

稀土新材料在新能源技术领域的应用

詹伟^{1,2}, 陈瑞强², 李庚², 杨帆^{3*}, 罗先武^{1*}

- (1. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084;
2. 中国稀土集团有限公司, 江西 赣州 341000;
3. 中国科学院海西研究院 厦门稀土材料研究中心, 福建 厦门 361021)

摘要:第四次工业革命的推进与绿色可再生能源的发展密不可分。面对气候变化和能源安全挑战,中国政府确立了实现碳达峰与碳中和的战略目标。稀土元素作为功能改性材料,在新能源产业的多个环节扮演着关键角色。本文深入探讨了稀土元素及其功能材料在风电、水电、储能和催化等新能源领域的应用和需求,并分析了在稀土永磁、催化、储氢、超导和电池等关键材料领域的研发方向和进展。稀土新材料的创新发展对于提高新能源的生产转换效率、优化存储与传输效能以及服务新能源终端设备具有重要意义,是推动新能源革命、助力实现国家“双碳”战略的关键因素。展望未来,应致力于将稀土资源优势转化为战略和科技优势,以支持国家战略需求和重大工程,并促进绿色低碳智能社会的构建,实现人与自然的和谐共生。

关键词:碳中和与碳达峰;绿色可再生能源;稀土功能新材料;低碳智能社会;“双碳”战略

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0277(2024)06-0145-10

人类的文明进步离不开科技发展,而科技发展的驱动力在于能源变革。近代以来,人类经历了三次工业革命,其本质是能源与材料的创新。而以人工智能技术为牵引的智能化设备的出现,使驱动力变为了绿色可再生能源,人类生产力得到极大的解放,这也预示着“智能化”时代即将到来。这一次的能源革命将在能源生产-能源存储-能源传输-能源终端使用产生全方位革新。绿色可再生能源,比如太阳能、风能、水电、生物质能、海洋能等,得到广泛的开发和应用;智能化设备,比如大数据技术、

人工智能技术、物联网、智能化机器人、电动汽车等,将取代大部分劳动生产。未来的工业革命将以新能源和信息技术融合为标志,开启高效化、清洁化、低碳化、智能化为主要特征的能源时代。其目标是消除化石能源消费所引发的环境问题,塑造一个经济、可持续的能源供应新格局^[1,2]。

2014年大气中CO₂浓度超过 400×10^{-6} ,地表温度上升近2℃,2021年全球排放CO₂达363亿吨^[3]。温室效应引发了全球担忧,环保成为经济发展需要考虑的重要因素。在此背景下,2020年9月

收稿日期:2024-07-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3504302)

作者简介:詹伟(1970-),男,四川绵阳人,博士研究生,工程师,主要从事稀土新材料研发,E-mail:wei_zhan@regcc.cn

*通信作者:杨帆(1981-),研究员,E-mail:fanyang2013@fjirsm.ac.cn;罗先武,教授,E-mail:luoxw@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.3724/S1004-0277.20240058

22 日,习近平总书记提出碳达峰与碳中和的战略目标,这一宏大目标愿景是中国秉持新发展理念,坚持可持续发展,积极参与应对气候变化全球治理作出的重大决策,充分体现了中国的大国担当,为加快构建人类命运共同体起到了积极作用。2022 年 10 月 16 日,习近平总书记在党的二十大报告中再次强调了中国“双碳”战略目标,为更加深刻地理解和认识“双碳”工作,并在今后的工作中采取更加积极稳健的措施推进稀土产业绿色低碳转型发展指明了前进方向、提供了根本遵循。目前中国化石能源占比超过 75%,而要实现“双碳”战略,能源格局要力争在 2060 年化石能源占比低于 25%。因此,在未来 30 年中应将大力发展水电、核电、风电、光伏、氢能等绿色可再生能源。为实现这一宏大的目标,中国政府自上而下设计了复杂而动态的管理机构和政策措施,保障碳达峰与碳中和^[4]。在能源安全、经济效益、空气质量、气候等因素的推动下,绿色和可再生能源始终是中国能源政策的核心支柱。因此,绿色可再生新能源是未来发展的趋势,也是必由之路。

稀土是元素周期表中原子序数 57 至 71 的镧系元素和钪、钇共十七种金属元素的总称(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、Sc、Pm),是制备稀土磁性材料、发光材料、晶体材料、陶瓷材料、催化材料等的关键基础原料^[5~7],美国、日本等发达国家均将稀土元素作为 21 世纪的战略元素中的重要组成部分,赋予战略储备和重点研究。中国也把稀土材料列入制造业领域中基础原材料的优先主题和重点支持方向。稀土被誉为“工业味精”,其具有不可替代性,一方面其为目前人类能够使用到的稳定的唯一具有 4f 轨道的一类材料,其存在两个独特特性:配位键丰富、超强磁性;另一方面,现代能源环境、高新技术产业、国防军工等领域都需要用到稀土元素及其功能材料。尤其是尖端高科技产品的研发离不开稀土材料,一辆纯电动新能源汽车需要使用约 3 kg~10 kg 稀土,每兆瓦风机需要使用约 200 kg 稀土,美国爱国者导弹制导系统

