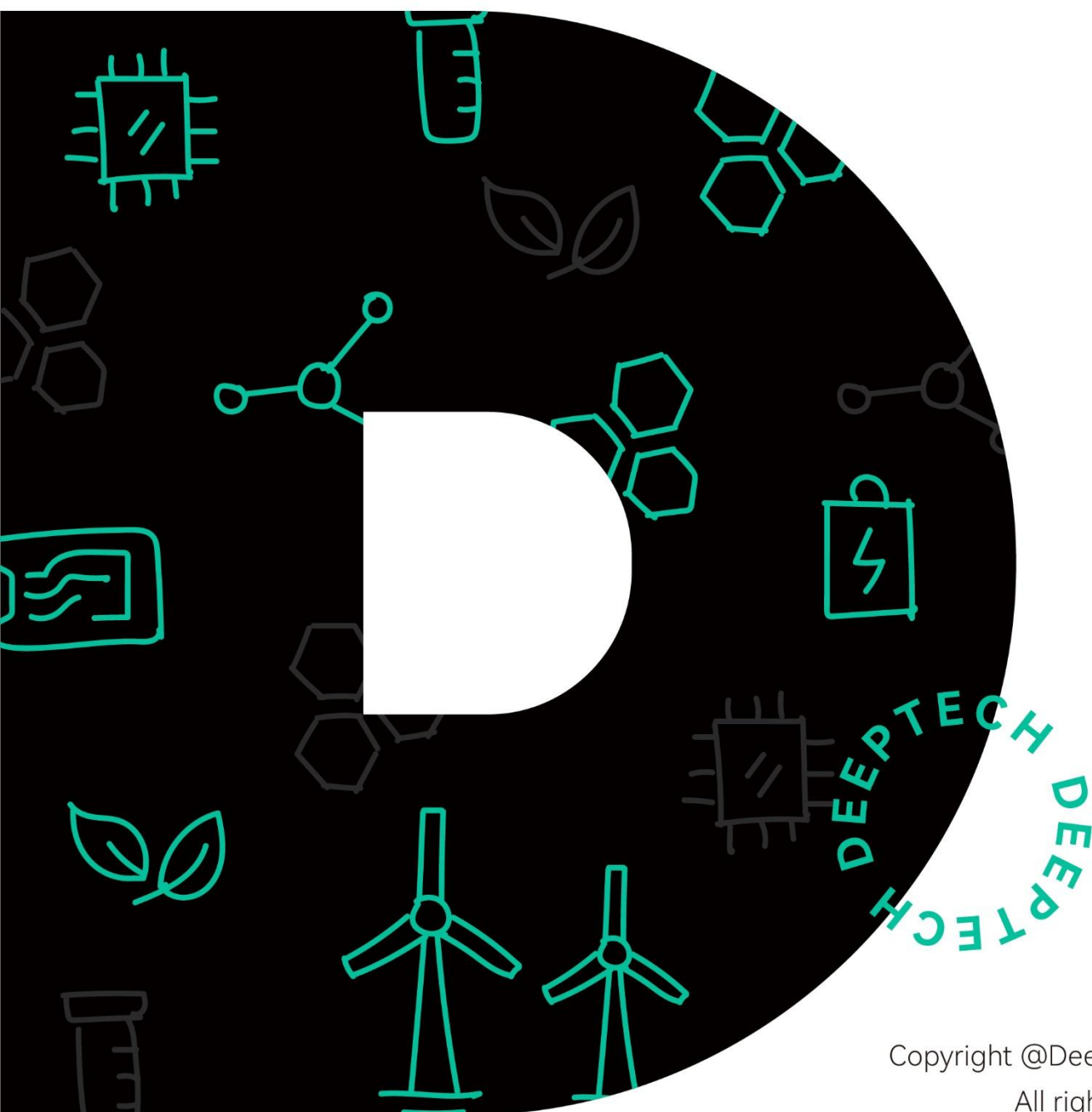


弥补产业薄弱环节， 突破关键材料困境

2022年中国关键新材料技术及创新生态
发展图景研究报告




DEEPTECH

Copyright @DeepTech 2022.
All rights reserved.



弥补产业薄弱环节， 突破关键材料困境

2022年中国关键新材料技术及创新生态
发展图景研究报告

- 03 **序言**
- 04 **Chapter 1 先进半导体材料**
第三代半导体材料“超越摩尔定律”，
成为半导体产业新的发展重心
- 20 **Chapter 2 新型锂电材料**
锂电材料产业生态逐渐成熟，
低成本、高性能、高安全性成为主要发展方向
- 39 **Chapter 3 氢能材料**
新兴清洁能源载体，突破氢能关键材料瓶颈是
产业发展的关键
- 54 **版权说明**
- 

序言

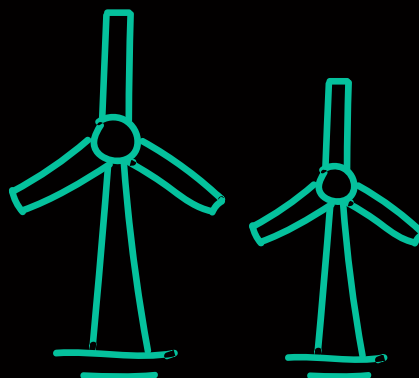
什么是关键新材料？新材料是指新近发展或正在发展的、具有优异性能的结构材料和有特殊性质的功能材料。在当前新一代信息技术、新能源、智能制造等新兴产业迅速崛起的背景下，叠加中国“双碳”目标对新材料市场需求的拉动，部分处于产业链关键位置、环节的新材料地位愈加凸显，这里将它们称作关键新材料。

2022年正值中国产业升级与“双碳”政策推进的关键阶段，半导体和新能源行业再度成为关注的焦点。能否在这两个领域取得突破一定程度上决定了产业升级和“双碳”政策的落地进程。

产业升级先锋，先进半导体材料位置突出。随着第四次工业革命到来，大量新技术需要依靠芯片来实现，但在过去的几十年间，中国的半导体材料过度依赖进口，无法自给自足的半导体产业限制了中国信息技术产业的发展。先进半导体材料作为信息技术产业的基石，在国际局势愈加动荡的背景下，其供需矛盾日益凸显，在诸多关键新材料中的地位也逐渐突出。

“双碳”目标下新能源材料重要性凸显：锂离子电池材料需求猛增，氢能材料蓄势待发。随着中国“双碳”目标从战略到落地，各行业开始施行减碳措施，碳排放占全中国终端碳排放15%的交通领域势必要率先做出改革。使用电能、氢能代替传统化石能源的新能源汽车是交通领域减碳的首选方案。目前已经广泛使用的锂离子电池和极具应用前景的氢燃料电池是新能源汽车的核心，其材料发展决定了中国新能源汽车产业的进步，地位的重要性显而易见。

本报告聚焦先进半导体材料、新型锂电材料和氢能材料三个领域，以关键新材料前沿技术为基础，从产业发展的驱动力出发，呈现中国产业发展图景，绘制研究体系图谱，以飨读者。



Chapter 1

先进半导体材料

- 第三代半导体材料战略性、先导性地位凸显
- 中国第三代半导体材料技术与全球先进水平缩小、产业集聚态势正在形成
- 中国第三代半导体技术创新生态发展迅速及未来展望

第三代半导体材料战略性、先导性地位凸显

第三代半导体材料，指带隙宽度明显大于 Si (1.1eV) 和 GaAs (1.4eV) 的宽禁带半导体材料，主要包括 III 族氮化物（如 GaN、AlN 等）、碳化硅 (SiC)、氧化物半导体（如 ZnO、Ga₂O₃ 等）和金刚石等宽禁带半导体。当前具备产业化条件的以 SiC 和 GaN 为主，AlN、ZnO、Ga₂O₃、金刚石等宽禁带半导体大多处于实验室研究阶段，产业化尚需时日。

第三代半导体材料性能更加优异。相对于 Si、GaAs 和 InP，第三代半导体材料具有高击穿电场强度、高热导率、高电子饱和率、高漂移速率以及高抗辐射能力等优越性能，这些优势有望大幅降低装置的损耗和体积/重量，因而第三代半导体材料在高功率、高频率、高电压、高温、高光效等领域具有难以比拟的优势和广阔的应用前景。

参数	单位	Si	SiC	GaN	金刚石
禁带宽度	E_g (eV)	1.12	3.26	3.37	5.45
介电常数	ϵ_r	11.8	10	9.5	5.5
迁移率	μ_n (cm ² /V·s)	1350	800	1250	4500
击穿电场	E_r (10 ⁶ V/cm)	0.3	3.0	3.3	10
饱和漂移速度	V_{sat} (10 ⁷ cm/s)	1.0	2.5	2.2	2.7
热导率	λ (W/cm·K)	1.3	4.9	2	20

表1 | 传统半导体材料与第三代半导体材料电学参数比较（来源：DeepTech）

第三代半导体材料成为半导体产业新的关注点。首先，传统半导体材料遵循摩尔定律演进趋势，随着制程微缩的难度和成本指数级上升，摩尔定律脚步放缓，以新材料、新结构和新工艺为特征的“超摩尔定律”成为产业发展的新方向。其次，能源危机和环保压力日益凸显，第三代半导体材料在功率电子、光电子和微波射频领域具有 Si 器件所不具备的优异性能，以 SiC 和 GaN 为代表的第三代半导体成为产业转型升级驱动因素。第三，半导体产业是国家核心竞争力，建立自主可控集成电路

第三代半导体材料战略性、先导性地位凸显

产业体系是国家重要的发展战略。在第一代半导体集成电路竞赛中，中国大幅落后于国际先进水平，但是在第三代半导体集成电路领域中国与国际先进水平的差距相对较小，有可能实现“弯道超车”。

第三代半导体材料是支撑制造业产业升级的重要保证。第三代半导体材料适用于中高压电力电子转换、毫米波射频和高效半导体光电子应用。可以应用于光伏、风能、4G/5G 移动通信、高速铁路、电动汽车、智能电网、大数据/云计算中心、半导体照明等各个领域。

如 4G/5G 通信基站和终端使用的 GaN 微波射频器件和模块、高速铁路使用的 SiC 基牵引传动系统、光伏电站、风能电场和电动汽车使用的 GaN 或 SiC 电能逆变器或转换器、智能电网使用的 SiC 大功率开关器件、工业控制使用的 GaN 或 SiC 基电机马达变频驱动器，大数据/云计算中心使用的 GaN 或 SiC 基高效供电电源，半导体照明中使用的 GaN 基高亮度 LED 等。

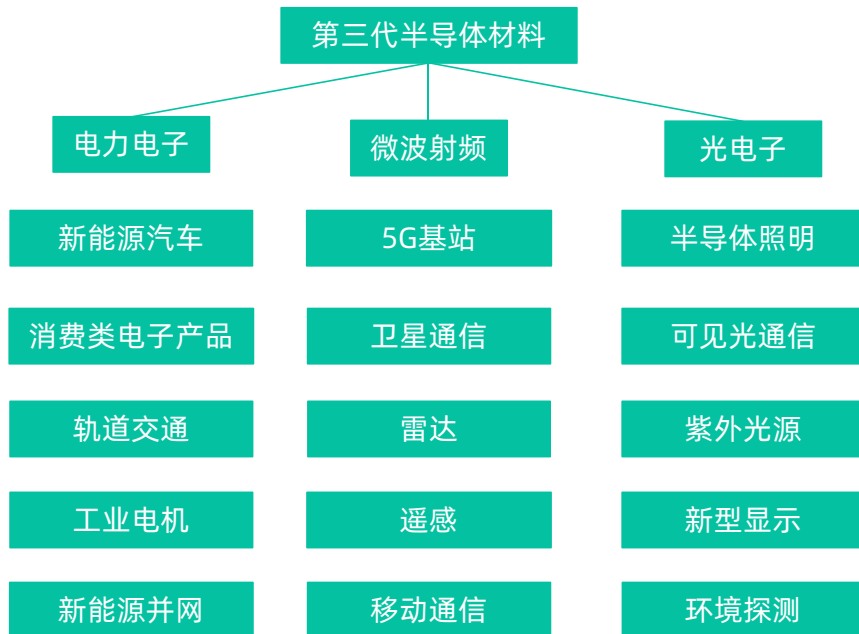


图1 | 第三代半导体材料主要应用领域（来源：DeepTech）

关键技术取得突破，与全球先进水平差距缩小

通过国家和地方的大力支持，中国第三代半导体材料发展迅速，形成了比较完整的技术链，部分关键技术指标达到国际先进水平。

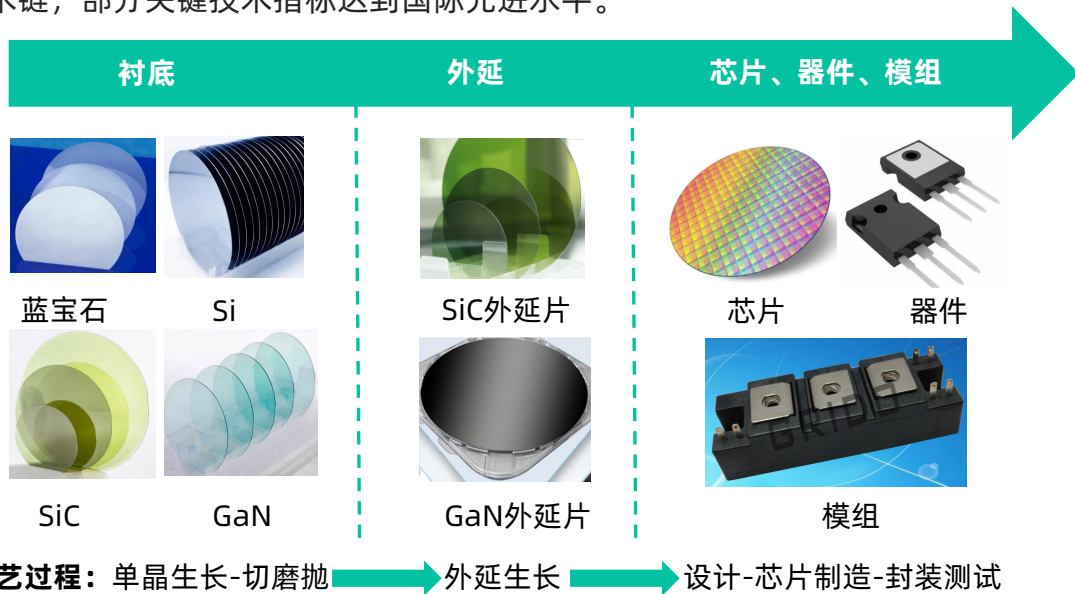


图2 | 第三代半导体材料主要技术环节 (来源: DeepTech)

在 SiC 衬底及外延方面: 中国已经实现 4 英寸 SiC 衬底的量产，开发出 6-8 英寸 SiC 单晶样品，衬底质量与国际水平尚存在一定差距。在 SiC 外延方面，中国实现了 4-6 英寸 SiC 外延片的量产，可以满足 3.3kV 及以下功率器件制备需求，而超高压 (>10kV) SiC 功率器件所需的 N 型 SiC 外延片以及双极型 SiC 功率器件所需的 P 型 SiC 外延片等方面还处于研究阶段。

