

固态电池产业化，还要闯过几道关

□ 王禹涵

全固态金属锂电池被誉为下一代储能技术的“圣杯”，但长期以来因种种技术难题而难以实用化。日前，清华大学教授张强团队在固态电池研究方面取得新进展：研发的新型含氟聚醚电解质，让固态电池的能量密度达到604瓦时每千克，较现有商业化电池提升近3倍。

今年初，工业和信息化部等8部门联合发布的《新型储能制造业高质量发展行动方案》，明确将固态电池列为锂电池发展的重要方向，并提出加强固态电池等新型储能技术标准布局。

实验室里的创新火花，能否照亮大规模产业化的漫漫前路？固态电池的真正普及，还要越过几重关山？

多条技术路线并行

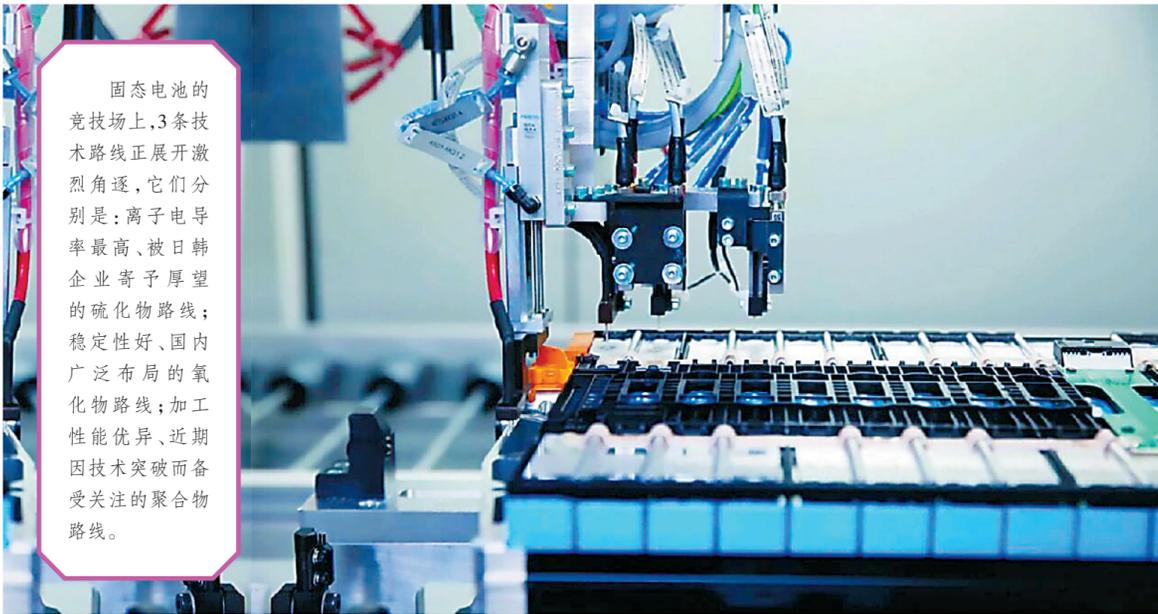
固态电池的竞技场上，3条技术路线正展开激烈角逐。它们分别是：离子电导率最高、被日韩企业寄予厚望的硫化物路线；稳定性好、国内广泛布局的氧化物路线；加工性能优异、近期因技术突破而备受关注的聚合物路线。

“硫化物路线的性能上限最高，目前在学术圈和产业界已基本成为共识。”西安电子科技大学副教授李思吾说，硫化物电解质拥有接近液态电解质的离子电导率，是实现快充和高性能的理想选择。

在这条技术路线上，日本丰田积累了约1300项相关专利，并宣布将于2027—2028年推出搭载全固态电池的电动车型。宁德时代、比亚迪等国内头部企业也将其作为核心攻关方向之一。

在氧化物路线方面，固高科技股份有限公司等企业正通过开发复合电解质体系推进产业化。据其首席科学家朱星宝介绍，公司目前准固态电池与现有液体电池生产线兼容度约90%，计划2028年推出基于复合氧化物、聚合物电解质的全固态电池。

聚合物路线正展现出“弯道超车”的潜力。张强团队研发的新型含氟聚醚电解质，巧妙解决



固态电池的竞技场上，3条技术路线正展开激烈角逐，它们分别是：离子电导率最高、被日韩企业寄予厚望的硫化物路线；稳定性好、国内广泛布局的氧化物路线；加工性能优异、近期因技术突破而备受关注的聚合物路线。