需要使用约 3 kg 的钕铁硼磁体,一架 F35 飞机需要使用 417 kg 稀土(包含 Eu、Tb、Dy、Y、Lu 等),丰田混合动力汽车每辆使用 9.07 kg~12.70 kg 稀土,许多组件以稀土材料制成,风力发电机中使用 NdFeB 永磁体,3C 电子消费品中需要使用大部分稀土元素^[8]。这直接导致了稀土材料领域成为大国博弈的主战场之一。

中国稀土产业具有四方面优势:一是稀土资源储量大,矿种齐全;二是稀土开采量大,出口量全球占比高;三是产业链齐全,冶炼分离水平全球领跑;四是稀土具有战略威慑力,美国对华依赖超过 80%^[9]。但是中国稀土产业发展方向也存在许多的问题,关键的技术专利被国外垄断,下游材料市场被国外占据,同时稀土开采高污染、冶炼高耗能、产品低附加值。尤其是新能源领域的应用面临严峻的挑战。比如,风力发电领域未来 5 年中国风电新增装机量平均每年在 50 GW,预计到 2025 年全球新增装机量有望达到每年 100 GW,对应磁材需求超过 4.5 万吨。目前国内风电主轴轴承中 6 MW 级以上风电主轴轴承约 98% 市场份额被进口企业占据,国内轴承企业仅在 3 MW~6 MW 占据约 32% 份额,且大部分集中在小功率级别,在寿命及能力等关键参数上与进口轴承有很大差距。传统汽车领域是目前稀土永磁最大的消费方向,主要集中在电机性能要求高的 EPS(电动助力转向系统)、ABS(制动防抱死系统)等。随着碳中和与智能驾驶的发展,EPS 渗透率会持续增高,2025 年预计超过 6000 吨。新能源汽车领域,2020 年中国新能源汽车出货量 136.7 万辆,全球 324 万辆,2025 预计全球新能源汽车超过 1000 万台,相应驱动电机用磁体需求到 3 万吨(按单台电机用量 3 kg)^[10,11]。在催化领域,国外索尔维、第一稀等公司对稀土催化材料铈锆复合氧化物具有专利垄断,并占据全球市场的 85% 以上。目前中国在铈锆复合氧化物、改性氧化铝以及汽车尾气催化剂等方面与国外技术及产业水平相比仍有较大差距,如国内缺乏核心专利保护,产业规模仍存在不足,市场占有仍主要是国产汽车市场,全

球市场占有率不足 10%^[12];在储能领域,中国已能完全满足国内常规民用电池和工业电池的需求,并出口日本、韩国、欧美等国家^[13]。但功率型动力电池用高端稀土储氢材料的产业化与国外相比还存在较大差距,国内混合动力车用大容量稀土储氢材料市场基本由日本占据,用于氢储运及规模化储能用稀土储氢材料的应用技术刚刚起步^[14]。

1 稀土功能材料与新能源的关系

在低碳和清洁新能源技术中,部分稀土元素发挥着重要支撑作用。在新能源产生端,风电、水电、太阳能、制氢等行业需要用到稀土永磁、发光和催化材料,而这些功能材料的制备需要用到 Nd、Dy、Tb 等稀土元素;在能源存储端,电池、储氢等行业需要用到稀土永磁和合金材料,而这些功能材料的研制需要用到 La、Ce 等稀土元素;在新能源传输与转

换端,智能电网、电机等行业需要稀土晶体、超导、催化等材料支撑,这些材料制备需要 Sc、Y、Lu 等稀土元素;在新能源的利用终端,汽车、显示和电子产品等领域需要用到稀土永磁、发光和晶体材料等,而这些材料的制备需要添加 Nd、Dy、Pr、Er、Ho 等稀土元素。

稀土元素及其功能材料研发是实现绿色可再生新能源革命和支撑全球实现“双碳”目标的关键矿产资源和重要工程技术。目前与能源变革息息相关的稀土新材料研发技术主要包括以下六个方面(见图 1):高性能稀土磁性材料及应用技术、高效率稀土晶体及发光材料研发技术、新一代稀土催化材料研发及工程化技术、高环境适应性稀土固态储氢材料及应用技术、稀土合金化高性能结构材料研发技术、前沿高端稀土新材料与绿色低碳制备工程化技术。

