



清华大学《新能源动力系统》产学研用团队

2021-2040：推动我国新能源全方位革命，探索产学研全新模式与零碳系统解决方案



中国动力电池发展历程、技术进展与前景展望

1. 发展历程

2. 技术进展

2.1 电动汽车应用与安全电池

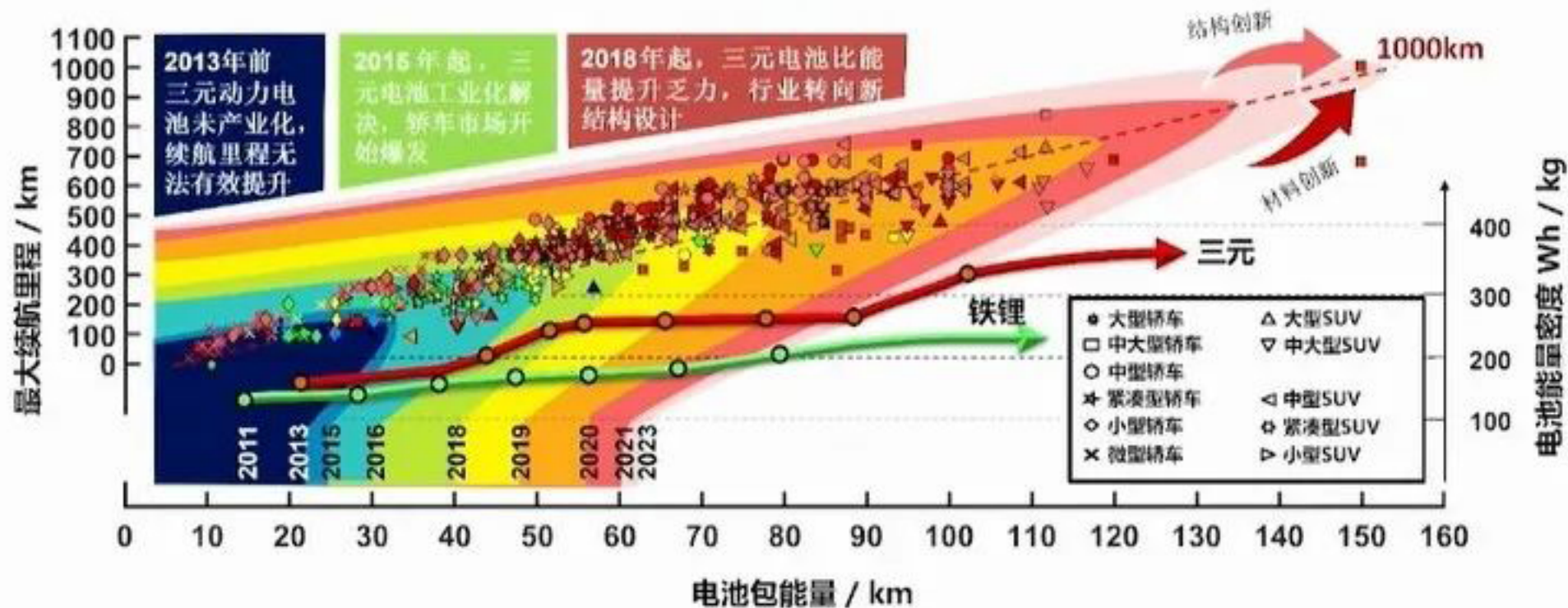
2.2 人工智能革命与智能电池

2.3 材料体系创新与固态电池

3. 前景展望

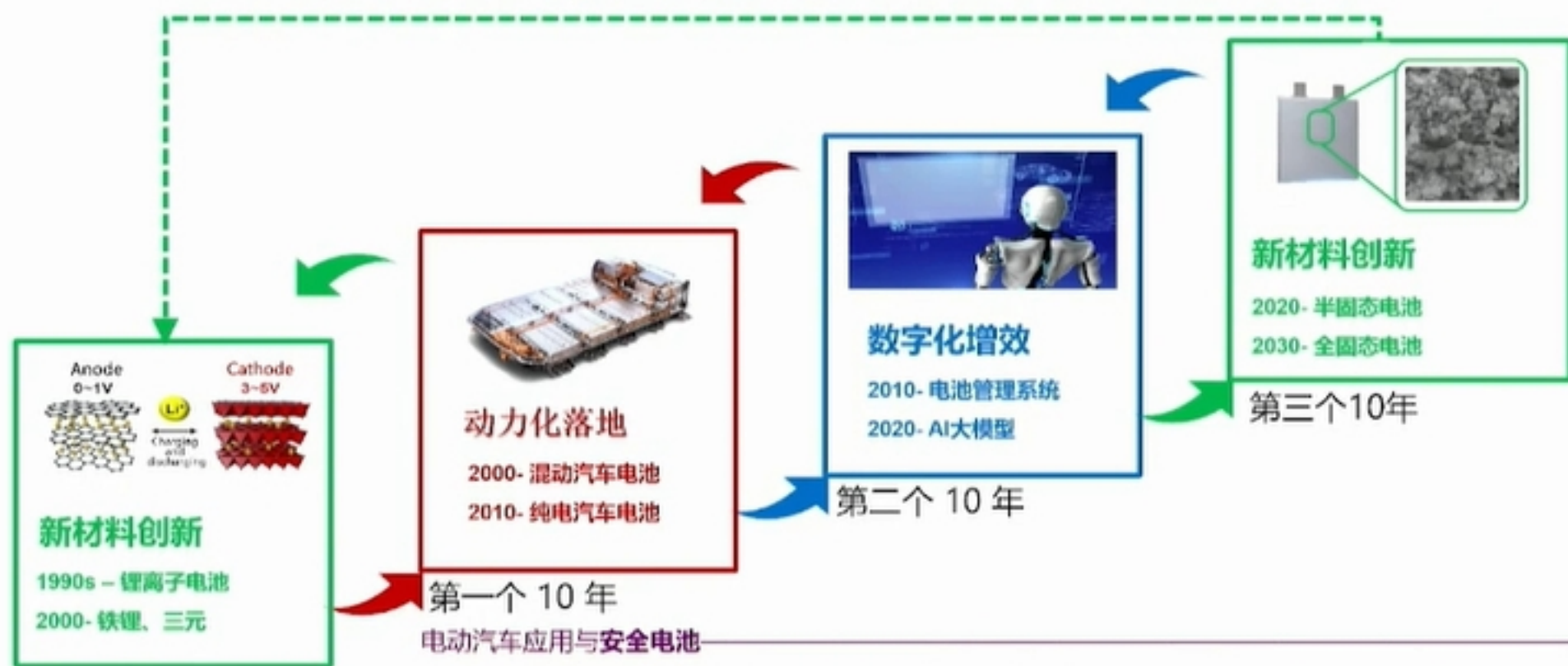
中国动力电池发展历程

2010-2024: 动力电池比能量从100Wh/kg提高到300Wh/kg;
动力电池成本从大于4元/Wh下降至低于0.5元/Wh。



中国动力电池发展历程

2000-2030：动力锂离子电池30年的创新周期



中国动力电池发展历程、技术进展与前景展望

1.发展历程

2.技术进展

2.1 电动汽车应用与安全电池

2.2 人工智能革命与智能电池

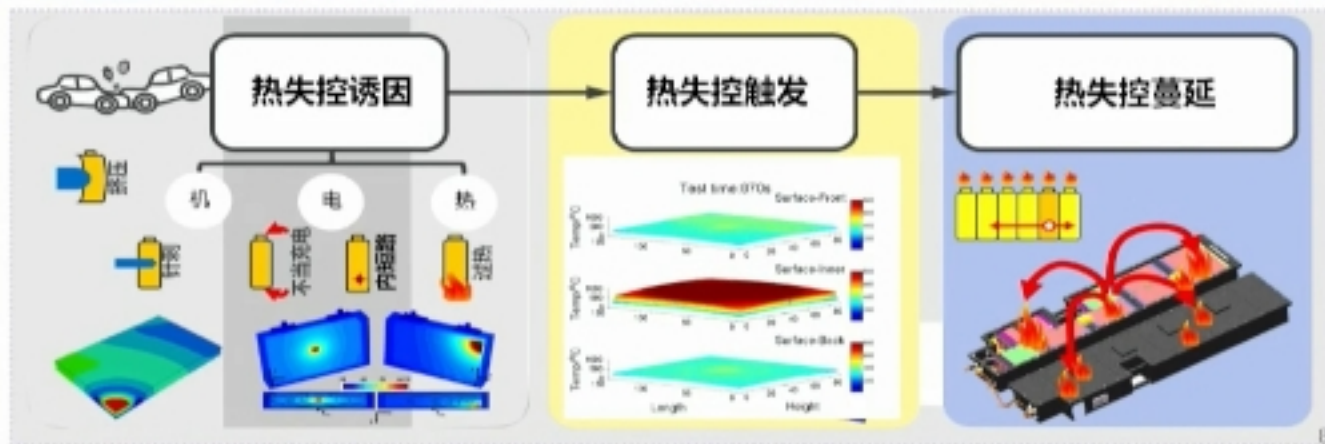
2.3 材料体系创新与固态电池

3.前景展望

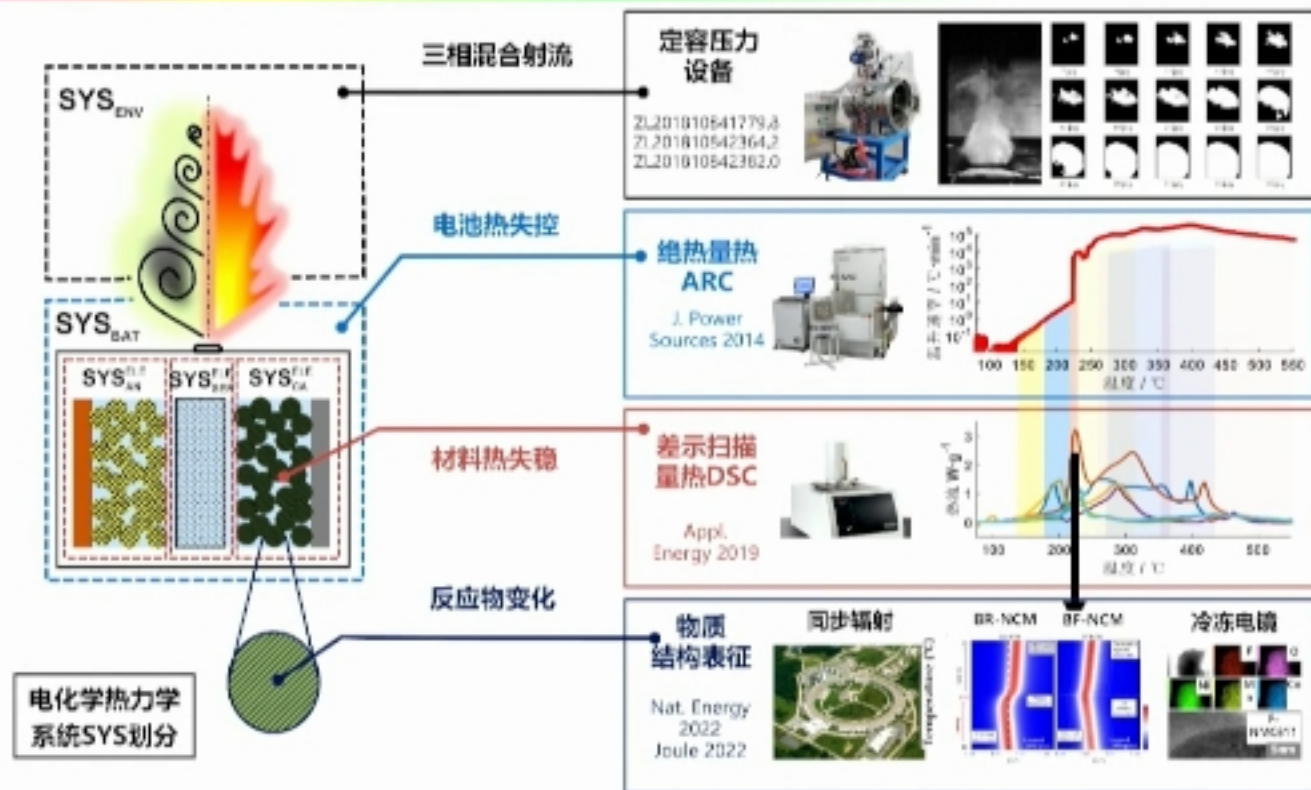
电动汽车与电池安全



电池热失控过程

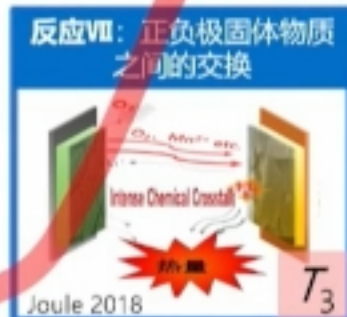
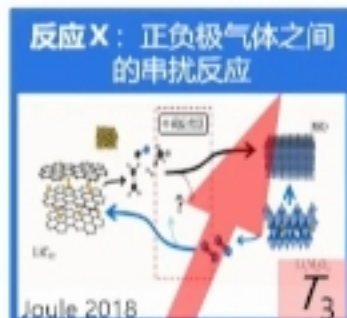
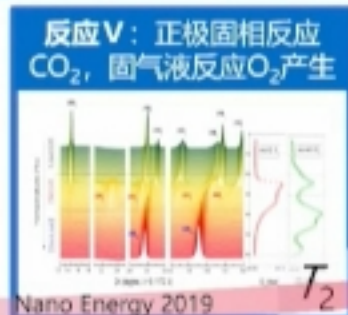
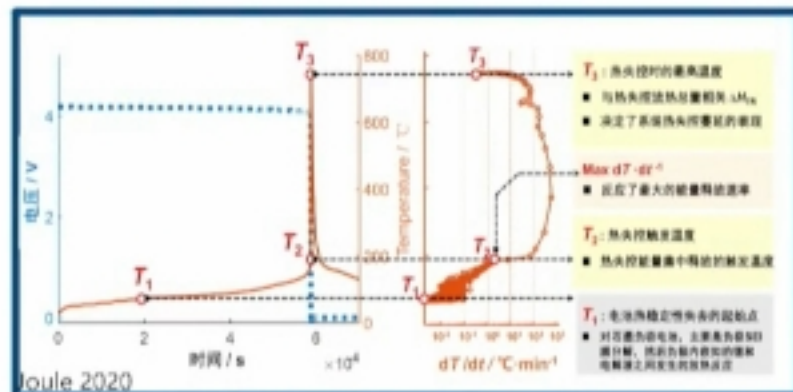
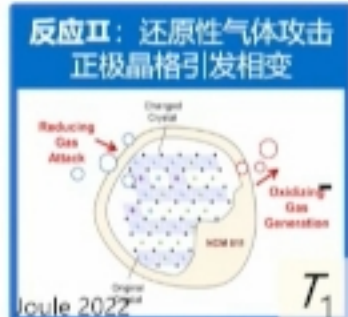
