

基于基元结构组装的下一代锂离子电池厚电极设计

刘悦^{1,2}, 郭晋芝^{1,2}, 曹峻鸣^{1,2}, 吴兴隆^{1,2}

(1. 东北师范大学物理学院, 长春 130024; 2. 集成光电子全国重点实验室, 紫外光发射材料与技术教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要: 电动汽车的普及和便携电子设备使用量增加, 锂离子电池亟须同时提升能量密度与功率密度。厚电极设计能有效提高活性物质占比, 是实现高能量密度的重要路径。但厚电极中电子和离子传输路径的延长会导致严重的极化现象, 使得高功率输出难以维持。近年来, 纳米基元结构(纳米颗粒、纳米片、纳米线等)的发展为解决这一问题提供了新的方向。在电池组装过程中, 严重的团聚和界面副反应使得基元结构的优势无法发挥, 这也导致在厚电极尺度下的性能远低于理论预期。本文梳理了从基元结构到厚电极的多尺度传输行为, 揭示了纳米效应在电极尺度下的作用规律。围绕着如何通过合理设计基元结构的组装方式, 包括构建连续导电网络、调控多级孔道结构、实现垂直取向排列突破厚电极中的电子和离子传输瓶颈, 阐明基元结构与电极宏观性能之间的构效关系。最后, 从“结构设计”到“系统智造”的未来研究方向进行展望, 强调将基元结构作为可设计单元, 通过三维空间内的组装实现电子、离子和机械应力的协同管理, 是突破下一代高能量与高功率锂离子电池性能极限的关键路径。

关键词: 锂离子电池; 基元结构; 厚电极; 电极设计

中图分类号: O782 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)07-2204-16

网络出版时间: 2026-06-26



锂离子电池作为现代社会最重要的电化学储能技术之一, 深刻影响便携式电子设备、电动工具和交通运输等多个领域^[1-3]。当前全球能源结构向可再生能源加速转型, 电动汽车市场规模迅速扩大, 这对锂离子电池的性能提出了更高的要求^[4], 电池既要具备高能量密度延长续航能力^[5], 又需要拥有高功率密度实现快速充放电^[6]。同时满足这两项需求是当前锂离子电池研究领域面临的主要挑战。提高电极厚度是提升能量密度最直接最有效的策略^[7]。厚电极设计可显著提高活性物质在电池整体中的质量占比^[8], 降低集流体等非活性组分的占比^[9], 进而在电芯层面实现能量密度的提升^[10]。然而厚电极的规模化应用始终受限一个核心矛盾: 随着电极厚度增加, 电子在导电网络中的传输路径延长, 离子在孔道内的扩散距离相应增加, 这会导致电极内部极化现象加剧^[11], 活性物质利用率下降^[12], 在高倍率放电条件下, 电池功率性能会出现急剧衰减。这

种能量密度与功率密度的反向制约关系, 被称为电池研究中的不可能三角。

纳米技术的发展为这一难题提供了解决方案。通过将活性材料构筑为纳米尺度的基元结构(包括纳米颗粒^[13-15]、纳米线^[16-18]和纳米片^[19-21]等), 并制备成设计好的厚电极结构, 可以显著缩短锂离子在电极中的扩散距离, 增加电化学反应活性位点, 缓解电极材料在循环过程中出现的体积膨胀。大量研究表明, 纳米结构电极在实验室尺度的薄电极中展现出优异的倍率性能和循环稳定性。但将这些设计后的纳米基元结构直接应用于厚电极时, 其本征优势却难以有效发挥。纳米材料的高表面能导致其在浆料制备过程中极易发生团聚, 形成可达微米级尺寸的二次颗粒, 无序堆积的纳米片层构筑了复杂的离子传输通道, 纳米尺度的界面在长周期循环中将引发严重的副反应^[22]。因此, 尽管纳米技术被认为能够增强纳米材料内部及附近的局部动力学, 但纳

收稿日期: 2026-03-03。 修订日期: 2026-04-04。

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91963118); 国家重点研发计划“战略性科技创新合作”重点专项(2024YFE0209600)。

第一作者: 刘悦(1997—), 女, 博士研究生。

通信作者: 吴兴隆(1982—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2026-03-03. Revised date: 2026-04-04.

First author: LIU Yue (1997—), female, Doctoral candidate.

E-mail: ly24923@163.com

Correspondent author: WU Xinglong (1982—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: xinglong@nenu.edu.cn

米结构设计对厚电极整体传输性能的影响仍缺乏清晰的解释。因为长期以来研究的焦点都集中在基元结构本身的设计上, 却相对忽视了这些基元结构如何在宏观电极中解决电子离子传输的过程。基元结构是电极的“积木”, 但积木的堆积方式决定着最终结构的稳定性和功能性。在薄电极中, 由于传输路径较短, 基元结构的本征优势能够直接转化为性能提升。而在厚电极中, 长程传输成为主导因素, 基元结构的组装方式, 包括它们在三维空间中的分布、取向、堆积密度以及彼此之间的连接方式, 是决定电极最终性能的关键。

然而基元结构的组装并非厚电极中各设计要素的简单堆砌, 而是通过调控基元在空间排布、几何构型以及界面连接方式, 构建高有序化、低曲折度的离子和电子传输网络, 解决厚电极中因离子扩散路径延长和电子传导受阻导致的动力学迟滞问题。同时, 基于组装形成的互锁、分级或多孔骨架结构能有效缓解充放电过程中的体积效应, 提高电极结构完整性。提高动力学, 优化机械稳定性成为厚电极设计的首要目标。

1) 构建高效传输网络, 提高动力学。传统厚电极的离子传输主要依赖曲折的孔隙通道, 随着电极厚度的增加, 离子传输路径延长, 导致高负载下的容量迅速衰减。基元结构组装将纳米纤维、纳米线或纳米片按特定空间取向排列, 形成的低曲折度结构可以缩短离子传输路径, 实现高效离子/电子传输。

2) 优化机械稳定性, 缓解体积效应。厚电极在长寿命的充放电过程中面临体积膨胀, 导致电极粉化, 与集流体剥离直至失效。基元结构组装利用结构互锁, 稳定电极结构, 释放循环产生的应力, 维持电极结构完整性。

因此, 本文基于锂离子电池研究的迫切任务, 从单一的材料设计转向“纳米材料到电极堆积形式”协同设计^[23], 将电极材料基元结构作为一种设计单元, 通过调控其在厚电极中的组装方式, 构建能够同时实现高效电子传输和快速离子迁移的多尺度传输网络^[24]。不仅要理解基元结构是什么, 更要理解基元结构如何排列。本文将基元结构与厚电极设计有机结合并系统梳理了这一新兴研究方向的最新进展。将从分析基元结构的本征特性及其在厚电极尺度下的传输行为演变、探讨三种基于基元结构组装的厚电极设计策略并揭示基元结构组装与宏观电化学性能之间的关联和对未来的研究方向进行展望 3

个方向讨论, 为下一代高能量和高功率锂离子电池的基元结构组装与厚电极设计提供新的思路和理论依据。

1 锂离子电池的厚电极设计

提升锂离子电池的能量密度, 是满足电动汽车长续航需求和实现电网级储能应用的前提条件。实现这一目标的策略可归纳为材料层面和电极层面。在材料层面, 研究人员致力于开发具有高比容量或高工作电压的新型电极材料。正极材料包括富镍层状氧化物^[25]、高电压尖晶石^[26]和富锂锰基固溶体等^[27]。负极材料包括硅基材料^[28]、锡基材料^[29]和金属锂等高容量体系, 这些材料层面的创新可以从源头上提升电极的储锂能力^[30]。然而这种策略通常会伴随着一系列连锁反应, 由于新材料的合成工艺、浆料配方、电解液兼容性和电压窗口等与现有体系存在差异, 这意味着从材料制备到电芯组装的全流程生产线都需要重新调整, 显著提高了技术成本。相比之下, 电极层面的厚电极设计更具有普适性。在不改变电池固有化学体系的前提下, 通过增加电极的厚度(即提升单位面积上的活性物质的负载量), 来提高活性材料在整个电芯中的质量占比^[31-32], 有效降低集流体、隔膜等非活性组分的占比。

如图 1 所示, 与薄电极堆叠而成的电芯相比, 厚电极设计的电芯能够在相同的体积内封装更多的活性材料, 显著提升电芯的整体能量密度, 同时由于减少了非活性组件的使用, 理论上也可以降低制造成本。但厚电极在电芯中的应用也存在挑战。首先, 随着电极厚度的增加, 内阻和浓差极化增加, 导致欧姆加热升高^[33], 这是引发内部热失控的主要问题。其次, 电池内的大量热应力可能导致厚电极中的局部结构破坏^[34], 影响电极的长循环稳定性和机械完整性^[35]。最后, 较厚的电极会导致锂离子传输动力学缓慢^[36], 使功率密度大幅下降。因此, 开发用于锂离子电池的厚电极成为一个复杂的问题。基于此, 近年来对电极内部多尺度传输行为的深入研究, 对基于基元结构理性组装的创新电极架构的探索, 如何在厚电极尺度下打通电子和离子快速传输通路, 维持电极结构完整性, 成为突破当前技术瓶颈的关键^[37]。

2 厚电极基元结构的多尺度结构设计

基元结构是构成电极材料的基本结构单元。在厚电极设计的框架下, 基元结构应当具备明确的几

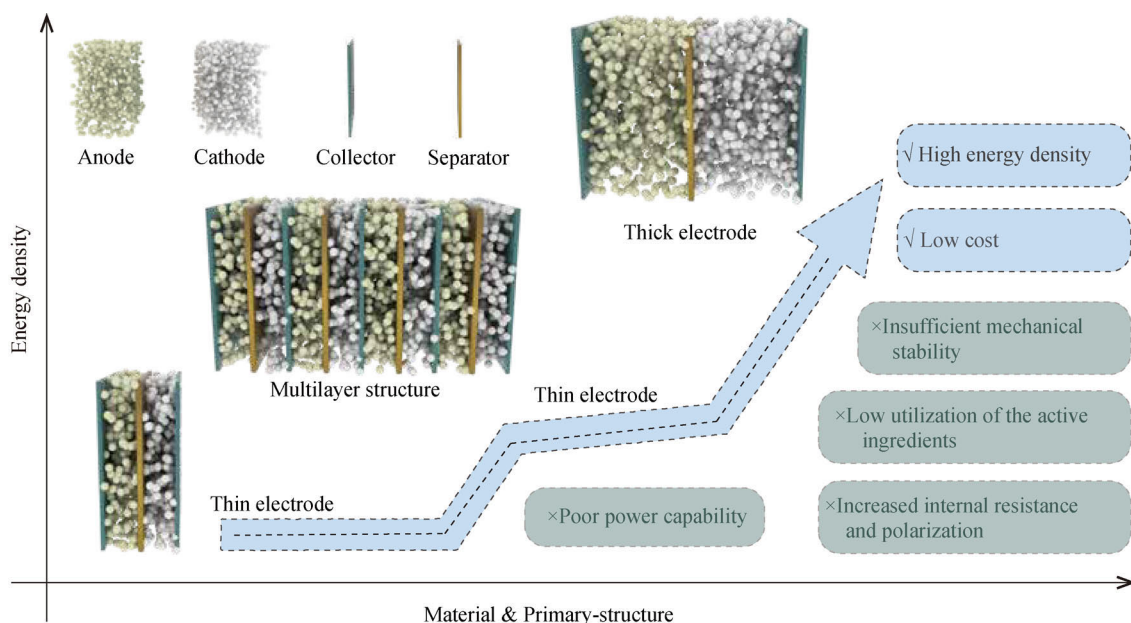


图1 锂离子电池厚电极的优势与挑战示意图

Fig. 1 Diagram illustrating the advantages and challenges of thick electrodes for lithium-ion batteries

