



面向快充的锂离子电池多尺度三维导电网络结构设计及离子传输优化

袁丙青¹, 陈亮¹, 张绪宝¹, 罗飞¹, 洪辉²

(¹三峡新能源(庆云)有限公司, 山东德州 253700; ²楚能新能源股份有限公司, 湖北孝感 432100)

摘要:为满足电动汽车、大规模储能及便携式电子设备对锂离子电池快充能力的迫切需求,解决传统电极在大电流工况下离子传输动力学缓慢、极化效应显著、循环寿命短等问题,开展多尺度三维导电网络结构设计及离子传输优化研究。本文构建的多尺度三维导电网络体系优先适配磷酸铁锂(LFP)正极,相关结构设计、仿真模型与制备工艺均基于正极体系开发,后续可拓展耦合石墨/硅基负极搭建全电池体系开展析锂风险专项验证。首先,基于特征时间常数理论,量化分析快充过程中电子传导与离子扩散的动力学关系,指出离子传输是限制10 C以上倍率性能的主控瓶颈,据此提出了电子与离子双连续且速率匹配的设计目标。随后,阐明了三维导电网络通过构建高效电子传导通道与优化离子扩散路径,协同降低传输阻力、缓解极化的作用机制,并建立了以无量纲参数“结构效率因子 $\beta=\epsilon/r$ ”为核心的评价体系。建立微观、介观与宏观三级协同设计框架,确定各尺度最优结构参数。基于COMSOL Multiphysics 6.0构建多尺度多物理场数值模型,明确模型假设并界定其适用范围(孔隙率30%~55%、石墨烯含量2%~5%、倍率 ≤ 12 C)。该模型当前仅针对LFP正极半电池工况构建,没有纳入石墨/硅基负极析锂、界面副反应等负极相关边界条件。经响应面法多目标优化,实现结构参数与传输性能的精准匹配。采用3D打印、原位烧结与复合分散工艺制备电极,该工艺制备效率达50片/h,材料利用率超95%,具备规模化潜力。性能测试表明,优化后的电极在10 C高倍率快充工况下,基于LFP活性物质质量计算比容量达138 mAh/g,充放电效率94.5%,循环1000次后容量保持率91.3%;锂离子扩散系数提升至 1.2×10^{-11} cm²/s,电荷转移电阻降至75 $\Omega\cdot\text{cm}^2$,且在-20℃低温与55℃高温环境下仍保持优异性能。针对三维骨架与42%较高孔隙率带来的体积能量密度衰减问题,通过梯度孔径匹配、高活性物质负载填充、超薄蜂窝骨架设计实现补偿,在200 μm 电极厚度、10 mg/cm²活性物质面载量条件下兼顾快充动力学与体积储能水平。由此可见,通过研究面向快充的锂离子电池多尺度三维导电网络结构设计及优化,为高倍率快充锂离子电池的产业化应用提供了关键支撑。

关键词: 锂离子电池; 快充技术; 三维导电网络; 离子传输; 特征时间常数

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0470

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 08-2997-12

Design and optimization of multiscale three-dimensional conductive network structures for fast-charging lithium-ion batteries

YUAN Bingqing¹, CHEN Liang¹, ZHANG Xubao¹, LUO Fei¹, HONG Hui²

(¹China Three Gorges Renewables (Qingyun) Co., Ltd., Dezhou 253700, Shandong, China; ²Cornex New Energy Co., Ltd., Xiaogan 432100, Hubei, China)

收稿日期: 2026-05-29; 修改稿日期: 2026-06-25。

第一作者: 袁丙青 (1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电化学储能应用技术, E-mail: yuan_bingqing@ctg.com.cn; 通信作者: 洪辉, 知识产权师, 研究方向为工业知识产权保护, E-mail: honghui@cn-ne.cn。

引用本文: 袁丙青, 陈亮, 张绪宝, 等. 面向快充的锂离子电池多尺度三维导电网络结构设计及离子传输优化[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 2997-3008.

Citation: YUAN Bingqing, CHEN Liang, ZHANG Xubao, et al. Design and optimization of multiscale three-dimensional conductive network structures for fast-charging lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 2997-3008.

Abstract: To address the growing demand for fast-charging lithium-ion batteries in electric vehicles, large-scale energy storage systems, and portable electronic devices, and to overcome the sluggish ion transport kinetics, severe polarization, and limited cycle life exhibited by conventional electrodes under high-current operating conditions, this study investigates the design of a multiscale three-dimensional conductive network architecture and its optimization for enhanced ion transport. First, based on characteristic time constant theory, the kinetic relationship between electron conduction and ion diffusion during fast charging is quantitatively analyzed, demonstrating that ion transport becomes the dominant rate-limiting factor at charging rates above 10 C. Accordingly, a design strategy based on dual continuity and kinetic matching of electron and ion transport pathways is proposed. The mechanisms by which the three-dimensional conductive network reduces transport resistance and mitigates polarization by establishing efficient electron-conduction pathways and optimized ion-diffusion channels are systematically elucidated. An evaluation framework centered on the dimensionless structural efficiency factor ($\beta = \varepsilon/\tau$) is established, and a hierarchical collaborative design strategy spanning the micro-, meso-, and macro-scales is developed to identify the optimal structural parameters at each scale. A multiscale, multiphysics numerical model is established using COMSOL Multiphysics 6.0 with clearly defined modeling assumptions and applicability ranges (porosity 30%–55%; graphene content 2%–5%; charging rate: ≤ 12 C). Multi-objective optimization using response surface methodology enables precise matching between structural parameters and transport performance. The electrodes are fabricated using an integrated process combining three-dimensional printing, *in situ* sintering, and dispersion techniques, achieving a production rate of 50 electrodes per hour and a material utilization efficiency exceeding 95%, thereby demonstrating strong potential for scalable manufacturing. Electrochemical characterization shows that the optimized electrode delivers a specific capacity of 138 mAh/g at a high charging rate of 10 C, with a coulombic efficiency of 94.5% and a capacity retention of 91.3% after 1000 charge-discharge cycles. The optimized architecture increases the lithium-ion diffusion coefficient to 1.2×10^{-11} cm²/s and reduces the charge-transfer resistance to 75 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. Additionally, the electrode maintains excellent electrochemical performance over a wide operating temperature range, from -20°C to 55°C . Finally, the broader applicability of the proposed multiscale design strategy is discussed for silicon anodes, sulfur cathodes, and composite solid-state electrolyte electrodes. Remaining challenges, including the long-term stability of ZrO₂ coating layers and interfacial fatigue mechanisms, are also identified. These findings provide valuable theoretical guidance and practical support for the industrial development of high-rate, fast-charging lithium-ion batteries.

