首次发布关于稀土产业动向和政策的白皮书；美国能源部宣布提供 1800 万美元的基础研究资助，推动关键矿物和稀土元素供应链的研究与开发。技术方面：福州大学和新加坡国立大学的科研团队制备出新型稀土纳米闪烁体长余辉材料，研发了柔性 X 射线成像技术；昆明理工大学研究团队首次发现不同稀土氧化物间的界面氧通道效应。应用方面：广东省科学院、中山大学等相关团队合作，研究新型颜色可调稀土荧光材料，揭示该材料在白光 LED 领域有潜在应用价值；包头稀土研究院与黑龙江大学联合研发稀土超分子感光变色镜片，以期打破我国高端变色镜片市场被进口镜片垄断局面。产业方面：我国目前是全球唯一具备完整供应链的国家，但在高端磁体、高端产品制造环节与欧美和日本存在差距；包头稀土研究院与成都某科技有限公司达成技术转让协议，筹备建立国内首条稀土纳米断热材料生产线。



目 录

政策.....1

 我国首次发布稀土白皮书1

 美国能源部开展稀土关键材料研究.....2

技术.....3

 新型“夜明珠” 纳米材料让手机也能拍摄 X 光片3

 国内研究者首次发现不同稀土氧化物间的界面氧通道效应3

应用.....6

 适用于白光 LED 的新型颜色可调稀土荧光材料.....6

 稀土超分子感光变色镜片试制成功.....6

产业.....8

 全球稀土供应链分析.....8

 国内首条稀土纳米隔热材料生产线筹建10

政策

我国首次发布稀土白皮书

2021年6月20日,《中国的稀土状况与政策》白皮书发布,这是我国第一次以白皮书的形式全景展示我国稀土工业发展现状、路线和政策立场。在当天国务院新闻办举行的发布会上,工业和信息化部副部长苏波等就白皮书进行了解读。苏波说,我国绝不以牺牲环境为代价换取稀土行业的发展,将奉行既保持国际市场稀土合理供应、又保护生态环境与资源的双赢战略。

苏波指出,白皮书的发表,旨在客观反映中国政府加强稀土管理促进行业持续健康发展所做的努力,进一步增加国际社会对中国稀土政策的了解。白皮书指出,稀土是不可再生的重要自然资源,中国以占世界稀土23%的储量承担着世界90%以上的市场供应,为 global 经济发展作出了重要贡献。但同时,也带来了资源过度开发、生态环境破坏等突出问题,严重制约了稀土行业的持续发展。

据苏波介绍,在中国南方中重稀土矿区,过去用池浸和堆浸的落后工艺开采,植被损毁极其严重。现在采用原地浸矿工艺,但又带来了所用硫酸铵威胁地下水源的问题。北方轻稀土的生产也存在含氟有毒尾气、氨氮废水和尾矿等问题。

苏波说:“绝不能以牺牲环境为代价换取稀土行业的发展。”为此,政府采取了提高稀土资源税征收标准,实施行业污染物排放标准,加强准入管理等措施,加强稀土行业监管。同时,严厉查处稀土违法勘查和开采行为,一批稀土矿山、冶炼分离企业停产整改,稀土企业新增环保投入近40亿元。苏波强调,这些举措都是为了保护稀土资源和生态环境,符合国际惯例和世界贸易组织的有关规则。

白皮书勾画了稀土行业持续健康发展的目标:在短期内,建立起规范有序的行业秩序,资源无序开采、生态环境恶化、生产盲目扩张和出口走私猖獗的状况得到有效遏制;稀土资源回收率、选矿回收率和综合利用率得到提高,资源开发强度得到有效控制;“三废”排放全面达标,重点地区生态环境得到有效恢复;稀土行业兼并重组加快推进,形成规模、高效、清洁化的大型生产企业;新产品开发和新技术推广应用步伐加快。