在 GaN 衬底及外延方面: 中国形成了具有自主知识产权的氢化物气相外延 (HVPE) 技术，实现了 2 英寸自支撑 GaN 衬底量产和 4 英寸小批量出货，实现 6 英寸 GaN 单晶衬底研发，晶体质量达到了国际先进水平。在 GaN 外延方面，根据衬底的不同主要分为 GaN-on-sapphire、GaN-on-Si、GaN-on-SiC、GaN-on-GaN 四种。GaN-on-sapphire 主要应用在 LED 市场，主流尺寸为 4 英寸；GaN-on-Si 主要应用于电力电子和光电子市场，实现批量生产 6-8 英寸 Si 上 GaN 外延片，克服了大尺寸 Si 衬底上 GaN 外延材料的开裂和翘曲等关键技术问题，部分技术处于国际先

关键技术取得突破，与全球先进水平差距缩小

进水平；GaN-on-SiC 主要应用在微波射频市场，中国已成功生长出高质量的 4 英寸 SiC 衬底上 GaN HEMT 器件外延片；GaN-on-GaN 主要应用市场是蓝/绿光激光器，中国还未实现产业化。

在电力电子器件方面：中国多家企业和科研机构已经掌握了 SiC SBD 和 JFET 的量产技术，实现 650V-1700V 的 SiC SBD 产品大规模出货以及 3300V SiC SBD 产品样品。研制出 650V-1700V 的 SiC MOSFET 产品，尚不具备产业化能力。GaN 电力电子器件方面，已经实现了 650V 及以下 Si 上 GaN 电力电子器件的产业化应用，但主要以分立器件为主，系统集成度和导通电阻等关键指标与国际先进水平有差距；已经研发出面向新能源汽车应用的 1200V Si 上 GaN 器件，尚未取得应用突破。

在微波射频器件方面：GaN 微波射频器件主要包括 SiC 基 GaN、Si 基 GaN 和金刚石基 GaN 的功率放大器。对于 SiC 基 GaN 工艺，主要应用场景是军事和国防领域的雷达、卫星通信，对输出功率要求比较高，中国已经研制出覆盖 C 波段和 K_a 波段多款军用 GaN HEMT 及 MMIC；在民用方面，中国推出了用于无线通信基站的 GaN 微波功率管，但在可靠性、工艺技术方面还存在较大差距。对于 Si 基 GaN 器件来说，主要应用场景是规模巨大的 5G 通信系统，输出功率要求不高，对低成本、高性价比的要求相对比较高，中国已经推出了相关产品，但还未大规模应用。对于金刚石基 GaN 射频器件来说，主要应用场景是军事和国防用雷达、卫星通信，对输出功率要求比较高，目前处于实验室研发阶段。

在光电子器件方面：LED 技术与国际差距较小，部分技术国际领先。目前中国在蓝宝石衬底上制备的功率型白光 LED 产业化光效超过 160lm/W，在 Si 衬底上制备的 LED 产业化光效超过 150lm/W，处于国际领先水平。在高端照明如汽车照明，核心专利技术由美国、德国、日本掌握。在新型显示方面，Micro-LED 作为下一代显示技术的重要技术路线，中国从关键装备到芯片、封装、驱动、应用系统，国内企业也进行了全面布局。

区域发展各具特色，产业集群正在形成

中国半导体照明产业已经有 20 多年的发展历程，政府高度重视技术创新和产业发展，产业布局相对完善，已经成为全球最重要的半导体照明产品生产国。中国第三代半导体电力电子、射频及光电子产业发展时间相对较短，从中央到地方密集出台政策措施扶持产业发展，第三代半导体产业集聚态势正在形成。

国家层面，2015 年国务院印发了《中国制造 2025》国家战略，提出了发展第三代半导体材料的任务和要求；随后，国家各部委相继出台了《“十三五”国家科技创新规划》、《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》等多项重要规划，均布局了第三代半导体相关内容。面向“十四五”，第三代半导体材料相关内容已经写进“十四五”国家发展规划。

地方层面，北京、深圳、广东、福建、江苏、浙江、湖南等省市政府先后出台相关政策（不包括 LED），第三代半导体技术和产业发展均被纳入地方“十三五”和“十四五”相关领域规划内容。各地区依托当地优势研究机构和企业，通过推进技术成果转化、资本投资等多种形式，推动第三代半导体产业发展。

发布时间	政策名称	主要内容
2015 年	《中国制造2025》	提出发展第三代半导体材料的任务要求
2016 年	《“十三五”国家科技创新规划》	发展先进功能材料技术，重点是第三代半导体材料
2019 年	《重点新材料首批次应用示范指导目录》	GaN 单晶衬底、外延片
2020 年	《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展若干政策的通知》	在新一代半导体技术领域推动创建各类平台
2021 年	《国家“十四五”规划纲要》	推进 SiC、GaN 等宽禁带半导体材料发展
2021 年	《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》	加快培育布局第三代半导体等一批未来产业

表2 | 中国第三代半导体材料相关政策（来源：各部委网站、DeepTech）

区域发展各具特色，产业集群正在形成

中国半导体照明产业发展相对成熟，形成了环渤海、长三角、珠三角、闽三角以及中西部五大产业集聚区。从产业基地建设情况来看，中国形成了 13 个国家级半导体照明产业基地。2004 年，上海、厦门、大连、南昌、深圳、扬州和石家庄 7 个地区获批建立国家级半导体照明产业化基地，加快了我国半导体照明产业的空间集聚，推动了半导体照明产业快速发展。随着半导体照明产业的发展，越来越多的城市将半导体照明产业列为当地重点布局的战略性产业，着力建设半导体照明相关产业基地和园区，2009 年，科技部认定天津、杭州、武汉、东莞、西安和宁波 6 个地区建立国家级半导体照明产业化基地。依托国家级产业基地，各地建成了数百个半导体照明产业园区，半导体照明产业在中国全面开花，推动中国成为全球最大的半导体照明产品生产和出口地。



环渤海地区：

- 大连国家半导体照明工程产业化基地
- 天津国家半导体照明工程高新技术产业化基地
- 石家庄国家半导体照明高新技术产业化基地

长三角地区：

- 扬州国家级半导体照明产业基地
- 杭州国家半导体照明高新技术产业化基地
- 宁波国家新能源与节能照明高新技术产业化基地
- 上海国家半导体照明产业基地

珠三角和闽三角地区：

- 深圳国家级半导体照明产业化基地
- 东莞国家半导体照明工程高新技术产业化基地
- 厦门国家级半导体照明产业化基地

中西部地区：

- 西安国家半导体照明工程高新技术产业化基地
- 武汉国家半导体照明工程高新技术产业化基地
- 南昌国家半导体照明工程产业化基地

图3 | 中国国家级半导体照明产业基地分布情况（来源：DeepTech）

区域发展各具特色，产业集群正在形成

中国第三代半导体电力电子、微波射频及光电子产业正在加速形成各具特色的产业集群。中国在 SiC、GaN 材料及器件方面的发展起步较晚，与全球水平仍有较大差距，目前正在积极布局中。2017 年，中国第三代半导体产业全面启动，中央和地方出台相关政策加大对第三代半导体材料及产业化应用扶持力度。从政策分布来看，广东省、江苏省、上海市、北京市、福建省、湖南省相对集中，未来将围绕这些区域形成第三代半导体产业集群。北京市和广东省相继建立北京第三代半导体材料及应用联合创新基地和第三代半导体南方基地，着力发展第三代半导体全产业链，未来将形成全球重要的第三代半导体产业集群；经过几年的发展，中国第三代半导体主要企业由中试进入大规模量产阶段，新建产能主要集中在上海、深圳、湖南、山西等地区，在这些地区依托龙头企业及当地产业基础将形成产业集群。浙江、河北、山东、安徽、四川等地已经集聚了相对完整的第三代半导体产业链，具备建设产业集群条件。

北京市：

发展方向：第三代半导体全产业链
典型企业：天科合达、泰科天润、世纪金光、聚能创芯
主要园区：北京第三代半导体材料及应用联合创新基地

江苏省：

发展方向：第三代半导体全产业链
典型企业：天科合达、纳维科技、55 所、英诺赛科
主要园区：苏州工业园、徐州凤凰湾电子信息产业园



上海市：

发展方向：第三代半导体全产业链
典型企业：山东天岳、积塔半导体
主要园区：上海临港新片区

福建省：

发展方向：第三代半导体全产业链
典型企业：瀚天天成、三安集成
主要园区：泉州芯谷

湖南省：

发展方向：SiC 电力电子
典型企业：湖南三安、泰科天润、中车时代半导体
主要园区：湖南三安半导体产业园

广东省：

发展方向：第三代半导体全产业链
典型企业：天科合达、南砂晶圆、东莞天域、英诺赛科
主要园区：第三代半导体南方基地、深圳坪山半导体产业园、广东南沙新能源汽车第三代半导体产业基地

图4 | 中国第三代半导体产业分布情况（来源：DeepTech）

区域发展各具特色，产业集群正在形成

第三代半导体典型园区：

①北京第三代半导体材料及应用联合创新基地：

北京第三代半导体材料及应用联合创新基地产业集聚初见雏形。初步完成 SiC 全链条核心技术突破和产业链布局，天科合达、世纪金光实现了 4 英寸以上 SiC 衬底材料批量生产，泰科天润、世纪金光在国内率先实现 SiC 二极管批量生产，形成了从材料、器件、封装到应用的产业链条。GaN 射频方面引入中国电子科技集团有限公司第 13 研究所，规划在基地投资 50 亿元发展民品微波射频产业。



②江苏省苏州市工业园区：

苏州工业园区已形成以 GaN 材料及其应用为优势的第三代半导体产业集聚区。在 GaN 材料、中游器件及终端应用产品方面形成一定规模，依托中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所，集聚了如纳维科技、苏州晶湛、苏州能讯等一批行业领军企业。目前，苏州工业园第三代半导体相关企业共 9 家，涵盖衬底、外延、器件等环节。



区域发展各具特色，产业集群正在形成

第三代半导体材料典型企业：

① 山东天岳

山东天岳是中国 SiC 半绝缘衬底龙头企业，也是第三代半导体材料领域第一家上市企业。截至 2021 年底，山东天岳 SiC 衬底产能约为 50000 片/年，衬底尺寸主要为 4 英寸。山东天岳在半绝缘型 SiC 衬底领域国内市场占有率第一，主要客户为中电科 13 所和 55 所。2020 年，公司招股说明书上表示公司市场占有率较上年增 12 个百分点，位列世界前三，大大缩小了与国外竞争对手的差距。

山东天岳总部位于山东济南，产业化基地位于上海临港新片区，于 2020 年底开始建设，总投资 25 亿元。

② 天科合达

公司是中国 SiC 导电型衬底龙头企业，公司实现 2 英寸至 6 英寸 SiC 晶片产品的规模化供应，2020 年启动 8 英寸晶片产品研发。截至 2021 年底，公司 SiC 衬底折合 4 英寸产能约为 50000 片/年。

天科合达总部位于北京市大兴区，在北京和江苏徐州有产业化基地，2021 年在深圳投资 22 亿元建设 6 英寸 SiC 衬底及外延生产线。

③ 纳维科技

苏州纳维科技有限公司是中国首家 GaN 衬底晶片供应商，GaN 衬底尺寸以 2 英寸为主，4 英寸至 6 英寸已经小批量出货，技术水平全球领先。

纳维科技 2 英寸 GaN 衬底产量接近 10000 片/年，客户主要为全球研发型机构，面向激光器、LED、电子器件、探测器和太赫兹等应用。

创新生态生机勃勃，助力打造核心竞争力

中国建立了较为完善的第三代半导体技术创新体系。与全球同步，中国科研院所和大学也相继开展了第三代半导体材料的研究，主要包括中科院物理所、山东大学、中科院硅酸盐所、中科院半导体所以及中国电子科技集团第46研究所等单位，这些科研单位的超前研究成果构建了中国第三代半导体产业技术基础。随着全球第三代半导体产业化水平的持续推进，中国越来越多的科研单位在细分领域和主要环节进行科学研究，如清华大学、北京大学、浙江大学、西安电子科技大学、复旦大学等单位，这些单位完善了中国第三代半导体研究体系。为建设以企业为主体、市场为导向、产学研用深度融合的技术创新体系，全面提升中国第三代半导体领域的自主创新能力，支撑第三代半导体产业集群式发展，深圳、苏州、南京、山西、湖南、北京等国家级第三代半导体技术创新中心相继成立，中国第三代半导体技术研发格局基本形成。

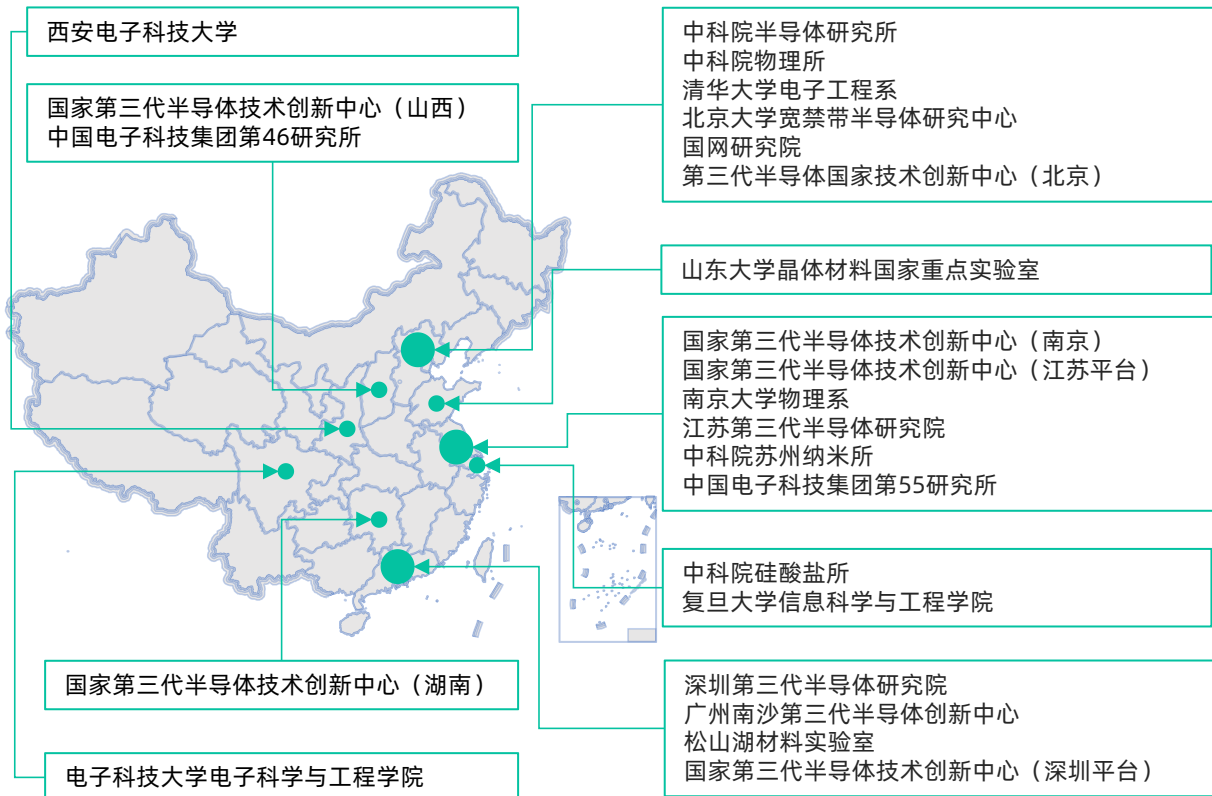


图7 | 中国第三代半导体产业研究机构分布图（来源：DeepTech）

创新生态生机勃勃，助力打造核心竞争力

中国第三代半导体技术创新机构形成以北京、江苏和广东三地为核心全国多点分布的格局。北京市研发力量全国最强，不仅有顶级的科研单位代表，如中科院半导体所、中科院物理所、清华大学、北京大学、国网研究院等，主要企业如天科合达、中科钢研、泰科天润、世纪金光等也汇聚于此。江苏省和广东省紧随其后，形成了以大学、科研院所、国家级技术创新中心、省市级技术创新平台、企业研发中心为代表的完善的研发体系。上海市、山东省、山西省、湖南省、江西省、福建省、安徽省、浙江省等地区依托大学、大院、大所以及龙头企业正在建设符合区域发展的研究队伍。