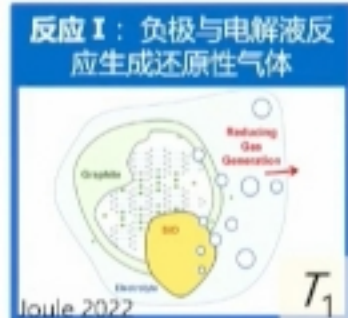


电池热失控测试与表征技术



电池单体热失控与抑制技术

揭示高比能量三元电池热失控全过程机理，确定热失效化学反应调控的关键靶点。

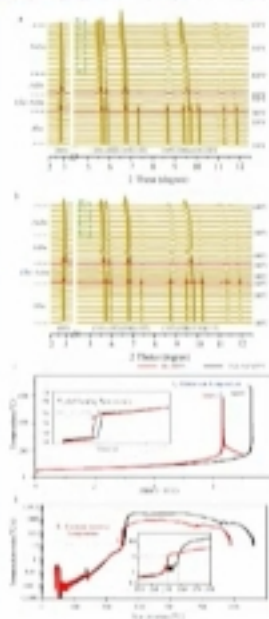


电池单体热失控与抑制技术

研究高镍三元电池热失控抑制技术，提升电池本征安全。

正极包覆

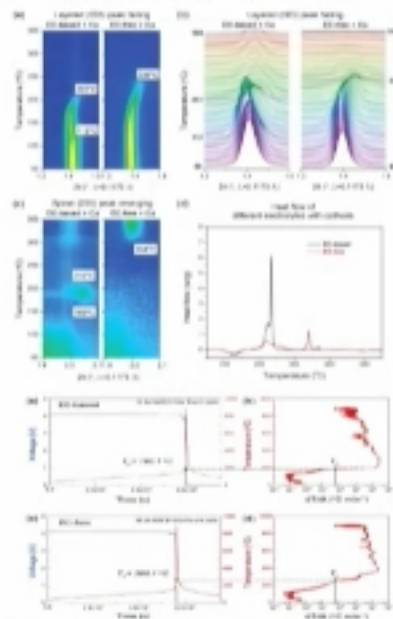
表面包覆提升三元材料热稳定性



Nature Energy 2020

EC-free电解液

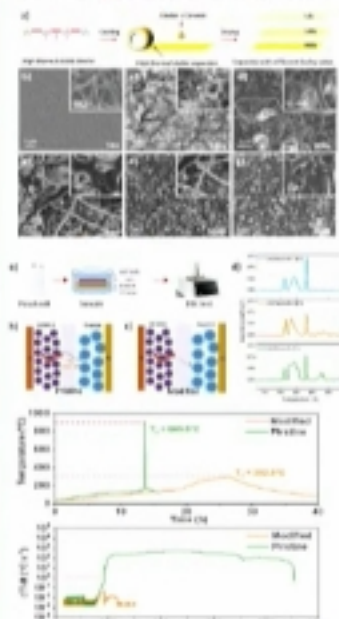
消除正极及其活性氧与EC反应



Advanced Energy Materials, 2021,

高安全隔膜

高安全隔膜设计阻断关键放热反应



Energy Storage Material, 2024

高安全FPE电解液添加剂

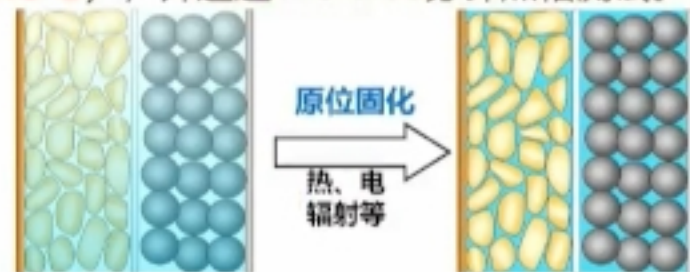
阻燃电解液抑制热失控主放热反应



Energy Storage Materials, 2021

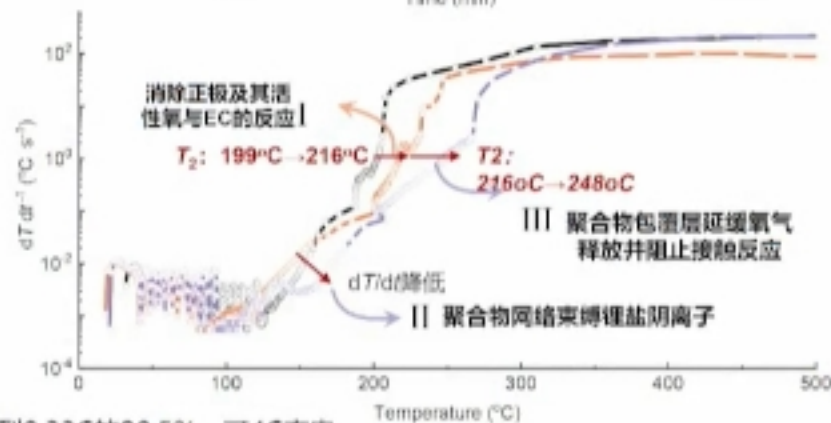
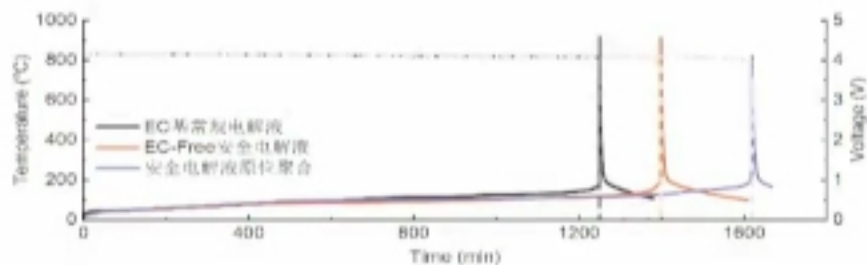
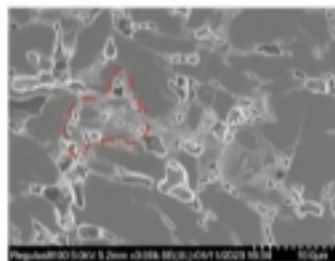
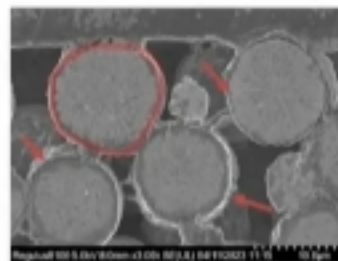
电池单体热失控与抑制技术

开发高安全电解液+原位固化技术，实现比能量为**360Wh/kg**的动力电池热失控特征温度 **T_2** 提升49°C（至**248°C**），并通过170°C-30分钟热箱测试。