了长期困扰固态电池的界面难题，让电池在实现超高能量密度的同时，兼具卓越的安全性。

西安交通大学先进储能电子材料与器件研究所教授徐友龙认为，从实现大规模产业化角度看，聚合物路线潜力最大。其工艺兼容性好，界面问题更易解决，综合性能均衡。

“完美样品”难下生产线

实验室中的突破令人振奋，但将科研成果转化为商业化产品，却面临着诸多挑战。李思吾坦言，“从学术视角看，被低估的挑战远远多于被高估的技术”。

“固—固界面”问题被学界视为全固态电池最核心的技术瓶颈。在液态电池中，流动的电解液可以充分包裹电极材料，离子传输畅通无阻。

而固态电池中，电解质与电极如同坚硬的“顽石”，接触面存在无数微小缝隙。“目前全固态电池的良率远低于成熟的液态电池。”徐友龙解释，“这不仅是接触问题，更是涉及电化学、化学、力学等多方面耦合的综合性难题。”

“当前材料性能已基本够用，界面失效才是致命伤。”李思吾举例，实验室0.1安时单层电池的循环寿命能做到大于1000圈，但放大到100安时大软包时，寿命往往“腰斩”。硫化物电解质的合成从克级放大到公斤级时，离子电导率通常下降30%—50%。

技术瓶颈直接推高了成本。数据显示，全固态电池成本约400—800美元/千瓦时，是液态电池的3—5倍。关键材料硫化锂价格虽已回落，仍占据电解质成本的主要部分。

制造环节同样面临挑战。全固态电池的生

产线与现有的液态电池生产线兼容度不足50%，需要全新的干法电极、静压设备，投资巨大。安全性也需重新评估，李思吾说：“硫化物电解质在200摄氏度以上与锂金属或高镍正极会发生剧烈放热，绝热温升可达800摄氏度，比液态电池更早触发热失控。”

对于未来格局，高工产业研究院(GGII)院长高小兵分析说：“全固态电池的商业化仍需时间，2027年只能是试产，远未达到规模上量元年。”他认为，一个“高端全固态、主流半固态”的多元并存时期即将到来，过渡期“短则2—3年，长则5—10年”。

产业化并非“百米冲刺”

尽管困难重重，但产业界正在多维度探索突

破路径，为固态电池产业化按下“加速键”。

北京纯锂新能源科技有限公司率先将全固态电池应用于储能和两轮电动车领域。该公司董事长杨帆分享了他们的解决方案：“我们选择聚合物体系电解质技术路线，匹配磷酸铁锂加石墨的正负极材料体系，主要解决磷酸铁锂电池的本质安全问题。从主要原材料看，供应链体系已经非常成熟，成本稳定。”

“我们已完成中试进入量产，开始向客户交付产品。”杨帆介绍，公司的主力市场并非电动汽车，而是两轮车和用户侧储能。这些场景对极端性能要求不高，但对安全性的需求极为迫切。

广州鹏辉能源科技股份有限公司则将其半固态高安全电池Secu系列，率先应用于高端移动电源市场，既实现了商业化落地，也为技术迭代积累了宝贵经验。

市场孵化需要更多元化路径。高小兵建议，不必只盯着“车规级”这一独木桥，可引导产业进军低空经济、人形机器人等高端领域。据GGII预测，2030年人形机器人电池需求将超100吉瓦时。“这些领域对价格敏感度低，对性能要求高，是固态电池绝佳的‘孵化器’。”高小兵说。

为了跨越从实验室到工厂的“死亡谷”，2024年成立的中国全固态电池产学研协同创新平台正在发挥关键作用。该平台整合顶尖研发资源，推动专利共享，集中攻坚界面、成本等共性难题。上海等地也设立了专项基金，支持固态电池的技术研发与产业化。

徐友龙建议，应建立开放共享的中试平台，让高校和初创公司的优秀技术能进行工程化验证和工艺摸索，缩短从技术到产品的时间。

产业化不是“百米冲刺”，而是一场考验战略定力与创新智慧的“马拉松”。高小兵提醒，固态电池对现有格局将是“渐进式替代”而非“颠覆性变革”。“固态电池产业化后也不会立即取代液态电池，其成本不会快速下降，且多数场景对电池能量需求并非越高越好。”他建议，政策制定需要更具前瞻性和包容性，既要鼓励前沿技术突破，也要稳定现有产业链的发展信心。