中国第三代半导体技术创新人才形成以院士为引领，杰青、长江学者、国家高层次人才计划、青年学者等多层次人才梯队结构。郑有料、甘子钊、王立军、江风益、郝跃、刘明等院士专家构成了中国第三代半导体领域第一人才梯队，在前沿领域进行探索研究，为中国第三代半导体技术指明了方向。以徐现刚、陈小龙、张荣、王新强、龙世兵等杰青和长江学者为代表的专家，以及张清纯、严群、张波等国家计划重点人才形成了中国第三代半导体领域第二人才梯队，在学科建设、技术引领、人才培养方面发挥重要作用。广大的青年专家、学者、企业技术负责人等构成了中国第三代半导体领域第三人才梯队，在技术研究、工程研发、产业化推进等方面贡献力量。另外，依托早期半导体照明产业的发展，中国在第三代半导体领域初步积累了人才基础，三安光电、国星光电、乾照光电等半导体照明龙头企业都为第三代半导体领域的重要参与者。

创新生态生机勃勃，助力打造核心竞争力

典型研究机构：

①电子科技大学

电子科技大学国家示范性微电子学院依托现有的电子科学与工程学院，拥有电子薄膜与集成器件国家重点实验室、电子科技大学功率集成技术实验室、国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心、极高频复杂系统国防重点学科实验室、微波电真空器件国防科技重点实验室、国家集成电路人才培养基地、国家集成电路设计成都产业化基地研发培训中心、3 个国家级实验教学示范中心、10 个省部级重点实验室及工程中心等实验平台。

学院开展了 SiC JBS、SiC PiN 和 SiC 功率 MOSFET（平面和槽栅）研究。650V/1200V（10A/20A）SiC JBS 二极管已获批量应用；1200V/25A、1700V/15A SiC MOSFET 以及 4.5kV/6.5kV/10kV（50A/100A）SiC PiN 二极管已经流片成功，可以进行产业化推广；实现 10kV SiC MOSFET 晶体管以及 10kV SiC JBS 二极管样品开发工作。

自研 650V GaN HEMT 器件，导通电阻 70mΩ，电流 40A，达到国际商用器件 Navitas NV6128 芯片技术水平；自研 100V GaN HEMT 器件，导通电阻 21mΩ，电流 45A，与国际商用器件 EPC 2051 器件性能相当。

②松山湖材料实验室

松山湖材料实验室第三代半导体材料与器件团队涵盖了从上游薄膜材料外延、中游芯片设计制备、到下游器件模组封装等全部产业链研究布局。构建外延片生长及表征系统、紫外 LED 芯片制备系统、AlN 陶瓷基板及封装应用系统与应用级产品测试开发系统等四大板块。2020 年松山湖材料实验室成功建设了一条 SiC 外延工艺研发产线。

创新生态生机勃勃，助力打造核心竞争力

专家人物	所在单位	研究方向
甘子钊 院士	北京大学物理学院	固体物理和激光物理研究
郑有料 院士	南京大学南京大学 电子科学与工程学院	新型半导体异质结构材料与器件研究
王立军 院士	中科院长春光机所	激光与光电子专家
刘 明 院士	复旦大学芯片与系统 前沿技术研究院	半导体存储器和集成电路的微纳加工
江风益 院士	南昌大学国家硅基LED 工程技术研究中心	半导体发光方向研究
郝 跃 院士	西安电子科技大学 微电子学院	5G GaN 射频器件研究, Ga ₂ O ₃ 衬底生长技术研究, 金刚石超宽禁带半导体技术研究
张 荣 杰青	厦门大学	光电材料、半导体新材料
王新强 杰青	北京大学 凝聚态物理与材料物 理研究所	宽禁带半导体材料、物理与器件研究
沈 波 杰青	北京大学 宽禁带半导体研究中 心	GaN 基半导体材料生长、物理性质和光电子 器件研究、GaN 基功率电子器件和新功能器 件技术
陈小龙 杰青	中科院物理所先进材 料与结构分析重点实 验室	大尺寸、高质量 SiC 衬底研究
龙世兵 杰青	中国科学技术大学 微电子学院	超宽禁带半导体 Ga ₂ O ₃ 材料研究
盛 况 杰青	浙江大学电气工程学 院	SiC 电力电子
徐现刚 长江学者	山东大学晶体材料国 家重点实验室	大尺寸、高质量 SiC 衬底研究, Ga ₂ O ₃ 衬底 生长技术研究, 金刚石CVD生长和加工技术 研究
张清纯 特聘教授	复旦大学上海碳化硅 功率器件工程技术研 究中心	宽禁带半导体研究
严 群 国家高级人才计划	福州大学 物理与信息工程学院	Micro-LED 显示技术, VR/AR
张 波 国家百千万人才工程	电子科技大学 电子工程学院	功率半导体技术研究

表3 | 中国第三代半导体产业研究机构分布图 (来源: DeepTech)

中国第三代半导体材料未来展望

第三代半导体材料和技术正在加速发展，在新一代显示、5G 移动通信、相控阵雷达、高效智能电网、新能源汽车、自动驾驶、工业电源、消费类电子产品等领域展示出广阔的、不可替代的应用前景，并逐渐成为人工智能、未来物联网等发展的核心关键元器件的材料基础。预计将形成万亿美元的应用市场，成为新一代制造业必争的战略要地，成为全球各国提升未来核心竞争力的重要手段和重要支撑。

①更大尺寸晶圆将成为主流，材料质量与器件性能不断提升

生产成本成为推动大尺寸晶圆的主要推动力，较大的晶圆直径能提升单晶利用率降低晶圆制造成本，且全球先进水平已经突破大尺寸晶圆生长技术，如 wolfspeed 即将实现 8 英寸 SiC 晶圆量产，而国内主流尺寸为 4 英寸，加速实现 6 英寸 SiC 衬底和外延材料的产业化转移成为中国企业的必然选择。不断开发新工艺和新技术，降低材料的缺陷密度、提高产品良率和降低成本，加速突破衬底材料、外延、芯片和封装测试瓶颈将成为整个行业未来发展的主旋律。

②产业集群发展态势将逐渐形成，企业兼并重组整合加速

中国第三代半导体工程化技术已经取得突破，有能力的企业进行产业化布局，支持政策完善、配套资源齐全、产业生态较好的区域将吸引企业落户，形成产业聚集，未来中国将围绕这些区域形成多个产业集聚区。另外，企业间的兼并重组也将加剧，全球主要企业如 II-VI、wolfspeed 等已经开启整合模式，中国优势企业为了扩大影响力也将通过兼并重组向上下游延伸；传统半导体企业为了寻求新的利润增长点以及布局新技术的需要，也将并购具备硬实力的初创公司；下游应用企业从自身供应链安全考虑，也将向上游延伸产业链。

③第三代半导体渗透将加快，新的应用蓝海将逐渐开启

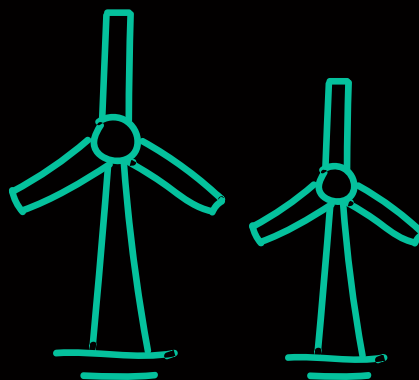
第三代半导体材料在新能源汽车、PV 光伏、消费类电子产品、轨道交通、半导体照

中国第三代半导体材料未来展望

明、5G 射频等方面应用优势明显，随着第三代半导体量产技术突破、成本进一步降低，渗透率将逐步提高。电力电子器件在新能源汽车上的应用、光电子器件在 Mini/Micro-LED 等新一代显示产业及 UV-LED 方面的应用将成为未来 5 年新的风口。

④新的材料体系将逐渐成熟

Ga_2O_3 、AlN 和金刚石等超宽禁带半导体材料具有更高击穿电压、更低导通电阻、更高频率、更大功率的特点，是支撑未来轨道交通、新能源汽车、能源互联网等产业创新发展和转型升级的重点核心材料。国外近几年对超宽禁带半导体愈发重视，布局和投资显著增加，中国也有越来越多的科技人员关注和开展对超宽禁带半导体的研究，前景为业界看好，未来几年会逐步推出相关产品。



Chapter 2

新型锂电材料

- 锂离子电池材料：跳跃在汽车电动化浪尖的关键新材料
- 磷酸铁锂和三元材料优势各有不同，是目前正极材料市场主流的研究方向
- 负极材料：石墨材料主导市场，新型负极材料具备潜力
- 电解液材料：新型材料成本过高，固态电解质另辟蹊径
- 隔膜材料：聚烯烃隔膜工艺成熟，新材料性能优越成本高昂
- 中国锂电材料产业发展动力：下游市场蓬勃发展，政策提供多元化支持
- 中国锂电材料技术：低成本、高性能、高安全性是发展方向
- 中国锂电材料产业：完整产业链和政策引导为锂电材料产业带来巨大潜力

锂离子电池材料：跳跃在汽车电动化浪尖的关键新材料

汽车电动化浪潮驱动锂离子电池材料行业飞跃发展。不管从国家政策支持力度还是市场化发展程度来看，汽车电动化趋势已然不可阻挡。在政策支持方面，中国出台了全方位的激励政策推进产业发展，如降低车企准入门槛、延长补贴政策期限等系列举措，基本覆盖了新能源汽车整个产业链；在市场化发展方面，不论是比亚迪、吉利汽车等各大传统车企，还是蔚来、小鹏、理想等新势力车企都在跑马圈地。

动力电池作为新能源汽车核心零部件之一，需求也随之猛增。其中锂离子动力电池因具有更高的能量密度和性能，是目前新能源智能汽车上应用的主流电池。锂离子电池是一种可以反复进行充电、放电而使用的高能电池，其充放电功能通过锂离子在电池正负极处中进行可逆的嵌入与脱出实现。锂离子电池由正极材料、负极材料、隔膜和电解液构成，这四种材料被称为锂离子电池四大主材。

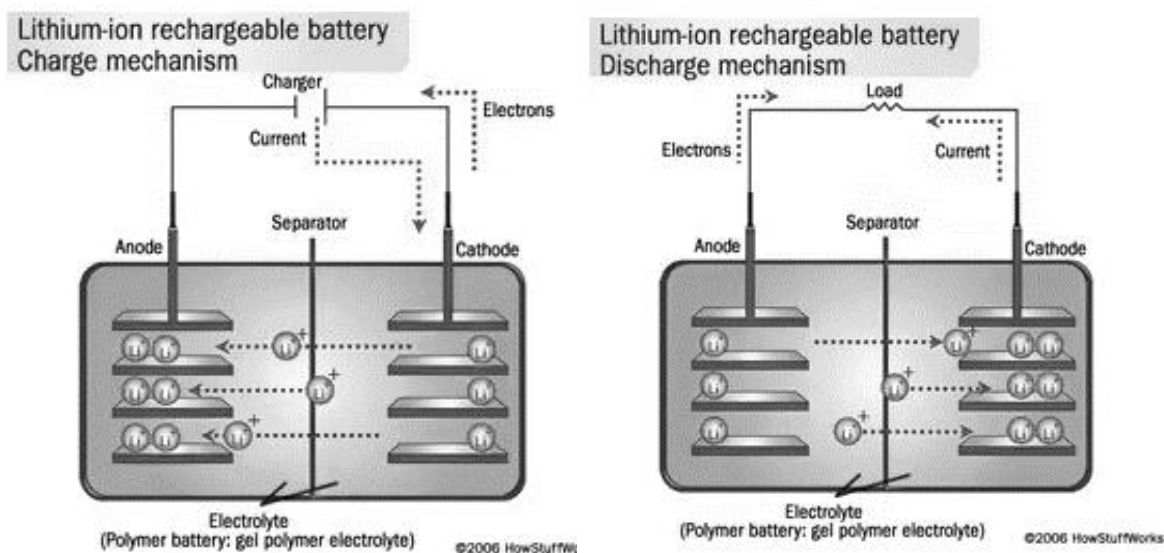


图8 | 锂离子电池充放电过程的工作原理（来源：Howstuffworks）

2021年中国新能源汽车占全球市场份额53%，是全球最大的新能源汽车市场，这也助推中国锂电材料产业迅速发展，在材料技术领域和产业园区建设有所建树。本章聚焦锂电材料前沿技术与中国锂电产业园区，对中国锂电材料产业进行分析。

磷酸铁锂和三元材料优势各有不同，是目前正极材料市场主流的研究方向

锂离子电池通过电池正负极处的锂离子嵌入和脱嵌来实现充放电功能，正极材料作为锂离子的来源，能够决定电池的性能，同时正极材料也是电池材料中规模最大，产值最高的环节，占比电池材料成本的约 40-44%。

从分类来看，目前商用的锂离子电池正极材料主要分为：锰酸锂、钴酸锂、磷酸铁锂和三元材料等。其中，磷酸铁锂和三元材料是目前正极材料市场主流的研究方向。

从各材料优势来看，三元材料容量领先，磷酸铁锂以成本和寿命见长。由于三元锂电池在能量密度上占据优势，近几年其在乘用车领域得到广泛应用；磷酸铁锂以成本与寿命领先，使用磷酸铁锂电池车型具备长寿命、高安全性、高性价比等优势。

从市场应用情况来看，使用三元材料和磷酸铁锂的锂离子电池支撑起了中国动力电池市场。2020 年，中国动力电池装车量累计 63.6GWh，同比累计上升 2.3%。其中三元电池装车量累计 38.9GWh，占总装车量 61.1%；磷酸铁锂电池装车量累计 24.4GWh，占总装车量 38.3%。

	磷酸铁锂	三元材料	
		镍钴锰	镍钴铝
分子式	LiFePO_4	LiNiCoMnO_2	$\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$
晶格结构	橄榄石	层状	层状
克容量mAh/g	130~140	155~164	140~190
电压平台	3.2V	3.5V	3.7V
合成工艺	容易	较难	难
安全性能	优秀	较好	较差
循环性能	≥2000次	≥800次	≥800次

表4 | 磷酸铁锂与三元材料性能参数（数据来源：GGII、CNKI）

三元正极材料：拥有高比容量优势的高镍材料已成为市场焦点

20 世纪 90 年代，以钴酸锂为正极材料的锂离子电池开始商业化应用，为锂离子电池的发展奠定了基础。三元正极材料在钴酸锂的层状结构基础上，对成本、比容量、循环性能等方面进行了优化，形成了以镍钴锰酸锂（NCM）和镍钴铝酸锂（NCA）为主的三元正极材料体系。