为实现这一目标,我国将继续努力对稀土实施保护性开采,注重稀土开发利用与生态环境的协调发展。



苏波同时指出，稀土行业的对外开放是我国既定的政策，我国将继续向国际市场供应稀土，但同时希望其他稀土资源国也承担起全球供应的责任，实现稀土供应多元化；中国将继续鼓励外商投资稀土产业，反对将稀土问题政治化。

资料来源：浙江省化工产品质量检验站有限公司网站 2021-08-16 新闻

美国能源部开展稀土关键材料研究

2020 年 4 月 14 日，美国能源部（DOE）宣布将向为期 3 年的项目提供 1800 万美元的基础研究资助，旨在推动关键矿物和稀土元素供应链的研究与开发，这对加强美国能源和国家安全至关重要。

该研究将寻求根本性突破，实现方法改进，以提高稀土元素的可获得性或减少其使用量，通过更有效的分离方法实现再利用，并发现稀土的有效替代品等。确保对现代美国经济运转至关重要的稀土元素及其有效替代品的持续供应。该研究关注的方向包括：

1、稀土物理与化学。开展理论和实验研究，了解稀土元素及其电子结构在决定材料和分子的物理与化学性质中的作用。开发新的理论模型，并通过最新表征技术等实验验证，准确把握 f 电子性质，加速材料和分子的设计及发现，从而减少或消除关键元素的使用，且不会引起功能损耗。

2、新型材料/分子设计与合成方法。通过假设驱动研究，开发新的设计和合成方法，以改进功能，减少或消除稀土元素的使用。研究主题包括通过合成、纯化、加工和制造具有能量相关功能的表征良好的材料与分子，开发出可在原子级层面实现性质调控的技术。

3、分离科学。利用新的分离原理与方法，包括配位体设计、综合驱动力、受生物学和地球化学启发的途径等实现创新，并提高从复杂混合物（如来自矿石加工、矿山尾矿或再生材料）提取稀土的效率。使用的方法涉及运输与分离、现场实验及数据科学的多尺度模拟。对微生物机理与过程的认识有望催生受生物启发的新分离原理及方法。

资料来源：中国科学院科技战略咨询研究院网站 2020-07-22 新闻

技术

新型“夜明珠”纳米材料让手机也能拍摄 X 光片

福州大学杨黄浩教授、陈秋水教授和新加坡国立大学刘小钢教授领衔的科研团队，在国际上率先发现一类稀土纳米闪烁体长余辉材料，并成功研发了新型柔性 X 射线成像技术，使常规的单反相机和手机等也能拍摄 X 光片。这一原创性成果于 2021 年 2 月 18 日在国际权威杂志《自然》上在线发表。

据介绍，传统 X 射线影像设备难以对曲面及不规则目标物的三维 X 射线成像，且存在体积庞大、设备昂贵等问题。相对于传统刚性器件，作为新兴技术的柔性电子器件具有更大的灵活性，能够适应不同的工作环境。但是柔性 X 射线成像关键技术一直难以攻克。

长余辉指的是在紫外可见光、X 射线等激发光停止后，仍可以持续发光几秒甚至几个小时的一类发光现象，如传说中的夜明珠在黑暗下也可以持续发光。

“基于长余辉材料独特的发光性质，我们首次用长余辉材料实现柔性 X 射线成像，但传统长余辉材料需要高温制备且颗粒太大，无法用于制备柔性器件。”杨黄浩说。

针对上述瓶颈问题，科研人员从稀土卤化物晶格中获取灵感，制备出新型的稀土纳米闪烁体长余辉材料。在此基础上，将纳米闪烁体长余辉材料与柔性基质相结合，成功研制出了透明、可拉伸、高分辨的柔性 X 射线成像设备。这一技术具有制备工艺简单、成本低、成像性能优异等优势，在便携式 X 射线探测器、生物医学、工业探伤、高能物理等领域展现出巨大的潜力和应用价值。