何形态和特定的组装方式，作为基本的结构单元跨尺度构建电极整体。

厚度与孔隙率的设计属于纳米尺度的调控，其中纳米颗粒的堆叠方式是决定厚度和孔隙率的主要因素，设计独特孔隙率的电极结构是行之有效的方案，如梯度孔隙率设计可以有效提高电解液的浸润效果。导向设计与集流体设计、模板法设计和激光法设计是宏观尺度设计的代表，通过对集流体定向分布设计和结构框架设计，构建有序的孔道结构，可以大幅度降低曲折度，提高离子传输速率。对于3D打印和模板法，不仅仅可以在宏观尺度完成，在介观尺度和纳米尺度都可以实现，同样可以决定电极整体的曲折度和离子传输效率。高性能厚电极的实现依赖于不同尺度基元结构的协同组装，单一的纳米尺度优化难以实现低曲折度，单一的宏观/介观孔道设计又难以实现对能量密度的要求。纳米尺度反应位点、介观传输通道和宏观低曲折度的协同作用才能有效构建高性能厚电极结构。

在电极厚度增加的情况下，电极和电池的性能很大程度上取决于对微观结构参数的调控。在薄电极中，活性材料的性质是主导电化学行为的关键，厚电极的性能更多受限于电子和离子在三维多孔网络中的长程传输特性^[38–39]。因此，通过优化离子扩散路径和减轻机械不稳定性，可以显著增强电池的循环稳定性和安全性^[40]。研究人员重点关注电极厚度^[41–43]、孔结构^[44–46]和曲折度^[47–49]等关键参数，同

时开发了相应的设计策略和制备工艺。

2.1 电极的厚度与孔隙率

电极厚度是最直观的设计参数，但电极厚度对电池性能的影响并非简单的线性关系。Xu等^[50]通过构建镍钴锰酸锂(NMC)半电池的计算模型，结合多物理场仿真模拟与实验，系统研究了电极厚度对电池利用率的影响规律。如图2a和图2b所示，当电极厚度在30~120 μm范围内时，对低倍率放电(如0.1 C)条件下的电池利用率影响甚微。然而随着电极厚度和放电倍率的增加(最高至5 C)，电池的倍率性能显著下降。这一现象归因于厚电极中电解液的运输限制和欧姆极化。当放电倍率高于3 C时，厚度超过75 μm的电极几乎难以被有效利用。这一工作表明，充分表征非均质多孔电极有助于更好地理解锂离子电池的行为。除此以外，颗粒尺寸和孔隙率对电池性能的影响也是至关重要的。传统的均质电极设计往往难以兼顾高能量密度与高倍率性能。

Yu等^[51]提出了一种创新的石墨负极活性材料结构设计，其优势在于颗粒尺寸和电极孔隙率的双梯度分布。如图2c和图2d所示，结构展示了从电极顶部到底部孔隙率稳定下降、颗粒尺寸逐渐增大的趋势。这种双梯度设计，电极顶部(靠近隔膜侧)具有较高的孔隙率和较小的颗粒尺寸，有利于电解液的浸润和锂离子的快速进入，而电极底部(靠近集流体侧)具有较低的孔隙率和较大的颗粒尺寸，有利于提高活性物质的堆积密度和电子传导连续性。这

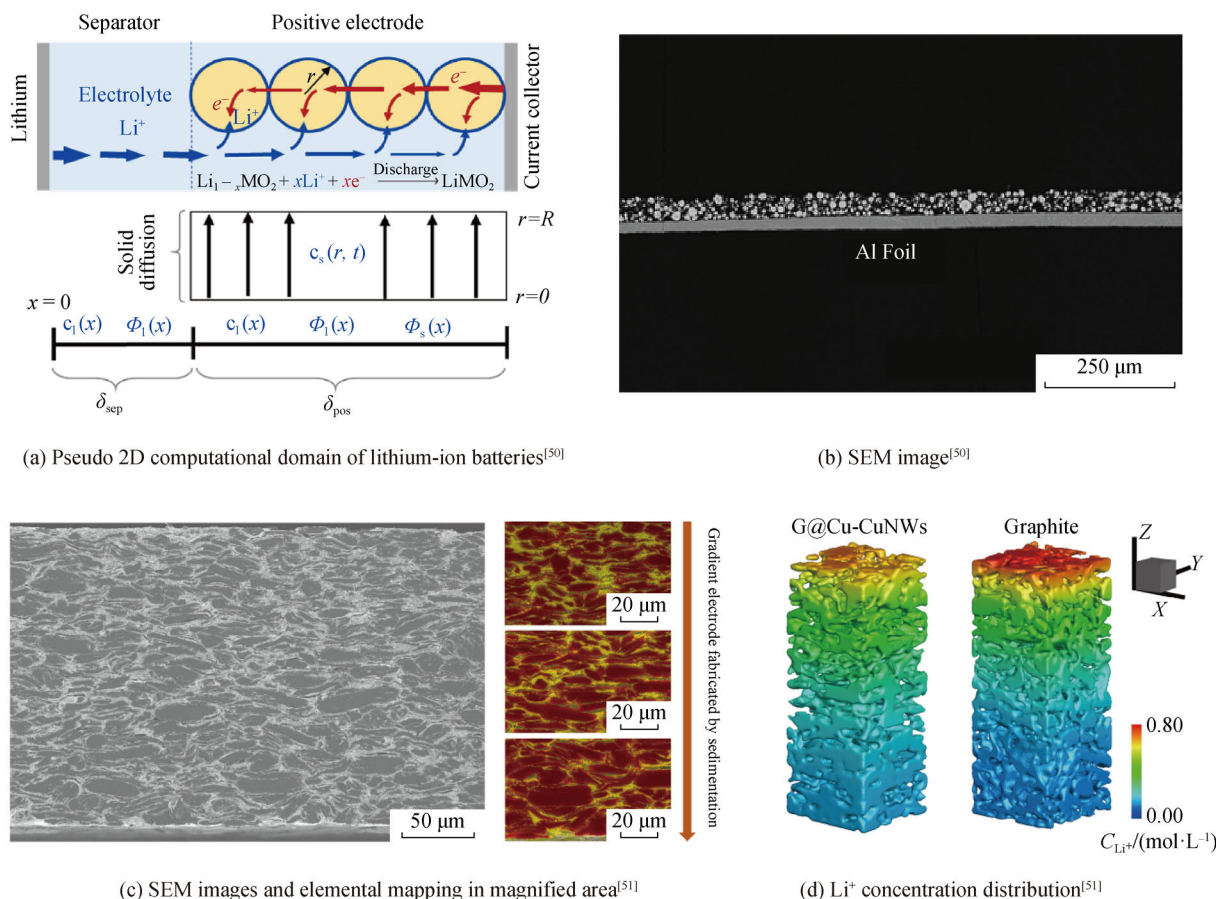


图 2 电极厚度与浓度分布
Fig. 2 Electrode thickness and concentration distribution

种独特的孔隙梯度可以在高电流密度下保持更大比例的活性材料参与反应, 显著增强电池的快速充电能力。结果表明, 采用这种双梯度结构设计的全电池在 6 C 倍率下, 只需要 5.6 min 即可实现 60% 的电量恢复水平。

2.2 导向设计与集流体设计

在厚电极的多孔结构中, 活性材料颗粒之间的堆积方式决定了锂离子传输路径的复杂程度。由于颗粒的不规则形貌和随机堆积, 电极内部形成了多种类型的孔隙结构。除贯穿整个电极的开孔和相互连通的交联孔外, 还存在大量一端封闭的盲孔和半通孔。这些复杂的孔道结构使得锂离子难以向电极内部扩散, 直接影响电极的倍率性能和活性物质利用率。曲折度(τ)是衡量电极传输路径曲率的关键指标。曲折度与锂离子通过电极孔隙传输的有效速率成反比, 即曲折度越高, 表明电极结构内部的孔道越复杂, 锂离子从电极表面向内部扩散的路径越长, 离子传输效率越低。

在薄电极中, 由于传输距离较短, 高曲折度带

来的影响相对有限, 但在厚电极中, 锂离子需要穿越数百微米的厚度才能到达集流体附近的活性位点, 此时高曲折度将导致电极上表面(靠近隔膜侧)与下表面(靠近集流体侧)之间锂离子浓度有巨大差异。这种浓度梯度会引发严重的浓差极化, 因此, 电极深度方向的反应均匀性急剧下降。靠近隔膜侧的活性材料被过度利用, 而靠近集流体侧的活性材料则因锂离子供应不足而难以参与反应。更为严重的是, 这种非均匀的反应分布会伴随着锂枝晶的析出、SEI 膜的反复破裂与再生, 甚至引发内部热失控, 带来安全隐患。因此, 设计具有低曲折度结构的电极已成为高性能厚电极研究的重要方向。如图 3a 所示, He 等^[52]通过构建垂直于集流体的定向孔道分布, 大幅降低了离子传输路径的曲折度。这种垂直孔道结构不仅缩短了锂离子的宏观传输距离, 还显著增加了电解液对电极内部的润湿程度, 有利于锂离子在活性材料之间的快速传输。实验结果表明, 采用这种低曲折度设计的电极, 活性材料的利用率显著提升, 电池的倍率性能和循环稳定性得到改善。