据《科技日报》

□ 陈慧珊

在瑞典芬斯蓬市——距离斯德哥尔摩约3小时车程的工业小镇，西门子能源公司工厂的车间里，一排排外形工业感十足的设备看似与“绿色”毫不沾边。但这些卡车大小的涡轮机，却是全球向清洁能源转型进程中至关重要却常被忽视的推动者。这款名为SGT-800的涡轮机全长6.2米，可用于天然气发电厂的发电作业。

燃气涡轮机的发电原理是通过高温加热空气与燃料的混合物，驱动涡轮叶片旋转，进而带动发电机将能量转化为电能。天然气作为化石燃料，燃烧时会释放温室气体二氧化碳，加剧气候变化。

而SGT-800的独特之处在于其兼容清洁燃料的能力——可使用天然气与氢气的混合燃料，氢气占比最高可达75%。氢气燃烧时不产生任何二氧化碳，被视为理想的绿色燃料。

西门子能源新加坡研发总监菲利普·盖佩尔博士表示，与同等容量的纯天然气燃气涡轮机相比，这款氢能兼容涡轮机可减少47%的二氧化碳排放。他在参观德国企业芬斯蓬工业中心时透露，若将氢气用于非氢能兼容涡轮机，可能导致燃烧不稳定，大幅增加爆炸风险。

新加坡的能源转型诉求

新加坡约95%的电力依赖天然气发电，电力行业的碳排放占其全国总排放量的40%左右。

为实现2050年电力行业净零排放的目标，新加坡正探索多条脱碳路径，其中包括为现有天然气发电厂改装氢能兼容涡轮机。

2023年，新加坡能源市场管理局(EMA)宣布，自2024年起，所有新建及翻新的天然气发电厂需提升10%的效率，且氢气兼容比例按体积计算至少达到30%。

据EMA数据，新加坡目前至少有13座燃气发电厂，到2030年，将至少建成8座氢能兼容发电厂。

EMA首席执行官潘国强赴瑞典参与双边交流时指出，新加坡必须尽早布局各类能源路径，使其符合本国发展需求。他补充道，提前实现氢能兼容，能让新加坡在氢能经济兴起时，直接利用现有燃气涡轮机完成脱碳转型。

由于自然资源匮乏，新加坡开发可再生能源的难度远高于其他国家。除氢能外，新加坡还在探索能源进口、核能、碳捕获、地热等新兴技术，以降低电力行业的碳排放。

氢能应用的现实挑战

尽管氢能作为绿色燃料前景广阔，但目前尚未在全球广泛应用。南洋理工大学能源研究院联合主任陈修华教授表示，核心瓶颈在于生产成本、储运成本高企，缺乏大规模基础设施，且市场需求存在不确定性。

氢能的主要生产方式是通过电解水将氢与

氧分离，若要成为真正的绿色氢能，电解过程需依赖太阳能等可再生能源发电。但目前全球大部分氢能由化石燃料生产，属于“灰氢”。

氢能的储运同样面临挑战。氢气在常温下呈气态，需冷却至约零下253摄氏度才能转化为液态便于运输——这一温度远低于新冠mRNA疫苗零下90至零下60摄氏度的储运要求，需要专用冷链物流保障。此外，氢能的易燃特性也决定了其发电必须使用专用涡轮机。

盖佩尔博士介绍，SGT-800涡轮机已针对氢能特性进行专项设计：采用特殊燃烧器应对氢能远快于天然气的火焰速度，同时配备强化通风、灭火系统及氢气探测装置，以应对这种近乎无色且反应活性更强的燃料带来的安全风险。“这种分阶段设计能最大限度降低未来改装成本和运营中断风险，在前期投入与未来灵活性之间取得平衡。”

陈修华教授认为，氢能兼容燃气涡轮机将为氢能的规模化应用铺路，一旦氢能普及且成本降至可接受范围，就能顺利实现能源转型。

氢气在特定领域的应用前景尤为广阔——例如需要燃料燃烧产生高温的行业，或可再生能源电气化成本过高的领域，包括钢铁、化工、航空和航运业等。

为推动氢能技术成熟，新加坡于2022年10月推出《国家氢能战略》，加速氢能的研发与应用。新加坡贸易与工业部当时表示，到2050年，氢能有望满足该国高达一半的电力需求(具体比例取决于技术发展进度)。政府还推出了定向氢能计划，已为6个项目拨款约4300万新元，助力氢能技术实现商业化和规模化。

西门子能源集团高级副总裁、亚太区董事总经理索比约恩·福斯表示，开发氢能兼容涡轮机是公司在全球能源转型背景下“保障业务未来竞争力”的关键举措。他透露，公司每年投入约10亿欧元用于研发，其中相当一部分用于确保燃气涡轮机能够适配包括绿色燃料在内的多种燃料。