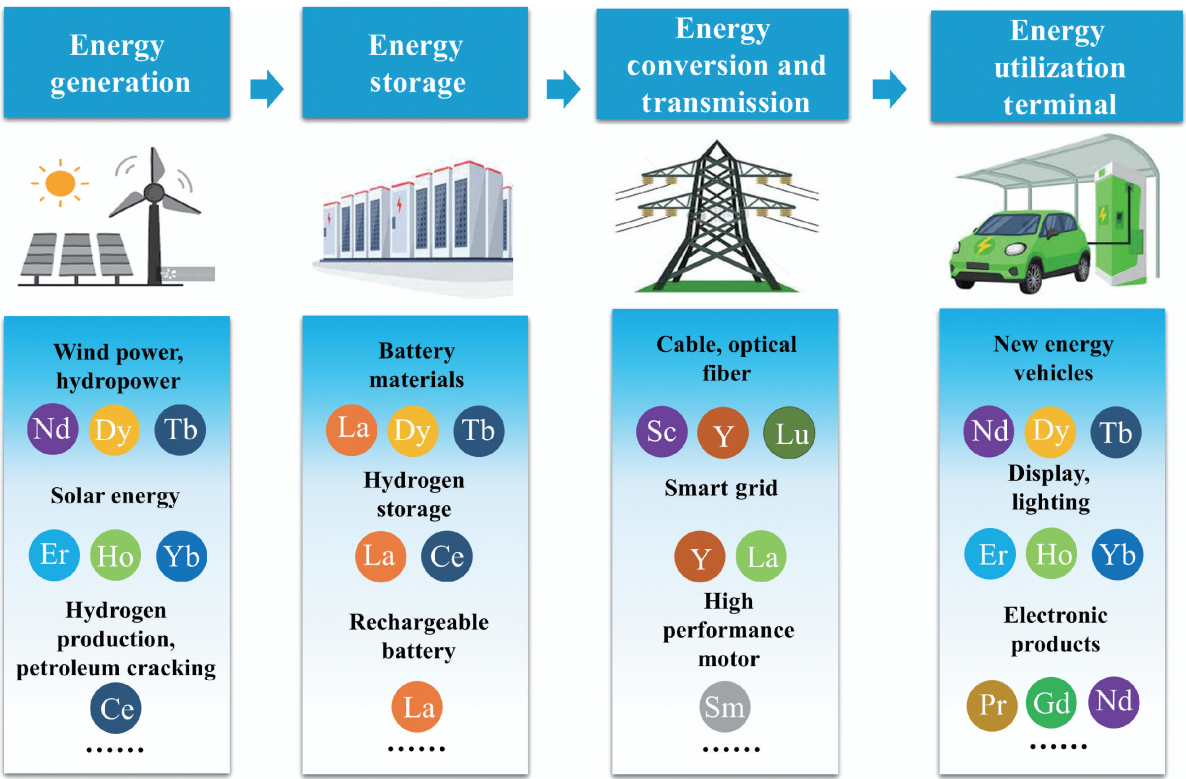


图 1 稀土新材料在新能源领域的应用

Fig. 1 Application of new rare earth materials in the field of new energy

根据中国双碳战略的规划时间表,从 2025 年到 2030 年再到 2060 年,中国要围绕以上六个关键技术,实现理论创新、技术突破、工艺改善和工程化生产。对关键稀土材料领域的自主保障能力达到 85% 以上,重大原创成果全球占比提升至 20%,在国际标准中的占比达到 30% 以上,对国家重大装备和重大工程形成全面自主保障能力。与新能源相关的细分 31 种稀土功能材料完成研发,完成 28 项战略产品,实现支撑 18 个应用系统。

2 新能源用稀土功能新材料研究

2.1 高性能稀土磁性材料及应用研发

稀土永磁材料在能源方向具有广阔的应用前景,比如消费电子、风电电机、固态存储、节能电梯以及新能源汽车等产品。在消费电子领域,稀土永磁材料,被广泛用于硬盘驱动器的音圈电机(VCM)和智能手机中的振动马达和扬声器中,以提供高扭矩、快速响应、更好的触觉反馈和音质。在风电电机领域,通过优化磁路设计和使用高性能的稀土永磁材料,可以减少能量损耗并提高发电效率。在固态存储方面,高性能计算和存储设备在运行过程中会产生大量热量。稀土永磁材料可以用于开发更有效的散热解决方案,以提高散热效率,如磁流体冷却系统。这些应用需要稀土永磁材料满足高性能、稳定性好、低成本、环境友好等要求。但是目前其在环保、成本、高性能方面还有待提高,高效稀土微调技术、原料可调控技术、高取向磁体成型技术、低能耗优化烧结技术等还需要继续研发。该领域一直以来的研发目标是要实现稀土永磁材料磁学性能达到双五,即“内禀矫顽力 500 kA/m,剩余磁通密度 500 mT”^[10,11]。围绕这一目标应重点解决三大科学技术问题:(1)4f 电子与 3d 电子间形成强大磁性的量子交换相互作用机制;(2)高各向异性场与高饱和磁矩双相间剩磁增强效应的量子耦合机制;(3)不同磁性颗粒间的强静磁相互作用,上述三个尺度范围的相互作用,内禀磁参量的同步提升。而且应解决诱导永磁性相易磁化方向取向排