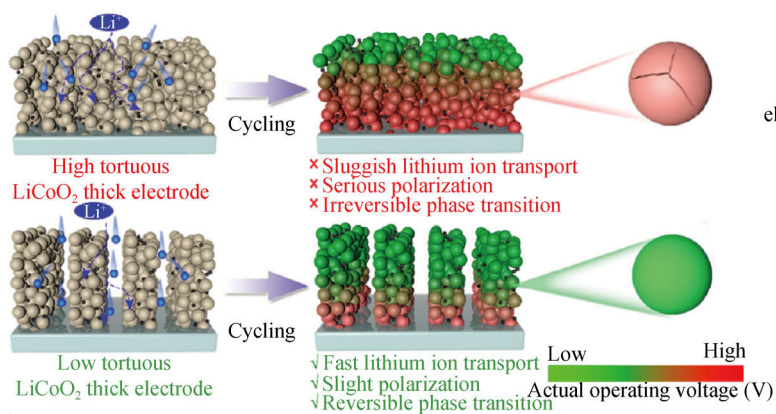
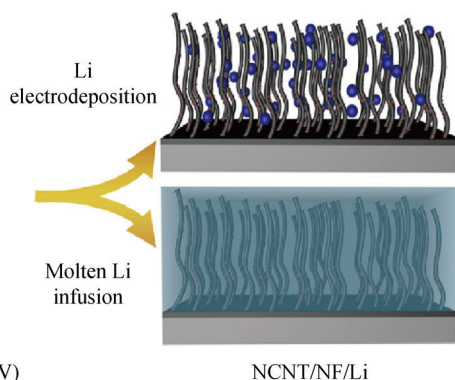
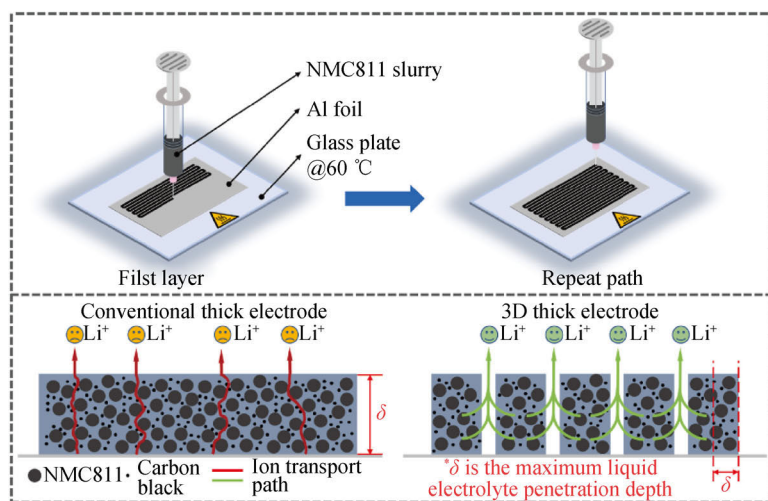
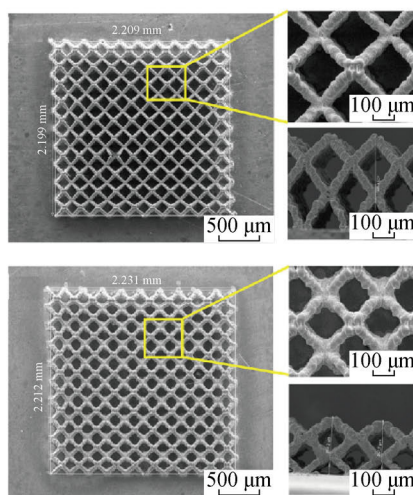
(a) Schematic diagram of Li^+ transport^[52](b) Schematic diagram of a composite metal anode^[53](c) Schematic of 3D printing and electrochemical kinetics^[54](d) SEM image of a 3D printed electrode^[56]

图3 电极导向设计

Fig. 3 Electrode orientation design

除了直接调控电极的孔道结构外,集流体的设计也能在一定程度上降低离子传输的有效路径长度。与传统平面集流体相比,三维结构集流体能够构建贯穿电极厚度的导电网络,为锂离子提供更直接的传输通道。Zhang 等^[53]通过简单的固相热解方法制备了分级结构的氮掺杂碳纳米管/泡沫镍(NCNT/NF)骨架,如图 3b 所示,三维多孔结构提供了大量的锂成核位点,有效降低了局部电流密度,而垂直生长的碳纳米管阵列构建了从集流体表面向电极内部延伸的导电网络,为锂离子提供了低曲折度的传输通道,最重要的是氮掺杂引入的缺陷位点增强了亲锂性,有助于实现均匀的锂沉积。电化学测试结果表明,NCNT/NF 在锂沉积/剥离过程中表现出远低于传统铜箔和纯泡沫镍的过电位,库仑效率高达 98.2%。这一研究充分证明,通过集流体的三维结构化设计,可以从电极底部(集流体侧)构建

垂直传输通道,与电极本体的低曲折度设计形成协同效应,共同促进锂离子快速、均匀地传输。

从更宏观的视角来看,曲折度的精准调控代表了对电极内部离子传输通道的“疏通”与“取直”。无论是通过构建垂直孔道直接降低传输路径的曲折度,还是通过三维集流体提供更直接的电子/离子接入点,其本质都是对电极内部传输网络进行优化。这种优化思路将在后续章节的 3D 电极设计中得到进一步深化和拓展^[55]。

2.3 3D 打印厚电极

浆料浇注工艺对电极厚度存在限制。随着涂层厚度增加,干燥过程中的溶剂挥发速率在涂层表面和内部产生显著差异,涂层内部产生巨大的毛细管应力和热应力。当这些应力超过涂层的内聚强度或涂层与集流体的附着强度时,电极会发生开裂、翘曲或是从集流体上剥离。这一问题在高面载量厚电

极的制备中更加明显, 成为提升活性材料负载容量的限制。面对传统工艺的局限性, 研究人员正在开发适合于生产具有复杂结构电极的制造工艺。其中, 3D 打印技术因其在空间精度和结构可编程性方面的突出优势, 成为厚电极制备领域的研究热点。

3D 打印技术可以按需设计, 精确控制电极材料在三维空间中的沉积位置和沉积量, 实现传统工艺无法制造的复杂结构。Tao 等^[54]使用 3D 打印机成功制备了具有三维结构化设计的 NMC 电极。如图 3c 所示, 这种“A-B-A”图案设计允许研究人员精确控制电极中活性材料条带与空隙通道的排列方式、宽度比例和间距。Saleh 等^[56]将喷墨打印技术成功应用于厚电极的制备, 如图 3d 所示, 通过喷墨打印方法, 研究人员可以创建由烧结纳米颗粒制成的高度可控的微晶格结构。这一结构具备独特的分级孔隙率——从数百微米的宏观孔道, 到几微米甚至更小的介观孔道, 均可在同一电极中实现。

这种分级孔道结构的电化学意义在于其多尺度协同效应。数百微米的宏观孔道可以作为锂离子的快速传输主干道, 确保电解液能够迅速浸润整个电极厚度方向; 几微米的介观孔道分布在活性材料颗粒周围, 为锂离子从主孔道进入活性材料表面提供局部通道; 同时纳米尺度的孔隙进一步增加了电极的比表面积, 缩短锂离子在固相中的扩散距离。这种从宏观到纳米的多级孔道设计, 为同时实现高能量密度和高功率密度提供了结构基础。

2.4 模板法设计电极

前文提到的 3D 打印技术虽然能够实现电极结构的精确控制, 但其对专用设备的依赖、相对较低的制备效率以及与传统涂布工艺的兼容性问题, 限制了其在规模化生产中的广泛应用。相比之下, 模板法成为一种更为灵活且简便的孔道构筑策略。模板法通过物理或化学方法将牺牲材料作为模板预先组装到电极基体中, 然后在后续处理步骤中选择性地将模板去除, 在电极内部留下与模板形貌相对应的定向孔道结构。根据模板类型的不同, 常见的模板法包括冰模板^[57]、盐模板^[58]、木模板等^[59-60]。

在各类模板法中, 冰模板法因其独特的冰晶生长机制而备受关注。Ju 等^[61]采用冰模板策略成功制备了具有垂直对齐通道的厚电极, 在图 4a 所示的制备流程中。

该方法的起点是制备均匀的电极浆料, 其中包含活性材料、导电剂和黏结剂。其中最重要的是单

向冷冻过程, 将浆料置于温度梯度场中, 使其从底部向上定向冷冻。在这一过程中, 水作为溶剂形成冰晶, 而冰晶的生长行为具有显著的各向异性。由于冰的六方晶格结构, 沿着 c 轴的生长速率远快于沿着 a 轴的生长速率, 导致冰晶优先沿着温度梯度方向(即垂直于冷源的方向)平行生长, 形成柱状冰晶阵列。冰晶的自发各向异性生长产生了垂直取向的模板, 研究者无须借助外部磁场或电场即可实现孔道的定向排列。这种垂直孔道结构为锂离子提供了从电极表面到集流体的快速传输通道, 大幅降低了电极的曲折度, 有效缓解了厚电极的浓差极化问题。在 Ju 等工作的基础上, Zhang 等^[62]进一步改进了冰模板法, 实现了对孔道结构的更精细调控。如图 4b 所示, 该研究通过引入精确控制的温度梯度, 对悬浮液进行过冷处理, 使冰晶严格沿着预设的温度梯度方向生长。通过调节温度梯度的方向和大小, 研究者可以精确控制冰晶的生长速率和取向, 进而实现对孔道直径、间距和排列规整度的调控。经过冷冻干燥后, 电极中形成了排列规整、贯穿整个厚度方向的垂直多孔通道。更重要的是, 这种改进的冰模板法实现了电极曲折度的可调性。研究者可以根据目标应用需求, 通过调节冷冻参数来获得不同孔隙率和孔道间距的电极结构。图 4c 展示了采用冰模板法制备的厚电极的离子传输示意图。与传统浆料浇铸电极相比, 具有垂直取向孔道的冰模板电极展现出更显著优势^[62]。

盐模板和木模板作为另外两种重要的模板策略, 具有独特的模板形成机制和结构调控能力, 为厚电极的多孔结构设计提供了多种选择。盐模板法是利用可溶性盐晶体作为牺牲模板, 通过与电极材料混合、成型后再用水溶解去除盐晶体, 从而在电极内部留下与原始盐晶体形貌相对应的孔隙结构。这一方法的优势是盐晶体尺寸可调、形貌可控, 并且去除过程温和环保, 不会对电极材料造成损伤。

Deng 等^[63]采用 NaCl 模板策略成功制备了具有多孔结构的钛酸锂(LTO)电极, 其制备流程和结构特征如图 5a 所示。研究者将 LTO 前驱体与 NaCl 晶体均匀混合, 经过高温煅烧使 LTO 结晶成型, 随后水洗去除 NaCl 模板, 最终获得具有三维连通多孔结构的 LTO 电极。Deng 等进一步利用盐模板法的可调控性, 设计并制备了具有梯度孔隙率分布的多孔 LTO 电极, 如图 5b 所示, 电极不同深度区域赋予不同的孔隙特征, 以实现功能分区。具体而言, 靠近隔膜侧的电极区域具有较高的孔隙率, 有利于锂