随着市场对新能源汽车续航里程要求的提升，拥有高比容量优势的高镍材料成为关注的焦点。由于钴元素在地球储量低，价格昂贵，因此使用价格较低的镍来降低正极材料中钴的比例从而控制成本的方法被广泛认可。同时，研究表明三元材料中的镍含量越高，比容量越大，在相同条件下对应的电池能量密度越高，这些材料也被称为高镍正极材料。常见的高镍正极材料有镍钴锰比例为 8:1:1 的 NCM811 以及镍钴铝比例为 80:15:5 的镍钴铝酸锂（NCA）。

但镍含量的提高也增大了正极材料前驱体的生产难度。尤其是 NCA 材料前驱体的生产过程中，铝元素的加入使前驱体的生产难上加难，复杂的生产工艺限制了高镍三元材料的普及使用。因此目前在三元正极材料研究方向上，研究人员一方面攻关生产工艺，降低生产难度，提高产品质量；另一方面通过元素掺杂、表面包覆等手段，对三元材料进行改性，优化产物的电化学性能。同时，三元正极材料也在继续向低钴化、无钴化方向发展，以期提升电池容量，降低成本。

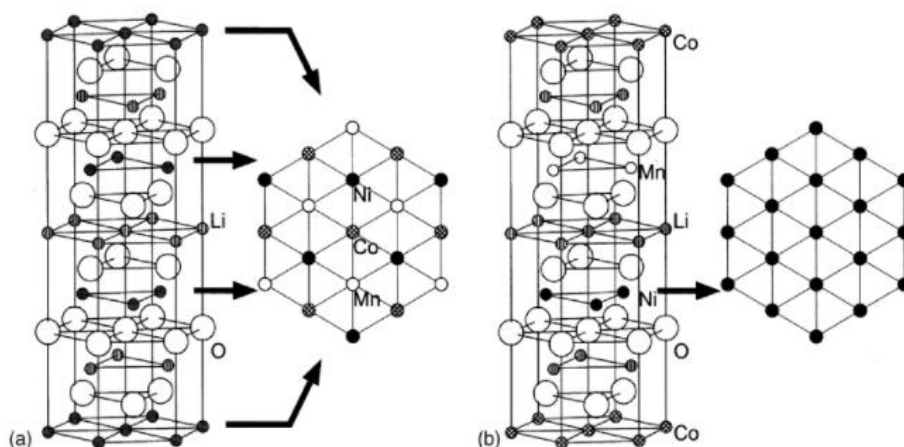


图9 | 三元正极材料NCM层状结构示意图（来源：CNKI）

磷酸铁锂：低成本、长寿命等优势带来强大市场竞争力

磷酸铁锂性能良好，且原材料价格较低，制备工艺简单，广受市场认可，成为现今动力、储能锂离子电池领域研究和生产开发的重点。

与层状结构的钴酸锂正极材料和三元正极材料不同，磷酸铁锂为橄榄石结构，其结构中牢固的 P-O 共价键在电池完全充电的情况下使氧原子保持稳定，避免其被氧化而生成氧气释放。这一结构特征使磷酸铁锂的安全性高于层状结构的正极材料，在电池上的体现便是使用磷酸铁锂作为正极材料的电池安全性高、使用寿命较长。

但磷酸铁锂材料导电性差，低温条件下放电性能较差，比容量不及三元正极材料。为了改善磷酸铁锂正极材料的性能，研究人员通过元素掺杂提高磷酸铁锂的倍率性能，或是通过将磷酸铁锂颗粒纳米化来改善锂离子传输问题；通过界面包覆手段改善其电子导电性，提升倍率性能等。

尽管磷酸铁锂正极材料存在少量不足，但瑕不掩瑜，磷酸铁锂将与三元材料形成互补关系长期共存。

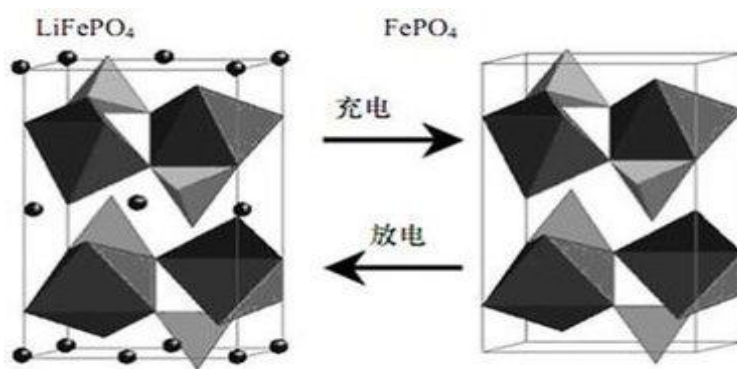


图10 | 磷酸铁锂充放电示意图（来源：CNKI）

负极材料：石墨材料主导市场，新型负极材料具备潜力

在锂离子电池充放电过程中，来自正极材料的锂离子在负极材料处进行嵌入/脱嵌，负极材料对锂离子电池的性能有重要影响。石墨材料凭借较高的稳定性和较低的成本，成为当下负极材料的主流。当前商业化的石墨负极材料的比容量已经接近理论值372mAh/g，因此负极材料的突破需要在新材料上发力。

以碳硅复合材料为代表的硅基负极材料具有明显的比容量优势（理论比容量可达900mAh/g）。同时硅基负极材料具备原材料成本低等优点，是目前学术界和产业界正在探索的新型负极材料。然而以目前的研究和实践来看，硅的结构单元在充放电过程中伴随着300%的体积膨胀和收缩，反复的体积变化易导致含硅负极材料颗粒产生裂纹并粉化，产生一系列严重问题，阻碍了硅基负极材料的广泛应用。

锂金属负极材料由于其高达3860mAh/g的理论容量和最低的还原电位（相对标准氢电极-3.040V）而被视作锂电池负极材料的最终选择。但同时锂金属负极材料的缺点也十分明显，不可控的锂枝晶生长和不稳定的表面SEI膜等问题亟待解决。目前的研究方向以选择寻找适合的载体结合和金属锂表面人工保护层设计两方面为主。

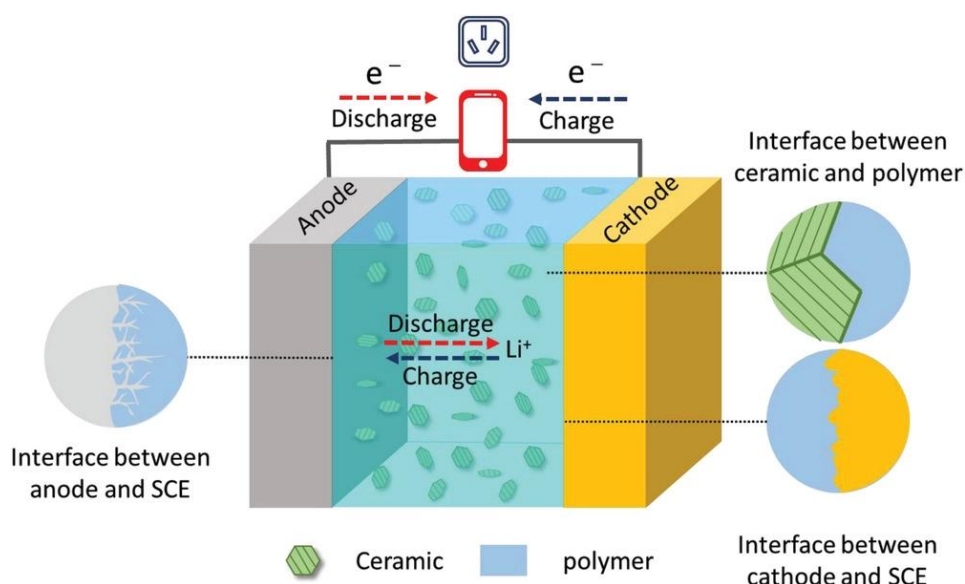


图11 | 使用复合固态电解质 SCE 抑制锂金属负极材料锂枝晶生成的案例（来源：Progress and Perspective of Ceramic/Polymer Composite Solid Electrolytes for Lithium Batteries）

电解液材料：新型材料成本过高，固态电解质另辟蹊径

电解液是锂电池关键材料之一，由锂盐、溶剂和添加剂按一定比例配制而成，是锂离子电池中锂离子传输的载体，在正负极之间起到传导锂离子的作用。相比于其他电解质，六氟磷酸锂在常用有机溶剂中具备适中的离子迁移数和解离常数，与多种正负极材料相容性较好，同时工艺成熟，成本较低，是目前主流的溶质锂盐。

双氟磺酰亚锂盐等高性能新型锂盐广受关注。随着正极材料性能的不不断提升，锂离子电池对电解液的要求也日益增高，双氟磺酰亚锂盐等具备高性能的新型材料成为了锂盐的新选择，但目前生产技术难度大导致其成本居高不下，目前尚未直接用作溶质锂盐，而只能作为电解液添加剂来提升电解液性能。

以安全见长的固态电解质是新型解决方案。传统电解液由于使用有机碳酸酯类作为溶剂，具有高活性、易燃烧等问题，在充电过充、过热和短路时易发生自燃和爆炸。随着市场对电池安全的需求日益增长，具备不可燃、无腐蚀、不挥发特性的固态电解质成为新型解决方案，可为锂离子电池带来更多的可能性。但目前固态电池技术尚不成熟，现有材料存在着离子电导率低、界面阻抗大、快充难度大和价格昂贵等问题。固态电解质材料技术成熟后，将为锂离子电池材料体系带来变革。

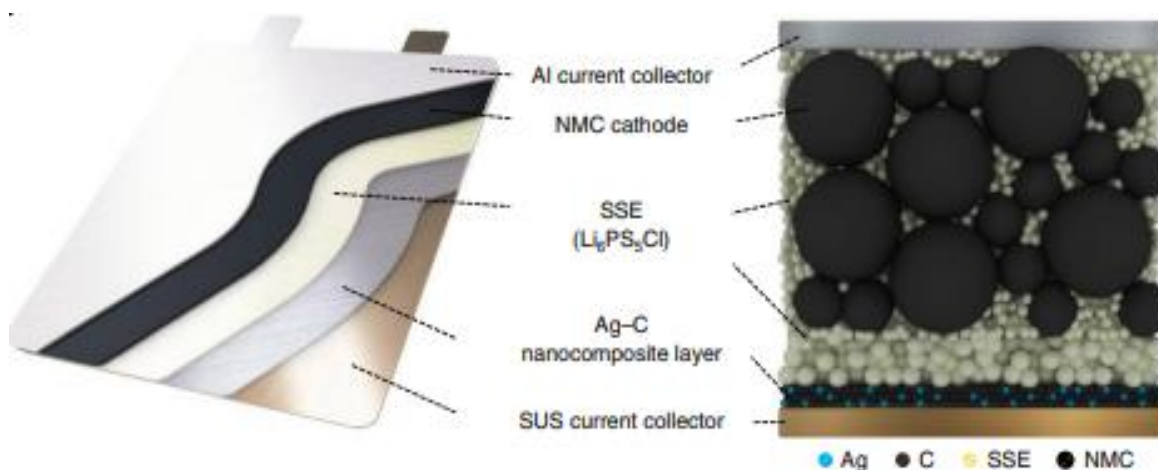


图12 | 使用硫银锗矿型固态电解质的固态锂离子电池结构示意图（来源：High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver-carbon composite anodes）

隔膜材料：聚烯烃隔膜工艺成熟，新材料性能优越成本高昂

聚烯烃隔膜材料成本较低、工艺成熟，是市场上主流的隔膜材料。隔膜在锂电池中的功能主要是提供锂离子传输通道，防止电池内部短路，对锂电池的安全与性能有关键作用。目前隔膜的基膜材料以聚烯烃为主，代表材料为 PP（聚丙烯）和 PE（聚乙烯）。聚烯烃隔膜以其高强度、优良的化学稳定性和低价格占据着目前 3C 电池的主要市场，但同时也存在着孔隙率低，电解液润湿性差、高温热收缩等问题，通常生产中在聚烯烃隔膜的一面或两面涂覆纳米氧化物和 PVDF 对其进行改性进行改良。

陶瓷涂覆隔膜成本较高，离子导体涂覆隔膜、无机-有机复合涂覆隔膜尚处在研发阶段。陶瓷涂覆隔膜指通过在聚烯烃隔膜单面或双面涂覆 Al_2O_3 、 SiO_2 、勃姆石等无机陶瓷材料，大幅提升聚烯烃隔膜的高温尺寸稳定性，在一定程度上可以主动防御锂离子电池热失控的发生，更适合用于大容量锂离子动力电池的制造和使用，但目前高昂的成本限制了陶瓷覆膜隔膜的广泛使用。在聚烯烃隔膜表涂覆无机纳米粒子和有机聚合物混合浆料，经过固化后可得无机-有机复合涂覆隔膜。该种隔膜同时具备有机聚合物的柔性和无机材料的耐热性，熔化温度和断裂伸长率在升高的温度下提升明显，可以显著改善锂离子电池的安全性，但目前该技术还停留在研发阶段。

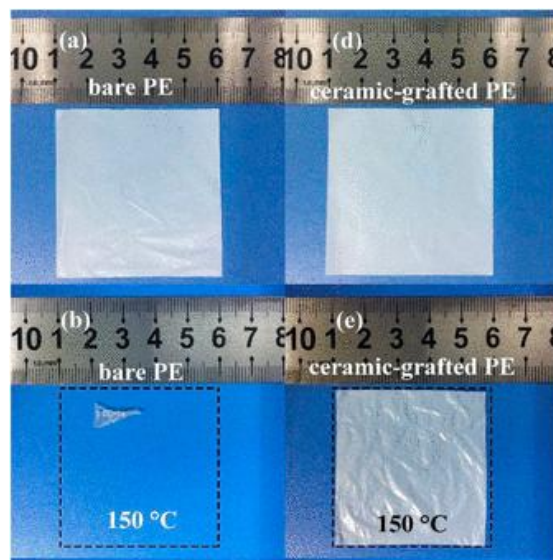


图13 | 150°C 下加热 0.5 小时后涂覆陶瓷材料的 PE 隔膜（右）和未涂覆隔膜（左）对比（来源：A Highly Thermostable Ceramic-Grafted Microporous Polyethylene Separator for Safer Lithium-Ion Batteries）

中国锂电材料产业发展动力：下游市场蓬勃发展，政策提供多元化支持

锂电材料是在新材料领域中少有的中国企业能够掌握全球话语权的领域之一。中国锂电材料产业发展迅速一方面得益于下游市场需求的不断扩大，另一方面也得益于国家政策支持。

旺盛的下游需求刺激了中国锂电材料产业的迅速增长。新能源汽车作为锂离子电池的主要用户近年来增长迅速。2020年中国新能源汽车销售额占全球新能源汽车销售额的40.7%，仅比欧洲少3.1个百分点。而在销量方面，2021年中国新能源汽车销量352.1万辆，连续七年销量位居全球第一。

