

“变革性洁净能源关键技术与示范” A 类先导专项

“面向国家能源结构变革战略研究” 课题



洁净能源重大信息专报

2019 年第 02 期（总第 02 期）



欧盟至 2030 年电池研发路线图草案

11月18日，欧盟“电池2030+”计划工作组发布了电池研发路线图第二版草案，确定了到2030年欧盟电池技术的研发重点，旨在开发智能、安全、可持续且具有成本竞争力的超高性能电池，使欧洲电池技术在交通动力储能、固定式储能领域以及机器人、航空航天、医疗设备、物联网等未来新兴领域保持长期领先地位。该路线图草案提出了欧盟电池研发的长期愿景和总体目标，指出未来将围绕材料开发、电池界面/中间相研究、先进传感器、自修复功能四个主要研究领域，以及电池制造和回收利用两个交叉研究领域，开展新概念技术（技术成熟度在1-3级）研发活动。

中国科学院洁净能源创新研究院
中国科学院武汉文献情报中心

目 录

2019 年第 02 期 (总第 02 期)

◆ “电池 2030+” 计划概述	
1 愿景及使命.....	2
2 目标.....	3
3 主要挑战.....	4
4 “电池 2030+”计划与欧盟其他电池计划的关系	6
◆ 主要领域一：材料开发	
1 发展现状.....	7
2 关键挑战.....	9
3 研发需求.....	10
4 研发目标.....	13
◆ 主要领域二：电池界面/中间相研究	
1 发展现状.....	13
2 关键挑战.....	15
3 研发需求.....	15
4 研发目标.....	17
◆ 主要领域三：先进传感器	
1 发展现状.....	18
2 关键挑战.....	19
3 研发需求.....	20
4 研发目标.....	21
◆ 主要领域四：自修复功能	
1 发展现状.....	22
2 关键挑战.....	23
1 研发需求.....	24
4 研发目标.....	25
◆ 交叉领域一：电池制造	
1 发展现状.....	26

2 关键挑战.....	27
3 研发需求.....	28
4 研发目标.....	29

◆ 交叉领域二：电池回收

1 发展现状.....	29
2 关键挑战.....	30
3 研发需求.....	32
4 研发目标.....	34

当前，全球工业、交通、建筑等行业不断提高的电气化程度成为实现“碳中和”社会的主要驱动力之一，而高性能电池是抢占未来电气化社会竞争制高点的关键所在。欧盟委员会预测到 2025 年欧洲电池市场规模将达到 2500 亿欧元，但其在电池产业布局中已落后于中国、美国、日本、韩国等竞争对手，迫切需要加快开发超高性能、安全、可靠、可持续和成本经济的新一代电池以迎头赶上，争夺全球电池研发和生产的主导权。2018 年 5 月，欧盟委员会在《电池战略行动计划》¹中宣布将设立一个大型的电池研发长期计划，并在当年 12 月发布《电池 2030+宣言》²，阐述了“电池 2030+”计划的目标、愿景和重点研发领域。2019 年 3 月，欧盟启动“电池 2030+”协调和支持行动，以确定“电池 2030+”计划的研发路线图。11 月 18 日，工作组发布了电池研发路线图第二版草案³，针对《电池 2030+宣言》中确定的技术研发领域，即材料开发、电池界面/中间相研究、先进传感器、自修复功能四个主要研究领域以及电池制造和回收利用两个交叉研究领域，提出了各领域的发展现状、关键挑战、研发需求以及近、中、远期研发目标。现将主要内容编译如下，供领导决策参考。

¹ Strategic Action Plan on Batteries. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF

² Battery 2030+ Manifesto. <https://en.calameo.com/read/00583710170d6d5dbacd5>

³ Battery 2030+ Roadmap (Second Draft). https://battery2030.eu/digitalAssets/820/c_820604-1_1-k_battery-2030_roadmap_version2.0.pdf

“电池 2030+” 计划概述

“电池 2030+”计划将于 2020 年启动，是欧盟一项为期 10 年的大型研究计划，汇集了研究机构、产业界和公共事业部门的力量，基于欧洲在电化学、材料科学和数字技术的卓越进展，利用人工智能、大数据、传感器和计算等技术，实现电池技术的突破。“电池 2030+”计划将重点关注电池新兴概念（技术成熟度在 1-3 级），通过新型材料、工程界面及智能功能设计以开发超高性能电池，为欧洲电池行业提供突破性技术，使欧洲电池技术在交通动力储能、固定式储能领域以及机器人、航空航天、医疗设备、物联网等未来新兴领域保持长期领先地位。

1 愿景及使命

“电池 2030+”计划将持续提出新的研究和创新领域，以克服实现长寿命、安全、低成本且可持续的超高性能电池的主要障碍，推动欧洲电池领域的技术变革。通过这种方法，“电池 2030+”计划将成为到 2050 年欧盟实现无化石能源社会的重要工具（图 1）。

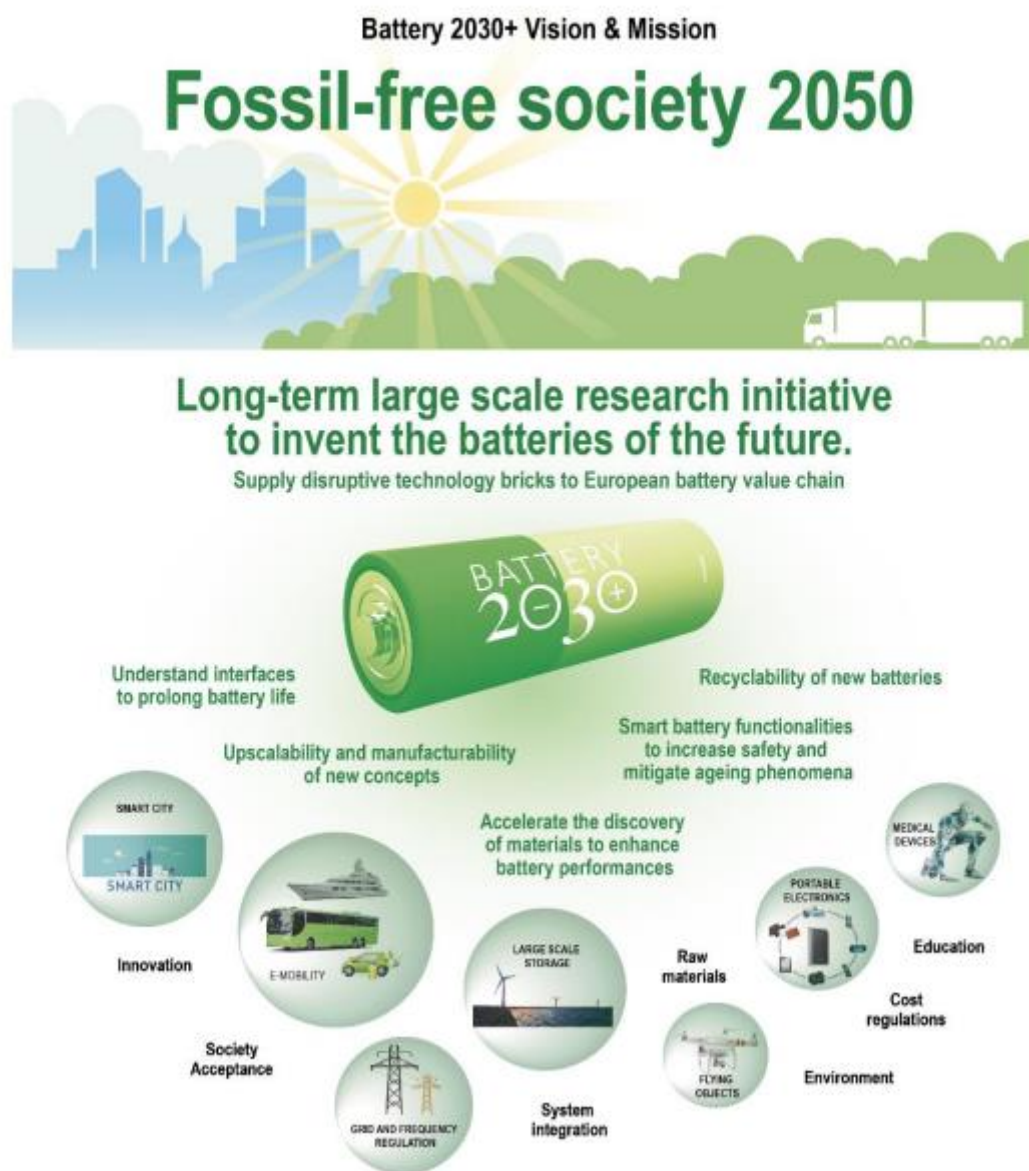


图 1 “电池 2030+” 计划长期愿景和使命

2 目标

总体目标: 研发具有超高性能的智能、可持续电池，以应用于各种领域。此类电池将具备超高性能（即能量和功率密度接近理论极限）、出色的使用寿命和可靠性、增强的安全性和环境可持续性以及可扩展性，并能以具有竞争力的成本大规模量产。