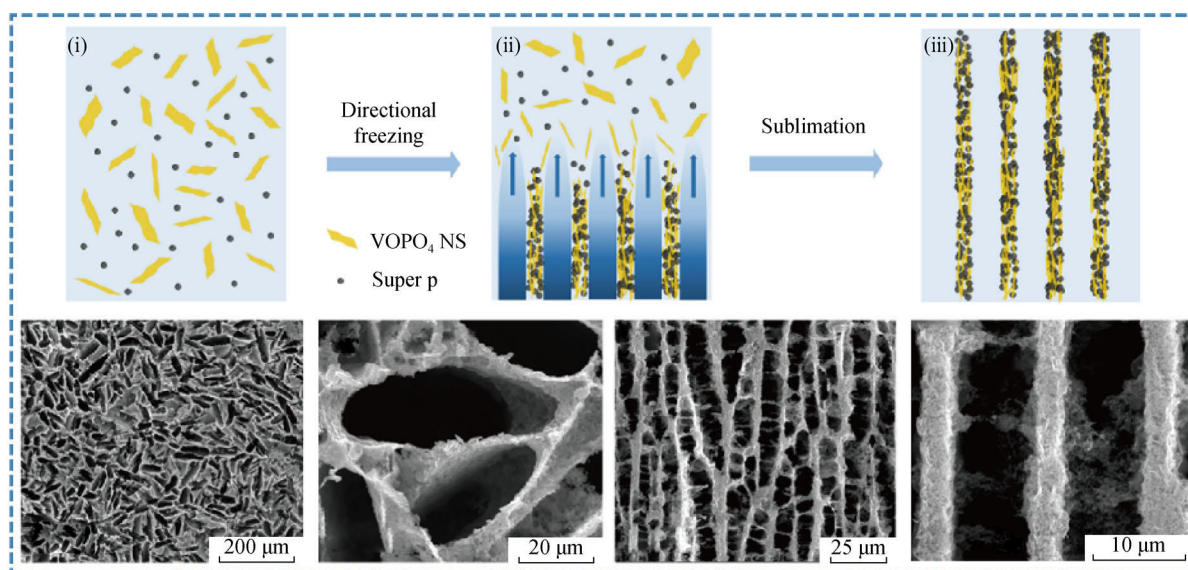
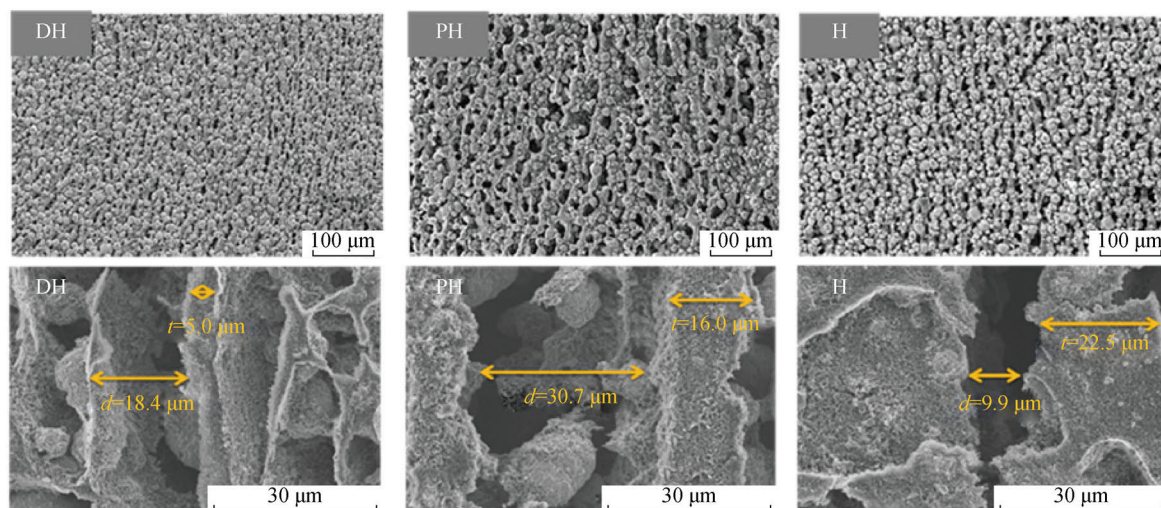
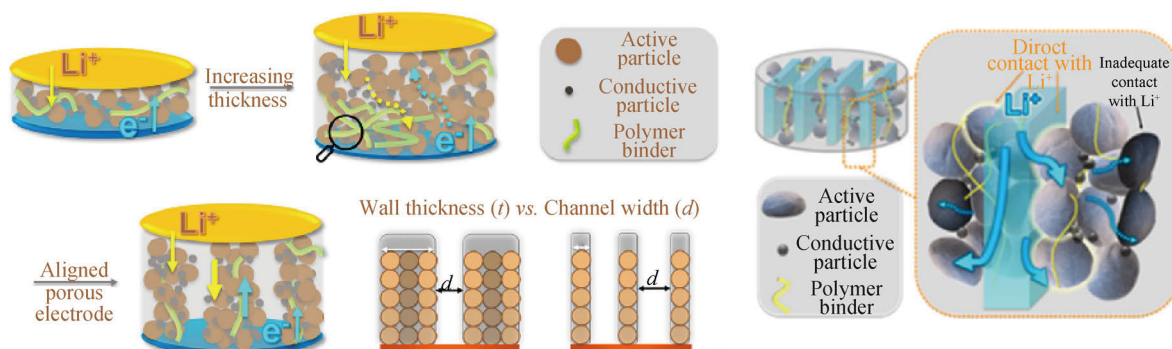
(a) Schematic diagram of the ice templating method and SEM images^[61](b) SEM image of a porous electrode structure^[62](c) Schematic diagram of ion transports^[62]

图4 冰模板法导向设计

Fig. 4 Design of ice template guides

离子的快速进入和电解液的充分浸润，而靠近集流体侧的区域孔隙率相对较低，以保证较高的活性物质堆积密度和电子传导连续性。电化学测试结果表

明，这种梯度孔隙率设计的多孔 LTO 电极在倍率性能和循环稳定性方面均优于均质多孔电极，展现出梯度结构设计优势。天然木材具有独特的各向异

性多孔结构, 沿着树干生长方向分布着大量平行排列的微通道用于输送水分和养分。这种天然的垂直

取向孔道结构与厚电极对低曲折度离子传输通道的需求相吻合。

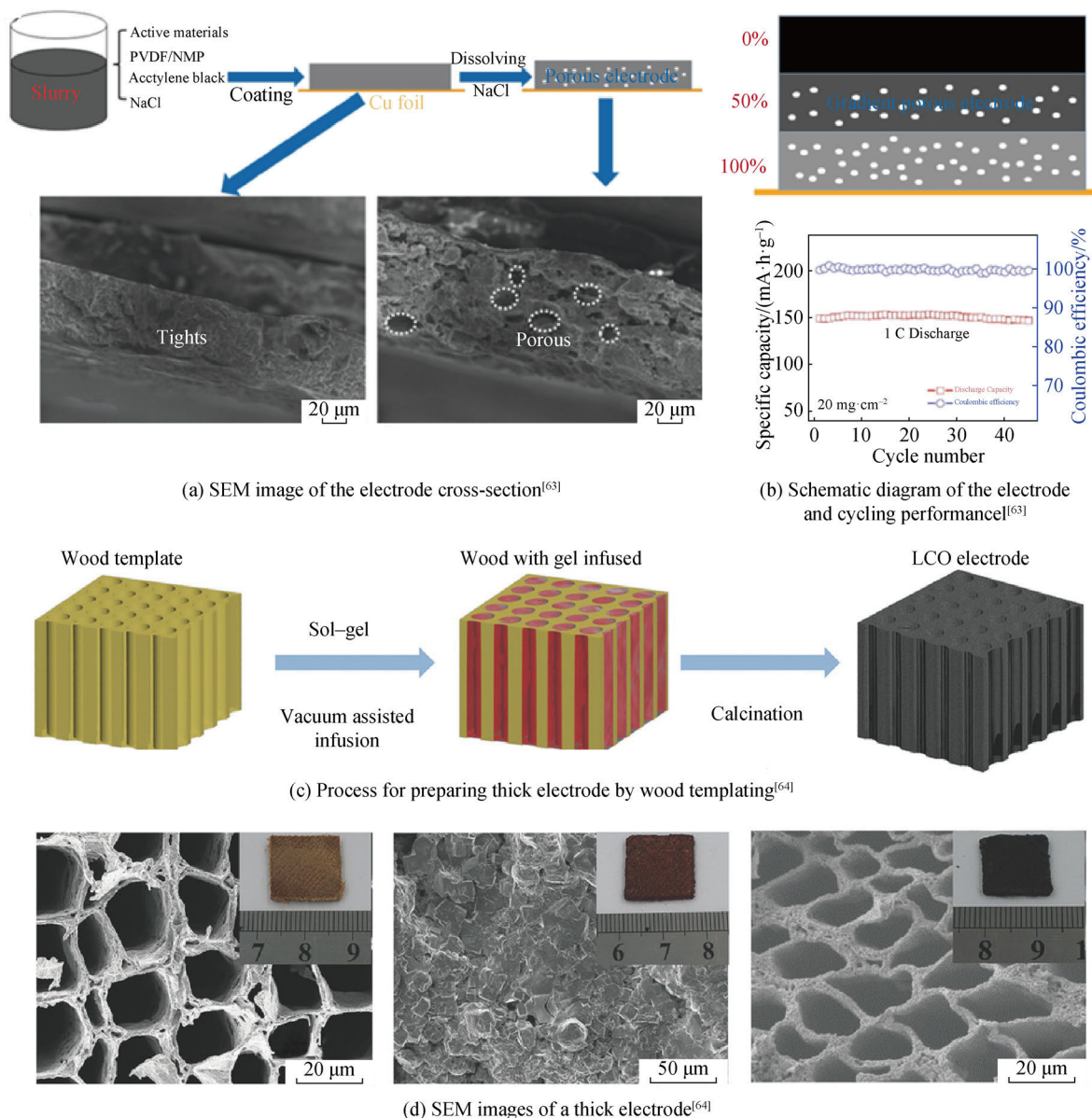


图 5 盐模板与木模板导向设计
Fig. 5 Design of salt template and wood template guides

Lu 等^[64]基于松木模板成功制备了超厚钴酸锂正极, 其制备流程如图 5c 和图 5d 所示。这一方法的起点是选择结构规整的松木作为模板材料。首先, 将木块切割成 1.5 mm 厚的方形薄片, 这一厚度超过传统涂布电极的极限, 随后, 研究者采用氨水溶液处理木材薄片的微通道, 这一步骤的目的是选择性去除木材细胞壁中的木质素。木质素是木材中起支撑作用的刚性组分, 去除后微通道的连通性显著增强, 可以形成更为开放的多孔网络。处理后的松木切片呈现出高度均匀的多孔结构, 原始木材的定向

微通道被完整保留, 为后续活性材料的引入提供了理想的骨架模板。

在前文 Lu 等的工作中, 木材主要作为牺牲模板, Yan 等^[65]则提出了一种更为简洁的策略, 将木材直接转化为导电碳骨架, 并完整保留其天然的多孔结构, 如图 6a 所示。这一方法的核心在于对木材进行预氧化和碳化处理, 将木质纤维素转化为导电碳材料, 同时保持原有的微观形貌。垂直导管可以作为锂离子的快速传输主干道, 凹坑结构用于确保主干道之间的连通性和电极整体的均匀浸润(图 6b)。