相关专家表示，该研究颠覆了传统 X 射线成像技术，将有力地推进高端 X 射线影像装备的国产化，标志着我国在柔性 X 射线成像技术方面进入国际先进行列。

资料来源：科技日报 2021-02-18 新闻

国内研究者首次发现不同稀土氧化物间的界面氧通道效应

2021年6月,《云南省人民政府关于2020年度科学技术奖励的决定》发布,揭晓获2020年度省科学技术奖的项目和个人。其中,在自然科学奖中,由昆明理工大学校长、省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室主任王华带领团队研究的“铈基稀土储氧催化材料的构建与性能调控”项目成果获特等奖。

“20年来,我们致力于开发高性能稀土储氧材料,针对稀土储氧材料储氧量、稳定性和催化性能难以兼顾的科学难题,团队在国际上率先提出了自催化氧载体的概念,实现了储氧——催化功能的有机耦合,首次发现了不同稀土氧化物间的界面氧通道效应,阐明了通过氧化物强相互作用调控材料储/释氧性能的作用机制,丰富了储氧材料设计理论与方法。”王华介绍。

我国是稀土生产大国,由于中重轻稀土元素在矿物中具有伴生特性,中重稀土元素供不应求的同时带来轻稀土元素严重挤压,造成资源浪费。该项目国际上率先提出了自催化氧载体的概念,耦合强化反应物活化和氧迁移速率,并探明了氧载体中晶格氧的迁移规律。揭示了界面在铈镧稀土材料储氧性能调控中的作用机制,提出了界面强相互作用提升储氧材料活性和高温稳定性的新方法。揭示了界面在铈镧稀土材料储氧性能调控中的作用机制,提出了界面强相互作用提升储氧材料活性和高温稳定性的新方法。

王华介绍,镧、铈等轻稀土氧化物及复合氧化物具有优异的储氧性能,已被广泛应用于汽车尾气催化净化和化学链技术。尽管国际学术界对稀土储氧材料进行了大量研究,但在材料设计、性能调控和反应机理方面还存在许多难题。首先是材料设计理念没有突破,大多限制于掺杂和负载等方法。同时,储氧—催化功能无法实现有机耦合,储氧材料参与催化反应的机理认识不清。此外,储氧量与稳定性无法兼备,传统储氧材料无法满足化学链技术高温运行的要求。

针对储氧材料存在的问题,王华团队另辟蹊径。其中,自诱导界面提升氧迁移率与活化能力;界面氧通道提升储氧量和氧化还原稳定性;界面缺陷提升热稳定性和选择性。通过界面调控,满足了高温储氧材料兼顾储氧量与稳定性、耦合储氧与催化功能、调控氧迁移与选择性的设计要求。

掺杂变价金属离子形成固溶液是大幅提升稀土储氧材料储氧量的常用方法,然而变价离子掺杂引起的严重晶格畸变和离子价态变化容易削弱其高温热稳定性。和传统的固溶体型储氧材料不同,项目组提出通过异质氧化物界面的相互作



用，提升晶格氧迁移速率和材料热稳定性的储氧性能调控新思路，解决了储氧材料活性和稳定性难以协调的难题，阐释了异物氧化物间界面耦合活化位与氧离子通道效应的作用机制，建立界面驱动的复合储氧材料制备新方法。

王华介绍，项目攻破了系列技术难题，构筑了适用于化学链技术的新型高活性氧载体，开发的新型轻稀土储氧材料获国际同行广泛认可，且已产业化应用。通过该类型稀土储氧材料的使用可实现贵金属减量化，催化剂成本降低 30%至 40%，性能显著提升，可应用于汽车尾气治理、工厂有害气体排放治理等。

资料来源：云南省科学技术院网站 2021-07-21 新闻

应用

适用于白光 LED 的新型颜色可调稀土荧光材料

广东省科学院半导体研究所封装应用平台与广东省科学院资源利用与稀土开发研究所、中山大学等相关团队合作，研究适用于白光 LED 的新型颜色可调稀土荧光材料。相关研究发表于《道尔顿学报》。

