

我国锂及其下游动力电池产业链发展探讨

邢佳韵, 陈其慎*, 张艳飞, 于汶加, 龙涛, 郑国栋, 王琨

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 锂及其下游动力电池产业链的高质量发展, 对支撑我国经济转型升级、保障战略性新兴产业平稳发展起到关键作用。本文梳理了锂及其下游动力电池产业链的构成, 涵盖资源端、冶炼加工端、关键材料与产品端、循环利用端四部分, 据此阐述了相关产业链高质量发展的必要性及其基本状况。研究发现, 受自然、生态等约束, 国内锂矿产受到限制; 国际性的资源争夺导致我国海外进口风险剧增; 正极材料、电解液等核心专利处于被国外公司垄断局面; 关键材料与电池技术相比国际先进水平存在一定差距, 新兴技术方向的积累薄弱; 废旧动力电池资源二次回收体系不完备, 产业秩序有待规范。着眼锂及其下游动力电池产业链的高质量发展, 论证了2025年、2035年的阶段发展目标, 提出了采取多维度构建安全稳定的资源供应体系、攻关关键材料和电池新技术并强化锂电技术体系及人才储备、围绕关键材料与产品实施创新以带动产业链各环节协同发展的建设路径。研究建议, 注重顶层设计的完备性, 形成全产业链一体化管理模式; 合理加大资金支持力度, 促进基础研究与应用研究水平互促提升; 鼓励上、下游环节的企业开展合作, 增强产业链协同效应; 强化“产学研”合作, 培育产业链复合型科技人才。

关键词: 锂; 动力电池; 产业链; 高质量发展

中图分类号: F416.1; F407.1 **文献标识码:** A

Development of Lithium and Its Downstream Power Battery Industry Chain in China

Xing Jiayun, Chen Qishen*, Zhang Yanfei, Yu Wenjia, Long Tao, Zheng Guodong, Wang Kun

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The high-quality development of lithium resources and the downstream power battery industry chain is crucial for China's economic transformation and the steady development of strategic emerging industries. This paper analyzes the implications of lithium and its downstream power battery industry chain, which comprise resource, smelting processing, key material and product, and recycling ends. Based on this, the necessity of high-quality development of relevant industrial chain and its basic situation are expounded. Due to natural and ecological constraints, the expansion of domestic lithium ore production is restricted. The international competition for resources has led to a sharp increase in China's import risks. The core patents on technologies such as cathode materials and electrolytes are monopolized by foreign companies. There remains a gap between domestic and international advanced level in key materials and battery technology, and the accumulation of emerging technologies is inadequate. The secondary recycling system of waste power battery resources is incomplete, and the industrial order needs to be regulated. Focusing on the high-quality development of lithium and its downstream power battery industry chain, the stage development goals for 2025 and 2035 are demonstrated. The construction path proposed includes constructing a safe and stable resource supply system using multiple

收稿日期: 2022-03-05; 修回日期: 2022-05-20

通讯作者: *陈其慎, 中国地质科学院矿产资源所研究员, 研究方向为矿产资源规划与调查评价; E-mail: chenqishen@126.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键金属矿产及其材料产业供应链安全保障研究”(2021-XBZD-06); 国家自然科学基金项目(92062111)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

dimensions, developing key materials and new battery technologies by strengthening the lithium battery technology system and talent reserves, and promoting the coordinated development of all links of the industrial chain while focusing on innovation of key materials and products. Furthermore, we propose the following suggestions: (1) improving the top-level design to form an integrated management model of the entire industry chain, (2) increasing financial support to enable the mutual promotion of basic and applied research, (3) encouraging cooperation among enterprises in the upstream and downstream links to enhance the synergy effect of the industrial chain, and (4) strengthening industry-university-research cooperation to cultivate interdisciplinary talents for the industrial chain.

Keywords: lithium; power battery; industrial chain; high-quality development

一、前言

世界碳减排压力凸显, 锂电池作为重要的减碳装备得到了快速发展。受新能源汽车行业的发展带动, 近年来我国锂消费保持了高速增长态势(年均增速为24%), 2020年的锂消费量为 2.29×10^5 t(按碳酸锂当量计, 下同)、车载动力电池出货量为80 GW·h [1]。目前, 我国是世界上最大的锂消费国、下游材料生产国、电池生产国, 相关产业处于加速上升的前期, 面临着参与锂电产业链国际竞争的重大战略机遇。

为了支持我国汽车动力电池产业的有序发展, 工业和信息化部、国家发展和改革委员会等部门积极出台政策, 着眼2025年前动力电池产品的性能与安全性、产业规模、关键材料及零部件、生产装备智能化等, 提出具体要求; 以动力电池实行梯次利用为契机, 明确动力电池回收责任主体及动力电池编码制度、建立全生命周期追溯体系, 促进资源的高效循环利用 [2,3]。在学术与产业研究方面, 针对锂及其下游动力电池产业链的各环节开展了较多工作: 关于资源勘查, 总结了四川省富锂地区资源勘查进展、全国盐湖锂资源品质, 梳理了选矿工艺及开发现状 [4~7]; 关于冶炼加工, 剖析了各类加工锂盐的发展规模、企业发展情况等 [8]; 关于关键材料和电池产品, 完成了国内外关键材料研发技术状况对比, 分析了我国关键材料发展面临问题并提出了面向2035年的目标任务 [9~11]; 还梳理了锂产业链环节以及龙头企业的生产工艺与技术路径 [12]。然而从已有文献看, 着眼行业高质量发展而展开的锂及其下游动力电池产业链串联性研究还有所不足。