“电池 2030+”计划将通过开发通用工具包和有效的工艺，

以研发适用于不同应用的未来绿色电池。“电池 2030+”计划将提高当前和未来锂离子电池、锂金属电池以“后锂电池”（钠离子电池、多价金属离子电池、金属-空气电池）和未来新概念电池的性能、可靠性、安全性和可持续性。“电池 2030+”计划将实现并超越欧盟战略能源技术规划（SET-Plan）提出的电池性能目标，带来电池性能的突破性飞跃。

通过“电池 2030+”计划在未来 10 年的研究，将为电池技术带来如下影响（与当前技术相比）：

- 将电池实际性能（能量密度和功率密度）和理论性能之间的差距缩小 1/2；
- 至少将电池的耐用性和可靠性提高三倍；
- 将电池的生命周期碳足迹至少减少五分之一（对于给定的电力组合）；
- 电池回收率至少达到 75%，关键原材料回收率接近 100%。

3 主要挑战

（1）电池性能达到最高

必须加快开发新材料和新电池概念，拟开发的新材料需要对电池环境中的有害腐蚀或化学副反应保持稳定。需要特别注意界面处发生的复杂反应，如电极材料和电解质之间、电极与集电器之间、电极内不同材料组件之间等。

“电池 2030+”计划将开发：（1）电池界面基因组（Battery Interface Genome, BIG）和材料加速平台（Materials Acceleration Platform, MAP），利用人工智能（AI）技术大大缩短电池材料

的开发周期；(2) 一个欧洲共享数据体系，能够自动获取、处理和利用电池开发周期内的数据；(3) 基于 AI 的新型工具和物理模型，以利用上述数据，尤其是电池材料、界面和中间相数据；(4) 各种辅助方法，包括数值模拟、自主高通量材料合成和表征、实验和设备级测试等，在不同的空间和时间尺度内生成数据。

(2) 增强电池单元和系统的寿命和安全性

寿命和安全性都影响着未来电池的尺寸、成本和接受度。为了实现这些目标，“电池 2030+”计划提出了两种不同的互补方案：

1) 开发直接在电池单元一级监测化学和电化学反应的传感器。新型嵌入式传感器将能够连续监测电池的“健康状态”和“安全状态”。可应用的传感器技术和方法将包括光纤、等离子体、声学、电化学传感器等。由于这将增加系统的复杂性，因此还必须考虑电池的可制造性和可回收性，以确保电池价格适中且规模可扩大。

2) 通过使用电池单元内的自修复功能来增强电池性能。自修复是指在电池单元的不同部分引入无源和有源组件或分子，这些组件或分子可以通过外部刺激释放或可以连续反应，以防止块状电极材料和电池内的界面退化。将开发一系列可能的自修复概念，根据电池的应用范围针对不同的电池进行设计。传感器可以实现电池级别的无缝集成，并且可以控制热失控反应、老化现象并释放自修复剂，从而为电池提供比现在更长的寿命。新型传感器具有很高的灵敏度和准确性，并且价格低廉，因此

有可能实现智能电池。将这些新技术在电池组级别与高效电池管理系统（BMS）集成并实现自修复是“电池 2030+”计划路线图的目标之一。

此外，电池材料、单元和系统的可制造性和可回收性是交叉领域研究，将整合到路线图确定的所有研究领域。上述研究领域的主要关系如图 2 所示。

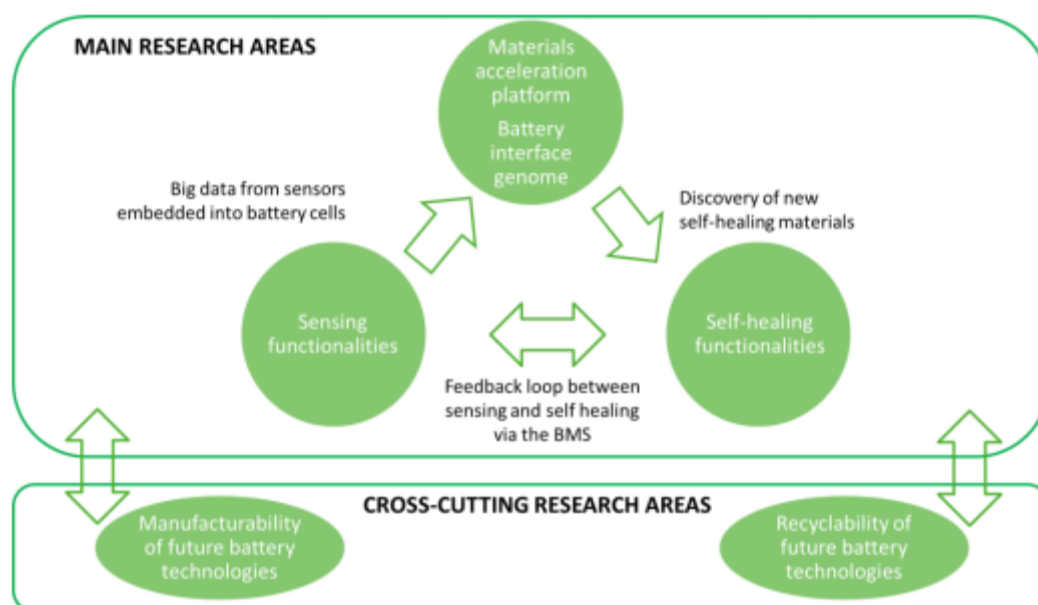


图 2 “电池 2030+” 技术路线图研发领域的关系

4 “电池 2030+” 计划与欧盟其他电池计划的关系

“电池 2030+” 计划、欧洲技术与创新平台“电池欧洲”（Batteries Europe）⁴和欧洲电池联盟（EBA）⁵三个相互衔接互补的计划构建起了欧洲电池研究与创新生态系统（图 3）。“电池 2030+” 计划重点关注对技术成熟度为 1-3 级的新型电池概念的长期研究。其开发的技术概念成果由“电池欧洲”组织实施短、中期研发项目，推进技术成熟度提高到 4-8 级，以探索

⁴ Batteries Europe. <https://www.eera-set.eu/eu-projects/batteries-europe/>

⁵ European Battery Alliance. <https://www.eba250.com>

实现商业应用。而欧洲电池联盟开展的短期工业化项目则支持“电池欧洲”研发成果的进一步工业化，推进技术成熟度达到 7-9 级。

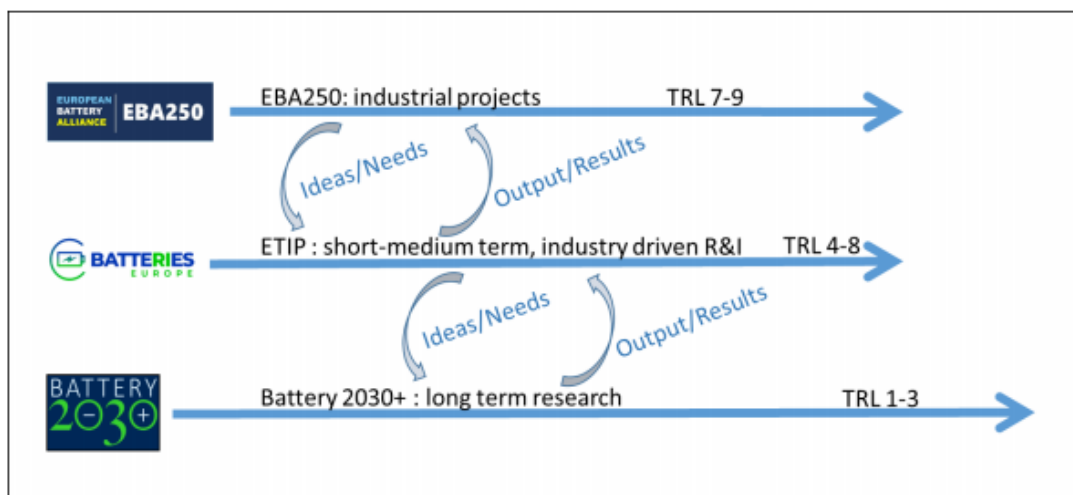


图 3 欧洲电池研究与创新生态系统—欧洲电池联盟、电池欧洲技术与创新平台和电池 2030+之间的衔接互补

主要领域一：材料开发

1 发展现状

开发新型电池材料的常规研究策略已广泛依赖于 Edisonian 方法(试错法), 每一步有价值的发现都取决于前一步的成功。近年来, 虚拟计算材料设计(通常是原子级)和运行表征技术在一个设计周期中的紧密集成可以加快下一代电池技术的发现, 例如高容量锂离子电池负极和用于金属-空气电池的材料。但要实现“电池 2030+”计划的宏伟目标, 还需要进一步加速。理想情况下, 这样的周期性材料开发过程可以把实验和理论研究整合在开发平台中, 实现几乎瞬间得到结果。相关领域最新技术现状如下:

(1) 数据基础架构和数据库。欧洲及其他地区正在进行的大量工作旨在为实验数据创建广泛、灵活且可共享的数据库。PRACE 和 EuroHPC 等计算基础架构以及 UNICORE、SimStack、AiiDA 和 Materials Cloud 等平台可促进高效且可靠的高通量计算。为了充分利用这些数据，欧洲材料建模委员会 (EMMC) 正开发本体 (例如 EMMO)，即通用知识表达系统，以确保开发过程中不同规模、技术和领域之间的互操作性。

(2) 多尺度建模。电池的性能和寿命取决于在非常不同的时间和空间尺度内发生的多个过程。电池模拟需要从不同的时间和空间尺度内进行观察，即遵循 EMMC 的指导原则：① 电子尺度，可以描述化学反应，通常使用电子密度泛函理论 (DFT)、AB Initio 分子动力学 (AIMD)；② 原子和介观尺度，通常使用分子动力学 (MD) 和动力学蒙特卡洛 (KMC) 模拟；③ 宏观尺度，通常使用连续体模拟。目前，涵盖所有尺度现象的虚拟材料设计的单个计算模型已经超出了当前计算能力和理论的范围。为了应对这一挑战，单一尺度模型必须适用于多尺度工作流程。

(3) 材料和界面的实验表征。在同步加速器和中子散射装置等大规模研究设施中，材料和界面的实验表征在确保充分获取描述电池材料和界面的高精度数据方面起着至关重要的作用。这要求能够对整个欧洲的实验室、同步加速器和中子设施产生的大量数据进行自主、动态的分析。

(4) 自主合成机器人。可以由中央 AI 控制的自主合成机器人技术是实现材料闭环发现的核心要素。高度自动化、高通量的合成正成为有机物和药物研究的最新技术，并且在固体和

薄膜材料的开发中也有很多应用。对于储能材料，机器人辅助的合成和自动化为高通量筛选功能性电解质和正极、负极活性材料开辟了新领域。将数据挖掘等计算方法与结构-属性关系和电池活性材料性能相结合，机器人技术对发现新颖和有前途的材料产生了重大影响。

(5) 实验和计算高通量筛选。通过使用自动化、小型化分析和大规模数据分析，对数据量庞大的化合物数据库进行实验和计算的高通量筛选，以加快相关电池材料组成研究，从而可以将材料发现的速度提高一个数量级。

(6) AI 技术在材料开发中的应用。AI 技术为材料开发提供了广阔的前景，但是自主发现新型电池材料和界面的复杂性和挑战性比目前的应用要复杂得多。为模型训练提供大量、精选的数据集是成功应用基于 AI/机器学习 (ML) 预测技术的前提。

2 关键挑战

(1) 数据可用性。用于未来电池设计预测模型的开发需要基于不同保真度的数据进行全面验证，尤其是验证用于电池材料和界面的（逆向）设计的复杂模型要求集成涵盖材料和设备特性的高保真数据。目前此类数据较为稀疏，仅覆盖所需数据的一小部分。而且，现有数据的可用性仍然很低。另外，在对实验和计算的不确定性量化和保真度评估，以及深度学习技术的应用方面也存在挑战。尽管机器学习有可能极大地加速对材料（如无机能源材料）结构-属性关系的筛选和识别，但是电池材料和界面开发面临的关键挑战是开发自主工作流程，以从源

自大量实验和计算的时间和空间尺度稀疏数据集中提取基本关系和知识。

(2) 材料的闭环开发。为了确保将实验和测试数据完全集成到材料加速平台 (MAP) 中, 必须开发用于数据采集和分析的自动化方案。当前, 将自动化技术用于固态合成的例子很少。更重要的是, 用于表征电池及其材料的自动化方法要么缺乏, 要么开发不足。最近, 科学家已经为 X 射线衍射 (XRD) 和原位 X 射线吸收光谱 (XAS) 等表征技术开发了一些基于机器学习的工具, 这些工具将实现自动化分析, 但是需要高度可预测、更广泛的技术组合以支持完全自主的材料开发平台。实现材料闭环开发的一个重要瓶颈是缺乏电池材料和界面的可靠、可预测模型, 这与物理/模拟方法和数据驱动的材料开发策略都相关。只有完全集成基于自动合成和表征的 AI 技术所开发的物理/仿真模型和数据模型, 才能实现完全自主的材料开发。

3 研发需求

欧洲一直处于电池技术发展的最前沿, 在活性材料开发、新型液体或固体电解质设计、开发超越锂离子电池的新型电池, 以及用于研究电化学系统核心复杂氧化还原反应的新实验和计算工具方面处于领先地位。欧洲研究界将通过创建**材料加速平台**, 将合作伙伴的优势互补与现有的合作环境相结合, 以提高对电池材料认识的研究工作。因此, 将对如下方面进行研究:

(1) 自主合成机器人。电池材料的全面电化学表征和电池测试是限制新型电池材料和界面开发速度的主要瓶颈之一。为

了在特定应用的背景下探索更多种类的材料，必须进一步开发高通量合成机器人，以解决电解质配方和电极活性材料及其组合时的材料表征问题。

(2) 高通量/高精度表征。即使文献中报道了越来越多的电池材料高通量测试方法，但许多电化学测试在短时间内没办法生效，特别是循环实验可能要花费数天至数月甚至数年。为了从大量样品中获取宝贵的机会，必须建立用于对电池材料及其原位和运行过程中表征的自动化高通量基础设施。该基础设施必须解决材料的广度和深度问题，并从已确定的一些候选材料中进一步筛选。需要将物理参数导向的基于数据的建模和数据生成相结合，以便将来能够对电池及其活性材料进行高通量测试，从而建立可加速开发新材料和界面的电池材料平台。

(3) 跨部门数据基础架构。加速材料创新依赖于合适、共享的数据以及从中获得的物理和化学认知，这对国际研究界共同建立和维护共享的材料数据基础架构提出了重大挑战。建立通用的数据基础架构将有助于确保在材料的闭环研发过程中，能够实时进行跨部门实验数据集成和建模。这样的数据基础架构的实现将使各个研究机构得到的数据立即为整体所用，并大大缩短了研发周期。材料加速平台将开创基于分布式访问模型的基础架构，各种数据资源、仿真策略及 AI 研发工具可通过访问协议来共享使用。

(4) 多尺度互连和集成工作流程。多尺度挑战的根源在于，如何以有效和稳固的方式最佳地耦合和连接不同尺度的模型。在较大规模的模型中，由于时间和空间数据过于庞大，通常会

牺牲细节和分辨率。要发挥用于新材料和装置设计的多尺度建模的全部潜力，需要完全创新的方法来弥合尺度，这超出了单个国家独立研究团体可以实现的最高水平。机器学习和物理理论导向的数据驱动模型可用于识别最重要的参数和特征。材料加速平台将利用欧洲的计算基础设施进行上述研究。

(5) 开发人工智能。基于 AI 的生成模型，即用于电池材料和界面的时空演化观测数据的概率模型，可以极大地促进实现材料加速平台的目标，开发集成物理参数和数据驱动的混合模型将是材料加速平台的重要组成部分。目前，缺乏足够的模型以开发全面的电池模型。这些可以通过基于 AI 的技术来解决，但存在可能违反物理定律的问题。克服这一难题的关键是开发混合模型，其基于 AI 模型的预测受到物理定律的约束。这些模型必须在来自先进多尺度计算建模、材料数据库、文献以及运行中的表征数据的庞大数据集上进行训练。这些数据必须涵盖电池材料的各个方面，从合成到电池水平测试等。

(6) 数据协议的统一。材料加速平台将通过利用欧洲材料建模委员会 (EMMC) 和欧洲材料与建模本体 (EMMO) 支持的语义访问协议，并将学术界和工业界、材料建模和工程联系起来，实现整个电池价值链中的数据标准化。需要开发开放式电池创新平台，以促进合作伙伴之间共享基础架构和数据，并将模型集成到工业流程中，以缩小材料的计算设计、电池实际制造及其最终用途之间的差距。