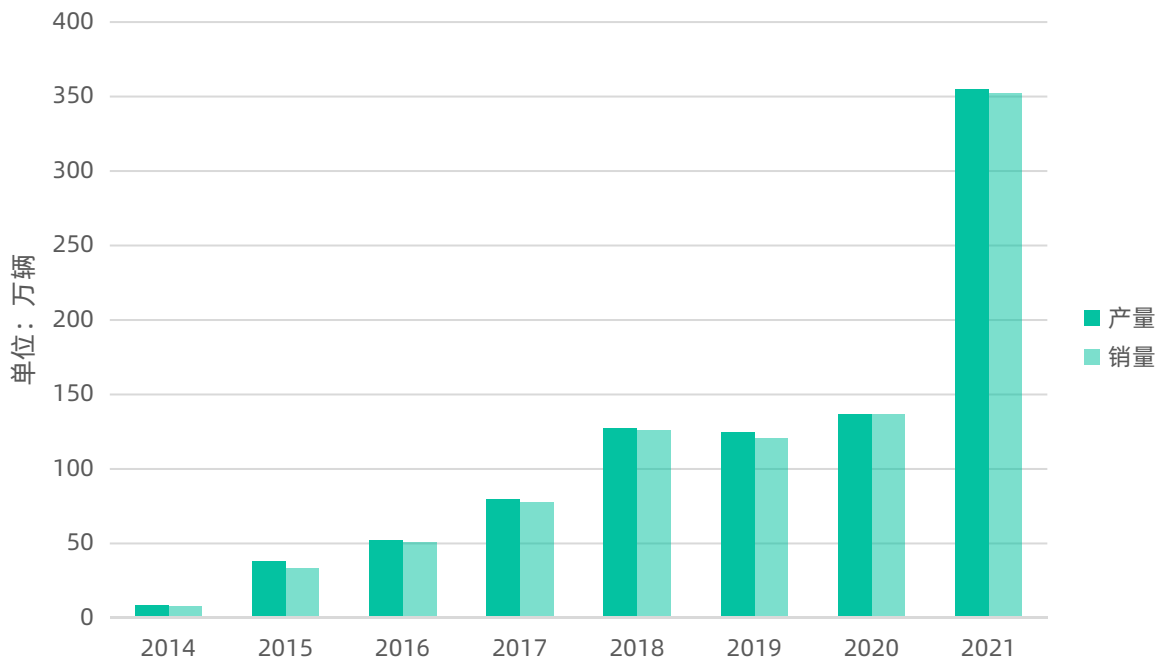


图14 | 2015-2021年中国新能源汽车销量（来源：中国国家统计局）

在政策的支持下，中国锂离子电池材料产业蓬勃发展。锂电材料产业是中国新能源汽车发展的关键，中国锂电池产业的发展得到了政府政策的大力支持，在十几年间各部委出台了一系列多元化鼓励锂电材料产业的政策。

《国家“十四五”规划纲要》中提到，突破新能源汽车高安全动力电池、高效驱动

中国锂电材料产业发展动力：下游市场蓬勃发展，政策提供多元化支持

电机、高性能动力系统等关键技术，并在《重点新材料首批次应用示范指导目录（2021年版）》中，将三元材料及前驱体作为重点材料公示。

发布时间	政策名称	主要内容
2013年	《产业结构调整目录（2013年本）（修正）》	确定锂离子电池用磷酸铁锂等正极材料为国家鼓励类产业。
2015年	《中国制造2025》	将“节能与新能源汽车”作为重点发展领域，明确支持电动车、燃料电池汽车发展，掌握低碳化、信息化、智能化核心技术。
2016年	《汽车动力电池行业规范条件》（征求意见稿）	提出锂离子动力电池单体企业年产能力不低于80亿千瓦时，系统企业年产能力不低于8万套或40亿千瓦时。
2017年	《促进汽车动力电池产业发展行动方案》	持续提升现有产品的性能质量和安全性，进一步降低成本，2018年前保障高品质动力电池供应；大力推进新型锂离子动力电池研发和产业化，到2025年，新体系动力电池技术取得突破性进展，单体比能量达500瓦时/公斤。
2020年	《新能源汽车发展规划（2021-2035年）》	实施电池技术突破行动；推动动力电池全价值链发展，建设动力电池高效循环利用体系；加快推动动力电池回收利用立法。
2021年	《国家“十四五”规划纲要》	突破新能源汽车高安全动力电池、高效驱动电机、高性能动力系统等关键技术。
2022年	《“十四五”新型储能发展实施方案》	开展钠离子电池、新型锂离子电池等储能技术，研发储备液态金属电池、固态锂离子电池、金属空气电池等新一代高能量密度储能技术。

表5 | 支持锂电材料产业发展部分政策（来源：DeepTech）

在下游新能源汽车蓬勃发展、产业政策大力支持的背景下，中国锂电材料技术开始迅速发展，在多个领域实现了国外技术壁垒的突破。在技术迅速发展的同时，锂电材料产业也突飞猛进，在锂电材料领域进行布局的产业园区在中国各地涌现，培育出了一系列拥有资源优势、技术优势、规模优势的产业集群。

中国锂电材料产业呈现聚集态势

中国锂电材料产业在下游市场和政策的双重助力下得到了蓬勃的发展，锂电材料相关企业和产业园区大量涌现，逐渐产生了聚集态势。

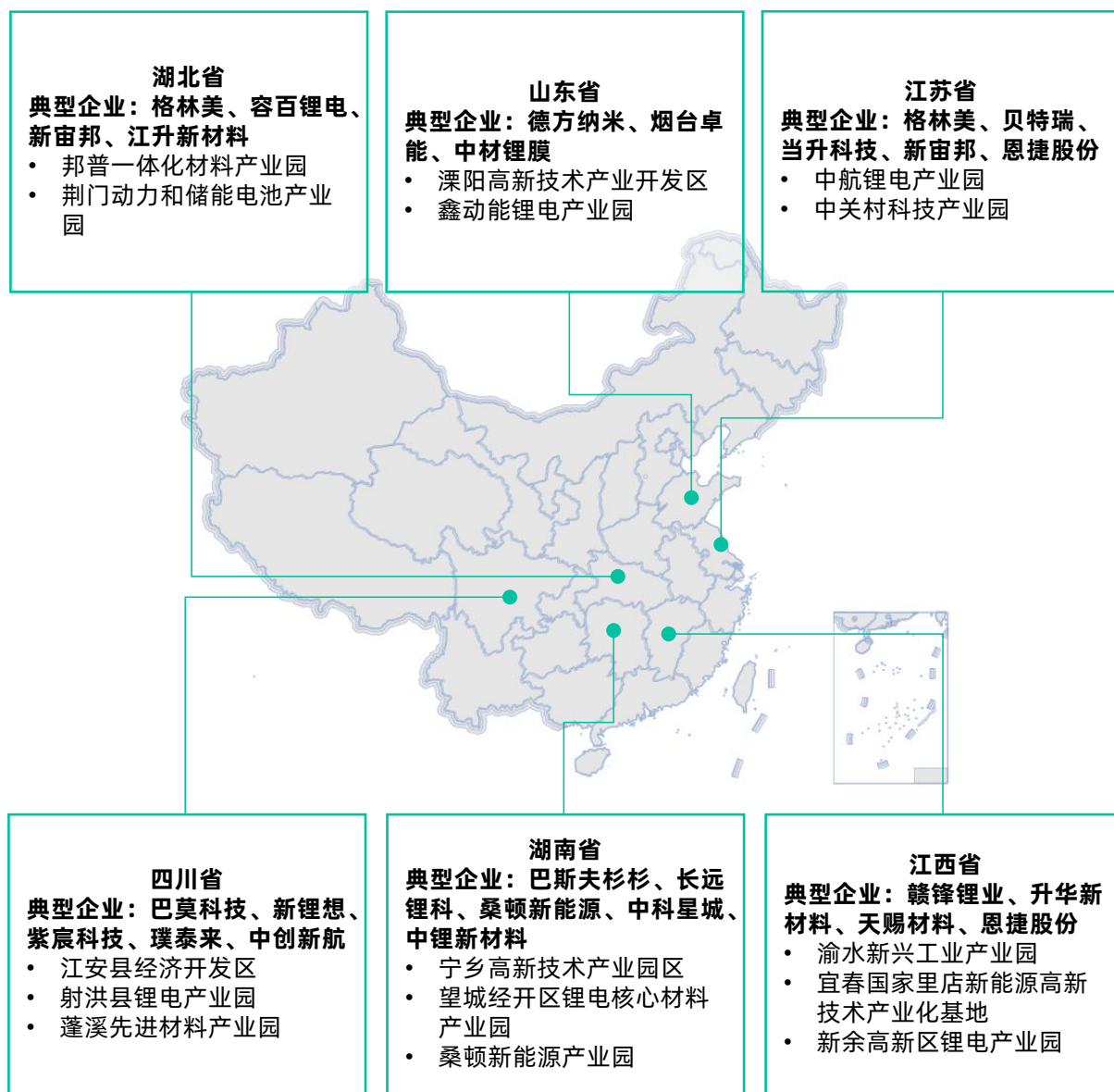


图15 | 中国锂电材料部分企业与产业园区（来源：DeepTech）

锂电材料产业园区：矿产资源导向布局，完整产业链产生虹吸效应

锂矿资源是中国锂电材料产业园发展的重要因素，在锂电材料产业的基础上产业园区通过补链、强链、延链逐步扩大在新能源产业的覆盖

正极材料作为锂电池材料的核心，正极材料产业能够吸引锂电池产业链上的其他产业聚集，形成产业园区。锂矿作为正极材料的关键原材料，锂矿的位置很大程度上决定了锂电材料产业园区聚集的位置。中国在锂电材料领域进行布局的产业园区分布具有明显的地域特征，大多聚集在四川、江西、湖南等地，这与中国的锂矿资源分布情况基本吻合。本章挑选各地在锂电材料领域进行布局的典型园区进行分析：

• 四川省：射洪县锂电产业园

据自然资源部统计，四川省硬岩石锂矿占全国锂矿石资源的 57%。丰富的锂矿资源为四川省带来了锂电正极材料发展的区位优势。射洪县锂电产业园启动于 2010 年的四川省遂宁市，依托锂矿石资源，发展锂离子电池正极材料产业，并以此为基础，横向上向负极材料、隔膜和电解液进行布局，纵向上向下游电芯制造、新能源汽车和锂电材料回收领域扩展，逐步建立全产业链。射洪锂电产业园将配合遂宁市蓬溪先进材料产业园和安居锂电产业园，形成良好的锂电产业集聚效应。

• 江西省：宜春国家锂电新能源高新技术产业化基地

江西省锂矿以锂云母为主，主要集中在宜春，这赋予了宜春锂电正极材料产业发展的区位优势。在矿产资源支持下，宜春从锂电正极材料产业出发，横向上在负极材料、隔膜等锂电材料产业布局，扩展锂电材料种类。宜春也是江西省机电生产基地，有较强的机械加工配套能力和生产特种汽车、工程机械的基础。宜春在锂电材料的基础上，向产业链下游的锂电池制造和新能源汽车产业发展，打造新能源全产业链。

锂电材料产业园区：矿产资源导向布局，完整产业链产生虹吸效应

完善的产业链条同样对锂电材料企业有巨大的吸引力。锂电材料产业位于锂电池产业链上游，除矿产资源外，能否高效地与下游产业配合对锂电材料产业的发展同样影响重大。

中国有部分产业园区在当地矿产资源并不十分丰富的背景下，由于布局较早，产业链条和园区服务支撑体系相对完善，对锂电池产业链头部企业产生了强大的吸引力，形成优势产业链。本章取产业链完善的典型园区进行分析。

• 湖南省：宁乡高新技术产业园区

宁乡高新技术产业园区成立于 2006 年，当地产业以机械制造、纺织服装等传统行业为主。在锂电池产业的布局是从 2007 年引入从事锂电池回收和三元前驱体的邦普镍钴技术有限公司开始，在十几年的发展期间各类正极材料、负极材料、隔膜、电解液、前驱体、废旧电池回收企业陆续进驻，自上游到下游形成了完整产业链。

在产业链完整的同时，多年的发展使园区中涌现了可观的头部企业，在正极材料、负极材料、隔膜、电解液、前驱体等领域产生了规模优势和技术优势，并在此基础上开始布局技术创新平台，围绕锂离子电池新型电极材料、全固态电解质、燃料电池、新型电池体系设计和先进电池表征等领域的前沿科学和技术问题进行突破。

正极材料进入门槛较低，行业竞争激烈，集中度较分散

目前正极材料市场集中度较低。由于正极材料在锂电池中的成本占比较高，是锂电四大材料中市场空间最大的品种。正极材料的低端产品工艺成熟，因此中国正极材料行业竞争激烈，上游锂、钴企业和下游电池企业等新进入者对正极材料产业进行布局，整体来看行业集中度较低。

其中，磷酸铁锂材料市场集中度高于三元材料。由于磷酸铁锂曾经历供给过剩导致的价格下跌，经过行业洗牌，行业内企业数量较少，头部企业在技术、规模、成本和客户黏性上优势明显。

随着下游对正极材料性能要求越来越高，随着高镍无钴化趋势的到来以及头部企业的高性能产品逐步成熟，三元正极材料的竞争格局正在逐步分化，高低端产能的产能利用率差距逐步拉开。



图16 | 磷酸铁锂和三元材料部分企业图谱（来源:DeepTech）

负极材料以人造石墨为主流，行业集中度较高

目前负极材料出货产品以石墨化碳材料为主，包括人造石墨和天然石墨。尽管人造石墨成本较天然石墨更高，但其凭借着优异的性能、与正极材料和电解液更好的适配性在动力电池中占据主流，据高工锂电统计，2020年人造石墨市场占比达到84%。

目前中国的负极材料行业集中度较高，行业呈现寡头垄断态势，据高工锂电统计，2020年天然石墨CR5约为84%，人造石墨CR5约为80%。

头部企业受产能限制，加速负极材料一体化产能布局。2021年，随着新能源汽车市场需求呈爆发式增长，负极材料下游市场需求持续旺盛，但受地方政府控能耗、限电等因素限制，负极材料产量提升速度低于市场需求增速。在负极材料供不应求的背景下，中国头部负极材料企业开始加速在江西、四川、内蒙等地加速负极材料产能建设、建立负极材料一体化生产基地。中国各大头部企业在发展产能的同时，在新产品、新工艺方面持续向低成本、高性能的方向推进，并在纳米硅碳、硬碳、软碳、锂金属负极等新兴技术路线方向上进行技术储备。



图17 | 中国锂电负极材料行业部分企业图谱（来源：DeepTech）

中国锂电材料研究体系逐渐成熟

研究机构和人才是产业发展的重要支撑。在中科院物理所陈立泉院士的带领下，中国学者们对锂离子电池材料的研究已持续四十余载，研究机构和人才已经形成了较为成熟的研究生态。以中科院物理所、中科院化学所为代表的研究机构为中国锂电材料技术的发展奠定基础；南开大学、清华大学、中南大学等高校在细分领域发力；射洪锂电研究院等研究机构与产业园区紧密配合，提升产业自主创新能力。中国建立起了具备多层次结构的研究机构和人才的研究体系。