安全电解液+
聚合单体

高安全
半固态电池



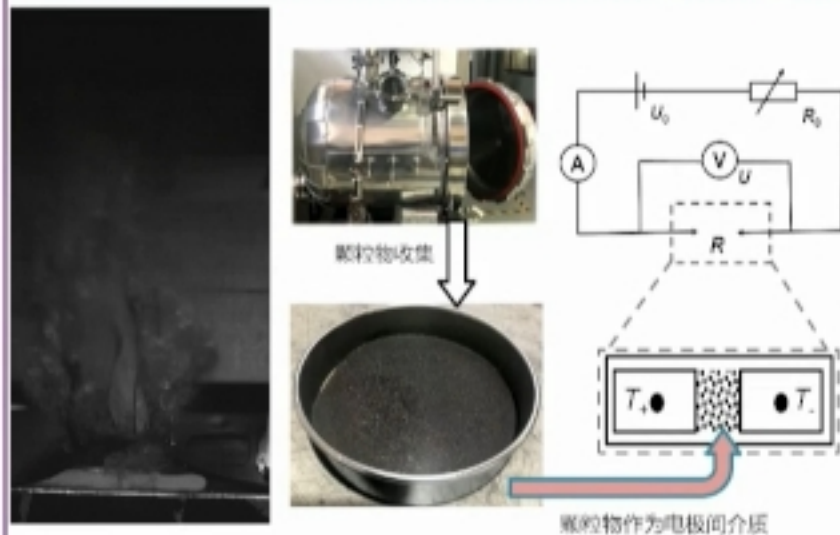
电池性能：①320Wh/kg, 1C循环1500周, 3C容量发挥可以达到0.33C的90.5%，可4C充电

②360Wh/kg, 1C循环700周, 2C循环发挥可以达到0.33C的80%；

电池喷发与热失控蔓延机理

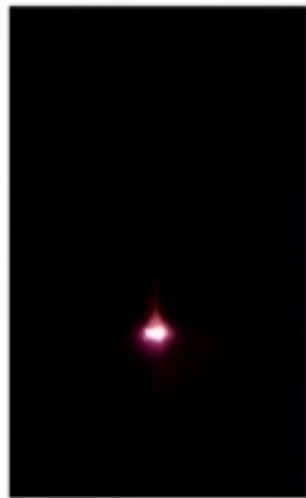
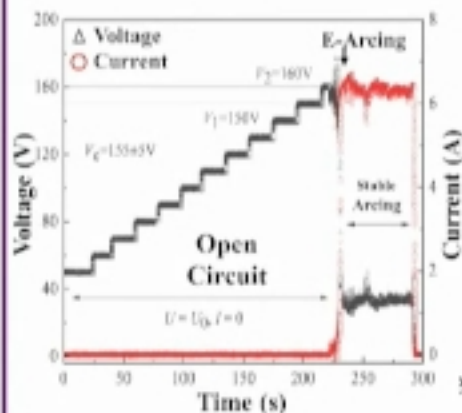
开展高压系统电弧测试与防护技术研究，发现“颗粒物诱导击穿电弧”是使得某些原本良好的电气绝缘条件变得不安全的主要诱因。