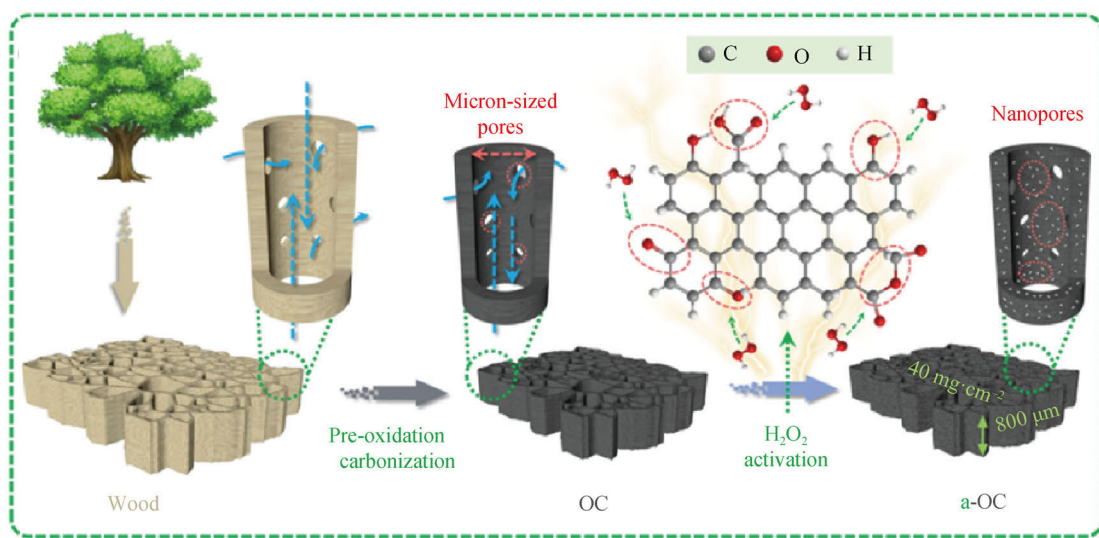
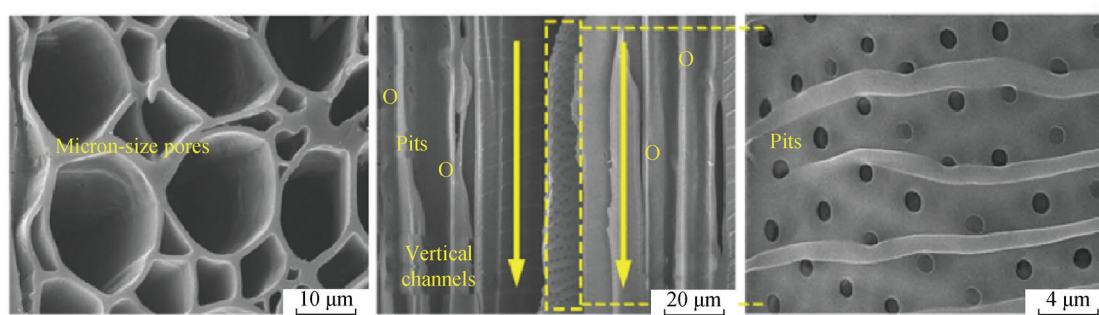
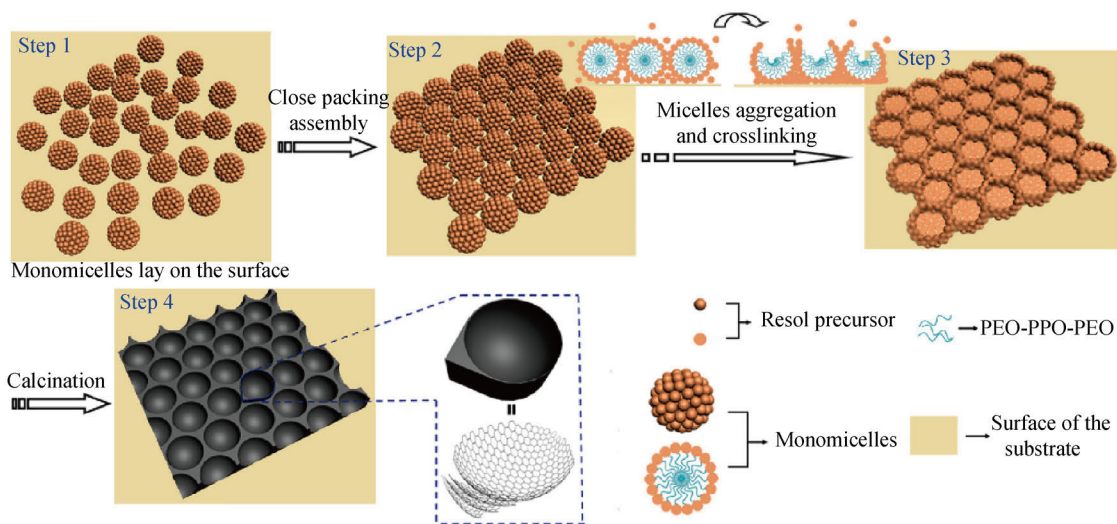
(a) Schematic diagram of material synthesis^[65](b) SEM image of the material^[65](c) Schematic diagram of the synthesis of ordered mesoporous materials^[66]

图 6 木模板与高分子模板导向设计
Fig. 6 Design guidelines for wood and polymer templates

Fang 等^[66]开发的介观尺度模板设计将这一方法扩展到纳米尺度。如图 6c 所示,通过开发一种可控的低浓度单胶束密堆积组装方法,成功合成了新型介孔碳纳米片。这一方法的创新之处在于对胶束自组

装行为的精确调控。在适当低的浓度条件下,表面活性剂分子形成单分散的球形胶束,这些胶束在基底表面(通常采用 AAO 孔道的内壁作为基底)密堆积排列,形成高度有序的二维胶束阵列。随后引入

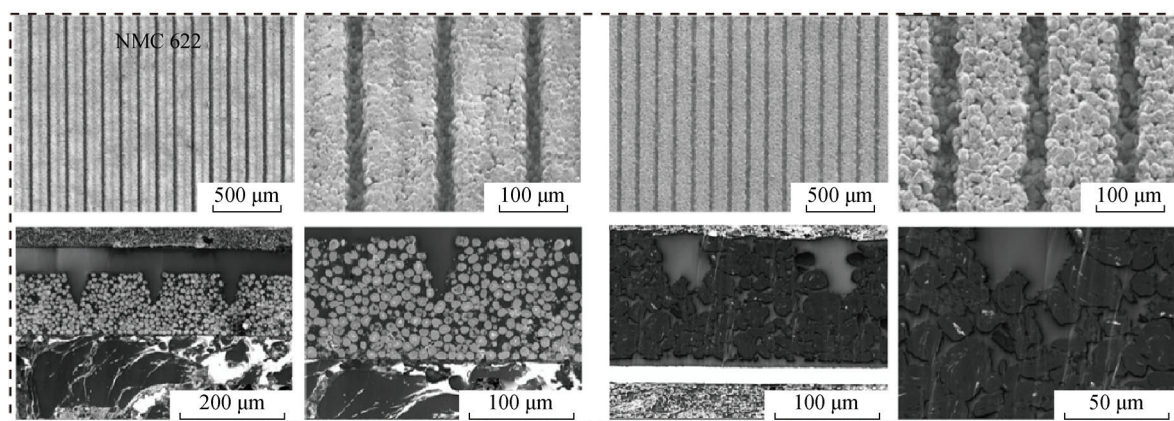
碳前驱体(如酚醛树脂),使其填充在胶束之间的间隙中,经过聚合和碳化处理,胶束被去除,最终形成具有高度有序的介孔结构。石墨烯纳米片制成的锂离子电池负极在 100 mA/g 电流密度下表现出 $770 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高可逆容量。

2.5 激光法设计电极

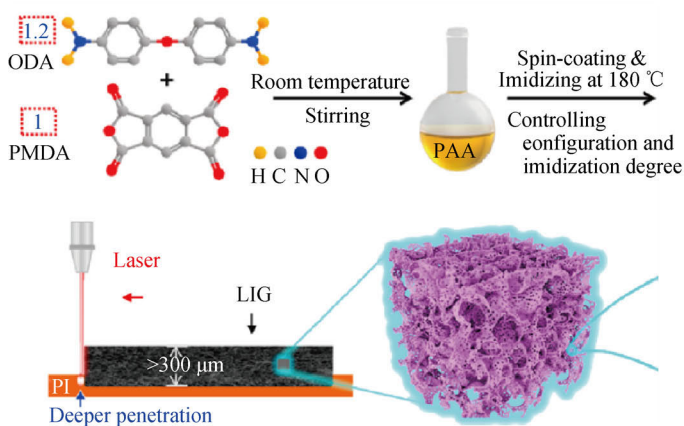
激光加工技术是厚电极结构设计另外一种重要方法。通过利用高能激光束与材料之间的相互作用,可以在集流体或电极表面实现精确的微结构加工,形成凹槽、孔洞、微米级线条和网格等精细结构。这种方法有着非接触、局部化、普适性强等特点,成为实现厚电极复杂结构设计的最简单和最精确的制造方法之一。

Dunlap 等^[67]的工作充分展示了激光图案化技术在电极结构调控方面的潜力。如图 7a 所示,该研究分别对正极和负极表面进行了激光图案化处理,并通过扫描电子显微镜(SEM)对处理后的电极形貌进行表征。从 SEM 图像中可以清晰地看到,激光在电极表面形成了规整的微米级凹槽阵列,这些凹槽

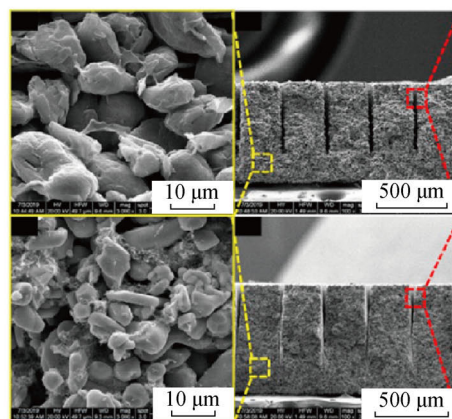
的宽度、深度和间距都可以通过调节激光参数(如功率、扫描速度、脉冲频率)进行精确控制,而图案化后的电极表面没有残留碎片的迹象,这保证了电极表面的洁净度和结构完整性。聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB-SEM)的横截面图像进一步揭示激光图案化电极的内部结构,激光加工的凹槽贯穿了电极涂层的部分厚度,形成了从电极表面向内部延伸的微通道。激光技术还可以直接参与电极材料的合成与转化。Wang 等^[68]提出一种基于激光诱导原位转化的超级电容器电极制备方法,如图 7b 所示,这一方法同样适用于电池厚电极的构建。制备的石墨烯电极在面积比电容方面达到了 $172.2 \text{ mF} \cdot \text{cm}^{-2}$,展现出优异的储能性能。更为重要的是,基于这种复合电极材料构建的超级电容器在储能密度、倍率性能、循环稳定性和机械灵活性方面均表现优异,证明了激光诱导转化技术在制备高性能厚电极方面的巨大潜力。Park 等^[69]发现激光成型的超厚电极的几何形状变化有助于降低弯曲度,并减少电子和离子电阻,验证了激光法的可行性(图 7c)。