(7) 电池材料和界面的逆向设计。通过所需性能目标来定义电池材料和/或界面的组成和结构，从而颠覆传统的开发过程。

可以在不同的时间和空间尺度内实现特定界面的性能指标，同时在一定程度上保持对界面在电池寿命期间演变过程的控制。

4 研发目标

前瞻性愿景：开发一种通用研发框架，能够将新型电池材料和界面的研发速度提高 10 倍。这一构想的核心是“电池界面基因组-材料加速平台”(BIG-MAP)，能够最终实现超高性能电池材料和界面/中间相的逆向设计，并可整合传感、自修复、可制造性和可回收性，直接进入发现过程。

材料开发领域的短、中、长期具体研发目标如表 1 所示。

表 1 材料开发领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	开发用于电池材料和界面的共享且可互操作的数据基础架构，涵盖电池发现和开发周期内所有领域的的数据；自动化的工作流程，可识别并在不同的时空尺度之间传递特征/参数；构建基于不确定性的材料和界面的数据驱动和物理混合模型
中期	在材料加速平台中实施电池界面基因组，能够集成计算建模、自主合成机器人和材料表征；成功演示电池材料可逆设计过程；在发现和预测过程中直接集成来自嵌入式传感器的数据
长期	在电池界面基因组-材料加速平台上建立并示范完全自主开发过程；集成电池组装和设备级测试；在材料开发过程中实现可制造性和可回收性；示范材料开发周期的 5 倍加速；实施并验证用于电池超高通量测试的数字技术

主要领域二：电池界面/中间相研究

1 发展现状

(1) 电池界面实验表征。电池界面和中间相既可能促进电池中的能量存储，又可能引发许多退化现象。因此，了解、控制和设计界面和中间相的功能对于开发超高性能、智能且可持续的电池至关重要。与电极和电解质的整体尺寸相比，界面（或中间相）要小几个数量级，界面反应容易被周围环境掩盖。因

此，实验和计算技术必须对表面高度敏感，并具有极高的分辨率才能探测此类隐藏的界面。然而，电池界面的实验表征一直是一项长期的挑战，目前很少有技术能够完整描述界面处发生的反应。

(2) 电池界面控制。在开发能够探测中间相化学和形态特性的表征技术的同时，科学家投入了大量的精力来开发化学和工程方法，以控制循环时界面的动态变化。最突出的方法是使用电解质添加剂，其初期可在电池内部发生反应，钝化电极材料表面，因此形成防止与电解质发生反应的涂层。然而，多年反复试验研究表明，需要使用多种协同作用的添加剂以获取有效的固体电解质中间相，高通量技术和 AI 将有助于加速开发此类固体电解质中间相。

(3) 界面模拟参数准确性。通常，电化学系统的复杂性使得只能简化模拟，因此仅能定性模拟电池的真实情况，所获得的参数与更复杂的电化学环境中材料的真实参数大相径庭。将物理感知与数据驱动方法相结合，可大大提高界面描述、特征和参数的准确性。

(4) 反应机理数学建模。对反应机理完整且封闭的数学描述极具挑战性，因为在电化学相关环境中离子和电子转移反应通常包括耦合的多步反应。这些多步反应要么被极大地简化，要么在理想的环境中对反应步骤进行建模。在特定情况下，可以将 DFT 方法与经典方法相结合来改善表面反应的描述，但是通用方法仍然受到限制，并且仍然缺乏有效和系统的耦合。

2 关键挑战

(1) 现有数据可用性。过去对电池界面动力学机理以及反应性和功能控制方面的大量研究产生了庞大的数据，但仍未被充分应用。因此，需要对数据彻底进行范式转换。应以更系统和自动化的方式进行数据收集、处理和分析，如通过电池界面基因组-材料加速平台的 AI 协调加速发现过程，实验、仿真和 AI 获取的模型要更加协同一致。主要挑战包括开发新的多尺度建模概念，如开发物理感知和数据驱动的混合模型来定义界面参数，开发新的表征技术以及将实验数据和观测对象标准化用作物理模型的输入等。

(2) 开发工具以探测电池界面处动态过程的演变。这些工具应选择性地提供界面区域的信息，并可将实验、仿真模型和 AI 模型相结合。电池界面/中间相表征技术应在运行期间提供电池界面的高通量输入数据，电池界面基因组平台应能够实现庞大数据集的自动采集、处理和分析。

(3) 界面预测设计的真实度。需了解和跟踪实验、仿真及机器学习模型的不确定性，同时利用多种数据，包括失败实验的数据，以开发可加速高性能电池的界面/中间相开发和逆向设计的模型。

3 研发需求

(1) 开发针对更高的空间分辨率、时域和运行条件的新型计算和实验技术，以获得超高性能电池系统构造的新认知。这种发展对理论和实验都具有挑战性，并且各学科之间需要加强协作以开发下一代电池技术。需要实验数据以开发新计算模型

的输入参数，并需对照实验结果以验证建模结果，还需将理论模型与实验结合以提高对实验结果解读的精确性。为了开发电池界面工程，需要高质量/高保真度的数据，这要求开发出更先进的运行实验技术，以建立对较小规模以及各种不同时间尺度和维度的原子级理解。此外还需实时获取和分析研究对象，以为材料加速平台提供实时输入数据。电池界面基因组将开发数据采集和传输的欧洲通用平台和通用标准。

(2) 采用结合实验、理论和数据驱动的全新方法。通过基于物理的数据驱动混合模型和仿真技术以描述最先进的实验。开发使用大数据确定多尺度/多结构理论参数的有效方法，以实现¹对电池界面的微调。

(3) 开发具有高保真度的电池界面表征技术。通过对电池界面及其动态特性的精确表征，建立电池界面属性的大型共享数据库，X 射线及中子技术都是有效的表征技术。为了加快研发速度，必须对相同材料/界面的多技术信息/数据进行系统性检测。在高通量水平上，表征技术应探究必要的元数据来研究大量样品，这要求工作流程能够以自动/自主方式生成和分析大量数据。

(4) 设计电池及其材料的标准化测试协议，以便通过将电池性能与其化学性质进行比较来获取有关电池界面的关键信息。电池界面基因组将设计欧洲通用策略，提供共享每种电池循环数据的数据基础架构。将建立电池材料特性数据库和电池界面现象标准化分类，定义物理模型的常用观测值，以实现数据和模型的多尺度集成。此外，为了支持测试协议的标准化，平台

将向欧洲合作伙伴开放，以认证电池的性能，这将有助于学术界与工业界之间更好的融合。

(5) 开发更精确的模型，以接近最真实的界面、老化和退化情况。 复杂的设计方案需要足够的数学框架，以耦合电子、原子、介观模型与连续模型。结合先进的多尺度建模和数据分析以实现相关时空尺度的复杂耦合，开发将数据映射回模型参数的逆向建模技术。

4 研发目标

前瞻性愿景： 完全集成数据驱动方法和基于物理理论的模拟，开发和实现用于电池界面/中间相逆向设计的合适模型，能够执行从所需特性到材料和材料原始组成的逆向映射。最终开发由数据输入驱动的电池逆向设计方案，实现一个完全自动化的平台，集成计算建模、材料合成和表征、电池组组装和设备测试。

界面/中间相研究领域的短、中、长期具体研发目标如表 2 所示。

表 2 界面/中间相研究领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	为电池界面建立规范的特性/测试协议和数据标准；开发自主模块可利用 AI 和仿真模拟技术进行动态特征分析和数据测试；开发可互操作的高通量和高准确度的界面表征方法
中期	为电池界面的空间和时间变化过程开发预测混合模型；电池中间相逆向合成设计模型的示范；电池界面基因组-材料加速平台得以实现，能够集成计算建模、自主合成机器人技术和材料表征
长期	在电池界面基因组-材料加速平台上建立并示范完全自主开发过程；证明界面性能提高了 5 倍；证明电池界面基因组到新型电池化学和界面的可移植性

主要领域三：先进传感器

1 发展现状

(1) 电池运行状态分析技术。多年来，通过使用复杂的分析方法，例如 X 射线衍射 (XRD)、核磁共振 (NMR)、电子顺磁共振 (EPR) 或透射电子显微镜 (TEM)，对不同的电池化学开展了许多基础研究工作。理想情况下，当电池循环时，可以进行原位分析。但上述分析技术依赖于特定的设备和电池，因此无法用于分析商业电池。最近在 18650 电池中进行了锂分布密度和结构效应的分析，但这些成像技术仅限于一定规模尺寸的设备。多年来，在仪器小型化方面取得了显著进展，开发出台式 XRD、扫描电子显微镜和便携式阻抗（甚至 NMR）光谱仪，但仍远远无法满足电池运行性能的实时监测需求。