本文从锂及其下游动力电池产业链高质量发展的必要性出发, 针对资源端、冶炼加工端、关键材料与产品端、循环利用端等产业链构成, 凝练问题、研判目标、论证路径、提出对策, 以期对相关行业发展研究提供基础参考。

二、锂及其下游动力电池产业链构成与高质量发展的必要性

(一) 锂及其下游动力电池产业链构成

产业链指从原材料一直到终端产品制造的各生产部门的完整链条, 其实质是各产业相互之间供给与需求、投入与产出的关系, 也是对产业部门之间因技术经济联系而存在紧密关系的形象表述 [13,14]。本文将锂及其下游动力电池产业链划分为矿产资源端、冶炼加工端、关键材料与产品端、循环利用端4个环节, 各环节之间相互联动、相互制约、相互依存, 存在产品、生产技术、投资等关联方式 [15]。

矿产资源端主要指勘查与采矿, 涉及锂辉石、锂云母、盐湖等不同锂资源类型的开发利用; 处于产业链的最上游, 是冶炼加工产业不可或缺的原材料、形成整个产业链的物质基础。

冶炼加工端主要指有色金属冶炼加工业中的锂盐加工, 涉及碳酸锂、氢氧化锂、六氟磷酸锂、双氟磺酰亚胺锂等盐类产品的加工生产; 相应的产品规模、生产工艺、产品质量等条件制约着关键材料的生产与发展。

关键材料与产品端主要指汽车锂动力电池及其生产所需要的关键部件, 如含锂关键材料主要有三元正极材料、磷酸铁锂正极材料、电解液等; 关键材料的研发能力、生产技术水平等因素, 直接影响下游的产品性能与水平。电池产品主要分为三元动力电池、磷酸铁锂动力电池, 不同的技术发展路线同样影响关键材料种类的选择与发展。

循环利用端主要指对报废汽车动力电池中的锂元素进行提取再利用, 是提高资源利用效率的有效手段, 将直接缓解资源端的供应紧张态势。

(二) 锂及其下游动力电池产业链高质量发展的必要性

锂及其下游动力电池产业链的高质量发展, 将

突出表现为：国内锂资源得到综合、高效、绿色开发利用，深加工锂盐、关键材料、不同电池产品的核心技术获得突破，各类产品的质量保障、技术研发能力达到国际先进水平，报废的动力电池得到有序和充分地回收再利用，产业链各环节流通顺畅且规模与结构合理，产业链自主可控、科技创新协同、“短板”环节改善等态势良好。加快实施锂及其下游动力电池产业链高质量发展，必要性体现在以下四方面。

一是实现燃油车向新能源汽车平稳过渡，加速降低能源风险。我国石油资源匮乏，2021年石油进口依存度达到72%；能源消费尚未达峰，若继续加大石油使用量，将加剧国家能源安全风险。在交通领域，采用性能先进的动力电池可显著缩小燃油车与新能源汽车的驾驶体验差距，在支持实现新能源汽车与燃油车平稳过渡的同时，进一步降低交通领域石油消费量，缓解对外石油依赖。

二是支撑新能源电力的多场景应用，助力实现碳达峰、碳中和战略目标。高质量的锂动力电池作为一种储能装置，将高效利用风、光、水等新能源电力；还可规模化扩展到航空、航天、船舶等重大装备应用场景，为控制碳排放强度、改善清洁能源使用结构提供有力支撑。

三是加快形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。国际竞争趋于激烈，逆全球化趋势对国际供应链分工合作模式提出挑战。唯有驱动锂及其下游动力电池产业链高质量发展，实现产业链的自主可控，才能有效应对国际竞争、在关键时刻保障国内生产和供给不受影响，从而提升国内经济的自我循环水平。

四是支撑国家经济高质量发展。锂电产业是战略性新兴产业的重要组成部分，锂及其下游动力电池产业链迫切需要朝着国际价值链的中高端迈进，产品结构则转向高技术含量、高附加值的体系模式。形成上、下游各环节共同发力，协同创新效应显著，竞争力水平大幅提升，产业技术水平国际领先的产业链体系，支撑甚至引领国家经济的优质高效发展。

三、我国锂及其下游动力电池产业链现状

（一）资源端

我国锂资源种类丰富，储量排名世界第四位

（约 8×10^6 t），约占世界总储量的7% [16,17]。目前世界上大规模开采的锂资源主要是盐湖、锂辉石、锂云母；富锂黏土作为一种潜力资源，部分企业已在墨西哥开展生产试验，尚未进行大规模商业利用。我国同时拥有盐湖、锂辉石、锂云母3种资源，其中盐湖锂主要分布在青海省、西藏自治区，锂辉石主要分布在四川省，锂云母主要分布在江西省；也有一定规模的黏土型资源，具备良好的发展前景。

相比海外优质资源，国内锂资源存在硬岩品位相对较低，盐湖中成分复杂、镁锂占比较高，提取难度相对较大等特点。例如，四川省的甲基卡锂辉石品位为1.3%~1.5%，而澳大利亚格林布什锂辉石品位达2.1%；我国察尔汗、大柴旦、一里坪等盐湖的镁锂占比分别为1577、134、90.5，而智利阿塔卡玛盐湖、玻利维亚乌尤尼盐湖的镁锂占比仅为6.4、18.6。

我国锂资源的产量增速较快，但产量有限。2015—2020年世界锂矿产量年均增速为20%，而我国同期的年均增速高达45%；目前我国的产量为 7.5×10^4 t，约占世界总产量的17%。江西省、青海省是我国最重要的锂资源生产地，合计占我国总产量的80%。四川省、西藏自治区虽然拥有丰富的资源，但因环境保护约束，高寒、高海拔开发环境恶劣，基础设施建设周期长，短期内的产量增长十分有限。