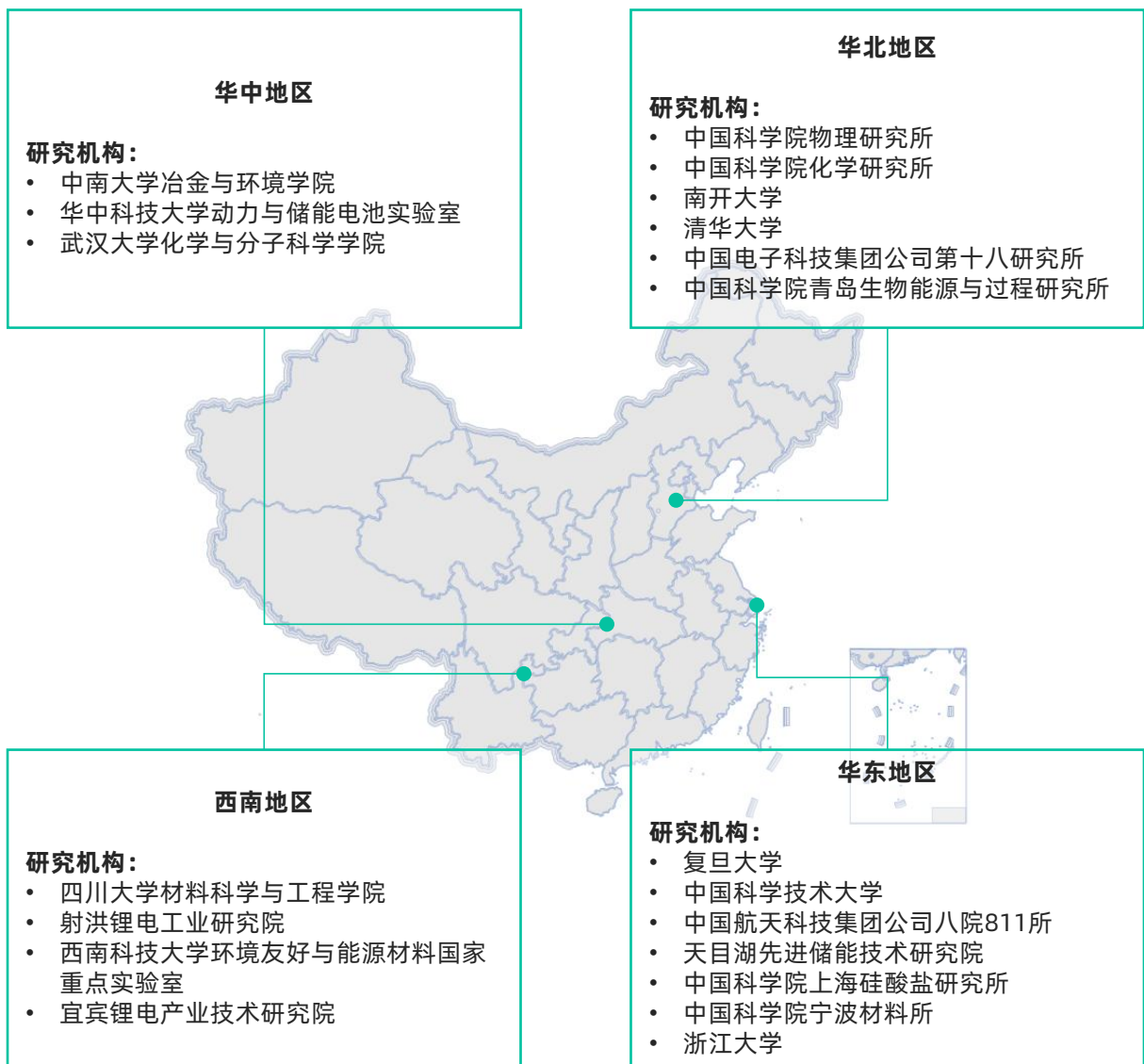


图18 | 部分中国锂电材料研究机构 (来源: DeepTech)

中国锂电材料研究体系逐渐成熟

专家人物	所在单位	研究方向
陈立泉 院士	中科院物理所	全固态锂电池、锂硫电池、锂空气电池等
万立骏 院士	中科院化学所	致力于纳米材料在能源和环境保护中的应用研究
南策文 院士	清华大学材料学院	锂电池用锂离子固态电解质及正极材料
欧阳明高 院士	清华大学汽车安全与节能国家重点实验室	动力电池热失控导致的安全问题
陈 军 院士	南开大学化学学院	新型有机电极材料、高能量密度层状氧化物正极材料
钱逸泰 院士	中国科学技术大学化学与材料科学学院	新型纳米材料及复合纳米材料在新能源领域的应用
孙世刚 院士	厦门大学化学化工学院	电催化、表界面过程，能源电化学（燃料电池，锂离子电池），纳米材料电化学
张 强 教授	清华大学	锂电池能源化学：锂键化学、离子溶剂复合结构、金属锂能源化学、电解液化学
黄学杰 研究员	中科院物理所	高性能锂二次电池及其关键材料研究与开发，固体材料中的离子的储存和输运特性研究
李 泓 研究员	中科院物理所	高能量密度锂离子电池、固态锂电池、电池失效分析、固体离子学
王兆翔 研究员	中科院物理所	二次电池材料结构设计、性能预测、材料内部及表面的物理化学过程
曹安民 研究员	中科院化学所	高性能动力电池正极材料的合成及应用
文 锐 研究员	中科院化学所	研究高比能锂电池充放电过程中电极/电解质界面动态演化规律的研究
辛 森 研究员	中科院化学所	高比能金属二次电池关键材料及组件的开发
程方益 研究员	南开大学化学学院	能源材料的设计、制备、反应机理与应用研究
焦丽芳 教授	南开大学化学学院	能源的高效储存与电催化转化：设计合成高性能锂/钠/钾离子电池关键电极材料，揭示新材料储能机制
牛志强 研究员	南开大学化学学院	锌离子电池、锂离子电池等新型储能器件
张 凯 研究员	南开大学化学学院	锂/钠二次电池中高比能电极材料设计、电化学反应机理解析以及新型电解液/固态电解质构筑等研究
赵 庆 研究员	南开大学化学学院	金属二次电池，在构建安全稳定的高能金属二次电池界面，固态电解质的界面优化，以及开发新型用于金属二次电池的正极材料
吴飞翔 教授	中南大学冶金与环境学院	高比能二次电池关键材料设计与材料界面科学等研究
李新海 教授	中南大学冶金与环境学院	在新型储能材料、新型化学电源、有色金属资源高效利用等领域
胡国荣 教授	中南大学冶金与环境学院	致力于锂电池正极材料的研发及产业化
赖延清 教授	中南大学冶金与环境学院	开展材料电化学（锂离子电池、锂硫电池、钠离子电池、金属空气电池和固态电池等）的研究

表6 | 中国锂电材料部分人才（来源:DeepTech）

中国锂电材料技术展望：锂电材料将持续向低成本、高性能、高安全性的方向发展

锂电材料将持续向低成本、高性能、高安全性的方向发展。在过去的十几年中，中国的锂电材料产业发展迅速，多种材料产业从无到有，从弱到强，从进口依赖到国产替代，直到现在大部分材料技术和产能均能与国际同行相匹敌，占据了全球锂电材料产业的半壁江山。随着中国“碳中和”“碳达峰”政策的持续推进，新能源汽车再次被推上风口浪尖，锂电材料也随之进入了新的发展阶段。

在技术层面，正极材料的三元材料更具潜力，低钴、无钴化是方向。作为锂离子电池性能关键材料，正极材料以高比容量、长寿命、高安全性、低成本为发展方向。在富锂锰基材料等新一代正极材料取得突破前，磷酸铁锂和三元材料将并驾齐驱。三元材料在比容量方面更具潜力，是近期正极材料产业发力的方向，其技术革新将带来更多可能。

负极材料中石墨材料将长期主导，新型材料尚需突破。石墨材料凭借成本优势还将长期主导市场，硅基材料、金属锂材料尚不成熟，需要负极材料本身或配套电解液材料的技术突破才能真正迈向市场。

在电解液材料上，固态电解质是发展趋势。作为锂离子电池安全性的基础，未来的发展方向在于更稳定、不易燃的基础上尽可能追求高性能。在这样的要求下，固态电解质是非常理想的发展方向。

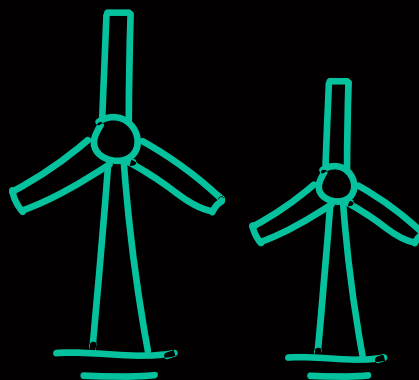
在隔膜材料上，涂层技术的发展将带来更安全的电池、更高比容量的电池材料体系。隔膜除了在电池全生命周期阻隔正、负极实现被动安全机制外，更需要针对高比容量正负极材料、高电压正极材料等新型材料体系以及快充、极端温度等工况场景发展具有温度响应、电压响应等主动安全策略，提高电池性能的新型功能隔膜。

中国锂电材料产业未来展望：锂电材料产业链完备，在政策的引导下具有无限可能

产业层面上，中国锂电池产业链完备，具备一定规模优势。中国是全球率先推广新能源汽车的国家之一，早在 2012 年就已开始在政策方面对新能源汽车产业进行扶持，拉动了锂电产业的发展。随着需求市场的迅速发展，中国锂电材料产业迎来爆发性增长，在各个领域诞生了全球领先的龙头企业。

双碳政策持续推进，锂电材料前景可期。2020 年中国提出“双碳”目标，并在 2021 年全方位落地，中国“涉碳”产业开始降碳转型，交通行业首当其冲，新能源汽车再一次登上风口浪尖。在氢燃料电池汽车技术尚不成熟的现在，锂电池将依然在新能源汽车领域占据主导地位，锂电材料产业依然前景广阔。

矿产资源受限，可能带来发展瓶颈。以锂钴镍为代表的矿产资源是锂电池材料的重要上游材料，其资源集中度较高，在全球呈寡头垄断特征。以锂资源为例，中国锂资源以盐湖为主，开发难度较大，成本较高，而锂矿石资源并不丰富，因此中国锂资源依赖进口，紧张的国际局势也可能带来供需矛盾。



Chapter 3

氢能材料

- 氢能突破的关键——储氢材料与氢燃料电池材料
- 储氢材料：氢能利用的第一道门槛
- 氢燃料电池材料：从氢能到电能关键枢纽
- 政府引导行业发展，氢能材料产业形成集群
- 产业园区：四大集聚区逐步成型
- 企业发展模式：从技术引进到自主创新
- 氢能产业的关键支撑：氢能研究机构与团队
- 技术展望：突破成本瓶颈，推进氢能普及
- 产业展望：产业集群初步形成，政策引导下中国氢能材料未来可期

氢能突破的关键——储氢材料与氢燃料电池材料

氢能是能源变革的重要一环。伴随着人类能源需求的快速增长，地球化石燃料的储量迅速下降，随之而来的还有二氧化碳等温室气体推动的全球暖化、海洋酸化等问题。人类迫切需要一场清洁、低碳、安全、高效的能源变革。可再生能源如太阳能、风能、水电等受其固有的间歇性、波动性限制，缺乏高效储能手段导致大量能源浪费。氢能作为一种洁净的二次能源载体，可以由可再生能源高效转化得到，且具备替代化石能源的潜能，是实现从化石能源到可再生能源的可持续循环中的关键一环。

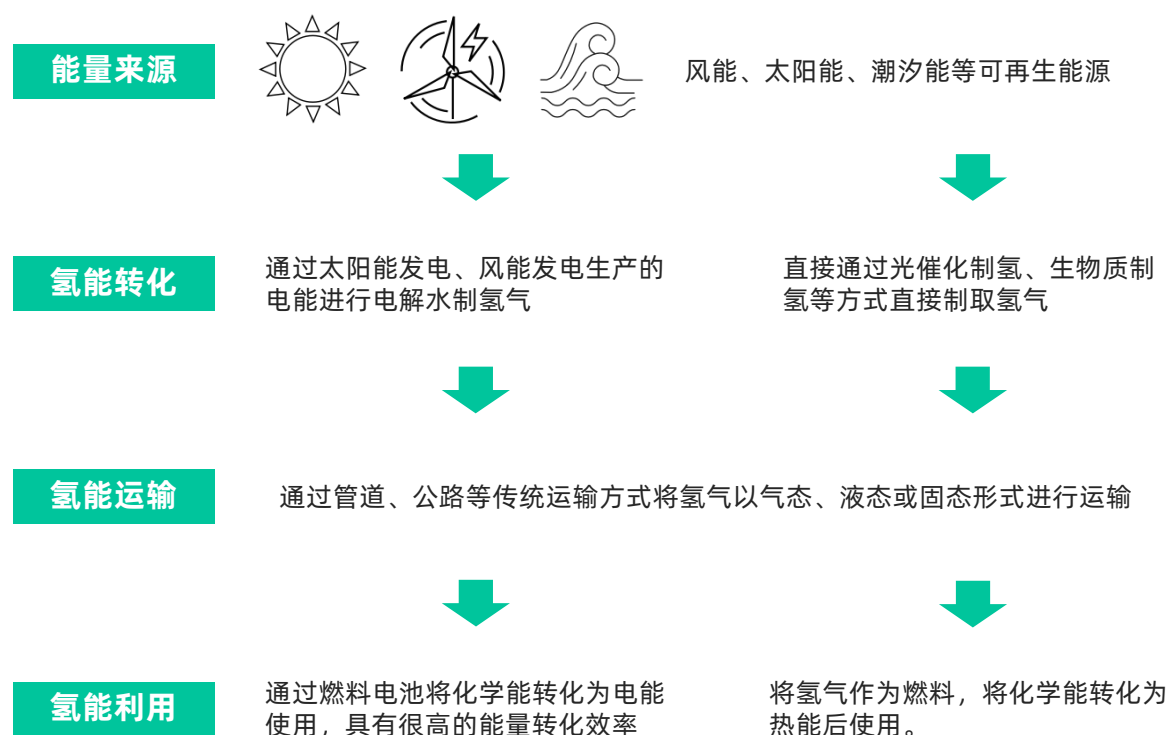


图 19 | 来自可再生能源的“绿氢”氢能产业链（来源：DeepTech）

储氢技术和氢燃料电池技术是限制氢能普及使用的瓶颈。氢能产业链由制氢、氢气储运和氢气利用三部分组成。由于氢气储运较为困难，氢气储运环节限制了氢能的大规模普及使用，高性能的储氢材料将为氢能发展带来革命性突破。在氢能利用环节，目前氢气主要在工业生产中使用，尚不成熟的氢燃料电池技术限制了氢能的广泛使用，而低成本高性能的氢燃料电池电堆则是行业突破的关键。

储氢材料：氢能利用的第一道门槛

氢气具有密度小、液化困难等特点，再加上氢脆现象的发生，氢气的储存对材料要求很高，这也是氢能利用的瓶颈。氢在常温下为气体，密度仅为 0.0899g/L，常压下需要 -252.7°C 才会以液态形式存在，这些因素导致氢气的运输效率低下。氢气分子半径极小，导致氢气在高压下可以穿过微孔从容器中溢出或与金属容器反应，使材料强度降低而导致开裂，即氢脆现象。在氢能需求日益增长的背景下，探索新材料来实现氢气的安全、高效的存储方式成为了研究的焦点。本章在此对其中关键材料的现状和前沿领域进行逐一分析。