(a) SEM image of laser patterned electrodes^[67]



(b) Schematic diagram of laser inducing growth^[68]



(c) SEM image of the laser structure region^[69]

图 7 激光导向厚电极设计

Fig. 7 Design of laser-guided template

厚电极设计需要离子传导、电子传导及体积膨胀收缩特性同时满足,彼此制约。优化任何单一性能都有可能牺牲其他性能,三者协同设计是厚电极设计的出发点。高离子传导特性要求结构具备低曲折度,高电子传导特性要求结构具备良好的导电网络,优异的体积收缩膨胀特性要求结构应力分布均匀,结构可逆变形,界面稳定。以基元结构组装为核心,对厚电极整合设计,在纳米尺度上选择高活性和可设计的纳米材料,构筑分级多孔的介观结构,作为离子/电子传导的桥梁;通过3D打印或者模板法设计垂直贯通孔道,降低曲折度,进一步提高离子传导和电子传导特性,同时均匀应力。基元结构的设计贯穿纳米、介观、微米和宏观尺度,不同的纳米材料,独特的介观排列和长程有序的宏观设计共同决定厚电极的电化学性能,实现三大特性的协同优化才能构建稳定且高性能的厚电极结构。

3 总结与展望

从工程放大角度出发,各类厚电极制造技术走向规模化时,均面临着一致性、控制精度和生产效率三大核心挑战。这3种技术路径在实验室尺度上各具优势,但在迈向产业化应用时,其局限性也逐步显现。

在一致性方面,3D打印法和激光法采用数字化控制可以实现较高的批次重复性和结构一致性,尤其适用于定制化、小批量的高端电极制备。相比之下,模板法则受限于天然模板或自发结晶过程的批次差异,例如木材的天然结构存在个体差异、生产现场的冰晶生长易受环境波动影响,导致孔道结构的均匀性难以严格保证。

在控制精度方面,3类技术都可以在纳米至微米尺度实现一定程度的调控。3D打印的空间分辨率受限于喷嘴直径和浆料流变性,挤出式打印与喷墨打印通常均可以达到微米级。激光加工的精度可达亚微米甚至纳米级,且可通过调节激光参数实现跨尺度加工。而模板法的精度取决于模板本身的规整性,冰模板和盐模板可形成数十至数百微米的孔道,介观模板则可达纳米级,但宏观尺度的孔道均一性控制仍具挑战。

在生产效率方面,不同技术的差距尤为显著。激光法具有较高的加工速度,其扫描速率可达数米每分钟,且无须后处理,具备与电极卷对卷集成的

潜力。相比之下高精度的3D打印法的成型速度通常较慢,典型的挤出式打印速率在厘米每分钟量级,远低于传统涂布工艺的生产节拍。模板法则因需要模板的制备、组装和去除等多个步骤,整体生产效率较低。

尽管上述技术在各自的发展路径上不断优化,但仍存在难以突破的瓶颈。3D打印法面临的主要问题包括打印速度慢、难以满足大规模生产的产能需求,喷嘴尺寸限制了结构特征的最小尺寸,浆料的可打印性和流变性控制复杂,影响长期连续运行的稳定性。模板法的规模化难题主要体现在:模板的制备和去除步骤增加了工艺链长度,连续化生产困难;大面积下温度场或浓度场的均匀性难以维持,导致孔道结构一致性下降。盐模板等水溶性模板在大面积应用中存在去除效率和残留控制问题。激光法虽在生产效率方面具有一定优势,但仍面临热影响区的控制问题,高能量密度激光在快速扫描时可能引发电极材料的局部热损伤或相变。一致性、控制精度和生产效率三者之间存在内在的相互制约关系。在追求高精度与高一致性时,通常需要牺牲生产效率(如采用更慢的扫描速度、更精细的逐层堆叠),而追求高速生产时,又容易导致结构可控性下降(如激光扫描过快导致孔道形貌不均,模板法成型过快引起孔道取向紊乱)。这种“工程不可能三角”是厚电极制造技术从实验室走向规模化所必须面对的核心矛盾。总体而言,当前尚不存在单一技术能同时兼顾高精度、高一致性与高生产效率。未来的突破方向可能在于:1)多技术融合,如将激光快速加工与模板法相结合,先用模板构筑宏观孔道骨架,再用激光进行局部精细调控。2)工艺创新,开发连续式冰模板或卷对卷兼容的导向成型工艺。3)设备升级,发展多光束并行激光加工、高速多喷头3D打印等新型装备。因此,找到三者兼备的规模化制造技术,是厚电极从实验室研究走向规模化应用的关键所在。

本文梳理从基元结构到厚电极的多尺度传输行为,探讨如何通过理性设计基元结构的组装方式来解决高能量和高功率电池中的传输限制。核心结论如下:锂离子电池的性能受到从原子尺度到电极尺度的多尺度耦合动力学的限制,基元结构的组装方式直接影响厚电极的最终性能^[70],经过合理设计的电极架构可以同时突破电子和离子二者的传输瓶颈。在未来的发展中,锂离子电池厚电极研究由“结

构设计”转向“基元工程学”，这一新方向强调将基元结构作为可设计单元，依靠三维空间内的合理组装

实现电子、离子和机械应力的协同调控。以下几个前沿领域值得重点关注，如图 8 所示。

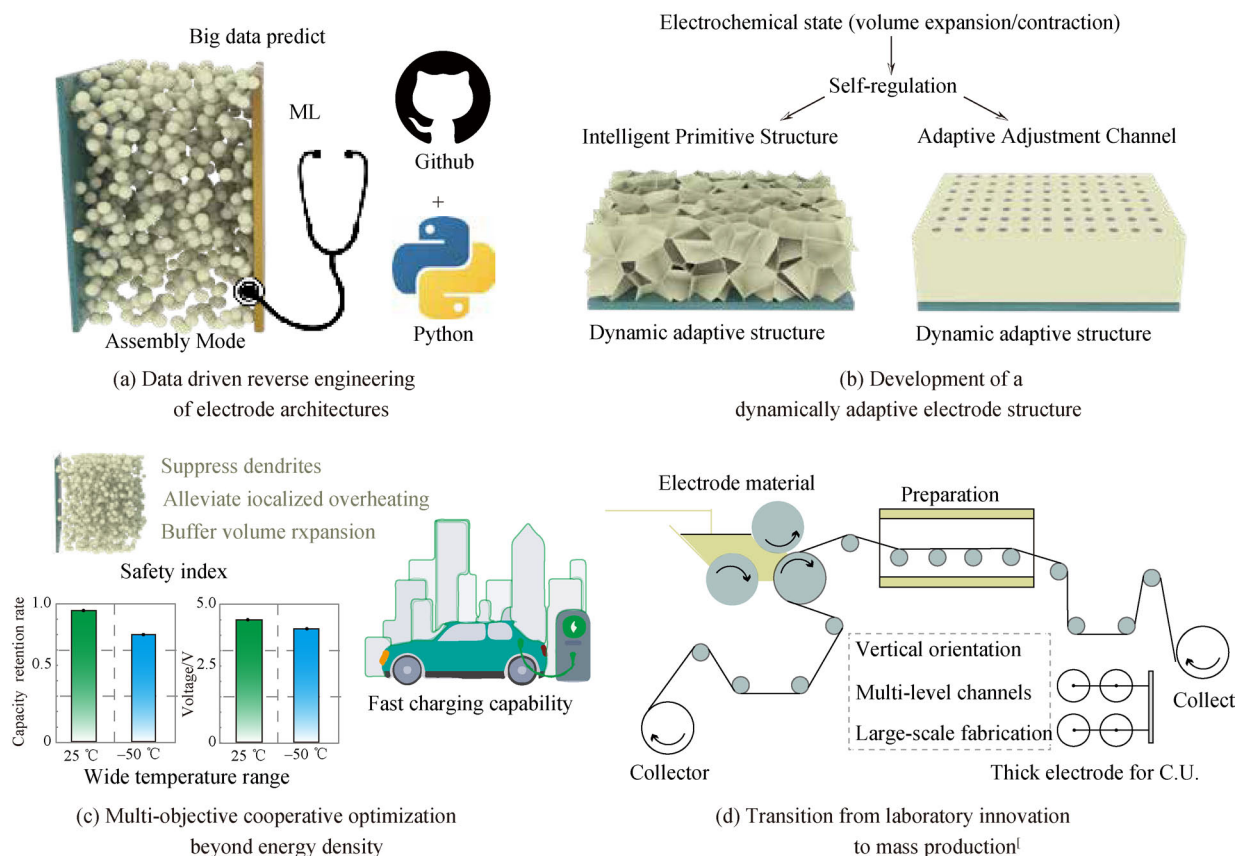


图 8 厚电极未来重点发展领域摘要图

Fig. 8 Summary chart of key development areas for thick electrodes in the future

1) 数据驱动的电极架构逆向设计

传统电极设计依赖试错法和经验积累推进，效率有限。高通量实验、自动化合成和先进表征技术的发展，海量的电极材料-结构-性能数据库正在积累。结合机器学习算法(图 8a)，研究人员有望建立基元结构特征(尺寸、形貌、维度)、组装参数(取向、密度、级配)与电极宏观性能之间的定量构效关系。人工智能支撑的数据科学方法可以辅助完成参数辨识，显示出应用潜力。未来，多物理场模拟结合人工智能的闭环优化系统，有望实现“按需设计”，针对特定应用场景(如快充电池型电动汽车、电网长时储能)，自动推荐最优的基元结构类型和对应的组装方式。

2) 动态自适应电极结构的开发

现有电极结构在电池工作过程中处于静态且被动的状态，难以应对循环过程中的体积膨胀、应力积累和界面演化。开发能够根据电化学状态自主调整的智能电极结构(图 8b)正在成为一个新兴方向。

例如，选择形状记忆聚合物或可逆交联网络作为黏结剂，使电极能够在体积膨胀时自主调整孔道结构，维持离子传输通畅。或者设计具有梯度孔隙率的电极，分别优化靠近隔膜侧和靠近集流体侧的传输特性，匹配深度方向的反应差异。这种可自主调整电极的概念，有望从根本上解决厚电极在长循环过程中的结构退化和性能衰减问题。

3) 超越能量密度的多目标协同优化

电动汽车市场逐步成熟，储能应用场景不断拓展，电池性能的评价维度正从单一能量密度，向“能量-功率-寿命-安全-成本”多目标协同转变(图 8c)。厚电极设计需要跳出厚度最大化的思维定式，转为在特定约束条件下寻找最优方案。在快充应用中，电极设计的目标是在保证一定能量密度的前提下，降低离子传输阻力，减少析锂风险。在长时储能应用中，需要牺牲部分倍率性能以换取极低的成本和超长的循环寿命。这一调整要求研究人员建立更全面的性能评价体系，把热管理、安全机制、成本核