国内资源开发市场较为集中，产量排名前5位的企业份额合计达93%。主要开采公司有宜春钽铌矿有限公司、青海盐湖工业股份有限公司、西部矿业集团有限公司、融达锂业有限公司、青海恒信融锂业科技有限公司、西藏矿业发展股份有限公司等。

与海外开采矿山相比，国内锂矿的提取生产成本偏高。2021年，世界主要锂矿的开采现金成本不到2900美元/t，澳大利亚优质锂辉石项目开采成本均不超全球平均水平；我国江西宜春锂云母、东西台吉乃尔等项目的提取成本高于3700美元/t，超出世界平均水平约30% [18]。

（二）冶炼加工端

我国生产的锂盐种类齐全，产量增长迅速。2015—2020年的平均增速为32%，2020年的产量为

2.46×10^5 t, 约占世界总产量的 67% [19]。形成了大量进口矿产资源进行冶炼加工、出口下游产品的基本格局。生产集中度较高, 前 5 家企业的市场份额占比超过 80%, 代表性企业有江西赣锋锂业股份有限公司、天齐锂业股份有限公司、盛新锂能集团股份有限公司、四川雅化实业集团股份有限公司等 [20,21]。锂深加工产品的产能规模仍处于扩张阶段, 但因进口锂矿资源供应的增量有限而未能利用全部产能。

新型双氟磺酰亚胺锂盐 (LiFSi) 有望成为第二代电池的电解质, 我国企业积极开展投资布局。2020 年, 以上海康鹏科技股份有限公司、深圳新宙邦科技股份有限公司为代表, 开始量产 LiFSi; 国内建设产能约 6800 t (占世界总产能 90%), 明显快于海外产能建设速度。

电池级碳酸锂、电池级氢氧化锂、六氟磷酸锂等深加工产品的生产技术与质量达到国际领先水平, 可满足国内下游关键材料企业应用需求, 同时向海外知名企业供货。例如, 江西赣锋锂业股份有限公司生产的电池级氢氧化锂产品, 为国际主流品牌的车用锂电池产品进行配套; 多氟多新材料股份有限公司生产的高纯晶体六氟磷酸锂产品, 向日本宇部兴产株式会社、韩国 Soulbrain 股份有限公司等国际主流的电解液企业供货。

我国企业的锂盐加工生产过程朝着智能化、绿色化方向发展。天齐锂业股份有限公司建成世界首条全自动化的电池级碳酸锂生产线, 年产能可达 2×10^4 t; 融捷股份有限公司等企业也正在建设高度自动化的锂盐工厂。锂盐加工属高耗能行业, 生产过程中产生污染物。部分矿石类提锂企业通过改进生产工艺、采用酸化窑外夹套循环加热等方式降低总能耗和“三废”排放。

(三) 关键材料与产品端

1. 正极材料

我国正极材料生产规模较大, 超过世界总产量的 50%。目前市场主流的汽车动力电池正极材料是三元材料、磷酸铁锂材料, 2020 年我国三元正极材料产量为 2.1×10^5 t, 约占世界产量的 40% [22]。三元正极材料的高镍低钴化是发展趋势, 2020 年国内中低端产品, 如镍钴锰多元材料 (NCM) 333、NCM523 的产量占比为 57%, 而 NCM811、镍钴铝

酸锂 (NCA) 等高端高镍产品的产量仅占 23%, 产品结构失衡。国内 NCA 材料产量不高, 主要原因在于: NCA 材料相比 NCM 技术壁垒更高, 对生产工艺、湿度等条件要求更为严格; 我国三元电池发展路径以 NCM 为主, 导致材料端、产品端难以产生联动效应、材料企业的 NCA 生产动力不足。

国内高端产品市场的集中度较高。以 NCM811 为例, 宁波容百新能源科技股份有限公司、天津巴莫科技有限责任公司市场份额合计高达 84%。在产品质量方面, 重点企业产品的品质良好, 进入了国际主流电池厂商的供应链。目前, 国内产品基本满足我国下游电池生产需求, 但高端正极前驱体材料仍部分依赖进口。

2020 年, 我国磷酸铁锂正极材料产量约为 1.42×10^5 t, 处于世界主导地位。磷酸铁锂安全性好、循环寿命长, 但因电池体积能量密度偏低而在国外较少生产。近年来, 国内无模组刀片电池等结构性创新大幅提升了磷酸铁锂电池的体积能量密度, 在补贴退坡情况下的性价比优于三元电池, 从而带动了材料端磷酸铁锂材料产量回升。国内磷酸铁锂动力电池市场化发展优于海外, 正极材料自产自销 (主要供应国内电池厂商), 相关企业具有较高的生产集中度。

在新材料研发和生产方面, 部分国内企业的超高镍材料生产技术进入国际前列, 如 Ni90 系三元材料实现国内外批量供货, Ni95 系产品完成国际客户验证, Ni98 系产品进入研发阶段。在镍钴锰铝 (NCMA) 四元正极材料方面, 国内少量企业已进行技术布局, 但整体上与国际先进水平存在差距。部分企业完成了富锂锰基材料的工艺定性和试生产, 保障了下游新电池产品的研制需求。

我国企业因技术研发起步较晚, 在关键材料的基础核心专利方面积累不足。例如, NCM 材料的基础核心专利为美国 3M 公司拥有, NCA 材料专利多由日本、韩国企业掌握。近年来, 国内科研院所、企业针对原始专利进行了一定的改性创新, 但因国际市场环境影响仍然受到较大制约。