• 高压气态储氢技术：碳纤维材料成为主流

高压气态储氢指在氢气临界温度以上通过高压压缩的方式储存气态氢，其储存方式是将氢气压缩到一个耐高压的容器中。高压储氢容器所用材料的要求是安全、可靠、成本可控且材料本身不与氢气发生任何强相互作用或反应。目前的热点方向是通过使用复合纤维材料缠绕气瓶，从而增强其结构强度，增大工作压力。玻璃纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、碳纤维等均被用于制造纤维复合材料缠绕气瓶，其中碳纤维以其突出的综合性能逐渐成为主流纤维原料。

• 液态储氢技术：有机液体储氢材料极具潜力

液态储氢包含低温液态储氢和有机液态储氢两种方式。低温液态储氢是将氢气在低温下液化，然后储存在低温绝热真空容器中，液氢不易制取，且由于液氢沸点低，一旦发生泄漏可能导致严重的安全事故，因此低温液氢存储对储存设施的要求很高。

有机液态储氢是利用一些有机液体化合物通过加氢反应将青提固定，形成分子内结合有氢的液态化合物以实现储氢的功能。有机液态储氢可以在常温和常压下以液态形式将氢气进行储存和运输，到使用地点后在催化剂作用下通过脱氢反应获取氢气。

储氢材料：氢能利用的第一道门槛

有机液态储氢过程安全高效，且对储存材料和工艺要求都不高，尽管该技术仍存在能耗高、技术复杂等问题待解决，仍然拥有可观的发展潜力。

• 固态储氢技术：将为燃料电池汽车带来革命的储氢方式

固态储氢法是一种新型储氢方法，利用钛、镁、锆、铈等金属及其合金吸收氢气形成稳定氢化物的特性，将氢气以固态的形式进行存储运输的方式。固态储氢技术具备储氢密度大、安全性好、能耗低、释放的氢气纯度高等优点，是燃料电池汽车理想的储氢方式。但由于该项技术还尚不成熟，存在着充放氢效率低、金属易粉化等问题，目前还无法大量应用，技术突破需要性能更加优秀的固态储氢材料。

高压气态储氢技术

高压储氢容器所用材料的要求是安全、可靠、成本可控且材料本身不于氢气发生任何强相互作用或反应。目前的热点方向是通过使用复合纤维材料缠绕气瓶，从而增强其结构强度，增大工作压力。其中碳纤维以其突出的综合性能逐渐成为主流纤维原料。

液态储氢技术

有机液态储氢是利用一些有机液体化合物通过加氢反应将青提固定，形成分子内结合有氢的液态化合物以实现储氢的功能。有机液态储氢可以在常温和常压下以液态形式将氢气进行储存和运输，到使用地点后在催化剂作用下通过脱氢反应获取氢气。

固态储氢技术

固态储氢技术具备储氢密度大、安全性好、能耗低、释放的氢气纯度高等优点，是燃料电池汽车理想的储氢方式。但该项技术还尚不成熟，存在着充放氢效率低、金属易粉化等问题，目前还无法大量应用，技术突破需要性能更加优秀的固态储氢材料。

图20 | 多种储氢技术目前的挑战及机遇（来源：DeepTech）

氢燃料电池材料：从氢能到电能关键枢纽

氢燃料电池指氢质子交换膜燃料电池（Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC），是将氢气和氧气反应释放的化学能转化为电能的装置。PEMFC 不受卡诺循环限制的，因此具备高能量转化效率的特征。氢燃料电池的基本单元由膜电极组件（MEA, Membrane Electrode Assembly）和双极板组成，其中膜电极组件通常包含质子交换膜、催化剂层和气体扩散层等部分。

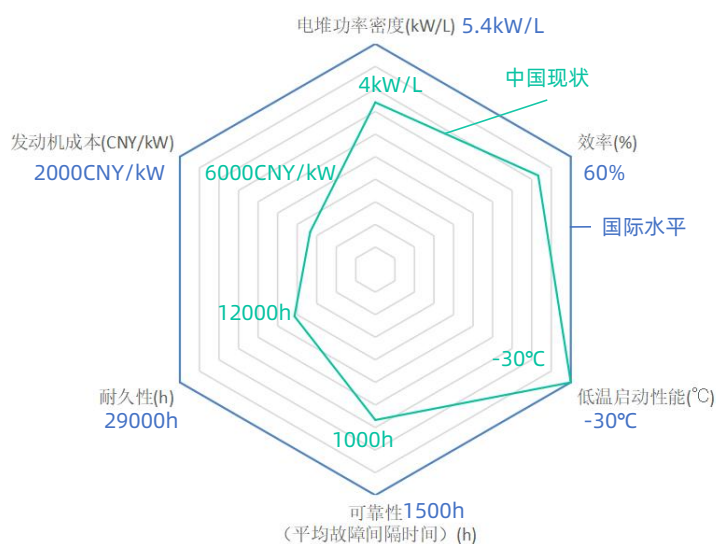


图21 | 2020年中国与世界 PEMFC 技术水平对比雷达图（来源：《质子交换膜燃料电池研究进展》）

• 质子交换膜：全氟磺酸质子交换膜稳占主流，高温膜、复合膜、碱性膜为未来发展方向

质子交换膜处在 MEA 最中心的位置，功能是在反应时让阳极失去电子的氢离子（质子）透过到达阴极，但阻止电子、氢分子、水分子通过。质子交换膜对材料要求很高：需要高质子交换律、低电子导电率和气体渗透率、稳定的化学和电学性能、优良的力学性能和热稳定性。研究认为全氟磺酸质子交换膜基本满足质子交换膜的需求，是质子交换膜材料的主流。为了提高质子交换膜性能，世界主要研究机构在质子交换膜领域以高温膜、通过对全氟性磺酸膜进行工艺加工改性以提高其高温性能的复合膜、能够在碱性环境下工作，可以放宽催化剂选择范围的碱性膜为主要研究方向。

氢燃料电池材料：从氢能到电能关键枢纽

- **催化剂材料：从贵金属电催化剂向低成本催化剂发展**

催化剂的性能决定着氢燃料电池的整体性能。催化剂层是氢气燃料电池中氢气和氧气发生电化学反应产生电流的场所，是燃料电池的关键材料之一。催化剂可以显著降低化学反应的活化能，改变化学反应速度。催化剂位于质子交换膜的两侧，决定了氢、氧在电极上的氧化还原反应的速度，即决定了氢燃料电池的整体性能。

超低铂或无铂催化剂是未来研究的重点。催化剂材料的要求包括高催化效率、高活性和高稳定性。贵金属(Pt)是催化 HOR 和 ORR 性能最高的材料，且满足作为电极催化材料的其他要求，因此含铂催化剂成为了目前主要的商用催化剂。但铂价格昂贵、储量有限且易中毒，这些缺点导致了催化剂的成本、效率和稳定性难以满足大规模商业化需要。为了降低催化剂中的铂含量，目前的主要研究方向包括改进催化剂的微观结构、开发铂高度分散的新型碳载体、开发钙钛矿族作为催化剂等。

- **双极板材料：石墨材料为主流，制造工艺向模压法聚焦；金属和复合材料有较大发展空间**

双极板是氢燃料电池的重要组成部分，主要功能是连接单体模块、分隔反应气体、收集电流、散热和排水等。为实现以上功能，双极板对材料的强度、致密性、耐腐蚀性、导电性和导热性有较高的要求。目前双极板材料以石墨板、金属板和复合材料板为主。石墨双极板最为成熟且已实现国产化，制备工艺方面正在从机加工法向成本更低的模压法方向发展。

金属双极板的力学性能和导电导热性能优异，但由于金属双极板表面易被腐蚀，导致使用寿命较短，需要进行表面镀膜、涂层处理。复合双极板采用树脂混合石墨粉和增强纤维等材料制成，兼具石墨板和金属板的优点，重量轻且抗腐蚀，但其加工繁琐，成本有待降低。

氢能材料产业：四大集聚区逐步成型

在政策的引导下，中国氢能产业园区发展迅速，各地区因地制宜，在氢能材料领域进行布局，逐渐形成了长三角、珠三角、环渤海和川渝鄂四大集聚区。

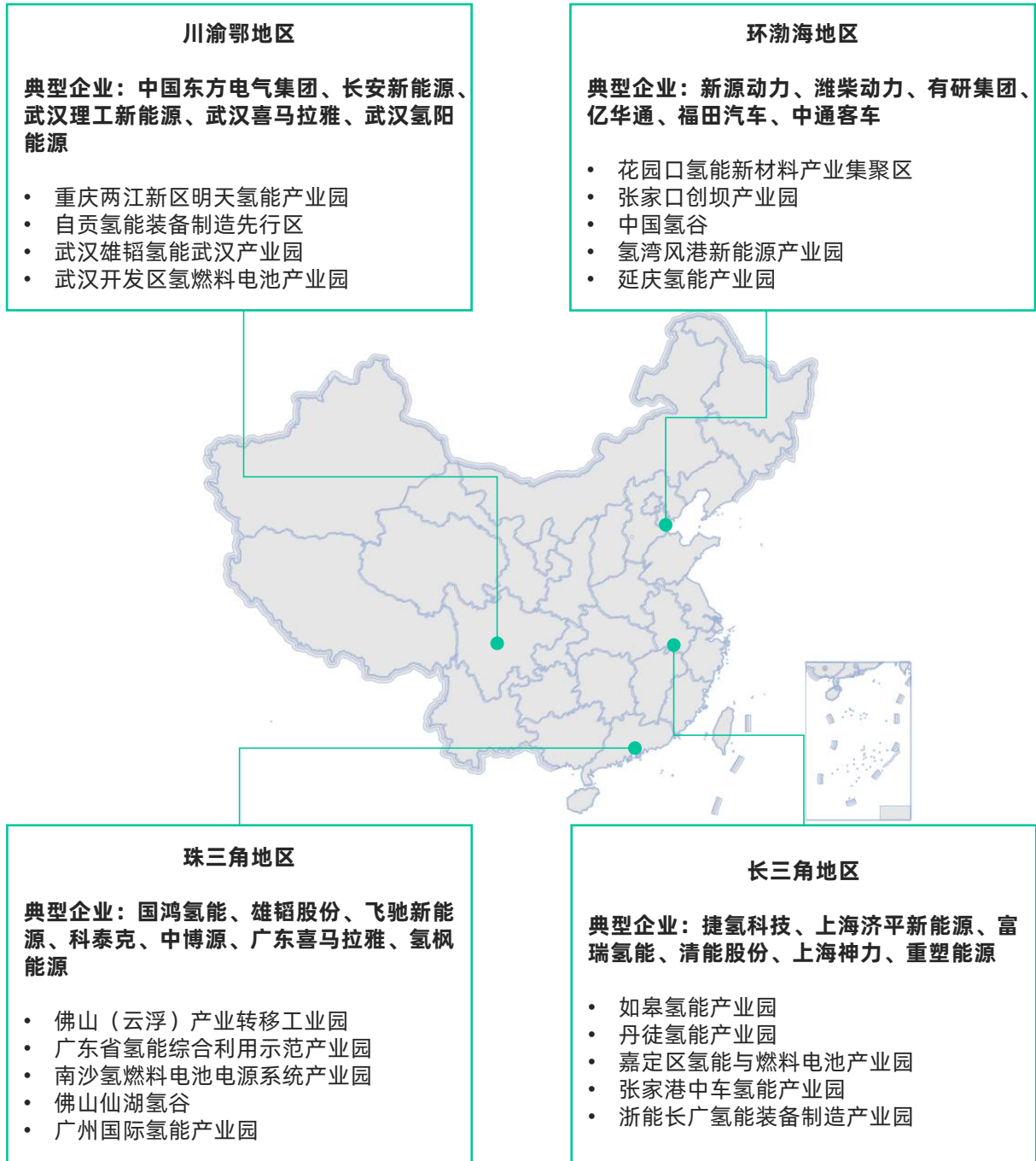


图22 | 中国四大氢能产业集聚区（来源：DeepTech）

政府引导行业发展，氢能材料产业形成集群

氢能源鼓励政策高密度出台，顶层规划持续推进。随着全球能源低碳化转型需求逐渐迫切，各国政府先后出台政策鼓励本国氢能产业发展。中国政府于2019年将氢能列入了清洁能源产业，并持续推出鼓励政策，加速中国氢能产业发展。2022年3月23日，国家发改委推出《氢能产业发展中长期规划（2021-2035）》，为中国氢能产业发展制定了顶层规划。

发布时间	政策名称	主要内容
2019年	《绿色产业指导目录（2019版）》	燃料电池装备制造、氢能利用设施建设和运营被列入了清洁能源产业。
2019年	《政府工作报告》	推动充电、加氢等设施建设。
2020年	《中华人民共和国能源法（征求意见稿）》	优先发展可再生能源、支持开发应用替代油气的新型燃料和工业原料氢能纳入能源范畴。
2020年	《2020年能源工作指导意见》	从改革创新和推动技术产业化角度推动氢能产业发展。
2020年	《新能源汽车发展规划（2021-2035年）》	攻克氢能储运、加氢站、车载储氢等氢燃料电池汽车应用支持技术。提高氢燃料制储运经济性。因地制宜开展工业副产氢及可再生能源制氢技术应用。
2021年	《国家“十四五”规划纲要和2035年远景目标纲要》	氢能与储能等前沿科技和产业变革领域，组织实施未来产业孵化与加速计划，谋划布局一批未来产业。
2021年	《关于组织开展“十四五”第一批国家能源研发创新平台认定工作的通知》	氢能及燃料电池技术：研究内容（包括但不限于）高效氢气制备、储运、加注和燃料电池关键技术。
2021年	《2030年前碳达峰行动方案》	积极扩大电力、氢能、天然气、先进生物液体燃料等新能源、清洁能源在交通运输领域应用。
2021年	《重点新材料首批次应用示范指导目录（2021年版）》	储氢气瓶用碳纤维复合材料 AB型稀土储氢合金 氢能源燃料电池用柔性石墨双极板
2022年	《氢能产业发展中长期规划（2021-2035）》	加快质子交换膜燃料电池技术创新，开发关键材料，提高主要性能指标和批量化生产能力，持续提升燃料电池可靠性、稳定性、耐久性。

表7 | 支持锂电材料产业发展部分政策（来源：DeepTech）

氢能材料产业：四大集聚区逐步成型

四大氢能产业集聚区逐步成型，氢能产业链逐步完整。氢能产业链涉及制氢、储运、加氢、氢燃料电池及配件、终端应用等诸多环节，产业链较长，涉及的企业、产品较多，技术密集，因此设立能够集中多种氢能相关企业的产业园可以有效推进中国氢能产业的发展。随着各省市产业园区的不断建设，截至 2020 年，中国已有氢能产业园约 30 个，并形成了长三角、珠三角、环渤海、川渝鄂四个氢能产业集聚区，储氢材料、氢燃料电池关键材料等氢能相关材料企业大多在此集中。本章选取若干在氢能相关材料进行布局的典型产业园区，从园区发展的驱动力角度进行分析。

氢能具有清洁、应用领域广泛的特征，在中国“碳中和、碳达峰”政策背景下，氢能的发展对当地的能源结构调整有巨大贡献。能源结构调整的需要是促进氢能及相关材料产业园区发展的重要因素。