列、跨尺度相互作用和磁性调控技术。最终突破现有永磁理论极限磁能积,催生第四代稀土永磁材料,使中国在智能社会、武器装备等领域跨越式发展。

2.2 高环境适应性稀土固态储氢材料及应用研发

储氢材料研究历史悠久,相比液态和钛钒等固态储氢技术,稀土储氢在应用成熟度、储氢密度与放氢性能方面具有更好的优势,稀土储氢材料重要组成成分来源于稀土元素 La、Sc、Ce 等^[15]。目前,稀土储氢材料是氢能全产业链条中氢储运的核心支撑材料。在氢能源汽车、移动能源存储、军事等领域具有重要的应用价值。比如在氢能源汽车方面,稀土固态储氢材料被用于氢燃料电池汽车的储氢系统,提供高密度的氢气存储解决方案。在移动能源存储中,稀土固态储氢材料可以作为能量存储介质,提供长效的能量供应。在军事领域,稀土固态储氢材料因其安全性和高效性,被用于无人机和其他战术设备。稀土储氢材料的优越性能需要材料具有高储氢容量、快速吸/放氢速率、良好的循环性、环境适应性和安全性等要求。但是稀土储氢材料存在价格高、重量储氢密度相对较小、循环稳定性有待提升、固态储氢装置传热和传质效率低等问题^[16]。目前最有望产业化的合金储氢材料是 AB₂ 型储氢合金,然而 AB₂ 型储氢合金仍存在活化难、稳定性差、结构易偏析、批量制备困难等问题^[17]。针对这些问题应开展高能量密度、长寿命、低成本稀土储氢材料研发,其研究技术路线如图 2 所示。科研人员应着力解决高性能稀土储氢材料的制备关键技术、新型稀土储氢材料的批量制备关键技术和高效换热的固态储氢装置的设计加工技术等技术难题。可以在以下性能和产业方面加大研发:(1)新型稀土储氢材料的有效储氢容量,常温放氢平台压力大于等于 0.2 MPa,2000 次吸/放氢循环后容量保持率大于等于 80%;(2)获得新型稀土储氢材料的批量制备技术大于等于 300 吨/年;(3)构建满足燃料电池重型叉车要求的固态储氢装置;(4)获得新型稀土储氢材料在燃料电池重型叉车中

的应用技术,其中燃料电池叉车吨位大于等于 20 吨。最终获得高性能稀土储氢材料并实现应用示范。

2.3 新一代稀土催化功能材料及工程化研发

稀土催化材料在石油裂化、汽车尾气净化、工业脱硝、天然气燃烧等领域具有重要应用。稀土催化材料主要消费 La、Ce 等高丰度稀土元素,全球年消耗量近 3 万吨^[12,13]。在石油裂化领域,稀土催化材料通常在石油精炼过程中用于提高裂化效率和选择性,改善燃油质量。在汽车尾气净化领域,稀土元素如铈(Ce)被用于三元催化转化器,有效降低汽车尾气中的有害排放。在工业脱硝领域,稀土催化剂可在工业烟气脱硝过程中减少氮氧化物的排放。在天然气燃烧领域,稀土催化剂可以促进天然

气的完全燃烧,降低不完全燃烧产生的污染物。其作为催化材料具有催化活性高、比表面积大、稳定性好、选择性高、加工周期短等优点,但是中国目前在该领域存在缺乏核心专利保护、产业规模存在不足、市场全球占有率不足 10%、产品稳定性有待提升等问题^[18]。针对这些问题,应从以下关键技术与问题重点攻关:(1)稀土、锆离子溶液配位络合技术;(2)铈锆复合氧化物绿色沉淀制备以及前驱体水热晶化技术;(3)研发满足国六及以上标准的汽车尾气净化稀土催化材料及后处理系统集成技术;(4)建立满足绿色、低碳/零碳内燃机排放控制的新型稀土催化材料体系;(5)发展新型结构、多组分复合、多功能集成的宽温度窗口、低起燃温度、长使用寿命的稀土催化材料及其制氧材料。