2. 电解液

电解液由锂盐电解质、溶剂、添加剂组成。2020 年, 我国动力电池电解液出货量约为 8.8×10^4 t, 约占世界产量的 50% [23]; 出口量超过 3×10^4 t, 主要供应给日本、韩国企业 [24]。广州天赐高新材料

股份有限公司、深圳新宙邦科技股份有限公司等排名前5名的企业，合计产量占国内市场的78%。国内企业生产的六氟磷酸锂电解质可满足电解液生产需求，碳酸亚乙烯酯、氟代碳酸乙烯酯等大规模应用的电解液功能添加剂也已经实现国产化。国际主流电解液企业拥有独特的添加剂配方，我国企业在部分功能添加剂设计方面还存在进口依赖现象。

3. 动力电池

我国动力电池生产规模位居世界第一，2020年动力电池装机量为63.3 GW·h，约占世界装机量的40%。宁德时代新能源科技股份有限公司、比亚迪股份有限公司是我国动力电池的领先企业，国内的装机量合计占比达到70% [25,26]。目前，汽车动力电池的主流类型有NCM三元电池、NCA三元电池、磷酸铁锂；我国企业在NCA三元电池方面技术积累较弱，发展路线以NCM三元电池、磷酸铁锂电池为主。在电池包装集成方面，国内企业突破了NCM电池、磷酸铁锂无模组技术，在提高电池包能量密度的同时降低了生产成本。电池生产的高度自动化可提升产品一致性，国际一流企业的自动化率近80%；我国优势企业的自动化率接近50%，而不少企业仅为20%。

在电池技术发展趋势方面，高能量密度仍是核心因素。从电池所用正极材料的角度看，日本、韩国的电池企业分别在NCM体系、NCA体系、NCMA体系下研发出超高镍（镍含量≥90%）电池，部分企业宣布即将量产。在我国，蜂巢能源科技股份有限公司突破了NCMA电池技术，但量产工作仍在准备；磷酸锰铁锂电池在保留铁锂材料稳定性的基础上可提升能量密度10%~20%，一些企业形成了技术储备和产能布局；富锂锰基电池因其容量高、成本低、安全性好的理论优势而成为潜在发展方向，浙江遨优动力系统有限公司已实现小规模量产。在电解质形态方面，液态电池的能量密度（350 W·h/kg）已达理论极限，发展方向转为固液混合电池、全固态电池。国外企业的固态电池研究积累较多，研发投入力度大，而国内企业的固态电解质技术原始创新及经验积累薄弱。

（四）循环利用端

我国动力电池的循环利用尚处发展初期。2020年进入了首次动力电池规模化退役阶段，累计退役量

约为 2×10^5 t；但实际回收量仅为41%，回收再利用锂资源约为 2×10^4 t，循环利用效果不佳。目前，国内动力电池回收体系分为梯次利用、拆解回收再生利用两个循环过程。当动力电池余能不足80%后，按照“低功率电动车、电网储能、家庭储能、报废”的先后顺序进行梯次利用；根据不同电池的工作特性，磷酸铁锂电池因可循环次数较多而更适用于梯次利用。政府从规定回收主体、动力电池拆解作业要求、贮存与安全环保要求，提高回收企业门槛、动力电池中的镍钴锰锂回收率等多方面着手，发布了拆解回收再生利用方面的管理办法 [27~30]；构建了新能源汽车国家监测与动力蓄电池回收利用溯源综合管理平台，对汽车用动力电池开展全生命周期追溯，实现动力电池的来源可查、去向可追、节点可控。整体来看，现有政策缺乏强制性，动力电池报废后进入正规渠道的回收率仍然很低，产业秩序有待规范。

在动力电池回收技术方面，广东邦普循环科技有限公司、格林美股份有限公司达到世界先进水平，报废电池（包装完好）中的锂、镍、钴、锰等金属元素回收率高于现行政策或标准规定。

四、我国锂及其下游动力电池产业链发展面临的问题

（一）面临自然环境、生态保护约束，锂矿扩产受到限制

在短期内，四川省、西藏自治区等地的锂资源难以大规模开发利用。西藏扎布耶盐湖平均海拔4422 m，而智利阿塔卡玛盐湖，青海察尔汗、东西台吉乃尔等大部分盐湖的海拔均超过2000 m；海拔高导致温度低、卤水蒸发较慢，基础设施建设困难，较差的地理位置条件制约了潜在生产规模。因环境保护政策等影响，四川省锂资源扩产受到直接限制，虽然多家企业拥有采矿权，但进入正常开采阶段的企业数量很少。

（二）锂资源竞争态势趋于激烈，海外进口风险有所增加

全球碳排放约束日趋严格，各国重视本国锂及其下游供应保障。在美国，提出《能源资源治理倡议》 [31]以强化与资源丰富国家的矿业开发合作，

实施《美国供应链行政令》以针对大容量电池等产品开展供应链调查，成立能源部矿产资源可持续发展司以保障锂矿供应链安全，发布《2021—2030年美国锂电池国家蓝图》[32]来促进锂电池产业链投资。欧盟以多元化方式扩大海外锂矿供应来源、降低供应链安全风险，建立本土电池产业技术优势并加强二次利用[33]。可以看出，锂矿的供不应求态势将进一步加剧各国对锂资源的争夺；随着国际形势紧张化，我国锂资源进口高度依赖单一国家，潜在的供应风险有所显现。