测试系统与方法



测过过程与现象: 存在临界击穿电压 V_c

增加电极间电压以诱导产生击穿电弧

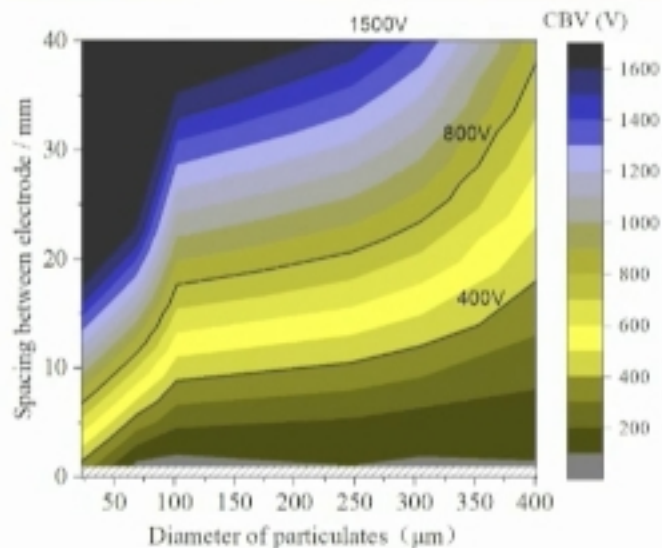


电池热失控颗粒物填充电极间隙，大幅降低所需击穿电压值

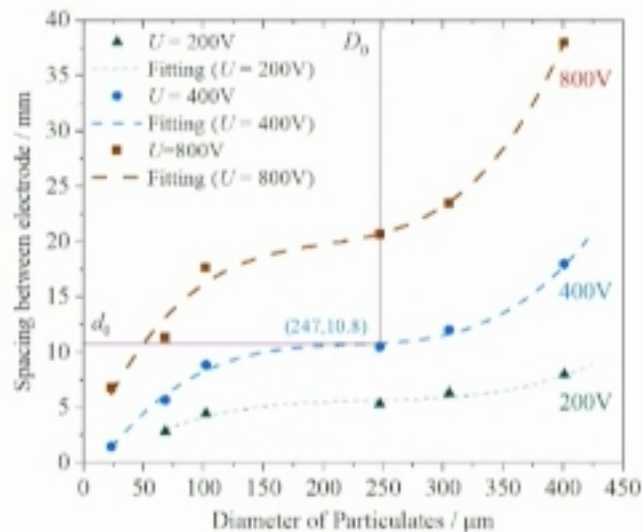
电池喷发与热失控蔓延机理

提出电弧防护理论与设计方法：为防止电弧触发热失控，提出了基于颗粒物诱导电弧防护设计Map图的防护理论与设计方法。

3临界参数和颗粒物诱导电弧灾害边界图



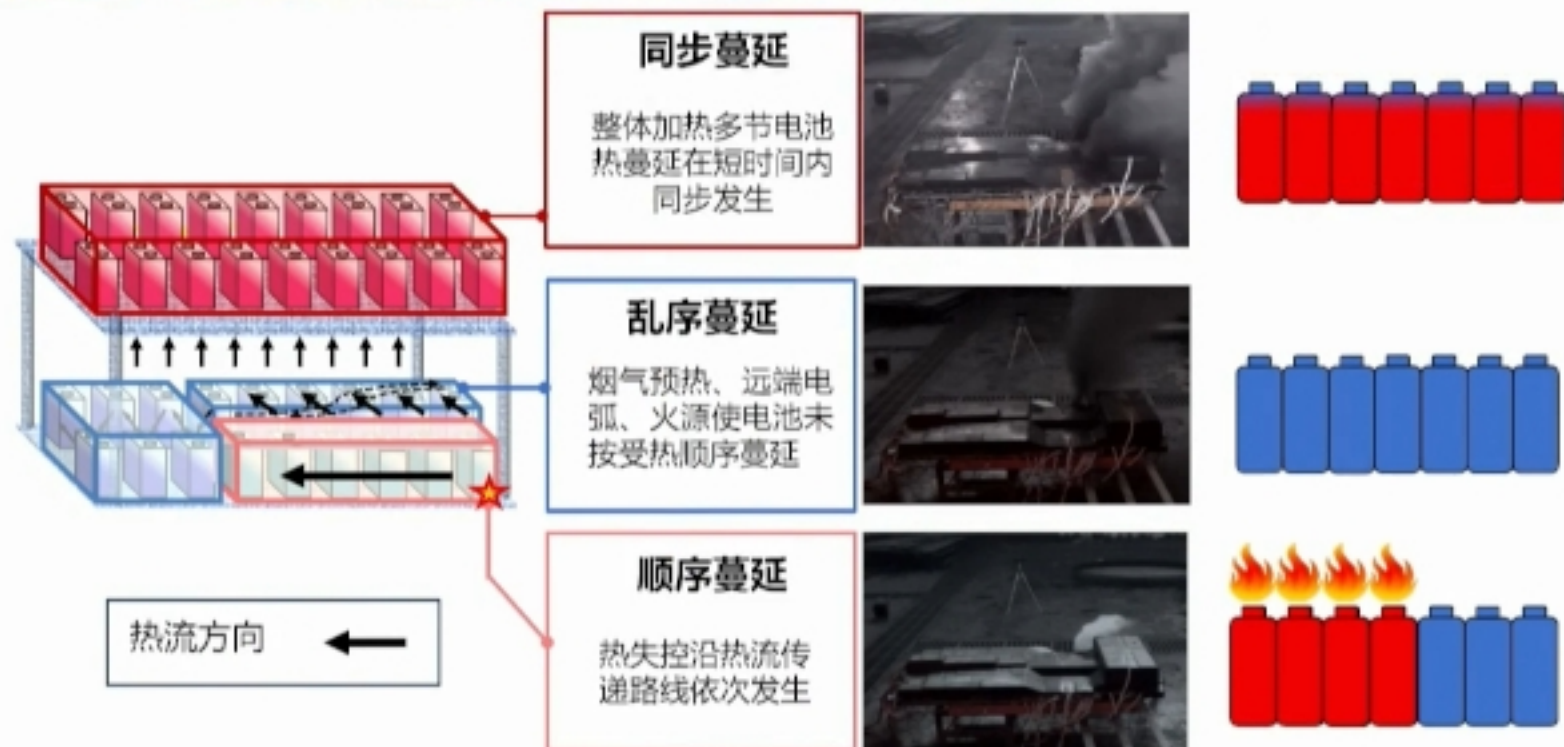
颗粒物诱导电弧防护理论设计方法



拟合、插值获得临界击穿电压的等高线

热蔓延与热防护

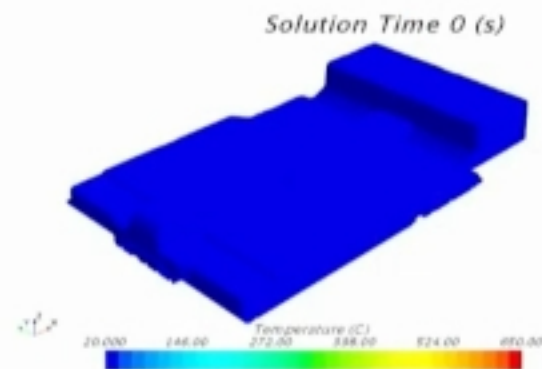
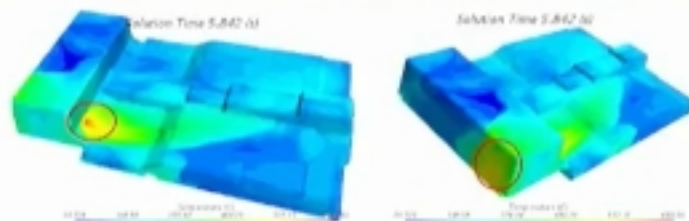
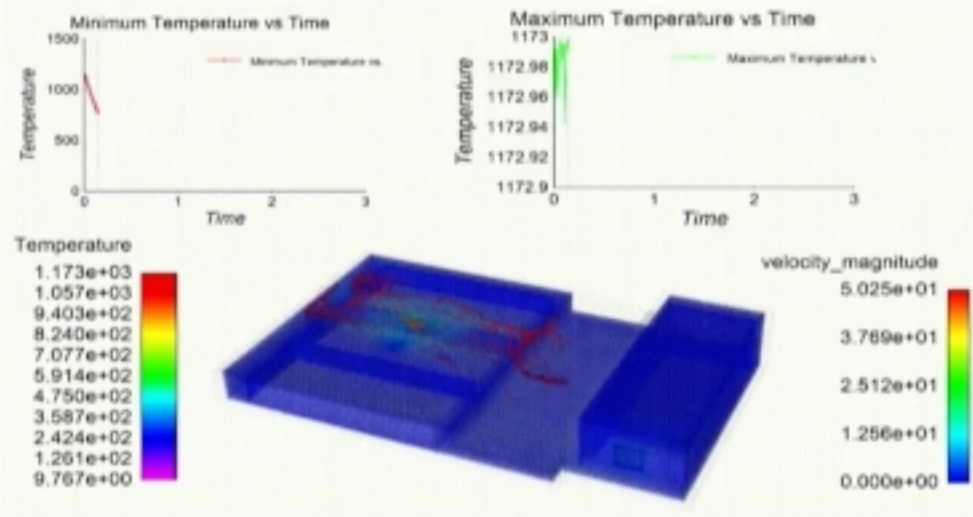
总结提出了电池系统热失控的**顺序**、**乱序**和**同步**三种特征模式



热蔓延与热防护

车用电瓶系统先进热管理设计新方法：用气-固两相流模型对热失控后过程进行精准模拟，进而指导热管理系统的优化设计。

气-固两相流模型：精确预测热失控后系统颗粒物沉积行为

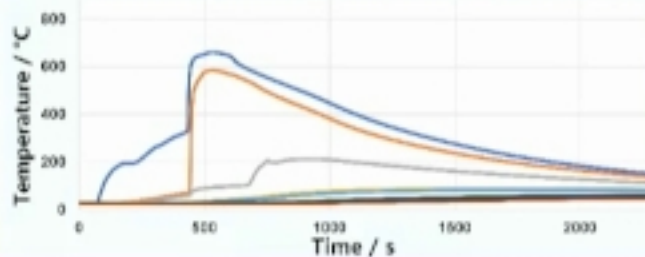
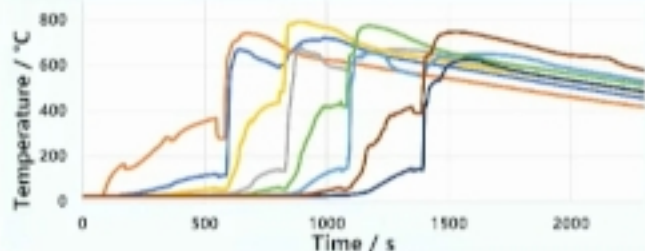
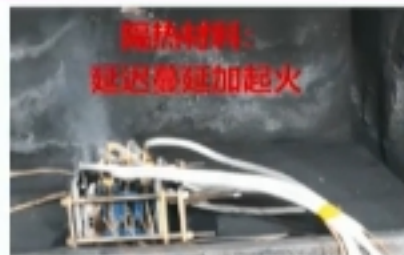
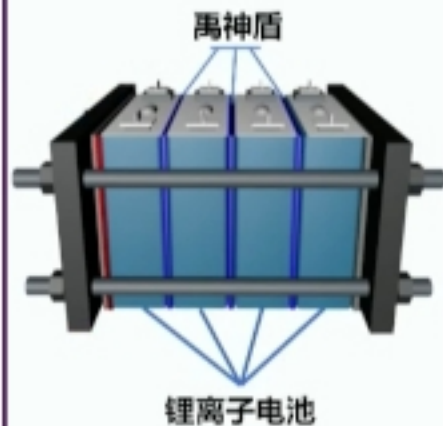


颗粒物沉积可诱导电弧发生，破坏电池系统原有防护结构

热蔓延与热防护

电池包热失控蔓延抑制技术：提出隔热+冷却方法，可调节热流，实现了对高能量密度电池组热蔓延抑制。

热扩散抑制实验



高安全电池系统设计

国家标准规定动力电池热蔓延后不起火、不爆炸

- 2024年5月工信部颁布新建议《电动汽车动力电池安全要求》；
- 基于现有热、烟气、电气设计体系进行安全防护，技术上可以实现上述规定(比能量小于300瓦时/公斤)

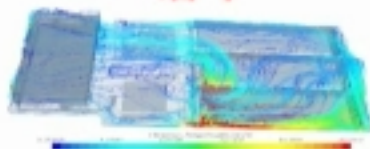
现有热-气-电高安全电池系统设计技术

“热”



智能热响应隔层

“烟气”



烟气危险点结构防护

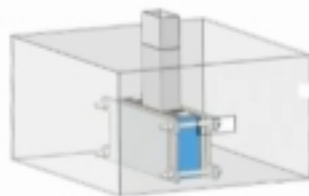
“电气”



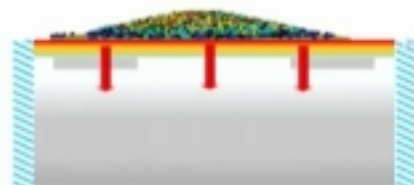
绝缘防护抑制电弧



双向液冷散热



热气分离

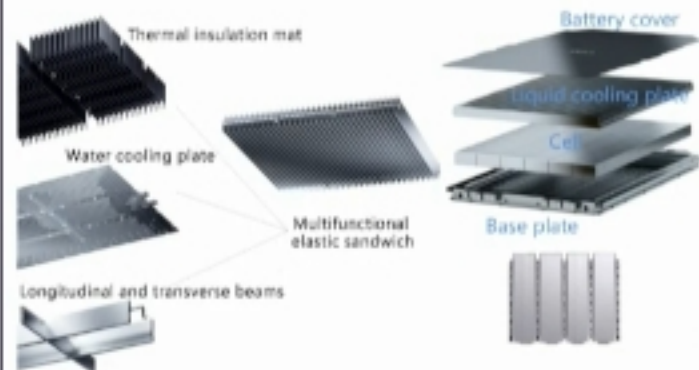


阻隔颗粒物诱发电弧

高安全电池系统设计

国内典型高安全电池系统：三元CTP麒麟电池系统

2022年8月29日CATL发布麒麟电池，将电池系统隔热垫、水冷板、横纵梁三合一组成多功能弹性夹层，简化结构、加强热管理。



- 采用高比能量三元电池，使电池系统比能量达到250瓦时/公斤；
- 在全球率先推出让电动汽车续航达到1000公里的动力电池系统技术。

中国动力电池发展历程、技术进展与前景展望

1.发展历程

2.技术进展

2.1 电动汽车应用与安全电池

2.2 人工智能革命与智能电池

2.3 材料体系创新与固态电池

3.前景展望

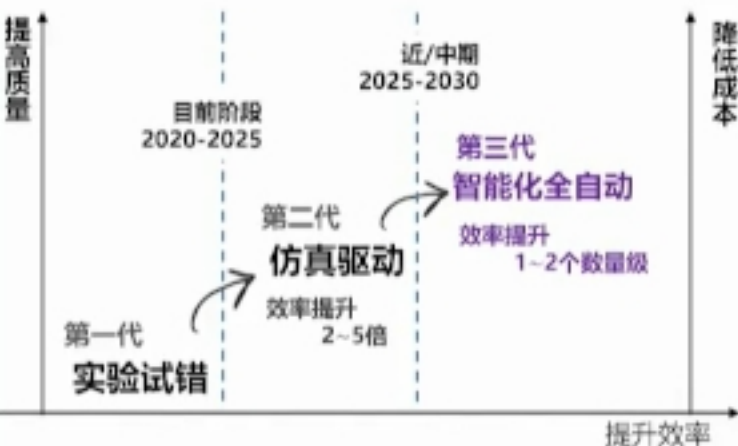
智能电池智能化：挑战和机遇

- **电池全生命智能化：**协助“设计-制造-管理-回收”全生命周期提速降本



电池仿真和设计自动化

电池设计技术三代沿革



电池智能设计技术可将电池研发效率
提升**1~2个数量级**，节省研发费用**70~80%**。

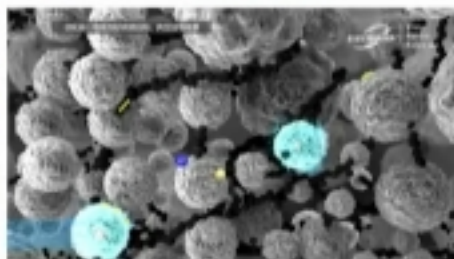
注：某头部动力电池企业2022年电池研发费用约为155亿元，其中约64亿为材料费，61亿为人工费。