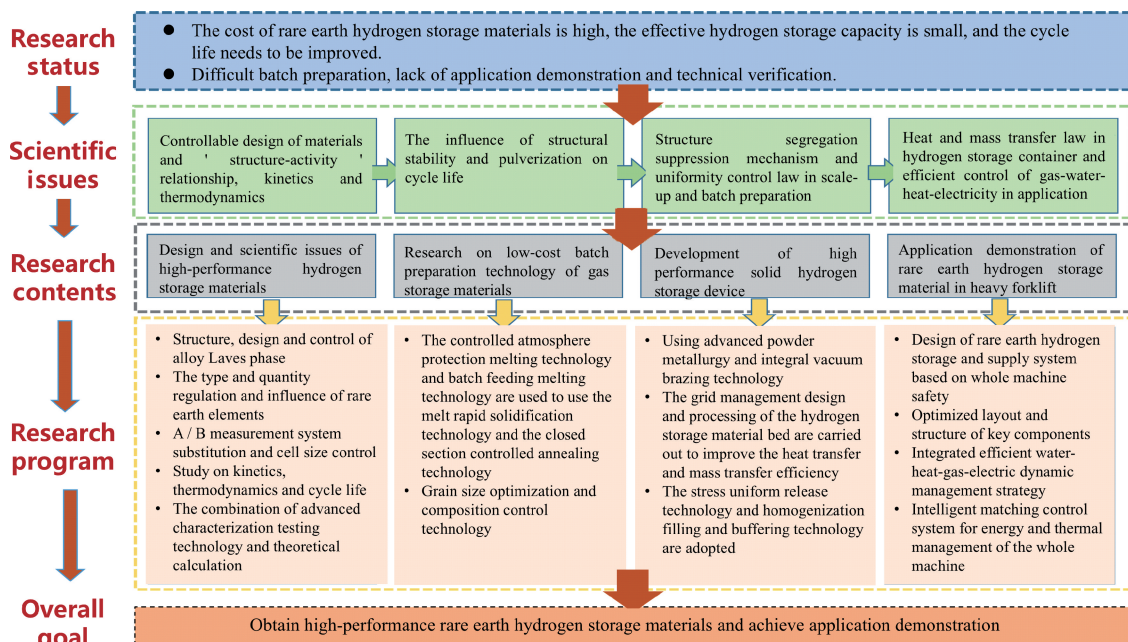


图2 稀土储氢材料的研究技术路线

Fig. 2 Research technology route of rare earth hydrogen storage materials

2.4 低损耗、高性能稀土钇钡铜氧超导材料研发

超导材料研究具有超过 100 年的历史,其中的高温超导材料一直以来都是研究的热点,目前已发现的高温超导材料大部分含有 Y、La 等稀土元素^[19,20]。其中的钇钡铜氧(YBCO)高温超导材料是

目前工程化输电最成熟的产品。在能源方向的诸多领域具有广阔的应用场景,比如在电力传输领域 YBCO 超导材料用于制造超导电缆,以实现低损耗、高容量的电力传输。在磁共振成像(MRI)领域 YBCO 超导材料可用于制造高性能的磁体,提供高

分辨率成像。在粒子加速器领域,YBCO 超导材料用于制造加速器的磁体,提高粒子加速效率等。这些应用使 YBCO 超导材料需要具备高临界电流密度、易于加工、低成本效益以适应不同的应用需求。YBCO 超导材料的常用制备技术主要包括激光脉冲沉积(PLD)和溶胶凝胶法沉积等,然而这些技术存在关键设备和核心部件国产化困难,以及在提升 YBCO 薄膜质量、降低制备成本等方面难以突破等关键问题^[21]。针对这些问题,应开展低损耗、高性能 YBCO 超导材料的研发,主要解决四方面的关键科学技术问题:(1)利用 MOCVD 薄膜外延技术制备 YBCO 超导带材的工程化技术;(2)YBCO 超导带材中组份织构-生长条件-临界电流的理论机理研究;(3)YBCO 超导带材 MOCVD 有机源的自主生产技术;(4)低损耗 YBCO 超导电缆的设计制造技术。

2.5 高比容量稀土固态电解质电池研发

稀土元素在能源动力中发挥着重要的作用,如图 3 所示,其中锂离子电池是目前储能和动力方向的主流产品,但是目前液态的电解液导致其存在易燃、易爆等安全性问题^[22],研究固态电解质电池将极大地克服这一问题。含稀土元素的固态电解质(如 Li_3YBr_6 、 Li_3YCl_6 、 Li_3ErCl_6 等)具有室温离子电

导率高、还原电位低、成本相对较低的优势。在能源存储的多个领域具有重要的研究和应用价值。比如在电动汽车领域,稀土固态电解质电池因其高能量密度和安全性,被视为下一代电动汽车动力电池的有力候选。在航空航天领域,固态电池可以为无人机、卫星和宇宙飞船提供高能量密度的电源。在医疗领域,对于需要高安全性和稳定性的医疗设备,如心脏起搏器和植入式医疗设备,固态电池是理想的电源。但同时缺少可规模化的高效制备方法、抗氧化性、空气稳定性等综合性能不佳,难以满足实际应用的要求^[23,24]。针对这一问题,应重点解决在湿化学法制备过程中的形成热力学规律探索、揭示结构和组成对其综合性能的影响规律及物性调控机制、在扣式和软包电池中进行工程化测试应用等问题(图 4 为稀土固态电解质电池的研究技术路线)。建议科研人员从以下几个方面加大研发力度:(1)发展低成本、可控性好和可规模化的高效湿化学制备方法;(2)制备几种综合性能优良,适合实际应用的固态电解质;(3)探明作为表面包覆层时的最佳组成和厚度,使富镍正极材料具有优异的倍率性能和循环稳定性;(4)揭示组成与不同正极直接的匹配机制和界面稳定化规律,获得高比能、高性能的全固态锂电池。