（三）正极材料、电解液等核心专利因布局较晚而成为产业发展短板

正极材料是锂动力电池生产的关键，而三元正极材料相关核心专利由美国3M公司等掌握，国内外主流企业都需要购买专利授权；磷酸铁锂正极材料核心专利已被加拿大魁北克水电公司申请；电解液、隔膜基础的专利也被日本、韩国企业注册。我国企业开展关键材料的专利布局较晚，专利内容集中在功能、应用层面（如在配方比例上作调整和改良），在原始创新专利方面落后较多。国外企业依托其原始专利，逐步在锂电关键材料方面构筑起专利“屏障”，不可避免地导致我国企业在参与国际市场竞争时处于劣势地位；国外企业构建的专利布局不仅主导了利润率最高的技术环节，相应技术体系也愈发难以规避[10]。

（四）关键材料及电池技术与国际先进水平存在差距，新兴方向积累不足

虽然我国电池生产材料的产能规模居于世界前列，但高端产品与国外企业仍有差距。在高镍三元正极材料方面，日本、韩国企业研发起步早，技术成熟度高，国内企业的产品性能、生产工艺相比之下存在差距；部分高性能正极材料前驱体、电池电解液功能添加剂等，仍部分依赖进口。国内电池企业在单体电池的能量密度、制造精度、温度适应范围等方面较国际市场先进水平存在一定差距。此外，受基础研发不足因素制约，我国关键材料与电池技术体系的发展后劲不足，突出表现在新一代全固态电池方向的研发布局明显滞后于日本丰田汽车公司等优势企业，可能导致新兴方向的技术与产品差距继续拉大[34,35]。

（五）废旧动力电池资源二次回收体系不完备，产业秩序有待规范

我国新能源汽车行业发展迅速，未来动力电池退役量将快速增长。中国汽车技术研究中心有限公司研究数据表明，2025年我国动力电池累计退役总量将比2020年增长近4倍。充分利用二次资源是缓解资源供应紧张的重要手段，但目前锂动力电池回收规模较小，回收产业链体系尚未建立；回收产业集中度低，仍处产业秩序混乱阶段。发布的动力电池回收管理办法覆盖度不足，因小企业分布分散而加大了监管难度。二次利用生产过程中分解出的氢氟酸和其他含氟化合物，相应的运输、处置可能对环境产生腐蚀性和毒性，潜在的生态环保问题不容忽视。退役电池检测沿用车用动力电池标准、检测时间与资金成本高、电池残值评估技术及人才储备不足等，也是回收产业优质发展的阻碍。

五、我国锂及其下游动力电池产业链发展目标和发展路径

（一）锂及其下游动力电池产业链发展目标

围绕国家发展战略需求，提升产业基础能力和产业链水平。强化国内资源保障能力并提高资源综合利用水平，加强海外不同区域的资源开发合作，在合理利用国内国际两种资源的基础上进行“双循环”。加大科技研发投入，开展前沿科技研究，推动全产业链协同创新，提高资源循环利用水平，保障我国锂及其下游动力电池产业竞争力全球领先。

1. 2025年目标

在资源端保持勘查投入，平稳提升国内供应能力，促进资源综合利用水平提高。鼓励企业与各国开展资源勘查与开发合作，多元化海外进口来源、锂资源开发种类，合理降低锂资源进口的集中度。在冶炼加工端，逐步降低生产能耗、提升智能化工厂比例。在材料和产品端，优化产品结构，增强国际市场竞争力，将高端产品占比由当前的约25%提升至40%以上。合理增加科技研发投入，梳理并解决“卡脖子”技术，缩小新一代电池方向的国内外技术差距。改善循环利用管理水平，构建动力电池回收系统全国统一平台，使得报废动力电池回收率在95%以上，有色金属回收率全面达到国家标准。

2. 2035年目标

资源端综合利用水平大幅提升，锂资源来源分散多样，供应紧张局面显著缓解，采选技术水平稳步增强。冶炼加工产业规模适度，实现较高程度的自动化、智能化、绿色化生产。在材料和产品端，国际市场竞争力保持领先，高端产品占比不低于70%；全产业链科技协同创新的效应凸显，基础研发能力与原创新理论水平显著提升，关键技术体系达到世界先进水平。资源循环利用体系成熟完善，报废动力电池实现全面有序的回收利用，有价金属回收率进一步提升，支撑锂资源“国内大循环”。

（二）锂及其下游动力电池产业链发展路径

1. 多维度出发，构建安全稳定的资源供应体系

加大国内找矿力度，提高锂矿勘查区块投放数量；着眼合理、有序、环保，推进国内锂资源开发利用，提高国内锂资源供应能力，保障国内资源供给。

从多元化进口来源、多元化锂资源供给种类两方面，提高锂资源供应的稳定度。关注国际锂资源勘查和生产的新动向，主动谋划从多个来源地进口锂资源以分散进口来源地。推进富锂黏土等资源类型作为新供应来源的规模化生产，丰富锂资源的供应种类。

加强锂资源储备工作，包括产品储备、矿产地储备：对于前者，适当储备初级、高纯级锂盐，重点储备国内生产能力不强的关键材料类型；对于后者，将开发条件较差、短期内难以开采利用的矿山纳入矿产地储备名录。

加快动力电池回收管理体系构建，提升二次锂资源供应能力。合理提高二次回收市场的集中度，提高回收企业的基础门槛；将相关回收政策提升至法律层面，依法实施并加强监管，确保回收企业规范建立动力电池生命周期追溯系统；健全退役动力电池检测标准体系，保障废旧锂电池回收利用的规范有序，实质性提升资源利用效率。

2. 攻关关键材料和电池新技术，强化锂电技术体系和人才储备

在现有锂电池技术体系的基础上，发展超高镍低钴/无钴多元正极材料、新型铁锂正极材料及相应的单体电池，具备大规模量产条件。着眼应用潜力，积极研发基于富锂锰基正极材料、高压镍锰尖