• 上海市：嘉定氢能港

嘉定区作为上海汽车工业重镇，选择了交通领域作为氢能产业发力点，在氢燃料电池及氢燃料电池汽车产业进行积极布局。

长三角是中国能源使用的主要地区之一，尽管西气东输、西电东送等国家能源工程源源不断地为长三角输送清洁能源，但相对于经济的高速发展和国家给长三角的发展任务来说，长三角地区的经济增长仍然依靠大量的能源消耗，表明长三角地区长期存在能源供给的短板和缺口。同时，“双碳”目标也促使长三角地区主动进行能源结构调整，发展氢能相关产业成为了优质解决方案之一。

在氢能相关材料领域，嘉定氢能港引入了捷氢科技、上海济平新能源等专注于氢燃料电池膜电极、催化剂和气体扩散层等氢能相关材料领域研发制造企业，并将在此基础上建立较完善的氢能产业框架体系。

氢能材料产业：四大集聚区逐步成型

氢能产业包含上游制氢、中游运氢和下游用氢等众多环节，技术密集。拥有较为完备的氢能源产业链的产业园是氢能企业更好的发展土壤。

· 广东省：佛山（云浮）产业转移工业园

佛山（云浮）产业转移工业园是中国较早布局氢能产业的工业园区之一，整合构筑了领先全国的氢能产业体系和产业集群；构建起了“研发—原材料—制氢—储氢—加氢—应用—服务配套”的氢能全产业链条。

佛山市作为中国制造业名城，为帮扶粤西北欠发达的云浮市，从2013年开始着手建设佛山（云浮）产业转移工业园。2014年底佛山对口帮扶云浮指挥部委托清华大学编制了《佛山云浮氢能产业发展战略规划》，开始了对氢能产业的超前布局。2015年，广东国鸿氢能科技有限公司在佛山（云浮）产业转移工业园注册，以此为起点，氢能和燃料电池汽车产业链迅速进驻，逐步形成了聚集态势。

佛山（云浮）产业转移工业园一方面引进国际前沿技术进行消化吸收，带动本土企业自主研发，培育了一批氢能产业龙头企业；另一方面在上游引入制氢、储氢企业，在下游引入“广东电网综合能源示范”“新能源车推广运营”等项目企业，积极打造完整产业链闭环发展模式，在中国构建起制氢加氢、氢燃料电池及动力总成、氢能源汽车整车制造、氢能研究及产品检测等产业集群。佛山（云浮）产业转移工业园推动了中国构建有国际竞争力的氢能产业体系。

氢能材料发展模式：从技术引进到自主创新

引入国外先进技术，逐步发展自主创新。中国氢能及燃料电池技术起步较晚，早期行业基础薄弱，缺乏人才、技术、市场和经验，部分核心技术从零开始成本极高，限制了中国企业的竞争力。因此部分企业选择在初期对国外的先进技术进行引进，将先进技术消化吸收。同时这些企业开始自主创新，联合中国知名院校进行技术合作，推动科研成果的市场转化，形成研发合力和产业共鸣。

典型企业：国鸿氢能

国鸿氢能成立于 2015 年，是佛山（云浮）产业转移工业园在氢能产业布局的第一步。2016 年广东国鸿氢能科技有限公司与加拿大巴拉德合资企业落户云浮市，共建氢燃料电池生产线。国鸿氢能在消化吸收和再创新的基础上建成了当时全球规模最大的燃料电池电堆生产线，确立了自身在氢能燃料电池领域的龙头地位。

在消化国外先进技术的基础上，国鸿氢能加大研发投入，开展自主创新。2017 年国鸿氢能与佛山科学技术学院、佛山（云浮）产业转移工业园区共同组件新能源产业研究院，开展产学研项目合作。随后，国鸿氢能获批建立广东省氢能技术重点实验室和国家博士后科研工作站，并成为国家高新技术企业。国鸿氢能与大连化学物理研究所、上海大学、北京理工大学等高校的合作也为其研发工作提供了人才与技术支持。

经过数年的研发投入、队伍建设和高校产学研合作，国鸿氢能已开发出具有自主知识产权的高性能电堆和多款燃料电池系统，实现了从技术进口到自主创新的氢能企业发展。

氢能产业的关键支撑：氢能研究机构与团队

中国的氢能技术尚且不成熟，储氢、氢燃料电池等技术还有待突破。在寻求技术突破的过程中，各大高校和科研院所扮演了相当重要的角色。中科院大连物化所等研究单位为中国氢能产业奠定了技术基础；清华大学、南开大学、同济大学等科研单位在细分领域进行深入研究，完善了中国氢能研究体系。随着中国氢能产业的发展，部分产学研深度融合的科研院所纷纷涌现，如佛山（云浮）氢能产业与新材料发展研究院等。科研院所与研究团队共同支撑起了中国氢能技术的研究体系。

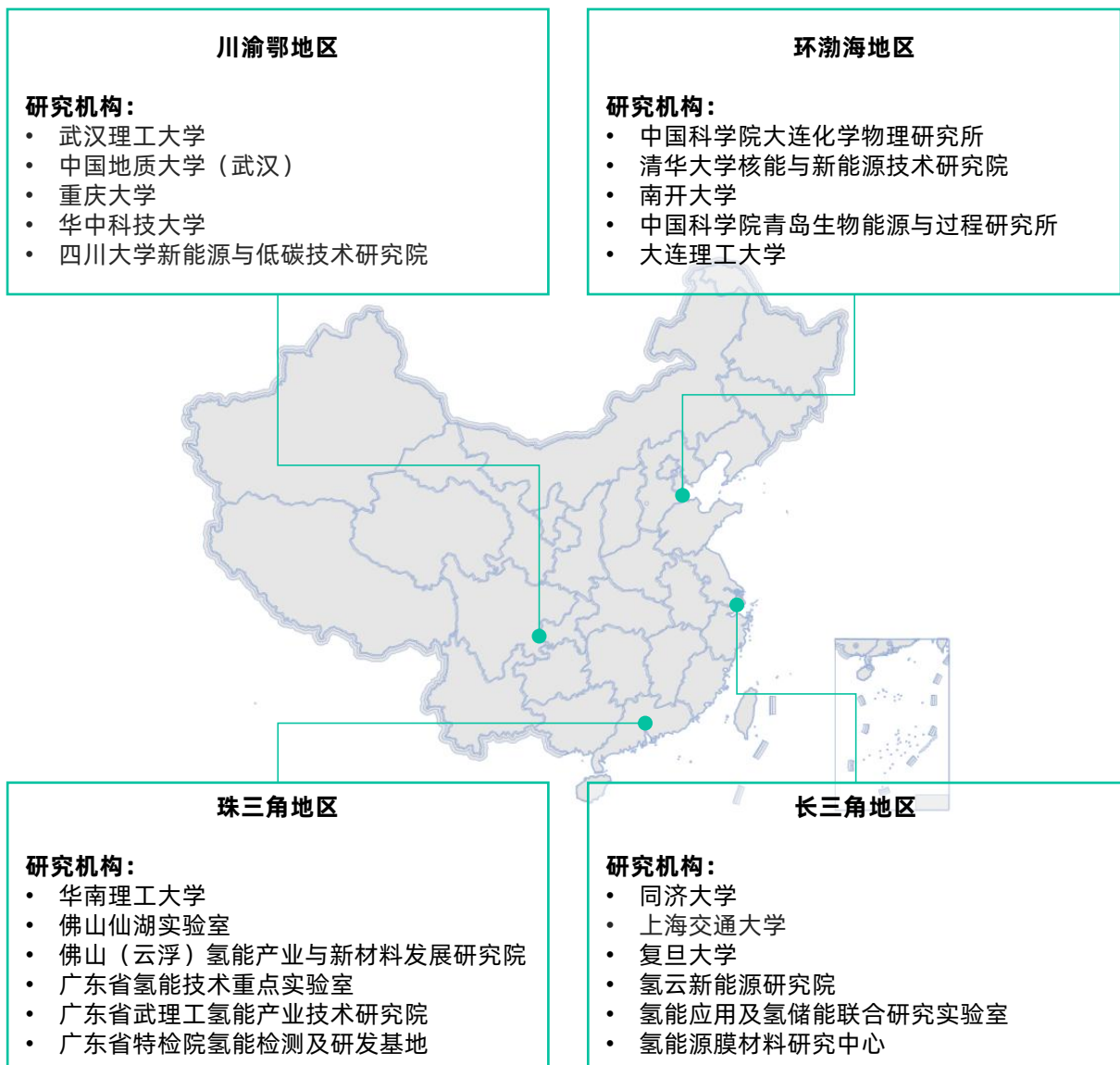


图23 | 中国部分氢能研究机构（来源：DeepTech）

氢能产业的关键支撑：氢能研究机构与团队

专家人物	所在单位	研究方向
衣宝廉 院士	中科院大连化学物理研究所	化学能与电能的相互转化研究，是中国燃料电池研究开拓者之一
包信和 院士	中科院大连化学物理研究所	事新型催化材料的创制和能源清洁高效转化过程的研发，在催化基础理论的发展和新催化剂开发、应用等方面取得了重要研究成果。
杨裕生 院士	中国人民解放军防化研究院	研究锂-硫电池、超级电容器、液流电池、铅炭电池等新型电源，参与推动中国的氢能与燃料电池、电动汽车增程技术的发展
孙世刚 院士	厦门大学化学化工学院	电催化、表界面过程，能源电化学（燃料电池，锂离子电池），纳米材料电化学
丁文江 院士	上海交通大学氢科学中心	氢科学与技术、先进镁材料及其精密成型，特别是固态镁基储氢材料的应用研发
邹志刚 院士	南京大学 环境材料与再生能源研究中心	长期从事光催化材料的设计、制备、反应机理及其应用的基础研究
魏子栋 教授	重庆大学化学化工学院	电化学反应工程，分子催化，新能源材料化学与化工
毛宗强 教授	清华大学核能与新能源技术研究院	纳米碳储氢、新型制氢方法和氢能经济与安全、氢能标准、氢能战略等与氢能有关的课题
王 诚 研究员	清华大学核能与新能源技术研究院	长期致力于氢燃料电池研究，主要研究方向为燃料电池关键材料与部件、电堆集成技术及其前瞻性技术。
程寒松 教授	中国地质大学（武汉）可持续能源实验室	储氢材料设计与制备；新型直接燃料电池技术
潘 牧 教授	武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室	材料工程学；新能源新材料；燃料电池汽车
明平文 教授	同济大学汽车学院	燃料电池的过程机理解析与衰减抑制，过程强化理论与超高功率密度电堆，传递与反应新过程及高效新材料体系
邹建新 教授	上海交通大学氢科学中心	镁基储氢材料，镁电池和燃料电池系统
曾小勤 教授	上海交通大学氢科学中心	储氢材料设计与制备、电池材料设计与表征、先进镁合金设计与成型
陶占良 教授	南开大学化学学院	能源材料化学；储氢材料；化学电源
王一菁 研究员	南开大学化学学院	储氢材料；高容量电池材料
廖世军 教授	华南理工大学化学与化工学院	电催化剂电化学及燃料电池：燃料电池催化剂、燃料电池膜电极制备技术；燃料电池极板及电堆设计；大功率燃料电池电堆的开发
闫常峰 研究员	中国科学院广州能源研究所	从事氢气制备和氢燃料电池等氢能利用的基础研究与开发利用

表8 | 氢能材料部分人才（来源：DeepTech）

氢能材料技术展望：突破成本瓶颈，推进氢能普及

突破氢能关键材料瓶颈是氢能产业迅速发展的关键。在“碳达峰、碳中和”目标的指引下，氢能作为一种清洁能源，兼具高效、可持续等诸多优点，正在逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一，是实现碳达峰、碳中和目标，深入推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系的重要一环。以储氢材料和氢燃料电池材料为代表的氢能关键材料在一定程度上决定了中国氢能产业的发展速度，是需要首先突破的技术瓶颈。

储氢材料：发展方向以高存储密度与高安全性为主，储氢材料是破局关键。氢的储存与运输是氢能利用的关键一环，决定了氢能能否得到大规模应用。高压气态储氢是目前最为成熟的储氢方式，目前的发展方向以高强度碳纤维储氢瓶为主；低温液态储氢主要用于军工领域，民用难以普及；有机液态储氢和固态储氢技术在应用前还需要技术上的突破。储氢材料的研发方向应从以下几个方向入手：1. 原料易得成本低廉、能够工业化制备、2. 向低密度材料努力，进一步提高材料储氢密度。

氢燃料电池材料：成本和寿命瓶颈限制了氢能的普及使用，因此低铂、超低铂或非铂催化剂是研究重点；质子交换膜层面，为了提升燃料电池性能，质子交换膜呈现超薄化趋势。还需要对各层间界面结构进行优化设计，降低燃料电池中的催化剂团聚、流失现象，减少恶劣工况对燃料电池耐久性的影响。超薄化质子交换膜可以降低质子传输阻抗、提升自增湿能力，对燃料电池性能提升明显，是发展趋势所在。

氢能材料产业展望：产业集群初步形成，政策引导下中国氢能材料未来可期

产业层面：

四大产业集聚区逐渐形成，氢能材料产业蓬勃发展。截至 2022 年 3 月，中国现存氢能相关企业约 2200 家，初步形成了长三角、珠三角、环渤海和川渝鄂四个产业集聚区，带动了区域氢能产业布局。

各地因地制宜发展氢能燃料电池汽车产业集群，促进全产业链发展。长三角区域以上海为中心，依托当地汽车产业集群基础，建立了较为完善的氢燃料电池产业链；珠三角区域布局较早，积极引入国外技术，消化吸收带动中国企业成长，全产业链逐步完成，在物流运输、城市交通等方面初步实现规模化应用；环渤海以北京为中心，冬奥会为契机，依托强大科研院所资源，推动加氢站及氢燃料电池产业发展；川渝鄂区域形成了较为完整的产学研用发展体系，依托当地丰富水电、天然气资源，推动氢能产业链发展。

顶层设计持续推进，国家政策引导氢能材料产业健康发展。2022 年国家发改委、国家能源局联合发布《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，为氢能发展带来了顶层设计，使氢能产业发展有了更为明确的方向和节奏。随后中国各地纷纷制定氢能产业的中长期发展规划和扶持政策。氢能产业扶持政策形成了中央-地方的立体架构，氢能产业迎来加速期。

About us

DeepTech 成立于 2016 年，是一家专注新兴科技的资源赋能与服务机构，以科学、技术、人才为核心，聚焦全球新兴科技要素的自由链接，为产业、政府、高校、科研院所、资本等科技生态的关键角色提供服务，通过科技数据与咨询、出版与影响力、科创资本实验室三大业务板块，推动科学与技术的创新进程。

About the report

关键新材料是未来高新技术产业发展的基石和先导。随着中国产业升级的不断推进，产业对新材料的创新和突破提出了新的要求，新材料的创新突破也将为产业升级提供推动力。

本报告围绕先进半导体材料、新型锂电材料、氢能材料三个关键新材料领域，直击新材料产业链存在的关键、薄弱环节，从技术前沿、政策、产业园区、企业、研究机构和人才角度进行分析。

Please use the following to reference the report

《弥补产业薄弱环节，突破关键材料困境，2022关键新材料技术及创新生态发展图景研究报告》，2022. DeepTech 2022 Insights. China.

©DeepTech 2022

Design by DeepTech