(2) 电池充电状态 (SoC) 监测。多年对电池 SoC 的监测主要针对铅酸电池，开发出多种传感技术。在此期间，电化学阻抗谱 (EIS) 取得了巨大进步，便携式 EIS 设备已商业化并用于交通运输领域，但可靠性不佳 (<70%)。总体而言，SoC 监测仍然非常具有挑战性，缺乏准确的解决方案。目前对 SoC 监测仍依靠 EIS、电阻、电流脉冲测量和库仑计数等直接测量技术与基于开路电压的估计相结合。

(3) 嵌入式传感器。嵌入式传感器可监测与电池寿命密切相关的电池内部化学/物理参数，光学传感器越来越受到关注，相关研究主要关注布拉格光纤光栅传感器 (FBG's)，其具备循环时准确监测、电池温度成像、估算电池 SoC 等优点。

2 关键挑战

(1) 温度传感器。通过在 18650 圆柱型电池的表面外壳上丝网印刷热传感器阵列，可以以 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的精度绘制出工作期间电池温度的纵向表面变化。但是，相关单元内部的信息匮乏，阻碍了目前热电池管理系统 (TBMS) 模型的完整性，从而使其准确性和预测能力受到质疑。通过在电池中嵌入热电偶来缓解该问题，可以绘制电池内的温度分布，从而提供有价值的信息以验证热电化学模型。这种方法的问题在于如何使各种热电偶及其布线的位置不会影响电池的性能和密封性。检测温度分布和识别电池内热点更友好的方法是红外热像仪，但该技术的缺点是空间分辨率低、具有背景噪声和温度精度限制。

(2) 仪表传感器。除了监测温度外，检测嵌入应变和电池压力对于控制固体电解质中间相动态变化也至关重要，这些动态变化将影响电池的 SoC 和电池健康状态 (SoH)。但是，在单元表面放置应变传感器不足以提供空间信息，这对于改进 SoC 和 SoH 至关重要。

(3) 电化学传感器。电化学传感器主要用于检测电池化学方面的数据，但仍是一种非原位检测技术。将先进电化学 (脉冲) 技术与电极/传感器小型化和电极修饰适应性相结合，为设计新型强大的检测微系统提供了极好的平台，只要可以解决材料方面的问题，这些微系统就可以方便地嵌入电池中。电化学电池诊断中的一项挑战是开发用于检测电流/电压或电位的有效、化学稳定的参比电极。但是，到目前为止还不存在可靠、用户友好、化学稳定、长期存在且自由拆装的电池结构。

(4) 光学传感器。迄今为止，布拉格光纤光栅传感器将发射信号的波长依赖性与局部温度、压力和应变相关联。很少有研究小组表明如何使用布拉格光纤光栅传感器获取电池组的热图。虽然近期有这方面的研究，但是存在如何将压力和温度分离的困难。微结构光纤（MOFs，也称为光子晶体光纤）的出现提供了此类问题的解决方案，但其制造仍处于起步阶段。

(5) 纳米等离子体传感器（NPS）。该技术于 2017 年末引入电池领域，具有通过电子振荡聚焦、放大和操纵光信号的优势，被称为表面等离子体激元（SPs）。然而，这种传感器的制造需要在光纤顶部沉积金属等离子体纳米结构，在电解质存在的情况下循环时的物理化学稳定性仍未得到解决。

(6) 声传感器。电池像是一个可呼吸物体，循环时会随着体积变化而膨胀和收缩，最大变化可达 10%。这会导致电池材料(裂纹)内部产生机械应力，从而发出声音信号。声发射(AE)正用于监测铅酸电池、镍氢电池的电化学性质，并在最近被用于锂离子电池研究中。然而，声传感技术的限制是连接用于信号发射和接收的声学换能器所需的大量布线。

3 研发需求

(1) 将智能功能嵌入电池。包括在其他研究领域中使用各种传感技术的集成和开发，这些传感技术依赖于光学、电学、热学、声学甚至电化学概念来将信息传输进/出电池。设计/开发可以精确测量多个参数的传感器，如应变、温度、压力、电解质浓度、气体成分等，并设计/开发固体电解质中间相动态监测功能。为了成功地将传感工具应用到实际电池中，传感器必须

在（电）化学稳定性、尺寸和制造限制条件（包括可回收性）方面适应目标电池环境。

（2）将传感器嵌入电池。将开发具有创新化学涂层的传感器，该涂层应具有极高的化学和热稳定性。将传感器尺寸减小到几微米以适合电极隔板的厚度，因此不会影响电池性能，需结合“电池 2030+”的电池制造和可回收活动探索新的制造工艺。此外，采用无线传感技术来避免连接布线问题，只要电池所处环境能够实现无线通信即可。还可开发能够监测多个参数的新型传感器，如将布拉格光纤光栅传感器、微结构光纤和纳米多孔金（NPG's）集成到单个传感器以减少导线。同样，可以将不同的布拉格光栅刻入同一根光纤，以进行多路复用测量。基于微结构光纤的分布式传感也是潜在的解决方案。

4 研发目标

前瞻性愿景：开发出具有高灵敏度、高精度和低成本的新型传感器，使人们有可能使用智能电池。在电池组层面实现这种新技术与高效电池管理系统的集成，并将其真正有效地与自修复功能关联起来。

先进传感器领域的短、中、长期具体研发目标如表 3 所示。

表 3 先进传感器领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	对电池而言，开发基于各种传感技术和简单集成的非侵入性多传感方法，为评估电池内的界面动力学、电解质降解、枝晶生长、金属溶解、材料结构变化等现象提供可能；监测电池工作期间关键参数的正常-异常变化，并定义从传感器到电池管理系统的传递函数；通过实时传感将工作温度窗口扩大>10%
中期	实现（电）化学稳定传感技术的微型化和集成，以经济有效的方式与工业制造过程兼容，在电池层面和实际电池模块中均具有多功能；利用先进电池管理系统传感数据，建立新的自适应预测控制算法；在电池界面基因组-材料加速平台中集成感应和自修复功能；多价电极体系过电压降低>20%；将锂离子的电压窗口增加>10%

长期 依靠新的 AI 协议辅助的先进电池管理系统，通过无线传感器通信实现完全可操作的智能电池组；在未来的电池设计中，将感测/监视与刺激引起的局部修复机制（例如自修复）结合，从而可以通过集成感测-电池管理系统-自修复系统来获得智能电池

主要领域四：自修复功能

1 发展现状

自修复分为自主修复和需要外部刺激（热量、光照、pH 值等）的非自主修复。在这两种情况下，修复过程的各个部分都必须具有高反应性，以实现与固体表面的快速有效反应。目前已开发了分子-聚合物，具有基于氢原子、静电交联、客体或范德华相互作用等动态超分子组装的固有自修复特性；此外还开发出与电池组件化学相容的功能性和柔性聚合物，其材料会针对损坏产生反应性物质；使用微胶囊自愈合材料的自修复方法在电池领域中几乎没有应用。科学家还尝试了许多自组装材料以及与超分子化学和生物学有关的仿生机制，从而为内在或外在的自修复过程开发全新的智能功能。

为了保护电池免于热失控（最常见的故障模式），已经采取了一些方法，如将具有热自保护功能的热转换聚合物集成到电解质和集电器中。由于自修复化学材料必须对电池苛刻的氧化/还原化学环境具有较强抵抗力，因此减慢了开发电池自修复功能的速度。最近的一些研究取得了较快进展，涉及将自修复功能集成到电池和超级电容器中，当前电池领域已探索的自修复机制见图 4。