晶石正极材料的关键材料及其电池；建立要素完整的锂电技术体系，营造生态良好的科研环境。

进一步加强半固态电池电解质技术研发，以此为技术过渡并增强基础研究理论，为全固态电池理论研究与技术创新提供坚实条件。着眼全固态电池材料体系，积极开展国际专利布局，形成高能量密度、高安全性的新一代电池技术体系的自有知识产权与自主产品应用。

3. 围绕关键材料与产品实施创新，带动产业链各环节协同发展

在资源端，持续推进自动化采矿装备、高速通信网络、智能生产管理系统平台等的配置与应用，对矿山生产对象和过程进行动态化、智能化监控；进一步提升充填采矿法的应用比例，保持绿色、无废化发展。针对矿石类资源，开展分选前的预富集工艺与新型高效预选设备的研发及应用，保障选矿回收率提升目标；加大矿石浮选药剂研发力度，重点开发高效环保、耐低温、选择性强的新型捕收剂。针对盐湖类资源，进一步优化各类提取工艺所需关键药剂（如沉淀剂、萃取剂等），发展适合国情的低成本、高效率、绿色环保的盐湖提锂技术工艺。

在冶炼加工端，全面实现生产工艺的全流程自动化控制；提升化学计量精准度，降低能源与辅材消耗强度，提高产品性能的稳定性及一致性；积极实施政策引导，规范锂盐加工企业准入条件，出台加工厂绿色生产标准，优化行业产能结构。

在循环利用端，提高机械化作业程度，强化不同废旧动力电池的分类管理，提高有价金属的回收率；着力提升电解液等回收难度大、经济价值低的关键材料综合回收利用水平，发展短流程、闭路循环的回收工艺，实施回收过程中的废液无害化管理并降低污染物排放强度。

六、对策建议

（一）注重顶层设计的完备性，形成全产业链一体化管理模式

建议相关部委牵头，组建国家锂电产业链管理协调小组，锂及其下游动力电池产业链各环节的重点企业密切配合。该小组负责掌握我国产业链各环节发展态势，参与相关政策的制定、实施及评估，

明确已建成重点平台的实施情况、各环节发展制约因素等；密切关注国际产业链相关的技术发展动态、发布的政策措施、推出的重大平台等，适时开展研讨，剖析国内产业链短板及管理缺陷；有效整合资源并集中力量实施产业链薄弱环节突破，及时“补链”“强链”，形成全产业链一体化的高效管理模式。

（二）合理加大资金支持力度，促进基础研究与应用研究水平互促提升

建议成立国家锂及其下游动力电池产业链发展基金，针对产业链薄弱环节的基础研究需求，持续性地给予投入支持；针对扶持项目，科学制定符合基础研究特点的评价与考核机制，实行半弹性化、长周期的评估制度，适当降低评估频率并精准实施分类评价，兼顾资金使用效率与激发创新活力。同步支持针对重点先进材料和锂电技术创新研究资源需求，鼓励行业龙头企业牵头项目申报，逐步积累研发与生产经验，实现基础研究与应用研究的协调、连贯、互促。

（三）鼓励上、下游环节的企业开展合作，增强产业链协同效应

建议国家锂电产业链管理协调小组牵头，搭建锂及其下游动力电池产业链企业交流平台，鼓励国内锂电产业链各环节企业加入；配套鼓励政策，定期开展线下交流，促进锂电产业链上、下游企业之间的技术交流与产业合作。注重上、下游企业的技术衔接与配套，促进上、下游企业开展生产技术合作，形成密切合作、协同创新、共生发展的产业链生态。

（四）强化“产学研”合作，培育产业链复合型科技人才

依托高校教育资源优势，强化锂及其下游动力电池产业链的学科体系建设，对照产业需求开展专业交叉融合，精准培养产业链复合型的技术与管理人才。依托国内不同区域的锂资源禀赋，围绕地质与环境、开发工程技术、资源综合利用等方向，重组和优化国家重点实验室，保障产业链上游基础研究需求，匹配应用研究发展创新需要。鼓励科研院所、高校积极实施技术成果转化，支持企业研发中心与相关机构开展深度合作，促进以市场需求为导

向的“产学研”合作及成果产出。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 5, 2022; **Revised date:** May 20, 2022

Corresponding author: Chen Qishen is a research fellow from the Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. His major research fields include mineral resource planning, investigation, and evaluation. E-mail: chenqishen@126.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Supply Chain Security of Key Metal Minerals and Their Materials Industry” (2021-XBZD-06); National Natural Science Foundation of China project (92062111)

参考文献

- [1] 北京安泰科信息股份有限公司. 2015年有色金属市场发展报告——锂 [R]. 北京: 北京安泰科信息股份有限公司, 2015. Beijing Antaiko Information Co., Ltd. Non-ferrous metal market development report in 2015: Lithium [R]. Beijing: Beijing Antaiko Information Co., Ltd., 2015.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 四部委关于印发《促进汽车动力电池产业发展行动方案》的通知 [EB/OL]. (2017-03-02)[2022-03-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-03/02/content_5172254.htm#1. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Notice of four ministries and commissions on printing and distributing the *Action plan for promoting the development of the automotive power battery industry* [EB/OL]. (2017-03-02)[2022-03-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-03/02/content_5172254.htm#1.
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范公告管理暂行办法(2019年本) [EB/OL]. (2020-01-02)[2022-03-01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_c1073817285c4b26a9fb34ed75a2e69d.html. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Interim measures for the administration of industry specifications for the comprehensive utilization of waste power batteries for new energy vehicles(2019 version) [EB/OL]. (2020-01-02)[2022-03-01]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2020/art_c1073817285c4b26a9fb34ed75a2e69d.html.
- [4] 王瑞江, 王登红, 李健康, 等. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用 [M]. 北京: 地质出版社, 2015. Wang R J, Wang D H, Li J K, et al. Rare and rare earth scattered mineral resources and its development and utilization [M]. Beijing: Geology Press, Beijing, 2015.
- [5] 王登红, 刘善宝, 于扬, 等. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究 [J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1444-1453. Wang D H, Liu S B, Yu Y, et al. Exploration progress and development suggestion for the large-scale mining base of strategic critical mineral resources in Western Sichuan [J]. *Acta Geological Sinica*, 2019, 93(6): 1444-1453.
- [6] 李成秀, 程仁举, 刘星. 我国锂辉石矿选矿技术研究现状及展