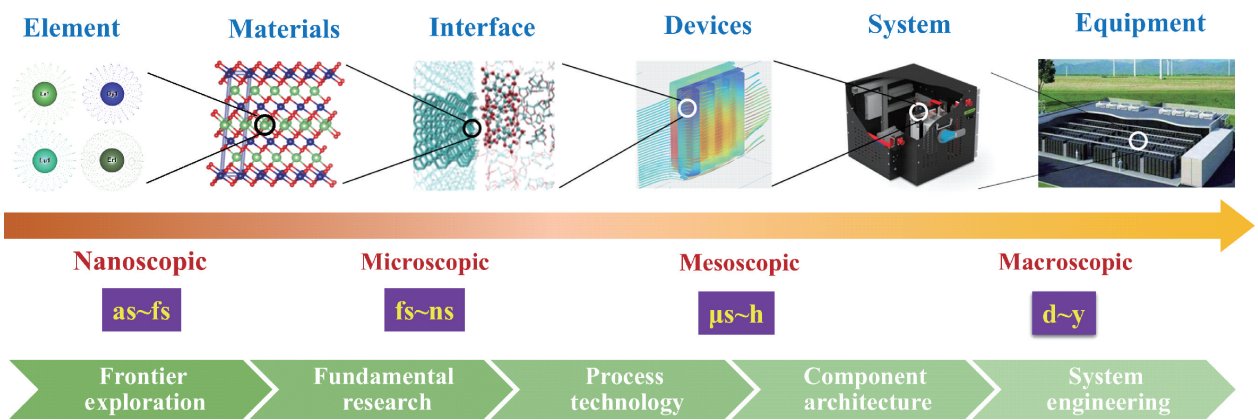


图 3 稀土元素及其功能材料在能源动力系统研发中的作用

Fig. 3 The role of rare earth elements and their functional materials in the research and development of energy and power systems

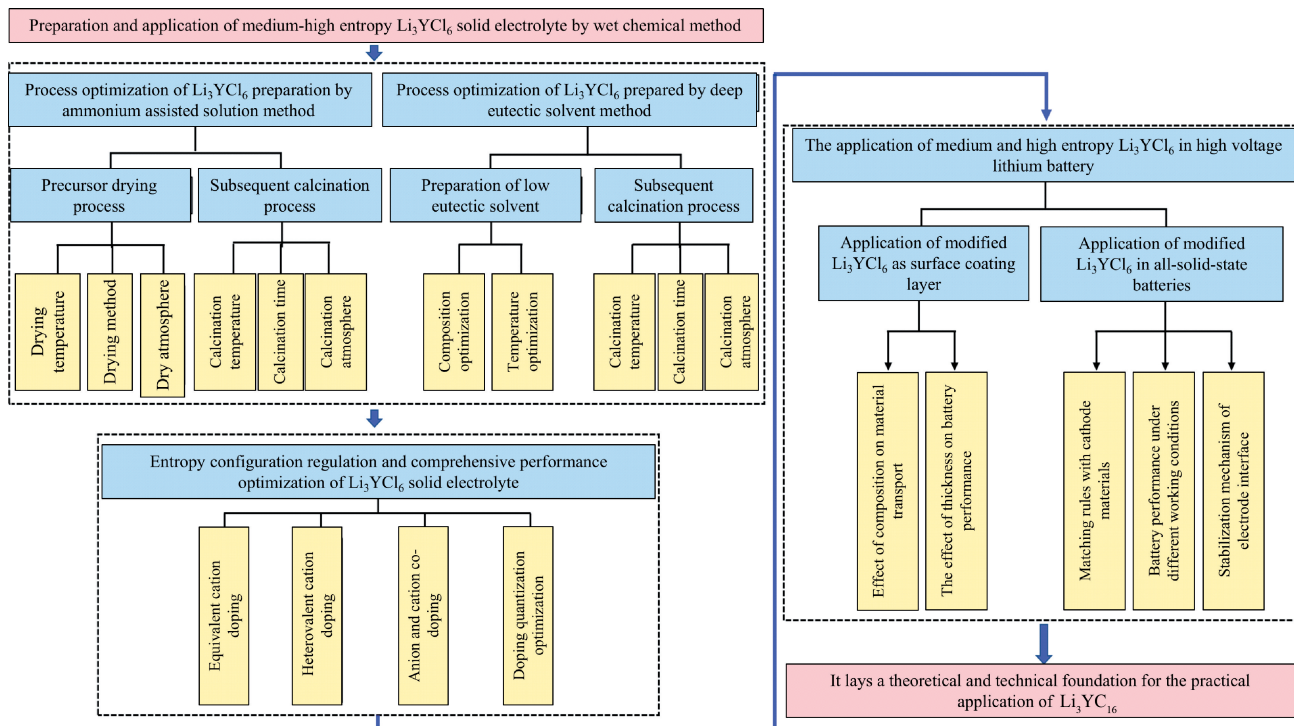


图4 稀土固态电解质电池的研究技术路线

Fig. 4 Research technology route of rare earth solid-state electrolyte battery

3 结语

稀土功能新材料广泛应用于储能、催化、光伏、发电等领域,其材料的创新研发将加速绿色可再生新能源的生产转换效率、提升存储与传输效能、服务新能源终端设备、推进新能源革命、助力国家实现“双碳”战略目标。绿色能源动力系统研发是全方位、全链条、全周期的,涵盖矿产元素、材料、界面、器件、体系、系统等研发,需要解决多尺度、长时态、多物理场耦合的物理、化学、材料、机械等问题,在前沿探索、基础研究、工艺技术、体系架构、系统工程等方面进行全链条创新,需要与相关行业及同仁深度合作,从而稀土元素才能作为基材在产业中上游引领绿色可再生能源及其动力系统革命。未来,应努力实现稀土的资源优势转变成战略和科技优势,服务国家战略需求和重大工程,支撑打造绿色低碳智能社会,促进人与自然和谐共生。