该论文第一作者和第一通讯作者颜靖博士介绍，现阶段大规模商用白光 LED 由于缺乏红光成分使得器件显色指数偏低、色温偏高，从而对色彩的还原能力较弱，光品质较差。近年来，为实现高显色指数白光发射，近紫外芯片激发荧光粉的组合受到了广泛关注。

研究人员以 β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 为基质的母体结构，通过研究稀土离子 Tb^{3+} 和 Eu^{3+} 在 $\text{Ca}_8\text{ZnLu}(\text{PO}_4)_7$ 的发光性质，设计制备了 $\text{Ca}_8\text{ZnTb}(\text{PO}_4)_7: \text{Eu}^{3+}$ 颜色可调发光材料。他们通过结构精修确定了制备材料与 β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 同构，通过结构特征解释了单掺材料不发生浓度猝灭的原因。

研究人员进一步利用光谱分析发现材料中存在 Tb^{3+} 向 Eu^{3+} 的能量传递，通过计算得到能量传递机理为电偶极-电四极相互作用。研究结果显示通过改变 Tb^{3+} ， Eu^{3+} 掺杂比例，可以实现光色由绿光到红光的精确调控。将具有优异热稳定性和色稳定性的 $\text{Ca}_8\text{ZnTb}(\text{PO}_4)_7: 0.2\text{Eu}^{3+}$ 黄色荧光粉和 BAM: Eu^{2+} 商业蓝粉组装到 370 nm 近紫外芯片可以得到 $\text{Ra} = 81.3$ ， $\text{CCT} = 2634 \text{ K}$ 的暖白光 LED 器件，揭示该材料在近紫外芯片激发的白光 LED 领域有潜在应用价值。

资料来源：中国科学报 2021-08-21 新闻

稀土超分子感光变色镜片试制成功

由包头稀土研究院与黑龙江大学联合研发的稀土超分子感光变色镜片试制成功。研发团队充分利用轻稀土在稀土元素中较大的金属半径、易变价和化学性质稳定等优点研发出新型感光变色材料，该类新材料由于稀土元素镧、铈、钇的引入使镜片具有更好的呈色速率（小于 3s）及褪色速率（小于 60s），抗疲劳性



强且稳定性好，从而可以延长镜片使用周期，打破我国高端变色镜片市场被进口镜片垄断的局面。

在日常生活中，无处不在的紫外线是伤害眼睛的一大“黑手”。人眼在短间接触大量紫外线会造成电光性眼炎，长期接触则会造成白内障、黄斑病变、眼睑皮肤癌等。想要在强光随处可见的环境中呵护好眼睛，越来越多的人将目光投向了感光变色镜片。

包头稀土研究院稀土功能材料研究所传感材料研究室高级工程师李静雅介绍：“我们首次将稀土通过无机和有机杂化的方式引入智能感光变色材料中，充分发挥稀土离子在超分子结构构筑，实现空间限域效应、重原子效应和抗氧化性等方面的优势。”

据悉，稀土超分子感光变色镜片采用自主研发的稀土超分子感光变色材料，可解决低端材料褪变色速率慢、寿命短和底色残留量多的问题，同时结合成熟的基层变色技术制备而成，可以智能调节光线的透过率，有效阻挡 100%的紫外光和 30%-80%的可见光，从而减少强光对眼睛的伤害，达到保护眼睛和减少视疲劳的目的。

稀土的特点使稀土超分子感光变色镜片在性能上相比于传统感光变色镜片在使用寿命、褪变色速率、底色残留量和提高镜片折射率方面均有明显改善。

资料来源：科技日报 2021-08-11 新闻

产业

全球稀土供应链分析

根据日本国家石油、天然气和金属公司（JOGMEC）的调研，在全球稀土供应链中，中国是目前唯一能够完成从稀土开采到精炼全部环节的国家，相对于美国、日本等国仍占据优势，但对于下游的高质量磁体和发动机等稀土产品来说，主要生产国则是日本。

美国是稀土的主要消费国，同时也是继中国和澳大利亚之后的第三大稀土生产国，拥有大规模稀土矿。然而，美国缺乏本土的稀土中游供应链，即分离、提纯和中间产品制造。据美国地质调查局统计，2016年至2019年，美国约80%的稀土混合物及稀土金属进口自中国。