电池智能设计BDA技术：Battery Design Automation



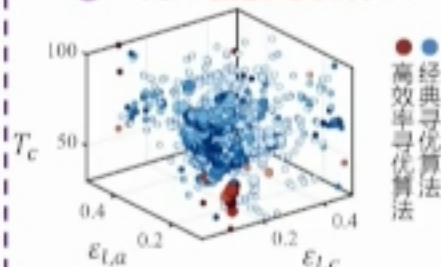
两大核心技术

① 高精度建模技术



建立设计参数与核心性能的精确构效关系

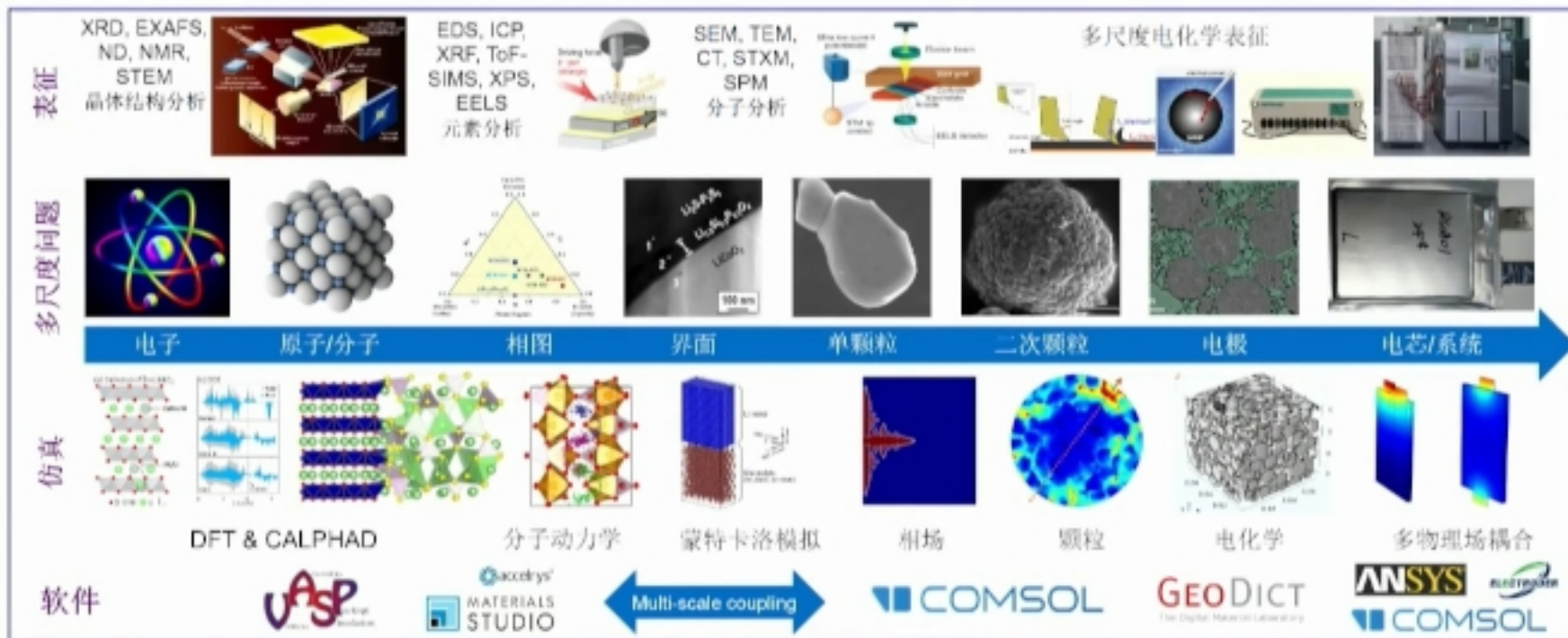
② 高效智能寻优算法



为设计过程自动寻找最优最速路径

电池仿真和设计自动化

开发多尺度表征和仿真平台：数字实验室融合多尺度表征-计算-分析-设计-发展技术，整合电池测试、优化设计和AI建模方法，形成新材料、新设备和新系统的闭环研发系统。



电池仿真设计和设计自动化

建立中国电池设计软件工具链，覆盖虚拟建模、短/长期性能仿真、型号自动设计。

服务130+家国内外专业客户，完成 700+套仿真设计方案

Electroder®-MOD/-SIM/-LIFE/-BDA

电池虚拟建模



电池尺寸容量配方

- 电池物料平衡
- 电池几何建模
- 材料和机械件库等

电热性能仿真



短期性能

- 电热性能
- 快速充电
- 实车工况分析



老化与寿命评估



长期性能

- 基于老化机理模型
- 预测性能衰退与内部变化
- 自定义工况多次循环

电池全自动设计



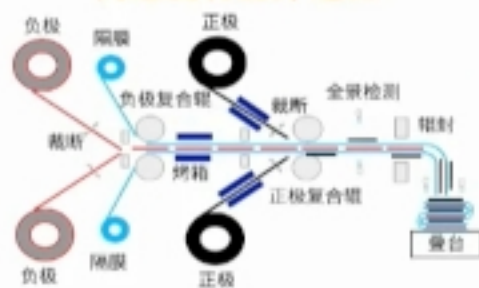
自动智能设计BDA

- 输入使用场景对电池要求
- 自动输出设计方案
- 根据各方案特色灵活选用

电池智能制造和设备

开发电池智能制造设备，实现电池大规律制造技术突破，具备PPB级别产品缺陷率、全生命周期电池产品可靠性、TWh级别超大规模高质量交付能力。

高速复合叠片过程



叠片效率: 600PPM
单机年产能: 1.5GWh

高速复合叠片设备



复合叠片优势: 界面均匀、高效, 踢出缺极片、材料利用率高。

智能装备发展阶段



单机智能



多机协同智能



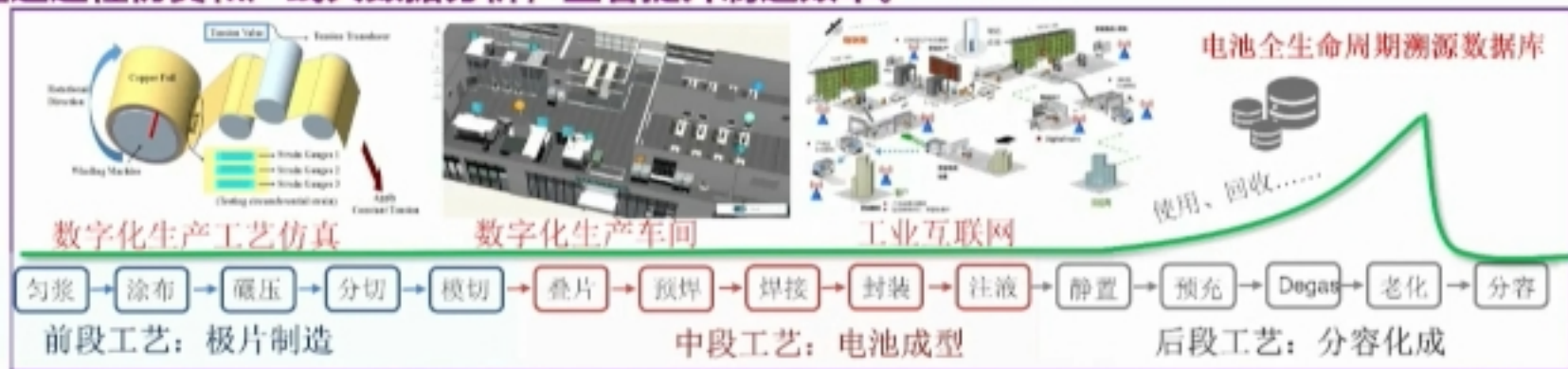
分段连续一体智能



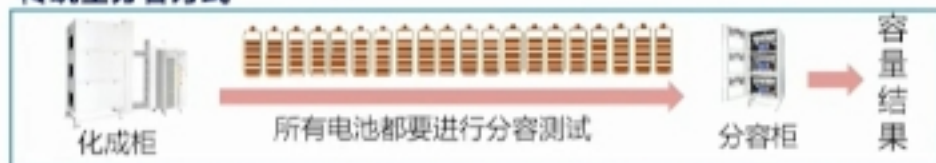
整线连续一体智能

电池智能制造和设备

通过过程仿真和产线大数据分析，显著提升制造效率。



传统全分容方式



新型半分容方式 可节约45%分容时间、电费、设备、场地。



1. 电池机理与数据融合驱动
2. 千万个电池数据验证
3. 已在头部电池企业应用

电池智能管理

开发出基于AI模型的电动汽车电池状态估计平台2.0

共性平台：**电池AI大模型PERB2.0**

10亿级参数量

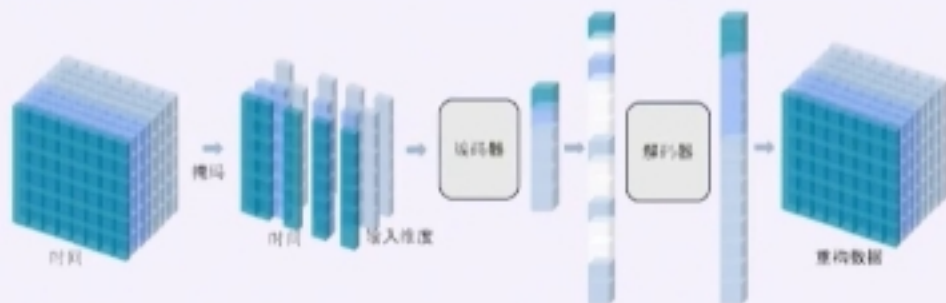
参数量1.2B，垂类领域参数规模第一

MAE架构

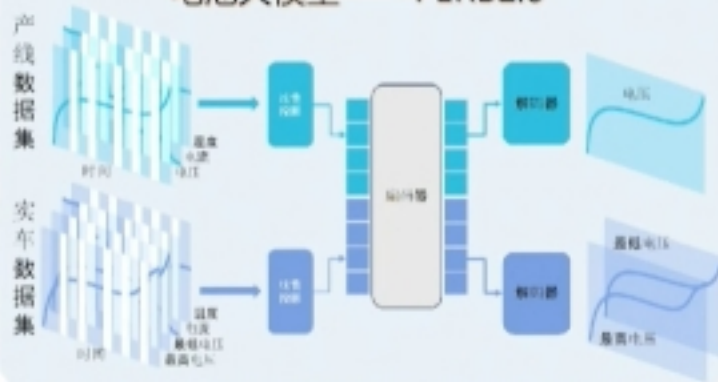
能在75%数据掩码的情况下实现高保真数据还原

TWh级数据量

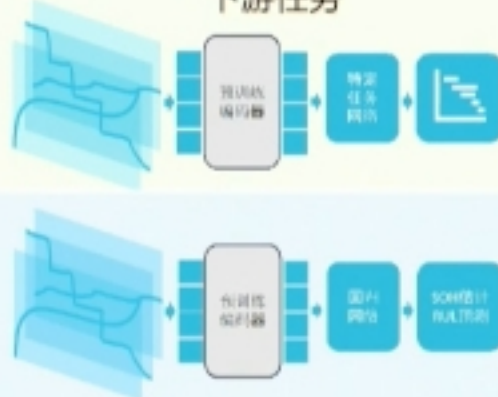
训练数据覆盖442种电池类型共计2.5TWh



电池大模型——PERB2.0



下游任务



基于人工智能的电池管理系统

开发出基于AI模型的电动汽车电池状态估计平台2.0

- 大模型PERB2.0实现了安全预警和SOH估计；
- 大模型PERB2.0已在全国30+城市实现应用落地。

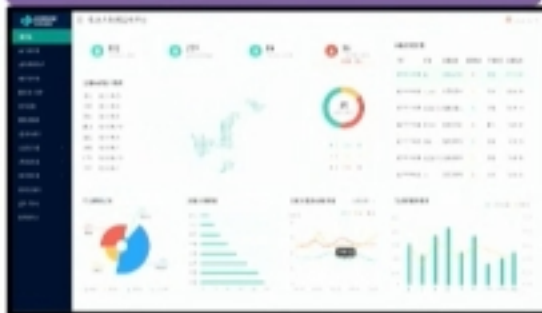
1GWh+储能



80万辆新能源汽车



20000+充电桩



技术
领先

93%

综合故障识别率

0.1%

误差率

150天

最长预警时间

平台
规模

60GWh

电池管理规模

2.5Twh

数据量

智能膜电极和智能电池

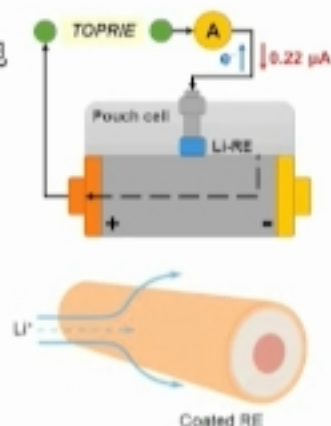
开发长寿命智能膜电极：迄今为止，长寿命参比电极的开发是一个极具挑战性的课题。

国际研究现状