参考文献:

- [1] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 林敏捷, 张国生, 熊波, 王影, 梁英波, 杨智. 论地球能源演化与人类发展及碳中和战略[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 411-428.
Zou C N, Ma F, Pan S Q, Lin M J, Zhang G S, Xiong B, Wang Y, Liang Y B, Yang Z. Earth energy evolution, human development and carbon neutral strategy [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 411-428.
- [2] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
Chen G P, Dong Y, Liang Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [3] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动

- 方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
- Yu G R, Hao T X, Zhu J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 423-434.
- [4] Yang Y, Wang H, Löschel A, Zhou P. Energy transition toward carbon-neutrality in China: Pathways, implications and uncertainties [J]. Frontiers of Engineering Management, 2022, 9(3): 358-372.
- [5] 王春梅, 刘玉柱, 赵龙胜, 赵娜, 冯宗玉, 黄小卫. 我国稀土材料与绿色制备技术现状与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2018, 37(11): 841-847, 879.
- Wang C M, Liu Y Z, Zhao L S, Zhao N, Feng Z Y, Huang X W. Current situation and development tendency on rare earth materials and its green preparation technologies in China[J]. Materials China, 2018, 37(11): 841-847, 879.
- [6] 王洪华. 关于稀土产业的某些思考[J]. 中国战略新兴产业, 2019, (22): 229.
- Wang H H. Some thoughts on rare earth industry[J]. China Strategic Emerging Industry, 2019, (22): 229.
- [7] 洪梅. 借力中国制造 2025 谋求稀土行业新发展[J]. 稀土信息, 2015, (8): 27-29.
- Hong M. Leveraging made in China 2025 to seek new development of rare earth industry[J]. Rare Earth Information, 2015, (8): 27-29.
- [8] 张倩, 张亚如. 稀土材料的应用及发展[J]. 科技风, 2019, (12): 135.
- Zhang Q, Zhang Y R. Application and development of rare earth materials[J]. Technology Wind, 2019, (12): 135.
- [9] 周宝炉, 李仲学, 赵怡晴. 世界稀土市场动态及产业对策建议[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(3): 257-264.
- Zhou B L, Li Z X, Zhao Y Q. Current status of world rare earths market and countermeasures for its industry development[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2016, 34(3): 257-264.
- [10] 陈雪琴. 稀土永磁材料产业发展现状及对策 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- Chen X Q. Rare Earth Permanent Magnet Material Industry Development Status and Countermeasures [M]. Beijing: Social Sciences Literature Press, 2015.
- [11] 闫阿儒, 刘壮, 郭帅, 陈仁杰. 稀土永磁材料的最新研究进展[J]. 金属功能材料, 2017, 24(5): 5-16.
- Yan A R, Liu Z, Guo S, Chen R J. Recent research development of rare-earth permanent magnetic materials [J]. Metallic Functional Materials, 2017, 24(5): 5-16.
- [12] 黄小卫, 崔梅生, 沈美庆, 王健强, 陈明昕, 赵娜. 面向 2035 的稀土催化材料发展战略研究 [A]. 中国稀土学会. 中国稀土学会 2021 学术年会论文摘要集 [C]. 北京: 中国稀土学会, 2021.
- Huang X W, Cui M S, Shen M Q, Wang J Q, Chen M X, Zhao N. Research on the development strategy of rare earth catalytic materials towards 2035 [A]. The Chinese Society of Rare Earths. China Rare Earth Society 2021 academic annual Conference abstracts collection [C]. Beijing: The Chinese Society of Rare Earths, 2021.
- [13] 江永, 杜亚平. 稀土氧化物复合材料在电催化中的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(3): 60-68.
- Jiang Y, Du Y P. Research progress on rare earth oxide composites in electrocatalysis [J]. Materials Reports, 2023, 37(3): 60-68.
- [14] 闫慧忠, 熊玮, 王利, 张旭, 周淑娟. 稀土储氢材料技术及市场应用现状 [A]. 中国稀土学会, 江西省科学技术协会, 赣州市人民政府. 中国稀土学会 2020 学术年会暨江西(赣州)稀土资源绿色开发与高效利用大会摘要集 [C]. 北京: 中国稀土学会, 2020.
- Yan H Z, Xiong W, Wang L, Zhang X, Zhou S J. Technology and market application status of rare earth hydrogen storage materials [A]. The Chinese Society of Rare Earths, Jiangxi Provincial Science and Technology