算等工程因素纳入电极设计的考察指标。

4) 从实验室创新到规模化制造的跨越

当前报道中, 多种先进电极结构如垂直取向阵列、冰模板定向孔道、盐模板宏孔电极, 在实验室尺度展现出优于传统结构的性能, 这类结构的规模化制备仍面临严峻挑战。例如, 在卷对卷涂布工艺中, 怎样实现纳米片的垂直取向, 如何在低成本前提下实现数十微米级孔道的精确调控。这些问题将决定先进电极结构能否走出实验室、进入商业化生产线。电极研究需要更加重视制备工艺的可行性和可扩展性, 将“设计–制备–表征–应用”形成连通, 推动基础研究向产业应用转化。(图 8d)

锂离子电池厚电极的研究正处于发展的关键阶段。基元结构作为连接原子尺度本征性质与电极尺度宏观性能的桥梁, 其合理组装将成为下一代高能量/功率电池的核心技术路径。实现这一目标需要解决很多问题, 比如深入理解传输机理、可控制备电极结构, 以及与现有电池制造体系的兼容。基元结构工程学为我们提供了全新的研究方向和更广阔的视野。

参考文献:

- [1] WANG X Y, ZHANG S J, CAO Y, et al. Universal strategy of capacity compensation *via* the electrolyte for Li-ion batteries[J/OL]. *Energy Environ Sci*, 2026. <https://doi.org/10.1039/D5EE07058A>.
- [2] WU Y, RAN Z C, LI Y L, et al. Ethylene carbonate-free electrolytes toward better lithium-ion batteries[J]. *Joule*, 2026, 10(1): 102274.
- [3] LIU R, ZENG H Z, ZHAO L, et al. Crystal engineering: Breaking “fast-charging” limit of anode materials in lithium-ion batteries[J]. *Prog Mater Sci*, 2026, 160: 101685.
- [4] ZHANG Z Y, LIU J Q, LIU L Z, et al. Unlocking superior conductivity in MOF electrodes *via* a MXene-activated electronic inversion layer[J]. *Adv Energy Mater*, 2026, 16(14): e70713.
- [5] LI J, MEJÍA-CENTENO K V, KHAN M D, et al. Beyond imperfect match: Silicon/graphite hybrid anodes for high-energy-density lithium-ion batteries[J]. *Adv Energy Mater*, 2026, 16(10): e05674.
- [6] DUBEY R J, SASIKUMAR P V W, KRUMEICH F, et al. Silicon oxycarbide: Tin nanocomposite as a high-power-density anode for Li-ion batteries[J]. *Adv Sci*, 2019, 6(19): 1901220.
- [7] NIU X Y, LU Y Y, CHEN P C, et al. Gradient-matched microstructural engineering for fast-charging, damage-tolerant thick electrodes of lithium-ion batteries[J]. *Adv Energy Mater*, 2025, 15(29): 2502245.
- [8] MU Y B, HUANG C Z, CHU Y Q, et al. Revolutionizing high-areal-capacity silicon anodes with a multi-level carbon construction strategy for practical Li-ion batteries[J]. *Carbon Energy*, 2025, 7(6): e702.
- [9] LI H, PENG L, WU D B, et al. Ultrahigh-capacity and fire-resistant LiFePO₄-based composite cathodes for advanced lithium-ion batteries[J]. *Adv Energy Mater*, 2019, 9(10): 1802930.
- [10] NIE B, LEE S W, WANG T W, et al. Unveiling multifunctional synthetic boundaries for enhanced mechanical and electrochemical performance in densified thick composite electrodes[J]. *Nat Commun*, 2025, 16: 9489.
- [11] BAEK J H, KANG H J, KIM H, et al. Unveiling the effects of laser structuring on thick electrodes using an electrochemical model[J]. *J Power Sources*, 2025, 656: 238052.
- [12] XIA Y, MATHIS T S, ZHAO M Q, et al. Thickness-independent capacitance of vertically aligned liquid-crystalline MXenes[J]. *Nature*, 2018, 557(7705): 409–412.
- [13] ZHANG Y, ZHANG B, LI J L, et al. SnSe nano-particles as advanced positive electrode materials for rechargeable aluminum-ion batteries[J]. *Chem Eng J*, 2021, 403: 126377.
- [14] CHA H, LEE H, JIN W, et al. Synergistic nano-micro structuring boosts high-Ni cathode performance for all-solid-state lithium-ion batteries[J]. *Energy Storage Mater*, 2025, 81: 104470.
- [15] ZHANG L H, WANG S W, ZHU L, et al. Synthesis design of interfacial nanostructure for nickel-rich layered cathodes[J]. *Nano Energy*, 2022, 97: 107119.
- [16] HU T S, HU Y J, YAO T Y, et al. Freestanding molybdenum carbide nanowires electrode for high specific capacity and superior rate performance Li–CO₂ batteries[J]. *Energy Storage Mater*, 2024, 72: 103740.
- [17] LIANG L W, LI X Y, ZHAO F, et al. Construction and operating mechanism of high-rate Mo-doped Na₃V₂(PO₄)₃@C nanowires toward practicable wide-temperature-tolerance Na-ion and hybrid Li/Na-ion batteries[J]. *Adv Energy Mater*, 2021, 11(21): 2100287.
- [18] LIU C, MARTIN-DIACONESCU V, BLACK A P, et al. Unveiling capacity limitations of MnO₂ in rechargeable Zn chemistry[J]. *Energy Environ Sci*, 2025, 18(21): 9611–9622.
- [19] KAUR H, KONKANA B, MCCRYSTALL M, et al. Potassium-ion battery electrodes from potassium ferricyanide nanoplatelets: Thin platelets and thick electrodes unlock high areal capacity and excellent rate performance[J]. *Adv Energy Mater*, 2025, 15(23): 2500488.
- [20] LIU X L, JIN Y C, WANG H L, et al. *In situ* growth of covalent organic framework nanosheets on graphene as the cathode for long-life high-capacity lithium-ion batteries[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(37): 2203605.
- [21] WEI C L, XI B J, WANG P, et al. *In situ* anchoring ultrafine ZnS nanodots on 2D MXene nanosheets for accelerating polysulfide redox and regulating Li plating[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(32): 2303780.
- [22] PARK K Y, PARK J W, SEONG W M, et al. Understanding capacity fading mechanism of thick electrodes for lithium-ion rechargeable batteries[J]. *J Power Sources*, 2020, 468: 228369.
- [23] XU J K, LEI J F, MING N N, et al. Rational design of wood-structured thick electrode for electrochemical energy storage[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(35): 2204426.
- [24] CAO L Y, CAI C Y, HUANG J F, et al. Engineering in-plane defects in VS₂-X for fast Na⁺ transport and highly active NaS reaction in thick electrodes[J]. *Chem Eng J*, 2025, 521: 166960.
- [25] WANG Y Y, LI C F, GUO H L, et al. Origin and suppression of structural degradation in Ni-rich layered oxide cathodes at elevated temperatures[J]. *Energy Storage Mater*, 2025, 80: 104413.
- [26] SOTOUEH M, DILLENZ M, DÖHN J, et al. Oxide spinels with superior Mg conductivity[J]. *Chem Mater*, 2023, 35(12): 4786–4797.
- [27] ZHAN Z Y, PENG W J, YUAN L, et al. Quantifying and inhibiting manganese dissolution in Li-rich Mn-based cathode materials[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(46): 40258–40270.
- [28] ZHAO J K, CAI F P, WANG B, et al. Advances and future perspectives on silicon-based anodes for lithium-ion batteries[J]. *Adv*