- 望 [J]. 矿产综合利用, 2021 (5): 1-8.
- Li C X, Cheng R J, Liu X. Research status and prospects of spodumene ore beneficiation technology in China [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021 (5): 1-8.
- [7] 汪泰, 胡真, 王威. 锂铍稀有金属选矿及综合利用研究现状和展望 [J]. 有色金属(选矿部分), 2020 (6): 24-29.
- Wang T, Hu Z, Wang W. Research status and prospects of lithium beryllium rare metals beneficiation and comprehensive utilization [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Part), 2020 (6): 24-29.
- [8] 胡萍, 刘明, 宋青荣, 等. 我国锂盐市场行情及未来发展趋势 [J]. 新材料产业, 2019 (6): 47-50.
- Hu P, Liu M, Song Q R, et al. China's lithium salt market and future development trend [J]. Advanced Materials Industry, 2019 (6): 47-50.
- [9] 陈立泉. 锂离子电池改变世界——2019年诺贝尔化学奖成果简析 [J]. 科技导报, 2019, 37(24): 36-40.
- Chen L Q. Lithium-ion batteries change the world: A brief analysis of the results of the 2019 Nobel Prize in chemistry [J]. Science and Technology Review, 2019, 37(24): 36-40.
- [10] 黄学杰, 赵文武, 邵志刚, 等. 我国新型能源材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 60-67.
- Huang X J, Zhao W W, Shao Z G, et al. Development strategies for new energy materials in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 60-67.
- [11] 涂康安. 锂离子电池三元正极材料现状及发展趋势 [J]. 当代化工研究, 2021 (17): 17-18.
- Tu K A. Present situation and development trend of ternary cathode materials for lithium-ion batteries [J]. Modern Chemical Research, 2021 (17): 17-18.
- [12] 安信证券股份有限公司. 角力与共生——全球动力电池竞争格局分析 [EB/OL]. (2018-11-28)[2022-03-15]. http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2018/11/28/82f4da1f-f781-40b1-a14c-547f25bc1a8c.pdf.
- Essence Securities Co., Ltd. Wrestling and symbiosis: Analysis of the global power battery competition pattern [EB/OL]. (2018-11-28) [2022-03-15]. http://pg.jrj.com.cn/acc/Res/CN_RES/INDUS/2018/11/28/82f4da1f-f781-40b1-a14c-547f25bc1a8c.pdf.
- [13] 刘贵富, 赵英才. 产业链: 内涵、特性及其表现形式 [J]. 财经理论与实践, 2006, 27(3): 114-117.
- Liu G F, Zhao Y C. Content, characteristics and formats of industrial chains [J]. The Theory and Practice of Finance and Economics, 2006, 27(3): 114-117.
- [14] 杨公朴, 夏大慰. 现代产业经济学 [M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2002.
- Yang G P, Xia D W. Modern industrial economics [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2002.
- [15] 苏东水. 产业经济学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- Su D S. Industry economics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [16] National Minerals Information Center. Nickel statistics and information [EB/OL]. (2020-01-01)[2022-03-15]. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/nickel-statistics-and-information>.
- [17] 中华人民共和国自然资源部. 2020年全国矿产资源储量统计表 [EB/OL]. (2021-11-22)[2022-04-01]. http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/kczycltjb/202111/t20211122_2706327.html.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Statistical table of national mineral resources reserves in 2020 [EB/OL]. (2021-11-22)[2022-04-01]. http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/kczycltjb/202111/t20211122_2706327.html.
- [18] S & P Global Market Intelligence. Mine economics 2021(Calendar) [EB/OL]. (2022-01-01)[2022-03-20]. <https://www.capitaliq.spglobal.com/web/client?auth=inherit#industry/mine>.
- [19] 北京安泰科信息股份有限公司. 2020年有色金属市场发展报告——锂 [R]. 北京: 北京安泰科信息股份有限公司, 2020.
- Beijing Antaike Information Co., Ltd. Non-ferrous metal market development report in 2020: Lithium [R]. Beijing: Beijing Antaike Information Co., Ltd., 2020.
- [20] 江西赣锋锂业股份有限公司. 江西赣锋锂业股份有限公司2020年年度报告 [EB/OL]. (2021-03-15)[2022-03-01]. <http://www.ganfenglithium.com/>.
- Jiangxi Ganfeng Lithium Industry Co., Ltd. Annual report of Jiangxi Ganfeng Lithium Industry Co., Ltd. in 2020 [EB/OL]. (2021-03-15)[2022-03-01]. <http://www.ganfenglithium.com/>.
- [21] 天齐锂业股份有限公司. 天齐锂业股份有限公司2020年年度报告 [EB/OL]. (2021-04-28)[2022-03-01]. <http://www.tianqilithium.com/relationship/achievement.html>.
- Tianqi Lithium Industry Co., Ltd. Annual report of Tianqi Lithium Industry Co., Ltd. in 2020 [EB/OL]. (2021-04-28)[2022-03-01]. <http://www.tianqilithium.com/relationship/achievement.html>.
- [22] 鑫椏资讯研究中心. 2020年三元产量21万吨 明年有望增长24% [EB/OL]. (2020-12-15)[2022-04-01]. <http://www.iccsino.com.cn/>.
- Xinluo Information Research Center. The ternary output of 210 000 intons, 2020 is expected to increase by 24% next year [EB/OL]. (2020-12-15)[2022-04-01]. <http://www.iccsino.com.cn/>.
- [23] 高工产研锂电研究所. 2020中国电解液市场复盘 [EB/OL]. (2021-01-01)[2022-03-01]. <https://www.gg-lb.com/art-42136.html>.
- Lithium Battery Research Branch of Gaogong Industry Research Institute. China's electrolyte market resumed in 2020 [EB/OL]. (2021-01-01)[2022-03-01]. <https://www.gg-lb.com/art-42136.html>.
- [24] 观研天下(北京)信息咨询有限公司. 2021年中国消费类锂离子电池市场分析报告——市场运营态势与发展定位研究 [R]. 北京: 观研天下(北京)信息咨询有限公司, 2021.
- Guanyan Tianxia(Beijing) Information Consulting Co., Ltd. Analysis report of China's consumer lithium-ion battery market in 2021: Research on market operation situation and development orientation [R]. Beijing: Guanyan Tianxia (Beijing) Information Consulting Co., Ltd., 2021.
- [25] 高工产研锂电研究所. 2021年中国锂电池行业调研报告 [EB/OL]. (2021-03-19)[2022.04.01]. <https://www.gg-lb.com/art-42434.html>.
- Lithium Battery Research Branch of Gaogong Industry Research Institute. Research report on China's lithium battery industry in 2021 [EB/OL]. (2021-03-19)[2022-04-01]. <https://www.gg-lb.com/art-42434.html>.
- [26] 高工产研锂电研究所. 新能源汽车产业链数据库 [R]. 北京: 高工产研锂电研究所, 2021.
- Lithium Battery Research Branch of Gaogong Industry Research Institute. Database of new energy automobile industry chain [R]. Beijing: Lithium Battery Research Branch of Gaogong Industry