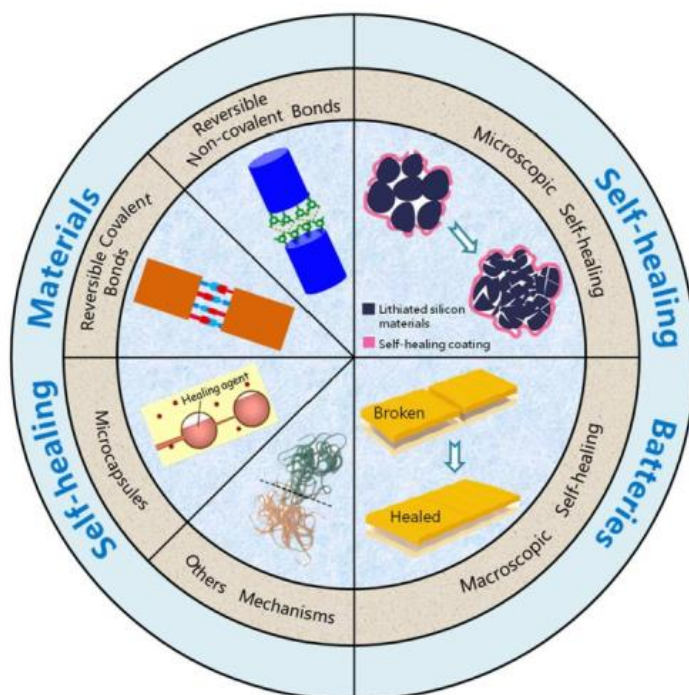


图 4 电池领域自修复机制示意图

2 关键挑战

(1) **电极电导率的恢复**。自修复系统应使导电材料在裂缝/断裂面、涂层外壳、电极-集电器等之间建立物理和导电完整性。现有的电导率自修复研究中，利用尿素-甲醛微胶囊实现溶剂和电导率的自修复；将炭黑与聚(3-己基噻吩)结合可用于恢复破裂硅负极的导电性，但其具有不可逆性且会损害电池的能量密度；氢键聚合物有助于硅负极承受循环多次后的体积膨胀；基于超分子相互作用的自修复粘合剂有利于硅负极和硫正极的修复；使用液态金属可实现锂合金负极的自修复，自修复钠锡合金可用作钠离子电池负极；自修复锌碘液流电池具有可吸附 I_3^- 的多孔膜，过度充电后膜中的 I_3^- 可氧化锌枝晶以修复电池。

(2) **自修复电解质设计**。自修复电解质可用于改善电池的电化学性能和耐用性。用于锂硫电池时，首先需要抑制电池中的多硫化物穿梭效应，预装多硫化物和自动修复剂的自修复电

解质可溶解硫化锂固体；聚乙烯醇/三氟甲烷磺酸锌制取的水凝胶电解质用于水系锌离子电池可实现自主修复。

(3) 其他自修复策略。目前还有一些其他自修复策略用于提高电池性能和可靠性，如 Si@TiO₂ 复合蛋黄-蛋壳结构可修复电极锂化膨胀产生的裂缝从而大幅提高循环稳定性，重复高电流密度可能触发锂的表面迁移从而防止锂枝晶生长。尽管该领域仍处于起步阶段，但这些研究为新的研究趋势奠定了基础，同时激发了针对电池自修复 (BSH) 的研究活动。但多数关于自修复的报道距离实际使用相距甚远。

3 研发需求

(1) 功能化电解质隔膜。在电解质隔膜孔道内接枝的方法具备研究前景，经过专门设计可具有自修复特性。环糊精具有高溶解度、亲油性内腔和亲水性外表面以及对小客体分子/阳离子的特异性识别能力，可以根据需求利用温度作为刺激条件来吸收或释放捕获的离子。另一种选择是使用冠醚或杯芳烃，其具备高度开放的结构，能够调节离子传输而不会造成阻塞，而且其接枝过程相对简单。此类新概念可应用于智能隔膜的设计。

(2) 聚合物电解质隔膜。聚合物隔膜既可以用作固态聚合物电解质，也可以用作电极氧化还原活性材料或混合型固态电解质的组分，金属涂覆的聚合物集流体甚至已有商业产品。由于聚合物可以原位形成或交联，因此可以用作电池单元内的机械修复剂，类似于环氧树脂或氰基丙烯酸酯(即超级胶)树脂。由于在电池中聚合物的使用实际上几乎不受复合成分的限制，因此可针对大多数组件和界面开发聚合物自修复策略。同时，

也将探索超分子在自修复多相固体聚合物电解质系统中的应用。

(3) 生物基电解质隔膜。生物基电解质隔膜可控制电解质的分解从而改善电池老化，研究重点在于通过使用纳米孔道技术和电子探测手段，使用单分子尺度且具有一定灵敏度和选择性的传感器来跟踪电解质的稳定性。为此，需要使用无毒的生物基分子/蛋白质（例如环糊精）设计薄而多孔的可控隔膜，其选择性可以通过使用和优化蛋白质工程来实现。

(4) 自修复电极。将探索利用滑动轮凝胶控制隔膜表面的有机物并优化电池装置的效率。除超分子相互作用外，滑动凝胶的主要优点是沿聚合物链的滑轮效应可分散应力，从而重建结构使性能恢复。另外，将研究复合电极，其包含能够通过施加刺激来释放修复剂的微胶囊，将设计具有矿物或聚合物壳的微囊，在受刺激破裂时将释放锂盐、钠盐等。

4 研发目标

前瞻性愿景：开发一种能够按需修复的智能自修复系统，以溶解电阻沉积或恢复电池中有缺陷的电极/电解质界面，甚至恢复复合电极中的导电网络。将开发自主的自修复工具（如自修复聚合物、液态金属合金），以及开发 3D 多孔多功能复合材料、胶囊、超分子化合物或能够吸收特定分子并通过物理或化学刺激释放的材料，以修复构成电池的电极/电解质或颗粒/颗粒间的界面。

自修复功能领域的短、中、长期具体研发目标如表 4 所示。

表 4 自修复功能领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	组建研究团队进行跨领域合作，为建立新的电池研究领域打下基础，从而开发电池的自修复功能。对隔膜进行功能化处理，并开发依靠 H-H 键可逆交联的超分子结构，以修复电极-隔膜的膜破裂，同时与目标电池的化学性质兼容
中期	设计具有可容纳多种功能有机-无机修复剂胶囊的隔膜，可通过磁、热或电模量触发以实现自动修复；确定与刺激驱动自修复操作相关的响应时间，以修复与电极断裂或固体电解质中间相老化有关的故障
长期	设计和制造具有受控功能和孔隙率的低成本生物基电解质隔膜；在电池传感器和电池管理系统之间建立有效的反馈回路，以通过外部刺激适当触发已经植入电池的自修复功能

交叉领域一：电池制造

1 发展现状

(1) 电池设计。目前，电池的设计遵循反复试错的方式，并且仅限于某些标准模式电池。已有对电池单元进行建模设计的尝试，这将为探索新的电池模式开辟新的可能性。

(2) 电池制造。电池制造是当今相当成熟的技术，但仍需进一步改进电池设计和制造过程，应采用全新的生态设计标准，以最大程度地减少废料、一次能源消耗，实现零排放或近零排放。当前的多物理场建模在电池设计和制造中非常重要：①多物理场建模能够加快新型电池的性能、效率和可持续性设计，将多物理场模型与 AI 的高级优化算法结合，并采用逆向电池设计，是自主电池设计优化的关键（图 5）；②多物理场建模还可从电池化学成分、制造成本和可持续性/环境影响方面加速优化现有制造工艺，并开发未来新工艺。

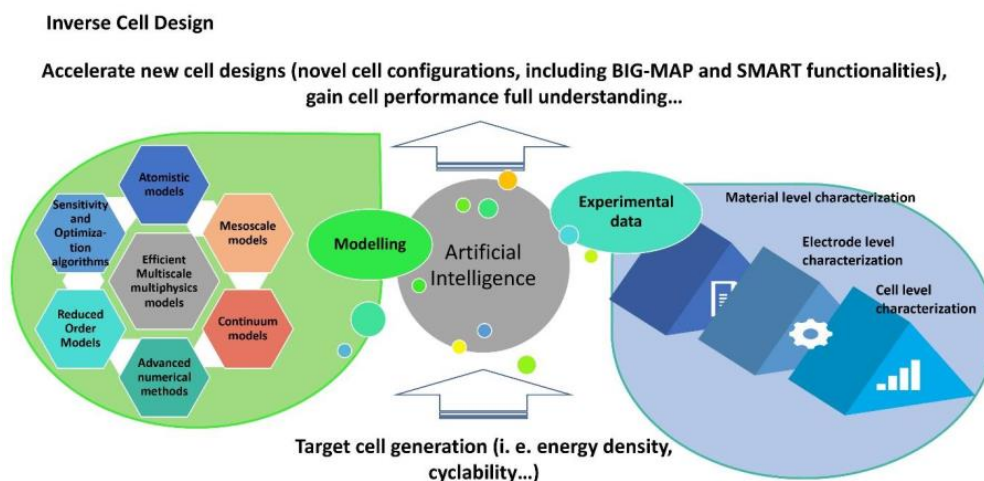


图 5 人工智能与电池逆向设计

2 关键挑战

(1) 电池（主要是锂离子电池）制造方法面临的挑战

- 需改变当前依靠反复试错以调整电池制造工艺并缩短开发时间的通用做法。当前的电池工艺链非常复杂，并且投资成本较高。出于成本考虑，具有大规模制造能力的超级工厂仅局限于生产几种电池。尽管通过试错法已对当前生产线进行了极大优化，但仍存在大量不符合规格的材料和电池。因此，特殊用途电池或新型电池的小批量生产极为困难且成本过高，还限制了新型材料和化学试剂在市场的應用。