- Association, Ganzhou Municipal People's Government. Summary collection of the 2020 academic annual meeting of the Chinese Society of Rare Earths and the green development and efficient utilization conference of Jian-gxi (Ganzhou) rare earth resources [C]. Beijing: The Chinese Society of Rare Earths, 2020.
- [15] 刘木子, 史柯柯, 赵强, 李晋平, 刘光. 固体储氢材料的研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(9): 4746-4769.
- Liu M Z, Shi K K, Zhao Q, Li J P, Liu G. Research progress of solid hydrogen storage materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(9): 4746-4769.
- [16] 吴勇, 姜晓静, 肖锐, 余洪蕙, 郑捷, 李星国. 稀土储氢材料新功能探索[A]. 中国化学会. 中国化学会第十届全国无机化学学术会议论文集(第二卷) [C]. 北京: 中国化学会, 2019.
- Wu Y, Jiang X J, Xiao R, Yu H E, Zheng J, Li X G. Exploration of new functions of rare earth hydrogen storage materials[A]. Chinese Chemical Society. The 10th national conference of inorganic chemistry proceedings (Volume II) [C]. Beijing: Chinese Chemical Society, 2019.
- [17] 宋静, 鱼银虎, 靳帆, 曹婧茹. 稀土元素在储氢材料中的应用进展[J]. 新型工业化, 2021, 11(2): 240, 241.
- Song J, Yu Y H, Jin F, Cao J R. Application progress of rare earth elements in hydrogen storage materials[J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(2): 240, 241.
- [18] 海波, 于涵, 魏航, 褚海斌. 面向新能源的稀土催化材料研究进展[J]. 化学试剂, 2022, 44(7): 941-951.
- Hai B, Yu H, Wei H, Chu H B. Research progress of rare earth catalytic materials toward new energy [J]. Chemical Reagents, 2022, 44(7): 941-951.
- [19] 张弛, 党乾, 刘国怀, 王昭东. 稀土钪的开发及应用[J]. 材料导报, 2023, 37(3): 106-113.
- Zhang C, Dang Q, Liu G H, Wang Z D. Development and application of the rare earth yttrium[J]. Materials Reports, 2023, 37(3): 106-113.
- [20] 霍知节. “揭秘” 稀土超导材料[J]. 新材料产业, 2019, (12): 65-71.
- Huo Z J. “Demystifying” rare earth superconducting materials [J]. Advanced Materials Industry, 2019, (12): 65-71.
- [21] 蔡传兵, 杨召, 郭艳群. 新型电力传输材料——RE-BaCuO 高温超导涂层导体[J]. 物理, 2020, 49(11): 747-754.
- Cai C B, Yang Z, Guo Y Q. The new power transmission material—REBaCuO high-temperature superconducting coated conductor[J]. Physics, 2020, 49(11): 747-754.
- [22] 张家庆, 张达, 陈昆峰, 薛冬峰, 梁风. 稀土改性锂基氧化物固态电解质研究现状与展望[J]. 材料导报, 2023, 37(3): 78-86.
- Zhang J Q, Zhang D, Chen K F, Xue D F, Liang F. Recent advances and perspective on rare earth element modified lithium-based oxide solid electrolytes[J]. Materials Reports, 2023, 37(3): 76-86.
- [23] Li X N, Liang J W, Yang X F, Adair K R, Wang C H, Zhao F P, Sun X L. Progress and perspectives on halide lithium conductors for all-solid-state lithium batteries [J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(5): 1429-1461.
- [24] 林碧霞, 林小燕, 邢震宇. 稀土元素掺杂锂离子固态电解质的研究进展[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(5): 682-697.
- Lin B X, Lin X Y, Xing Z Y. Research advances of lithium-ion solid electrolytes doped with rare-earth elements [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, 39(5): 682-697.

Application of Rare Earth New Materials in the Field of New Energy Technology

ZHAN Wei^{1, 2}, CHEN Rui-qiang², LI Geng², YANG Fan^{3*}, LUO Xian-wu^{1*}

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Rare Earth Group Co., Ltd., Ganzhou 341000, China;

3. Xiamen Institute of Rare Earth Materials, Haixi Institute, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: The development of the Fourth Industrial Revolution heavily relies on the green and renewable new energy. In response to climate change and energy security, the Chinese government has formulated strategic goals for carbon neutrality and carbon emission peak. Rare earth elements play a crucial role as functional modifiers in various stages of the new energy industry. This article analyzes the application scenarios and demands of rare earth elements and their functional materials in new energy fields such as wind power, hydropower, energy storage, and catalysis. It introduces the layout and progress of China Rare Earth Group in research directions related to rare earth permanent magnets, catalysis, hydrogen storage, superconductors, and batteries, emphasizing their close association with new energy. The innovative research and development of rare earth new materials are expected to accelerate the production conversion efficiency of green and renewable new energy, enhance storage and transmission efficiency, and serve new energy terminal devices. This will further propel the new energy revolution, contributing to the realization of the country's dual carbon strategy. Looking ahead, our concerted efforts will be made to transform the resource advantage of rare earths into strategic and technological advantages. This will cater to national strategic needs and major projects, support the creation of a green, low-carbon, and intelligent society, and promote harmonious coexistence between humans and nature.

Key words: carbon neutrality and emission peak; green renewable energy; rare earth functional new materials; low-carbon smart society; “Dual Carbon” goal