- 传统参比电极采用铜丝镀锂方案，循环性能差，并且具有阻隔效应；
- 目前最先进的参比电极循环寿命在300圈左右。

- 通过采样电路设计，减小漏电流，将参比电极寿命提高到100圈。

J. Power Sources. 2022. 231953

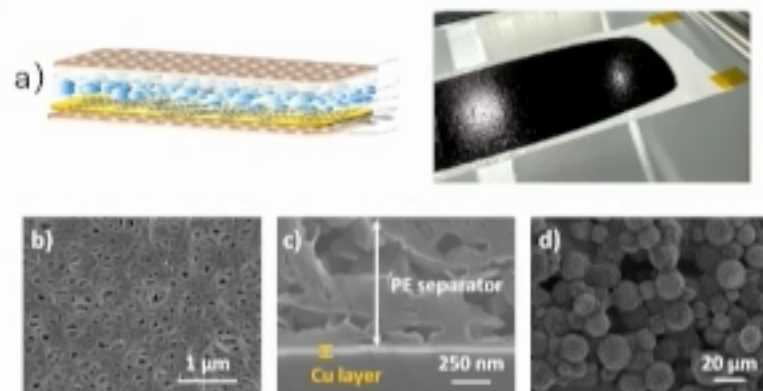


- 通过表面包覆，将参比电极寿命提高到300圈。

Adv. Energy Mater. 2024. 2304502

清华PSG团队方案

- 开发了智能膜电极（隔膜-参比电极一体化方案）
- 基于长寿命活性材料和多孔薄膜基底，智能隔膜有望实现全生命周期负极电位监测

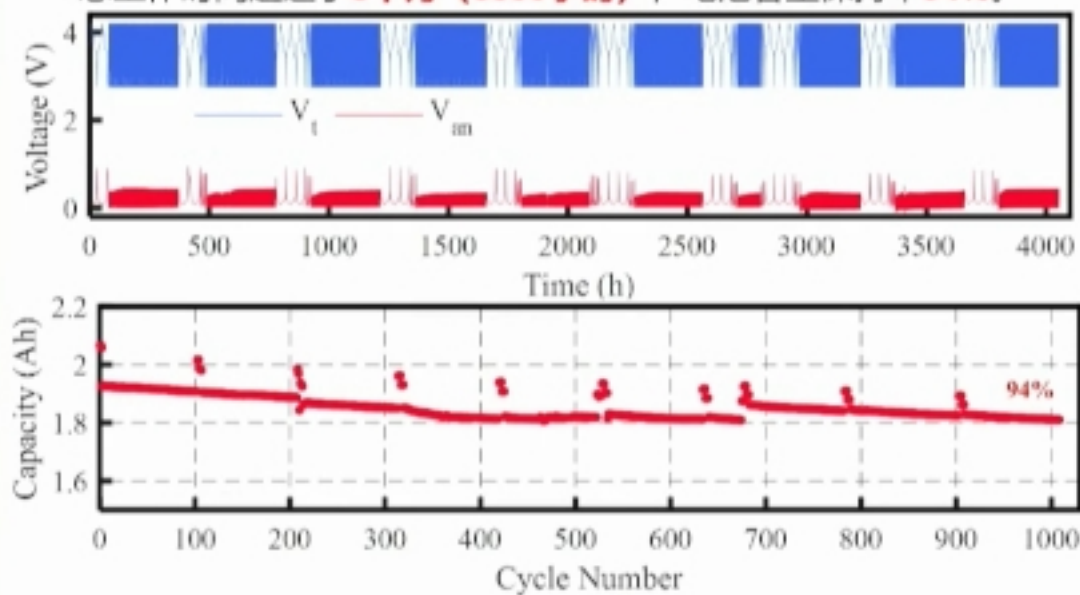


核心问题是基于参比电极的老化机制和合理设计和使用

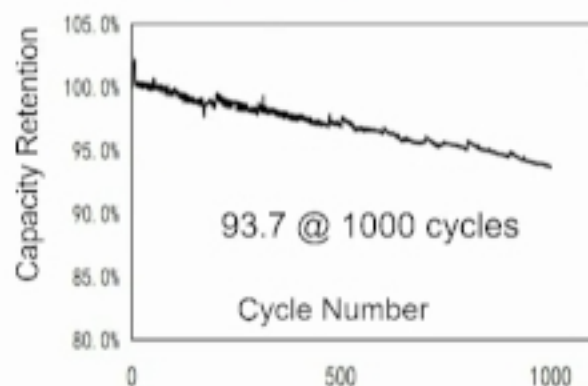
智能膜电极和智能电池

系统性研究智能膜电极老化机理，针对性设计和使用，开发出长寿命（现有水平的**3倍以上**）的参比电极。

- ◆ **植入参比电极电池**：实现了超过**1000个循环**的稳定负极电位监测，总工作时间超过了**8个月（6000小时）**，电池容量保持率**94%**。



- ◆ **未植入参比电极电池**：电池厂商测试数据：**1000循环后剩余容量93.7%**



进一步证实了：智能膜电极的植入对电池衰减无影响。即实现了无损植入。

智能膜电极和智能电池

智能电池技术样品开发与应用

- 与蜂巢能源合作量产化方壳电池的智能膜电极产线植入验证;
- 与BYD合作智能电池快充、安全预警功能开发。

智能单体



植入膜电极

核心技术

智能端盖



智能模组



无线分布式BMS



中国动力电池发展历程、技术进展与前景展望

1.发展历程

2.技术进展

2.1 电动汽车应用与**安全电池**

2.2 人工智能革命与**智能电池**

2.3 材料体系创新与固态电池

3.前景展望

材料体系创新与全固态电池发展趋势

中国全固态电池技术路线研讨会

- 作为全球锂离子电池行业的领导者，中国汽车和电池行业非常重视全固态电池的研发；
- 2024年6月1日，全固态电池技术路线研讨会在北京举行，来自全国80家单位的160余名代表展开深入研讨与交流。



材料体系创新与全固态电池发展趋势

◆ 第一步：重点攻关固态电解质

- 2025：以200Wh/kg和400Wh/L为目标，打通全固态电池技术链，三元和石墨正负极基本不变，确立主体电解质；
- 2030：以300Wh/kg和600Wh/L为目标，特种商用车应用为主要场景，三元和硅碳正负极，优化固态电解质体系（主体电解质+补充电解质），实现在电池层面大于4C的倍率性能和5000的循环寿命。

◆ 第二步：重点攻关高容量复合负极

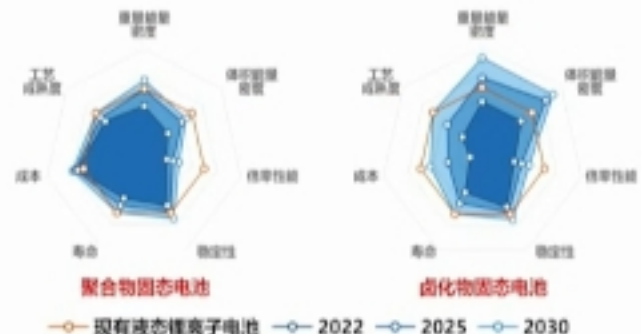
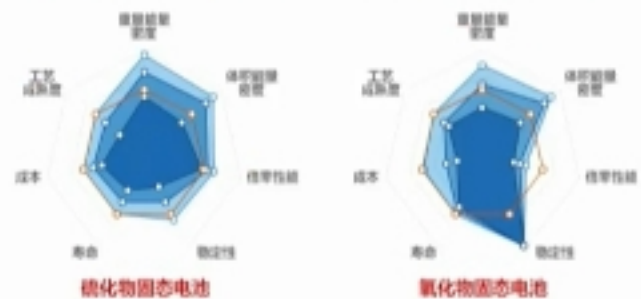
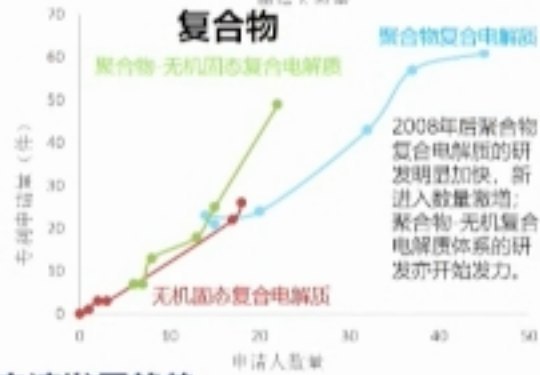
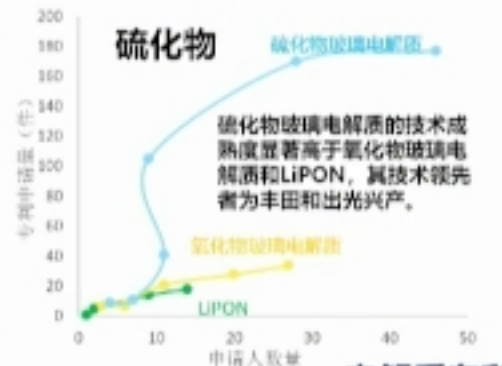
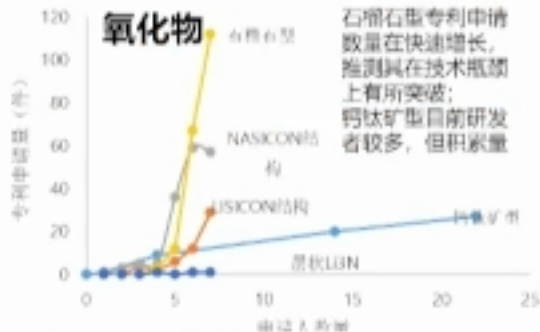
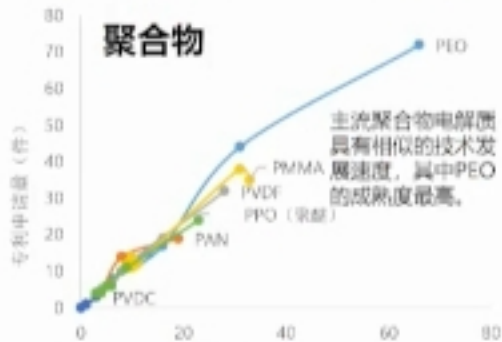
- 2030：以400Wh/kg和800Wh/L为目标，高性能乘用车应用为主要场景，进一步发展高比容量高硅基负极，实现在电池层面大于3C的倍率性能和1500的循环寿命；
- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高比容量锂金属负极（锂金属载体或功能层）。

◆ 第三步：重点攻关高容量复合正极

- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高电压高比容量富锂正极；
- 2040：以700Wh/kg为目标，发展锂硫和锂空气电池。