- Research Institute, 2021.
- [27] 中华人民共和国工业和信息化部. 符合《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件》企业名单(第一批) [EB/OL]. (2018-09-03)[2022-04-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5438758.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. List of enterprises(the first batch) that meet the *Industrial standards and conditions for comprehensive utilization of waste power batteries for new energy vehicles* [EB/OL]. (2018-09-03)[2022-04-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/content_5438758.htm.
- [28] 中华人民共和国工业和信息化部. 符合《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件》企业名单(第二批) [EB/OL]. (2020-12-16)[2022-04-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/zyjy/art/2020/art_e9a3e4aa47dc40deb59322c5fe8e48de.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. List of enterprises(the second batch) that meet the *Industrial standards and conditions for comprehensive utilization of waste power batteries for new energy vehicles* [EB/OL]. (2020-12-16)[2022-04-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/zyjy/art/2020/art_e9a3e4aa47dc40deb59322c5fe8e48de.html.
- [29] 中华人民共和国工业和信息化部. 符合《新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件》企业名单(第三批) [EB/OL]. (2021-11-23)[2022-04-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/zyjy/art/2020/art_e9a3e4aa47dc40deb59322c5fe8e48de.html.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. List of enterprises(the third batch) that meet the *Industrial standards and conditions for comprehensive utilization of waste power batteries for new energy vehicles* [EB/OL]. (2020-12-16) [2022-04-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/jns/zhlyh/art/2021/art_e0f11c4701f44fa6b2e124c8cceed5db.html.
- [30] 咎文字, 马北越, 刘国强. 动力锂电池回收利用现状与展望 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2020, 48(5): 5-9.
Zan W Y, Ma B Y, Liu G Q. Current situation and prospect of recovery and utilization of power lithium batteries [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2020, 48(5): 5-9.
- [31] Bureau of Energy Resources of U.S. Department of State. Energy resource governance initiative(ERGI) [EB/OL]. (2020-12-01) [2022-04-03]. https://www.state.gov/wp-content/uploads/2020/12/Marketing-Materials_ERGI-One-Pager_2.20.20.pdf#:~:text=ERGI%20is%20a%20U.S.%20Department%20of%20State%2C%20Bureau,best%20practices%2C%20and%20encourage%20a%20level%20playing%20field.
- [32] Federal Consortium for Advanced Batteries. National blueprint for lithium batteries 2021—2030 [EB/OL]. (2021-06-01)[2022-04-03]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf.
- [33] European Commission. Critical raw materials resilience: Charting a path towards greater security and sustainability [EB/OL]. (2021-02-09)[2022-02-28]. <http://imformed.com/wp-content/uploads/2021/02/NYBERG-Mineral-Recycling-Forum-2021-ONLINE-IMFORMED.pdf>.
- [34] 刘国芳, 赵立金, 王东升. 国内外锂离子动力电池发展现状及趋势 [J]. 汽车工程师, 2018 (3): 11-13.
Liu G F, Zhao L J, Wang D S. Development status and trend of lithium-ion battery in China and foreign countries [J]. *Auto Engineer*, 2018 (3):11-13.
- [35] 汪月英, 谢海明. 国内外动力电池产业发展现状与趋势 [J]. 内燃机与配件, 2018 (2): 205-206.
Wang Y Y, Xie H M. Development status and trend of power battery industry at home and abroad [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2018 (2): 205-206.