- Colloid Interface Sci, 2025, 343: 103543.
- [29] WANG M T, CHEN K T, LIN Z C, et al. Heterointerface engineering of tin-based chalcogenides for rechargeable batteries[J]. J Colloid Interface Sci, 2026, 702: 138909.
- [30] ZHANG J Y, MA L X, HAI C X, et al. Enhancing hydrophilicity of thick electrodes *via* sulfonation reaction for lithium extraction from salt lake[J]. Desalination, 2025, 604: 118669.
- [31] WU J Y, JU Z Y, ZHANG X, et al. Low-tortuosity thick electrodes with active materials gradient design for enhanced energy storage[J]. ACS Nano, 2022, 16(3): 4805–4812.
- [32] WANG Y Y, CHEN H, YANG J L, et al. Flexible, stackable, and fully active thick electrode with scalable 3D topology braid structure enables supercontinuous electron/ion transport[J]. Adv Mater, 2026, 38(6): e15575.
- [33] JUNG H, YOO Y. Thick electrodes for high-energy lithium-ion batteries: Structural limitations, wet/dry process engineering, and integrated design strategies[J]. J Power Sources, 2026, 670: 239528.
- [34] LI Z Y, WANG F, GAO Y, et al. Probing the effect of electrode thermodynamics on reaction heterogeneity in thick battery electrodes[J]. Adv Mater, 2025, 37(33): 2502299.
- [35] GUO Y T, LI X H, GUO H J, et al. Visualization of concentration polarization in thick electrodes[J]. Energy Storage Mater, 2022, 51: 476–485.
- [36] SUKENIK E G, KASAEI L, AMATUCCI G G. Impact of gradient porosity in ultrathick electrodes for lithium batteries[J]. J Power Sources, 2023, 579: 233327.
- [37] LIN S X, WANG Y F, CHEN Y H, et al. 3D ordered porous nanostructure confers fast charge transfer rate and reduces the electrode polarization in thick electrode[J]. Small, 2022, 18(7): 2104224.
- [38] WANG C T, YAO Q, WANG M Y, et al. Highly conductive hierarchical TiO₂ micro-sheet enables thick electrodes in sodium storage[J]. Adv Funct Mater, 2024, 34(5): 2301996.
- [39] LI G, OUYANG T, XIONG T Z, et al. All-carbon-frameworks enabled thick electrode with exceptional high-areal-capacity for Li-ion storage[J]. Carbon, 2021, 174: 1–9.
- [40] KUANG Y D, CHEN C J, KIRSCH D, et al. Thick electrode batteries: Principles, opportunities, and challenges[J]. Adv Energy Mater, 2019, 9(33): 1901457.
- [41] CAO Z Q, WU Y D, JIN L C, et al. Interfacial hydrogen bond engineering: Enabling rapid 3D assembly of MXene thick electrodes with high mass loading and fast charge transport[J]. Adv Funct Mater, 2026, 36(22): e26006.
- [42] WU J Y, ZHANG X, JU Z Y, et al. From fundamental understanding to engineering design of high-performance thick electrodes for scalable energy-storage systems[J]. Adv Mater, 2021, 33(26): 2101275.
- [43] WAN C, HUANG J, CHEN K, et al. Hierarchical porous N-doped carbon fibers enable ultrafast electron and ion transport for Zn-ion storage at high mass loadings[J]. Energy Storage Mater, 2024, 69: 103384.
- [44] LI W Z, DU Q, GUO G N, et al. Enhanced electrochemical and thermal behavior of lithium-ion batteries with ultrathick electrodes *via* oriented pores[J]. Appl Therm Eng, 2023, 228: 120555.
- [45] GUO J, MING N N, YUAN S N, et al. Vertical-array channel engineering of wood-structured thick electrode to assemble high-performance supercapacitors[J]. Chem Eng J, 2025, 514: 163200.
- [46] YANG Y, LIU C Y, SU M X, et al. Kinetic mechanism and structural design of thick electrodes in lithium-ion batteries: Challenges and optimization strategies[J]. Small, 2025, 21(43): e06931.
- [47] YUAN R X, SUN S X, LING S W, et al. Solvent exchange assisted 3D printing of low tortuosity thick electrode for high areal energy density and power density supercapacitors[J]. Carbon, 2024, 218: 118737.
- [48] LI S P, TIAN G L, XIONG R Y, et al. Enhanced homogeneity of electrochemical reaction *via* low tortuosity enabling high-voltage nickel-rich layered oxide thick-electrode[J]. Energy Storage Mater, 2022, 46: 443–451.
- [49] WU J R, GUO H X, WANG R X, et al. Fabrication of low-tortuosity thick electrodes with low material loss by temporally shaped ultraviolet femtosecond laser[J]. Nat Commun, 2026, 17: 973.
- [50] XU M, REICHMAN B, WANG X. Modeling the effect of electrode thickness on the performance of lithium-ion batteries with experimental validation[J]. Energy, 2019, 186: 115864.
- [51] LU L L, LU Y Y, ZHU Z X, et al. Extremely fast-charging lithium ion battery enabled by dual-gradient structure design[J]. Sci Adv, 2022, 8(17): eabm6624.
- [52] HE R J, TIAN G L, LI S P, et al. Enhancing the reversibility of lithium cobalt oxide phase transition in thick electrode *via* low tortuosity design[J]. Nano Lett, 2022, 22(6): 2429–2436.
- [53] ZHANG Z, WANG J L, YAN X F, et al. *In-situ* growth of hierarchical N-doped CNTs/Ni Foam scaffold for dendrite-free lithium metal anode[J]. Energy Storage Mater, 2020, 29: 332–340.
- [54] TAO R, GU Y, SHARMA J, et al. A conformal heat-drying direct ink writing 3D printing for high-performance lithium-ion batteries[J]. Mater Today Chem, 2023, 32: 101672.
- [55] LIU C Y, QIU Y, LIU Y L, et al. Novel 3D grid porous Li₄Ti₅O₁₂ thick electrodes fabricated by 3D printing for high performance lithium-ion batteries[J]. J Adv Ceram, 2022, 11(2): 295–307.
- [56] SALEH M S, LI J, PARK J, et al. 3D printed hierarchically-porous microlattice electrode materials for exceptionally high specific capacity and areal capacity lithium ion batteries[J]. Addit Manuf, 2018, 23: 70–78.
- [57] QIU W X, ZHANG J, TAN G Q, et al. Continuous ice-templating of macro-porous materials with uniformly ordered architecture[J]. Sci China Mater, 2022, 65(11): 3134–3143.
- [58] WANG G X, LIU H, LIANG Y H, et al. Composite polymer electrolyte with three-dimensional ion transport channels constructed by NaCl template for solid-state lithium metal batteries[J]. Energy Storage Mater, 2022, 45: 1212–1219.
- [59] WANG Y, ZENG H C, LEE J Y. Highly reversible lithium storage in porous SnO₂ nanotubes with coaxially grown carbon nanotube overlayers[J]. Adv Mater, 2006, 18(5): 645–649.
- [60] WEI Q L, FU Y Q, ZHANG G X, et al. Rational design of novel nanostructured arrays based on porous AAO templates for electrochemical energy storage and conversion[J]. Nano Energy, 2019, 55: 234–259.
- [61] JU Z Y, ZHU Y, ZHANG X, et al. Understanding thickness-dependent transport kinetics in nanosheet-based battery electrodes[J]. Chem Mater, 2020, 32(4): 1684–1692.
- [62] ZHANG X, HUI Z Y, KING S, et al. Tunable porous electrode architectures for enhanced Li-ion storage kinetics in thick electrodes[J]. Nano Lett, 2021, 21(13): 5896–5904.
- [63] DENG W W, SHI W B, LIU Q J, et al. Constructing gradient porous structure in thick Li₄Ti₅O₁₂ electrode for high-energy and stable lithium-ion batteries[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2020, 8(46): 17062–17068.

- [64] LU L L, LU Y Y, XIAO Z J, et al. Wood-inspired high-performance ultrathick bulk battery electrodes[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(20): 1706745.
- [65] YAN B, FENG L, ZHENG J J, et al. High performance supercapacitors based on wood-derived thick carbon electrodes synthesized *via* green activation process[J]. *Inorg Chem Front*, 2022, 9(23): 6108–6123.
- [66] FANG Y, LV Y Y, CHE R C, et al. Two-dimensional mesoporous carbon nanosheets and their derived graphene nanosheets: Synthesis and efficient lithium ion storage[J]. *J Am Chem Soc*, 2013, 135(4): 1524–1530.
- [67] DUNLAP N, SULAS-KERN D B, WEDDLE P J, et al. Laser ablation for structuring Li-ion electrodes for fast charging and its impact on material properties, rate capability, Li plating, and wetting[J]. *J Power Sources*, 2022, 537: 231464.
- [68] YU X L, LI N, ZHANG S D, et al. Ultra-thick 3D graphene frameworks with hierarchical pores for high-performance flexible micro-supercapacitors[J]. *J Power Sources*, 2020, 478: 229075.
- [69] PARK J, JEON C, KIM W, et al. Challenges, laser processing and electrochemical characteristics on application of ultra-thick electrode for high-energy lithium-ion battery[J]. *J Power Sources*, 2021, 482: 228948.
- [70] WU T Q, ZHAO Z D, ZHANG J J, et al. Thick electrode with thickness-independent capacity enabled by assembled two-dimensional porous nanosheets[J]. *Energy Storage Mater*, 2021, 36: 265–271.

作者贡献声明:

刘悦: 论文构思、调查研究、绘制图表、撰写初稿
郭晋芝: 调查研究、绘制图表、获取资助
曹峻鸣: 验证、分析/综合数据并推导结论、监督指导
吴兴隆: 监督指导、审阅与修订、获取资助、项目管理

Next-Generation Lithium-Ion Battery Thick Electrode Design Based on Primitive Structure Assembly

LIU Yue^{1,2}, GUO Jinzhi^{1,2}, CAO Junming^{1,2}, WU Xinglong^{1,2}

(1. Northeast Normal University School of Physics, Changchun 130024, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, and MOE Key Laboratory for UV Light-Emitting Materials and Technology, Changchun 130024, China)

Extended Abstract

The widespread adoption of electric vehicles and increased usage of portable electronic devices have created an urgent need for lithium-ion batteries to simultaneously enhance both energy density and power density. As one of the most important electrochemical energy storage technologies in modern society, lithium-ion batteries have had a profound impact on numerous sectors, including portable electronic devices, power tools, and transportation. With the global energy mix undergoing an accelerated shift toward renewable energy and the electric vehicle market expanding rapidly, higher demands are being placed on the performance of lithium-ion batteries. These batteries must not only offer high energy density to extend operating range but also possess high power density to enable fast charging and discharging. A thick electrode design can significantly increase the mass fraction of active material in the battery, thereby improving energy density.

Thick electrode designs effectively increase the proportion of active material, representing a key pathway to achieving high energy density. However, the elongated electron and ion transport paths within thick electrodes lead to severe polarization, making it difficult to sustain high power output. Recent advancements in nanoscale building blocks (nanoparticles, nanosheets, nanowires, *etc.*) offer new solutions to this challenge. During battery assembly, severe agglomeration and interfacial side reactions prevent these building blocks from delivering their full potential, resulting in performance significantly below theoretical expectations at thick electrode scales. Advances in nanotechnology have provided a solution. By constructing active materials into nanoscale building blocks and forming them into engineered thick electrode structures, it is possible to significantly reduce the diffusion distance of lithium ions within the electrode, increase the number of electrochemical active sites, and mitigate the volume expansion of electrode materials during cycling. Although thin electrodes have demonstrated advantages, the use of thick electrodes still poses a risk of agglomeration. Consequently, research on thick electrodes has long focused on the design of the building blocks themselves.

Therefore, in response to the urgent needs of lithium-ion battery research, this paper shifts the focus from individual material design to the co-design of ‘nanomaterials and electrode stacking configurations’. By treating the elementary structure of electrode materials as a design unit and regulating its assembly within thick electrodes, the study aims to construct a multiscale transport network capable of simultaneously achieving efficient electron transport and rapid ion migration. This paper organically integrates elementary structures with thick electrode design and systematically reviews the latest advancements in this emerging research field. This approach provides new insights and a theoretical foundation for the assembly of elementary structures and the design of thick electrodes in next-generation high-energy and high-power lithium-ion batteries.

Summary and Prospects Although the aforementioned technologies continue to be optimized along their respective development paths, there remain insurmountable bottlenecks. There is an inherent trade-off between consistency, control precision, and production efficiency. When pursuing high precision and high consistency, production efficiency is often compromised (*e.g.*, by using slower scanning speeds or finer layer-by-layer stacking), whereas pursuing high-speed production tends to result in reduced structural controllability (*e.g.*, excessively fast laser scanning leading to uneven pore morphology, or excessively fast template-based molding

causing disordered pore orientation). This ‘engineering trilemma’ represents the core contradiction that thick electrode manufacturing technologies must address as they transition from the laboratory to large-scale production. Overall, there is currently no single technology capable of simultaneously achieving high precision, high consistency, and high production efficiency. Future breakthroughs may lie in: 1) the integration of multiple technologies, such as combining rapid laser processing with the template method—first using a template to construct a macro-porous framework, then employing lasers for localized fine-tuning. 2) Process innovation, including the development of continuous ice-templating or roll-to-roll compatible guided forming processes. 3) Equipment upgrades, such as the development of new equipment for multi-beam parallel laser processing and high-speed multi-nozzle 3D printing. Therefore, identifying a scalable manufacturing technology that integrates all three elements is key to transitioning thick electrodes from laboratory research to large-scale application.

Research on thick lithium-ion battery electrodes is currently at a critical stage of development. As a bridge linking intrinsic properties at the atomic scale to macroscopic performance at the electrode scale, the rational assembly of unit cell structures will become a core technological pathway for next-generation high-energy/high-power batteries. Achieving this goal requires addressing numerous challenges, including gaining a deep understanding of transport mechanisms, enabling the controlled synthesis of electrode structures, and ensuring compatibility with existing battery manufacturing systems. The engineering of unit cell structures offers us a new research direction and a broader perspective.

Keywords lithium-ion battery; primary structure; thick electrode; electrode design