- 难以适应/调整当前制造工艺以适应下一代电池的创新。如金属箔负极（金属锂）、固体电解质（聚合物电解质、混合电解质或无机物电解质）。

- 对制造产生巨大影响的设计问题。如电池单元制备过程中封装材料过多、双极板和其他结构电极布线和连接问题等。

- 开发可实现组件回收/再利用的电池设计方案和工艺，即从性能良好的报废电池中回收电极并进行再利用。

- 开发预测加工参数对最终产品性能影响的工具，或者在给定原材料特性的情况下预测最佳加工参数。

- 降低总体工艺成本。通过减少溶剂和能源消耗，减少废料，并加快生产速度，尤其是在成型步骤中。

(2) 高度创新的电池研发方案带来了与未来电池材料和技术有关的挑战

- 使用电池界面基因组-材料加速平台生产具有特定制造要求的创新材料/界面需要灵活的制造过程设计策略。

- 快速原型制备方法，可在电池界面基因组-材料加速平台中实施设计规则。

- 引入自修复材料/传感器，并开发外部物理连接方法，用于自修复激活和双向通信。

- 在不影响微观结构/功能的情况下，在电极和电池加工过程中引入 3D 或其他中尺度复合材料并进行优化，以保持其纹理/功能特性要求。

- 开发工具以预测制造参数对电池组件功能特性的影响。

- 有助于直接回收的加工生产线，以保留电池的结构单元（电极、传感器等）。

3 研发需求

未来电池制造应避免使用当前的反复试错方法，并且电池和制造过程必须“智能”，开发电池数字化模型。因此需进行如下工作：

(1) 引入新功能。例如：自修复材料/界面，传感器或其他执行器，电池生态设计和替代电池设计。

(2)开发灵活的制造流程和高精度建模工具,以优化工艺、条件和机器参数。开发用于处理电极浆料和电池性能的实时模型(即用于电池制造的数字化模型)。

(3)在电池制造过程中开发和验证多重物理量和多尺度模型,能够更加准确了解制造过程的每个步骤。

4 研发目标

前瞻性愿景: 开发基于物理建模和 AI 技术的电池数字化模型,将电池设计和制造设计集成在一起,结合电池界面基因组-材料加速平台,并将这一技术完全发展成熟。

电池制造领域的短、中、长期具体研发目标如表 5 所示。

表 5 电池制造领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	重点开发电池设计方法,改进仿真工具(如多物理场模型),通过深度学习和机器学习方法减轻电池单元设计的计算量并应用当前的 AI 技术
中期	开发电池界面基因组、材料加速平台、传感技术、自修复、回收和其他创新领域,并将其整合到流程中;在电池级设计取得进展之后,将启动并实施基于 AI 制造方法,即建模->AI->制造(包括新技术的制造以及制造过程中的数字化模型);规模可扩大的电池,如液流电池
长期	通过在整体原型开发中集成电池单元设计,可以成熟地使用整体由 AI 驱动的方法,实现基于电池界面基因组-材料加速平台的完全自主系统。利用这种方法开发可商业化的最新电池技术

交叉领域二：电池回收

1 发展现状

目前,火法冶金是应用最广泛的电池回收方法。在根据化学方法进行可能的拆卸和分类后,将电池或电池部件直接送入回收过程,或通过物理手段(例如切碎或研磨)进一步破碎。在回收方案方面,取决于所选的电池化学和工艺,可能需要几

个涉及物理、机械和/或化学转化的步骤。目前电池工业回收的主要流程和方案如图 6 所示。

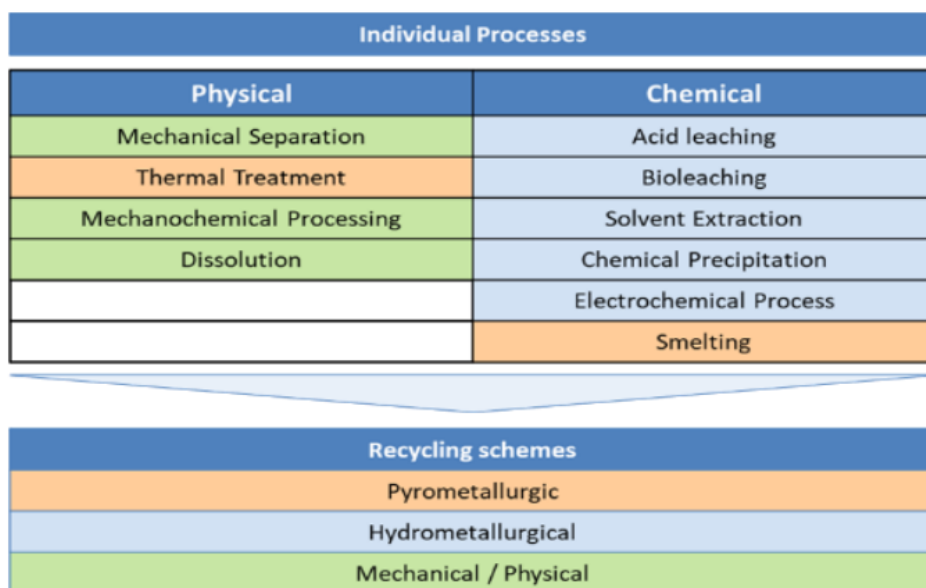


图 6 电池回收流程和方案

2 关键挑战

(1) 当前挑战

- **报废电池回收达到欧盟电池指令的电池回收目标。**动力电池回收问题较小，便携式电池在收集和运输方面存在困难。

- **缺乏有效的电池组件分离方法。**电池产品较为复杂，目前缺乏优先的电池组件分离方法，使得电池回收成本较高，回收产品的质量可能成为回收的障碍。

- **电池分类标签。**需要对电池类型进行分类并增加标签，以实现高效的回收流程。

- **动力电池拆卸困难。**汽车动力电池系统的设计具有很高安全性，其拆卸难度对回收过程提出了巨大挑战。

- **锂电池活性材料价值不断下降。**与回收成本相比，锂电池活性材料的价值有限且在不断下降，使得从废旧锂电池电极中

直接分离回收高价值成分，并重新只作为电池材料的“直接回收工艺”的经济效益不断降低。

- **报废锂电池正极材料的“翻新”质量不合格。** 电池电极活性物质会随着电池运行而降解，锂电池正极材料的晶体结构变化是不可逆的，限制了对其进行回收“翻新”的可行性。

- **方法的挑战。** 新兴电池的经济、生态和社会影响必须以预期的方式进行分析 and 评估。所有材料、组件和电池的开发人员、回收商和其他利益相关方都需要跨学科合作，以实现新电池系统的共同目标。

(2) 短、中期挑战

- **进入市场的电池种类增加使回收变得困难。** 多种锂离子电池将使回收过程变得更加困难，分拣质量将成为克服和获得组件特定回收过程的主要挑战。电池和电池单元的识别标准将极为重要。

- **新型电池的回收需要相应的回收流程。** 固态电池、锂硫电池、氧化还原液流电池和金属空气电池将有可能进入未来市场，因此需开发新的回收流程用于上述电池及其电池管理系统，并将提出新的挑战，如锂金属的存在会影响回收流程的安全性。可能需要重新设计流程，如使用惰性气体气氛，具体取决于电池类型。

- **电池分拣更加困难。** 市场上动力电池的大量增多将使得部分分拣后的电池模块或电池单元可进行二次使用，进入最终回收环节的电池将是老化情况更为严重的电池。这将使电池的质量分拣更具挑战性，需开发先进的 AI 技术，与传统的加标签和

人工观察等传统方式相结合，才能达到期望的水平。

- **需处理增多的电池附加信息。**更加复杂的电池管理系统和传感器能提供更多的电池信息，必须开发在回收阶段处理这些信息的过程。另外，此类高级数据将为电池的二次使用和电池组中的单个（老化）电池单元提供有价值的信息。

- **大量的待回收电池系统/模块将需要大量的物流工作，并将显著增加运输、安全风险和碳足迹。**需要建立新型的分散式收集和回收流程/机构，还需考虑社会接受度问题。