固态电解质技术现状

- 在各种固态电解质中，硫化物电解质技术成熟度最高，复合电解质技术潜力巨大：硫化物具有与液体电解液相当的高离子电导率，是短期内开发方向，并逐步向复合电解质(主导电解质+补充电解质)发展。



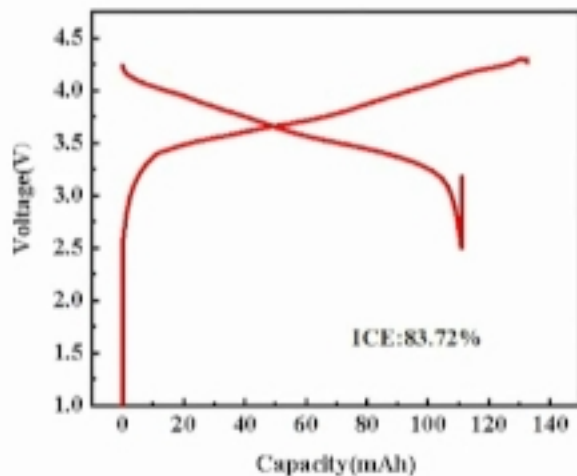
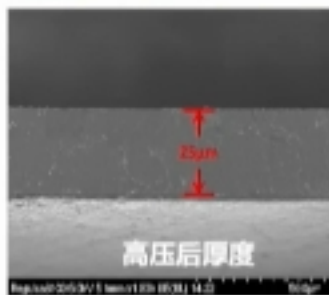
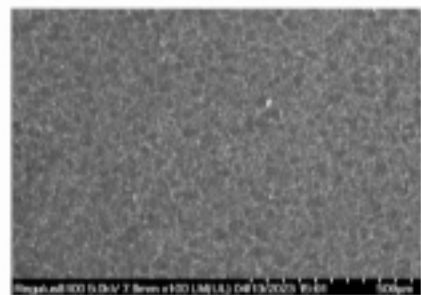
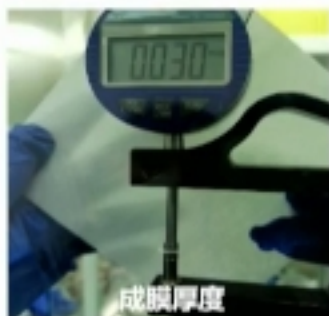
— 现有液态锂离子电池 — 2022 — 2025 — 2030

电解质专利申请发展趋势

电解质性能发展趋势

固态电解质技术现状

- **硫化物固态电解质**：结合粘结剂设计改性、溶剂适配和粒度匹配，研发了高机械强度的自支撑硫化物固态电解质膜，厚度超薄至 $25\mu\text{m}$ ，并在软包电池体系中实现了验证。

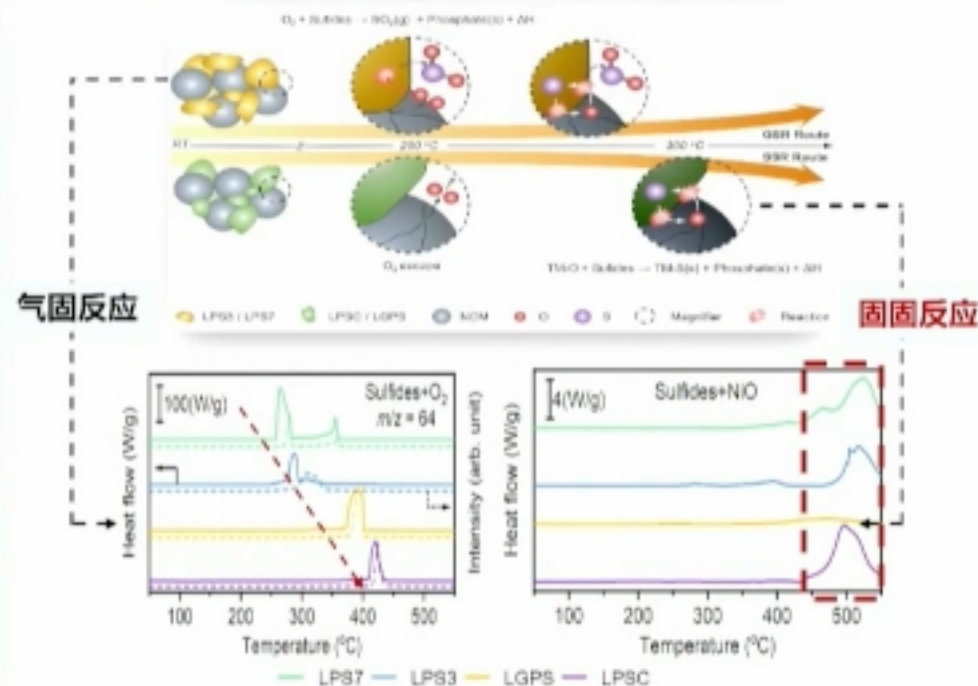


厚度	孔隙率	离子导率
25 μm	6%	3 mS/cm

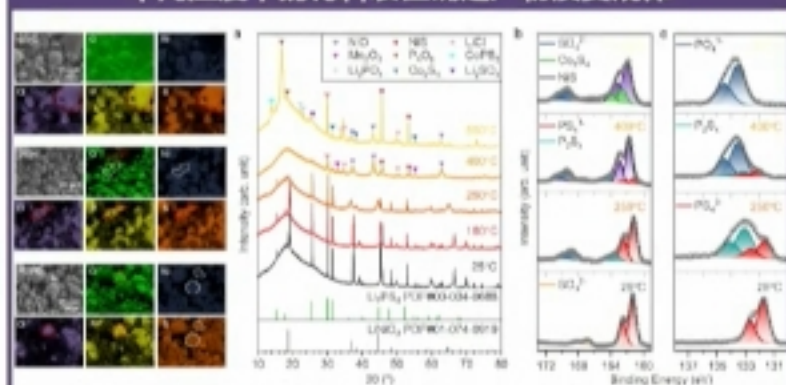
固态电解质技术现状

■ **硫化物固态电解质**：揭示硫化物固态电解质两种热失效机理，发现LGPS/LPSC具有高热稳定性。

两种热失效机理：气固反应、固固反应



不同温度下的材料表征确定产物演变规律



- LPS7/LPS3电解质在较低的温度下与正极释放的O₂发生反应，属于气固反应失效路径。
- 四种硫化物固体电解质与过渡金属氧化物反应释放热量，证明了LPSC/LGPS与NCM的固-固反应失效途径。

材料体系创新与全固态电池发展趋势

◆ 第一步：重点攻关固态电解质

- 2025：以200Wh/kg和400Wh/L为目标，打通全固态电池技术链，三元和石墨正负极基本不变，确立主体电解质；
- 2030：以300Wh/kg和600Wh/L为目标，特种商用车应用为主要场景，三元和硅碳正负极，优化固态电解质体系（主体电解质+补充电解质），实现在电池层面大于4C的倍率性能和5000的循环寿命。

◆ 第二步：重点攻关高容量复合负极

- 2030：以400Wh/kg和800Wh/L为目标，高性能乘用车应用为主要场景，进一步发展高比容量高硅基负极，实现在电池层面大于3C的倍率性能和1500的循环寿命；
- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高比容量锂金属负极（锂金属载体或功能层）。

◆ 第三步：重点攻关高容量复合正极

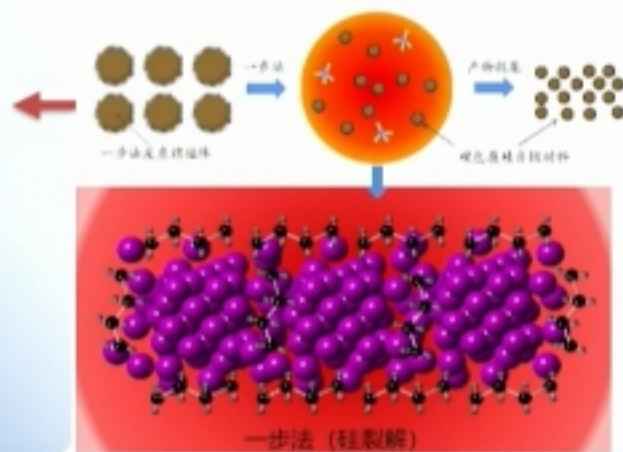
- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高电压高比容量富锂正极；
- 2040：以700Wh/kg为目标，发展锂硫和锂空气电池。

复合负极技术现状

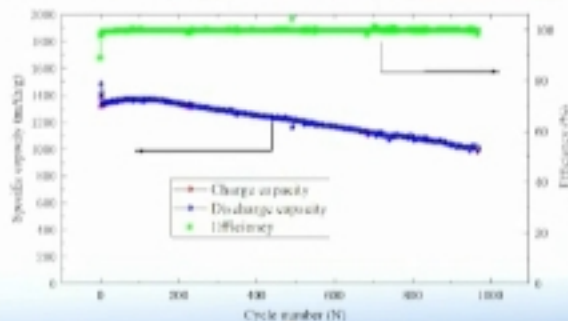
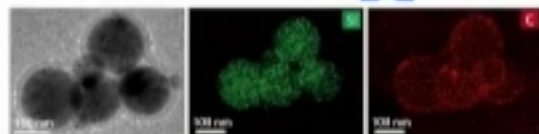
■ 硅碳复合负极：硅碳负极材料的创新合成工艺

创新地提出了一步法制备硅碳负极技术，该技术具有**低成本、低能耗和低碳化**等优点，硅碳负极材料可达到**高比容量、长循环寿命和高首次库伦效率**的目标。

一步法制备硅碳负极材料



华宜清创
HYIC New Materials



低成本

低能耗

低碳化

纳米化

球形化

碳包覆

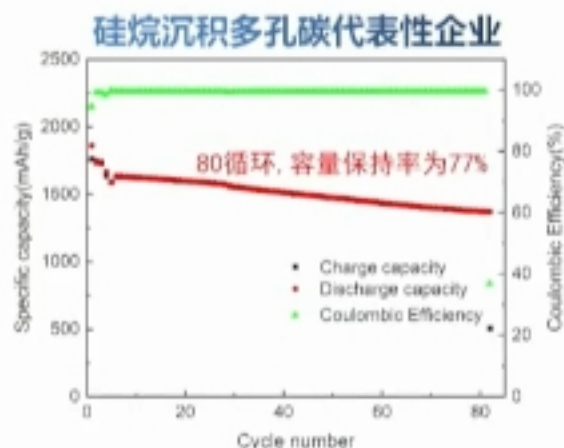
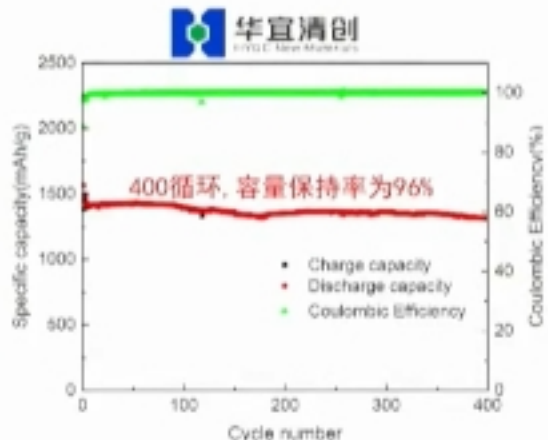
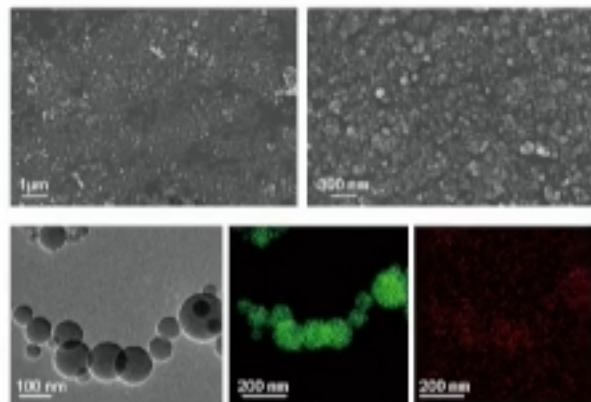
高比容量