氨气：氢能储运的潜在解决方案

为解决氢能应用的瓶颈，研究人员正探索以其他形式储运氢能，氨气成为热门选项。氨气稳定性强，可液态储运，且广泛应用于化肥生产，拥有现成的储运基础设施。

氨气通过氮气与氢气合成制得，但要从中提取氨气，需通过高温裂解将化合物分解，这一过程不仅需要极高的操作温度，还会造成能量损失。因此，研究人员转而探索直接燃烧氨气发电

的可能性。

西门子能源亚太区战略与政府事务负责人桑达尔·奇丹巴拉姆表示，氨气直接用于燃气涡轮机燃烧目前仍处于早期研发阶段。“氨气的反应活性低于氢气和天然气等燃料，可能会影响燃烧发电效率。”

新加坡也在积极探索氨气发电的潜力。10月，EMA与新加坡海事及港务管理局委托吉宝集团牵头的联合体，在裕廊岛开展下一阶段项目，旨在提供低碳或零碳氨气解决方案，用于发电和船舶加注。

潘国强指出：“如果能实现氨气直接燃烧，发电效率将大幅提升。”他补充道，氨能和氨气作为清洁燃料的相关研究，还能增强使用国的能源安全。“任何拥有丰富低成本能源的地区都能生产氨能和氨气，一旦氢能经济成型，新加坡将拥有众多供应来源，保障能源供应安全。”

区域能源转型愿景

在东盟地区，各国能源行业绿色转型的势头日益强劲。该组织设定了2025年可再生能源在区域能源结构中占比达到23%的目标，而2022年这一比例仅为15%。此外，连接区域各国能源系统的跨境电网建设也在推进中，将助力各国共享可再生能源资源。

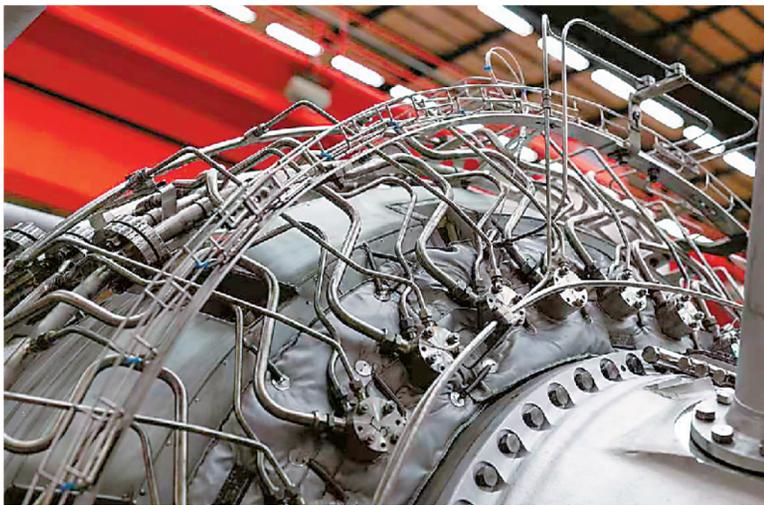
对于能源需求庞大且持续增长的发展中地区而言，电力行业脱碳并非在可再生能源与氢能、氨气等低碳燃料之间做出非此即彼的选择。西门子能源表示，SGT-800氢能兼容涡轮机设计初衷就是适配能源结构多元化的电网，其10分钟内快速启动的特性，能在无风无日照时填补可再生能源的供电缺口。

专家认为，选择氢能、氨气还是其他脱碳路径，需结合各国具体国情。福斯指出，欧洲已建成天然气与氢气混合运输的管道网络，新建管道也相对容易；而在亚洲，从印度、澳大利亚等可再生能源丰富、适合生产氢能或氨气的国家，向新加坡等地区建设跨境管道难度更大。“这正是氨能在欧洲更具吸引力，而氨气在亚洲更受青睐的主要原因。”

他强调，氢能的规模化应用需要政策支持和定向投资。“太阳能和风能等主流技术在发展初期也面临类似挑战，而转折点在于政策制定者推出清晰、有针对性的扶持计划，助力产业规模化发展。我们呼吁政策制定者如今对氢能、氨气等重要清洁能源载体采取同样的支持措施，推动产业升级。”

据《海峡时报》

氢能或氨能 新加坡能源转型路径



组装过程中的SGT-800燃气轮机。