在日本国家石油、天然气和金属公司目前制定的中期计划中，稀土元素被列为重要矿产。据统计，日本消费的稀土元素有60%是从中国进口的。

全球以中重稀土为主的矿床大多分布在中国

据美国地质调查局统计，截至2021年1月，中国稀土储量和产量均位居全球首位，储量约为4400万吨，约占全球稀土储量的37%，2020年产量约为14万吨，约占全球稀土产量的58%。

中国稀土资源总量的85%分布在内蒙古、江西、广东、四川、山东等地区，轻稀土资源主要分布在北方，如内蒙古白云鄂博稀土矿、山东微山湖稀土矿。中重稀土资源主要分布在南方，集中在江西、福建、广东、广西、湖南、云南。据统计，位于广东的新丰稀土矿中重稀土（钐、铕等）含量高达45.6%。相比之下，位于澳大利亚的Mt. Weld稀土矿和位于美国的Mt. Pass稀土矿的中重稀土含量仅分别为5.3%和1.3%。

中国拥有完整的稀土供应链

这里的稀土供应链主要包括稀土的开采和浓缩、分离和提纯、精炼三个环节。由于放射性物质的管理和各环节技术能力因素，只有中国在本土拥有完整的稀土供应链。

开采和浓缩环节主要是开采稀土矿石并将其浓缩成精矿和天然放射性物质，拥有此环节技术能力的企业包括美国的MP Materials、澳大利亚的Lynas、印度稀土有限公司（IREL）以及中国的6家主要稀土生产商。俄罗斯的Lovozerkiy GOK



和 Solikamsk MW 虽然拥有稀土开采和浓缩的管理和技术能力，但相关业务目前并未运营。

分离和提纯环节主要是将稀土精矿加工为氧化物或人为活动富集的天然放射性物质。能够进行此环节的企业包括澳大利亚的 Lynas（位于马来西亚，仅能处理轻稀土）、印度的 Toyotsu 稀土公司（TREI）、比利时的 Solvay（仅能进行提纯）以及中国的 6 家主要稀土生产商。爱沙尼亚的 NPM Silmet 和越南稀土公司拥有分离和提纯的技术能力，但相关业务目前并未运营。日本虽然没有分离和提纯稀土精矿的技术，但能够处理回收的稀土并对其进行分离和提纯。

精炼环节主要是将稀土氧化物精炼为稀土金属。能够进行稀土精炼的国家主要包括中国、越南、泰国和日本。

中国和美国均为稀土应用大国

据 2019 年中国稀土行业协会统计，在中国稀土应用环境中，总需求量最大的是永磁材料，2019 年中国钕铁硼永磁材料产量为 18.03 万吨，占全部稀土总需求量的 44%，其次是抛光材料（9.7%）、催化材料（6.7%）、储氢材料（3%）和发光材料（2.2%）。主要应用领域包括冶金机械（15.7%）、石油化工（8.6%）、玻璃陶瓷（7.5%）、农轻纺（2.6%）及其他（65.6%）。

据德勤评估，美国稀土的年平均需求量为 6660 吨，催化剂的需求量较大（约 95%），磁体需求量次之（约 5%）。主要应用领域包括 FCC 催化剂（84.9%）、汽车催化剂（10.6%）、电动汽车/混合动力汽车（1.9%）、风力涡轮机（1.5%）、空调（0.9%）及飞机（0.1%）。近年来，美国电动汽车/混合动力汽车和风力涡轮机的稀土需求量显著增长，分别达到了稀土磁体用途需求量的 44% 和 34%。