- **必须建立立法框架以促进和维护可持续回收设计。**

(3) 长期挑战

- **需对回收工厂进行改造以处理大量的废电池，并且需要建立从分拣、拆卸到回收的高度自动化过程。**将需要大量投资以建设新一代电池回收工厂，需要创新以验证高度灵活且经济可行的回收过程所有步骤，从而能够处理可能具有不同化学性质的多种电池。

- **回收技术将需要回收未来的智能电池组件。**例如，传感器、“自修复”组件或任何类型的通信组件。

3 研发需求

“电池 2030+”将开发新的电池回收模式（如图 7），主要包含以下环节：数据收集和分析；自动将电池组拆解至电池单元；分析重复使用和再利用的可能性；将电池自动拆解至组件；选择性粉末回收并将其“翻新”为电池活性材料。因此，将从如下方面开展研究以实现这一突破性的电池回收工艺：

- **数据收集和分析（通过标签、电池管理系统、传感器等）；**

- 现代低碳足迹物流概念，包括分散式处理；
- 自动将电池组拆解到单元级别；
- 尽可能探索重复使用和再利用；
- 自动拆解电池至最大的单个组件；
- 开发选择性粉末回收技术，并将其“翻新”为电池活性物质；如果不可能，则通过调整组成来合成活性物质前驱体。

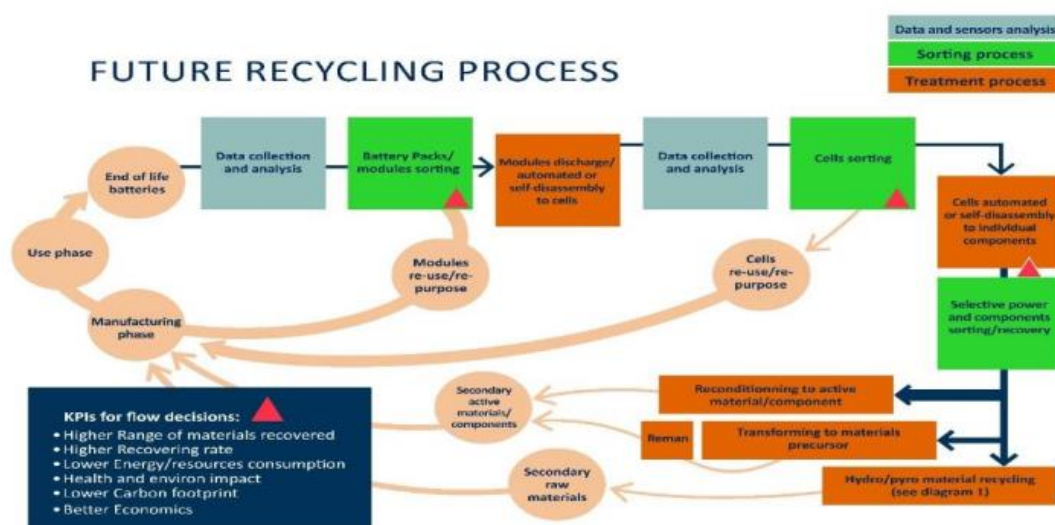


图 7 未来的电池回收过程：直接回收与再利用完全整合

要进行的特定研发活动包括：① 电池设计中尽可能延长寿命，并考虑重新校准、翻新以及二次使用和多次使用的适用性；② 集成传感器和自修复功能，用于识别损坏/老化的组件并为它们的重复使用做准备；③ 开发可追溯性概念，特别是整个电池生命周期中关键原材料的可追溯性，自动电池分拣和评估，以及开发对有价值关键材料的有效、低成本和可持续的一步回收处理；④ 选择性回收过程中将使用 AI 技术和分拣设备，同时还将寻求适用于所有电池的通用过程，确保即使是金属-空气电池等新型电池，也能最大程度地回收电池组件。

4 研发目标

前瞻性愿景： 开发新的电池回收流程，在长期内实现电池的“直接回收”。电池回收的十年研发路线如图 8 所示。如果由于结构或纯度方面的限制，材料/组件不适合重新用于电池，新回收工艺最后阶段的后备替代方案可能是改变其组分，转换为前驱体用于未来电池和新一代材料。

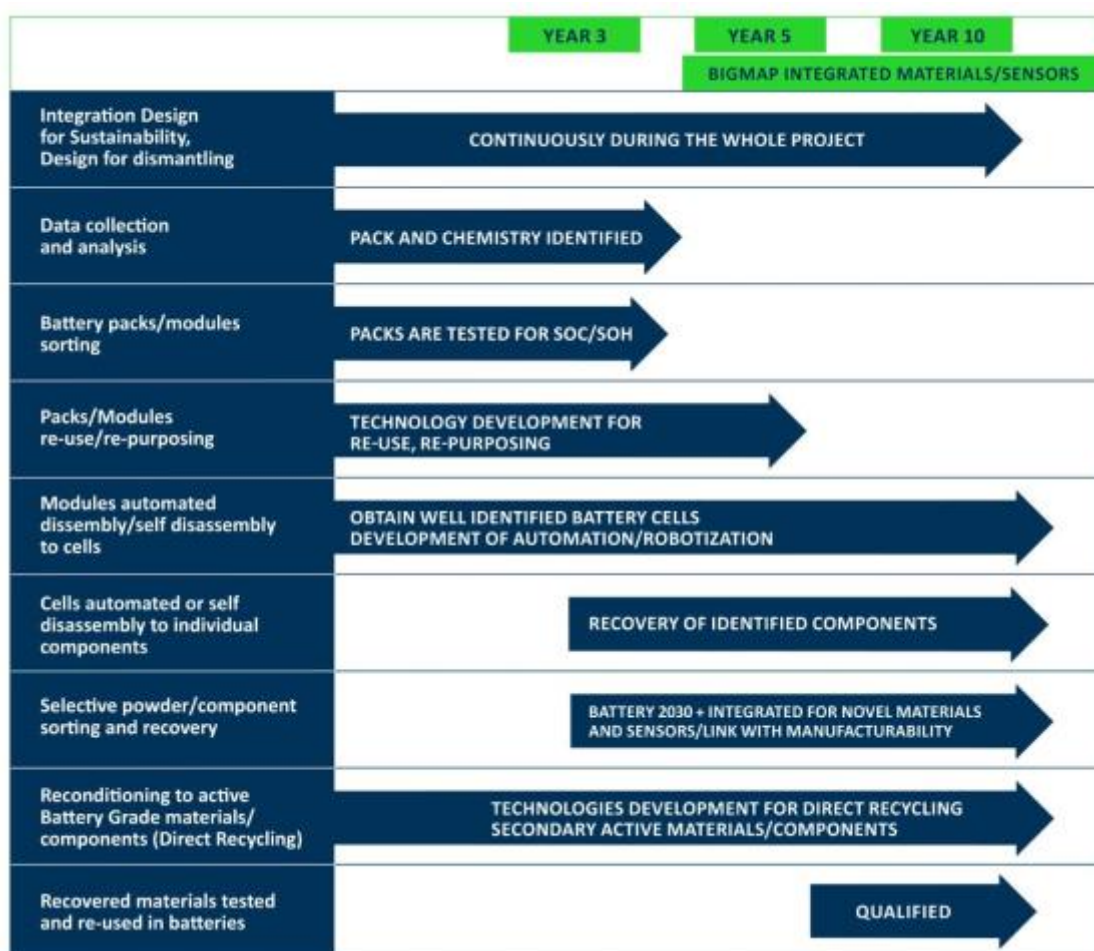


图 8 电池回收的十年研发路线图

电池回收领域的短、中、长期具体研发目标如表 6 所示。

表 6 电池回收领域的分阶段研发目标

阶段	研发目标
短期	开发用于数据收集和分析的系统，开发用于电池组/模块分拣和重复利用/再利用的技术，并开发自动拆解电池的方法。将开发用于电池快速表征的新测试技术
中期	开发自动将电池拆解成单个组件的技术，粉末和组件的分选和回收技术，以及将其“翻新”为先进的新型电池活性材料的技术。在电池中测试回收的材料。将开发二次应用中材料再利用的预测和建模工具。显著提高关键原材料的回收率并明显改善对能源和资源的消耗
长期	开发和验证完整的直接回收系统，该系统将在经济上可行、安全且环境友好，并且比目前的流程具有更低的碳足迹



《洁净能源重大信息专报》

编辑出版：中国科学院武汉文献情报中心

联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

联系人：陈伟 郭楷模 岳芳

联系电话：(027) 87199180

电子邮件：energy@whlib.ac.cn