长寿命

高首效

复合负极技术现状

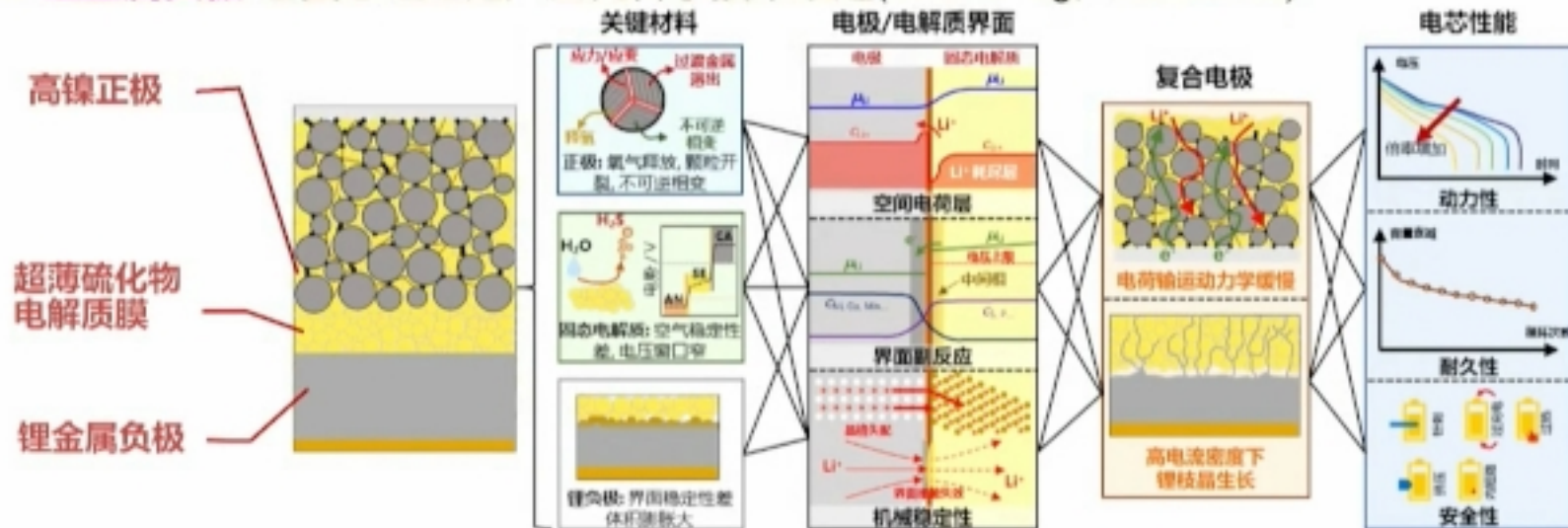
- **硅碳复合负极**：通过采用高锂离子导率、低电子导率的材料作为界面修饰材料，提高硅碳负极材料和硫化物电解质的界面稳定性，实现硅碳负极材料优异的循环性能。



- 应用于硫化物全固态电池的硅碳负极材料实现高**首次放电比容量为1500 mAh/g**;
- 首次充电比容量为**1350 mAh/g**, 首次库伦效率高达**89%**;
- 在**0.5C**倍率下**1000次**循环后硅碳负极材料保持高容量保持率为**82%**。

复合负极技术现状

■ 锂金属负极:全固态锂电池产业化科学技术难题(500Wh/kg, 1000Wh/L)



- **材料层级:** 硫化物电解质化学稳定性和空气稳定性差, 批量生产难题; 正极材料NCM优化、锂金属负极的过渡层材料
- **界面层级:** 电极材料-固态电解质的界面相容性, 包括界面副反应、固-固界面机械接触和体积变化, 需要包覆与掺杂材料
- **电极层级:** 锂离子/电子传输动力学缓慢; 锂枝晶的生长; 需要粘结剂与分散剂材料
- **电芯层级:** 制造成本高, 等静压压制工艺效率低, 电芯做大做厚难, 安全性能存在不确定因素

材料体系创新与全固态电池发展趋势

◆ 第一步：重点攻关固态电解质

- 2025：以200Wh/kg和400Wh/L为目标，打通全固态电池技术链，三元和石墨正负极基本不变，确立主体电解质；
- 2030：以300Wh/kg和600Wh/L为目标，特种商用车应用为主要场景，三元和硅碳正负极，优化固态电解质体系（主体电解质+补充电解质），实现在电池层面大于4C的倍率性能和5000的循环寿命。

◆ 第二步：重点攻关高容量复合负极

- 2030：以400Wh/kg和800Wh/L为目标，高性能乘用车应用为主要场景，进一步发展高比容量高硅基负极，实现在电池层面大于3C的倍率性能和1500的循环寿命；
- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高比容量锂金属负极（锂金属载体或功能层）。

◆ 第三步：重点攻关高容量复合正极

- 2035：以500Wh/kg和1000Wh/L为目标，进一步发展高电压高比容量富锂正极；
- 2040：以700Wh/kg为目标，发展锂硫和锂空气电池。

材料体系创新与全固态电池

■ 产学研协同构建中国全固态电池技术创新平台（CASIP）：

2024年1月21日，由欧阳明高院士牵头，院士专家，领军企业、知名高校、研究机构，及地方政府联合发起，建立了**中国全固态电池产学研协同创新平台（CASIP）**。



中国动力电池发展历程、技术进展与前景展望

1.发展历程

2.技术进展

2.1 电动汽车应用与**安全电池**

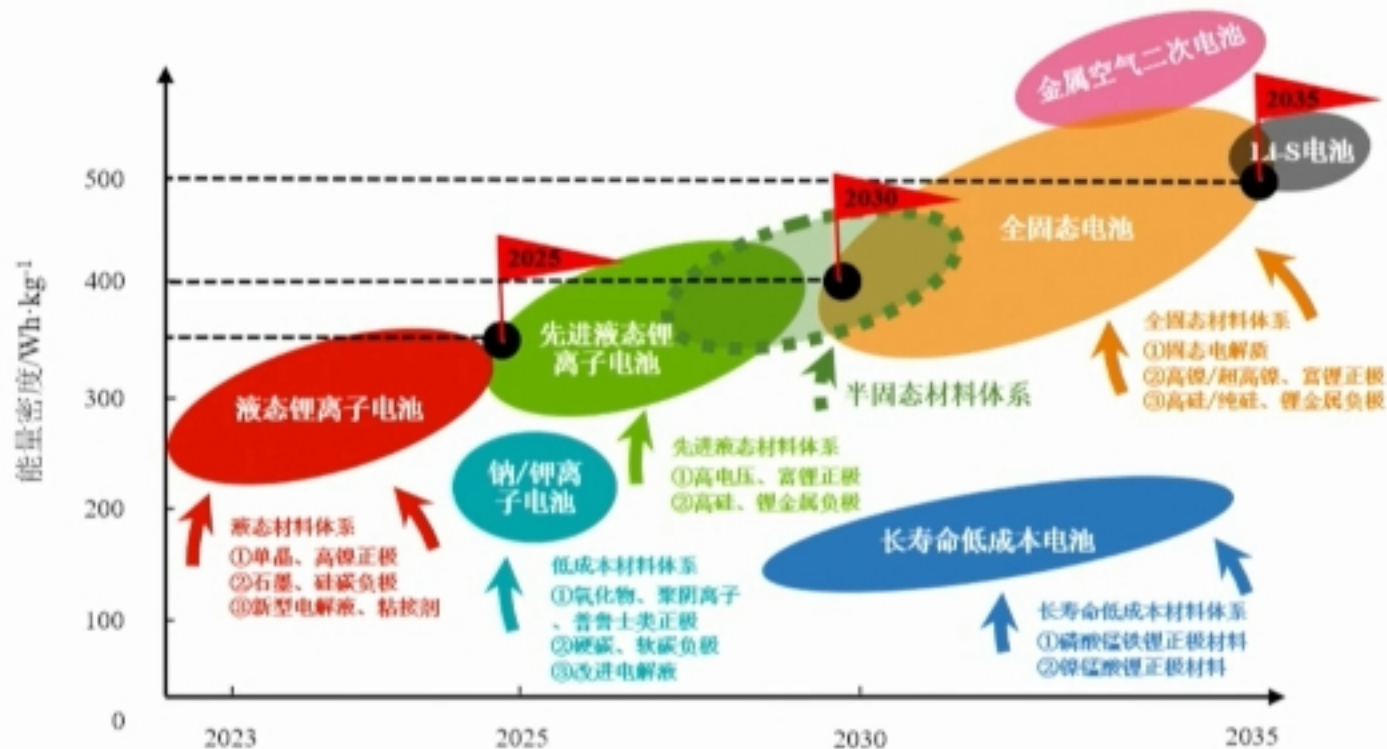
2.2 人工智能革命与**智能电池**

2.3 材料体系创新与**固态电池**

3.前景展望

中国动力电池前景展望：双轮驱动

■ 高比能全固态电池与低成本、长寿命锂离子电池对中国动力电池产业同等重要



中国动力电池前景展望：绿色发展

■ 典型减排技术潜力评估 (评估基准：NCM811方形电池)

电池回收再生：①物理回收减排超过50%；②湿法回收减排32%；③火法回收减排3.5%

绿电比例提升：①2030电力结构背景下碳排放降低12%；②2050电网深度脱碳背景下，碳排放降低75%；

③100%绿电结合电能替代化石过程燃料，可以实现电池生产制造全生命周期近零排放



中国动力电池前景展望：产业转移

- 动力电池产业向**可再生能源丰富的西部地区**转移将是中国电池产业发展的重要选择