高端稀土磁体的供应仍以美国、欧洲及日本为主

全球稀土磁体的生产企业主要分布于中国、日本和韩国，中国各门类磁体产量均位居全球首位。但在高端磁体的生产方面，中国同日本、欧美等仍然存在一定差距。

据德勤报道，在汽车供应链中，日本的电动汽车/混合动力汽车制造商倾向于购买本国的磁体并在国内生产汽车。部分美国制造商也由于质量原因购买日本的发动机和磁体。但部分日本企业近期已经开始考虑采购中国生产的磁体。中国的磁体供应商主要向本国新能源汽车企业以及部分美国电动汽车和混合动力汽车企业供应相关产品。



在飞机组件供应链中，一级供应商在采购飞机组件时倾向于从日本制造商处采购高质量的磁体和发动机，且由于供应商提供的产品质量和可靠性高，他们在选择供应商后很少再次更换。因此一级供应商大多从日本、美国和欧洲的制造商处采购磁体和发动机，其中日本企业在钕磁体产业中占据更多份额，欧美企业则在钐钴磁体中占据较多份额。

结论

综上所述，由于只有中国拥有中重稀土分离工厂，因此在稀土分离和提纯环节中，只有中国具备完整供应链。虽然美国和澳大利亚也生产中重稀土，但由于中国在分离和提纯环节的“垄断”地位，因此其供应链在分离和提纯环节没有更多选择。近年来，美国及欧洲各国纷纷采取相关措施，旨在加快实现稀土供应链的本土化。

在磁体制造、中间产品及最终产品制造等方面，中国虽然在产量上逐年增加且在全球占据了重要地位，但中国在高端磁体、高端产品制造环节仍与美国、欧洲、日本等存在一定差距。

资料来源：山东省矿业协会网站 2021-05-10 新闻

国内首条稀土纳米断热材料生产线筹建

包头稀土研究院与成都某科技有限公司达成技术转让协议，筹备建立国内首条月产 800 公斤稀土纳米断热浆料中试生产示范线，预计首期投资 2000 万元。

“稀土纳米断热材料是继中空玻璃、Low-E 玻璃为代表的节能玻璃之后，未来几年行业中最耀眼的亮点，具有极其广大的市场前景和发展空间，将带来巨大的经济及社会效益。”该企业总经理杨崛说道。

一直以来，断热玻璃涂层材料核心技术和知识产权由美、日、欧等发达国家把持，我国在断热玻璃涂层材料领域尚处于空白。据稀土研究院尹健博士介绍，研究团队利用稀土独特的电子结构和理化性能，已经成功开发出百纳米以下稀土断热剂公斤级制备技术，制备出多种不同介质的稀土纳米断热剂、稀土纳米断热粉等。



稀土研究院高级工程师鲁飞介绍说：“稀土纳米材料的原理是稀土纳米断热剂中的稀土纳米粒子具有局域表面等离子体共振效应（LSPR 效应），再通过科技手段，将稀土纳米粉体均匀分散至各体系中，形成长效稳定的稀土纳米断热剂。”

随着稀土纳米断热剂在玻璃涂层上实现应用，产品性能指标与国外产品相当，甚至优于国外产品，在技术层面实现了“弯道超车”，填补了国内断热玻璃涂层材料的空白，完全可替代进口产品。

据了解，稀土纳米断热材料还可广泛应用于 EVA、PVB、TPU 等夹层玻璃用中间膜、涂料、塑料、薄膜、显示器、建筑用节能视窗、汽车风挡等，可有效屏蔽紫外、红外，具有隔热性、透明性和耐候性良好等诸多优点。

“稀土纳米断热材料在 EVA 胶膜中的均匀分散，制备出稀土纳米透明断热膜，在可见光透过率为 60%-80% 的情况下，红外阻隔率可达 80%-90%，紫外阻隔率达 99% 以上，隔热温差近 8℃。”尹健介绍说。

目前，这种新材料已注册并授权三项产品商标，与全国范围 10 余个省份近百家经销商签订了代理协议。

资料来源：科技日报 2021-01-11 新闻



地址：上海市永福路 265 号
邮编：200031
编辑：吴春莹
责编：崔晓文
编审：林鹤
电话：021-64455555
邮件：istis@libnet.sh.cn
网址：www.istis.sh.cn