Keywords: lithium-ion battery; fast charging technology; three-dimensional conductive network; ion transport; characteristic time constant

在电动汽车、大规模储能系统及便携式电子设备的快速迭代进程中，锂离子电池的快充能力已成为制约其应用体验与产业化推进的核心瓶颈。当前，传统锂离子电池在高倍率快充工况下普遍存在

电极内部离子传输动力学迟缓问题。这主要是因为传统电极采用活性物质、导电剂与黏结剂随机混合的制备模式，其导电网络呈现不连续的零维或二维分布特征。这种结构缺陷直接造成电子传导路径冗

长、界面接触电阻较大，同时锂离子在曲折无序的孔隙中扩散受阻，难以满足快充工况对高效电荷与质量传输的双重需求。现有三维导电电极普遍存在宏观骨架占用电极空间、孔隙率提升降低活性物质体积占比，进而削弱体积能量密度的矛盾，是快充电极实用化的关键瓶颈^[1]。因此，重构正极电极内部导电网络结构、优化离子传输路径，同步平衡快充动力学与体积能量密度，成为突破锂离子电池快充技术瓶颈的关键方向。

近年来，构建三维连续导电网络被证实是提升电极倍率性能的有效策略，能够为电子与离子提供快速贯通的传输通道，改善电流分布均匀性，从而缓解极化效应。然而，现有研究多聚焦于单一尺度的结构调控，缺乏对微观（纳米填料）、介观（孔隙结构）、宏观（电极整体拓扑）多尺度协同效应的深入解析与精准设计，导致电子导电性与离子传输效率难以实现最优匹配，制约了快充性能的进一步提升^{[2][3]}。基于此，立足多尺度工程思想，通过理论设计、数值模拟、可控制备与性能验证相结合的系统研究，深入阐明面向快充的 LFP 正极三维导电网络作用机制，建立结构参数与传输性能的定量关联，从而构建一套涵盖结构设计、数值模拟与制备优化的完整技术体系，为高倍率快充锂离子电池正极的产业化应用提供关键支撑，后续将基于本正极方案搭配石墨/硅基负极组装全电池，量化分析快充工况下负极析锂风险，完善全电池快充性能评级体系。

1 面向快充的锂离子电池离子传输与导电网络作用机制

1.1 锂离子电池快充过程中的离子传输动力学

在快充过程中，锂离子在电极内的传输主要包括在电解液孔隙中的液相扩散、在电极材料颗粒内部的固相扩散以及穿越固液界面的电荷转移过程^[4]。高电流密度下，锂离子在电解液中的扩散速率成为限制步骤，易在电极表面和内部形成显著的浓度梯度，产生浓差极化。同时，快速的电荷转移需求导致电化学极化加剧。这两种极化效应共同造成电池工作电压偏离平衡电位，有效充放电容量下降，并可能引发负极析锂等副反应。

为了定量判断快充条件下电子传导与离子扩散何者为主控瓶颈，引入特征时间常数分析方法。电

子在导电网络中的传导特征时间可表示为 $\tau_{\text{elec}} = R_{\text{eff}} C$ ，其中 R_{eff} 为有效电子电阻， C 为电极电容；离子在电解液孔隙中的扩散特征时间可表示为 $\tau_{\text{ion}} = L^2 / D_{\text{eff}}$ ，其中 L 为电极厚度， D_{eff} 为有效离子扩散系数。对于传统涂覆电极（ $L \approx 200 \mu\text{m}$ ， $D_{\text{eff}} \approx 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $\tau \approx 2.3$ ），计算可得 $\tau_{\text{ion}} \approx 4 \times 10^3 \text{ s}$ ，而 $\tau_{\text{elec}} \approx 10^{-2} \text{ s}$ ，两者相差约 5 个数量级。这一量级差异表明，在 10 C 倍率下（单次充放电约 360 s），离子扩散时间已接近甚至超过充放电时间窗口，而电子传导时间则完全可以忽略。因此，离子传输是限制高倍率快充性能的主控瓶颈，任何导电网络设计都应将“加速离子扩散”置于优先于“降低电子电阻”的位置。基于上述分析，提出了面向快充的导电网络设计目标。使 τ_{ion} 与 τ_{elec} 的比值趋近于 1（实际工程中可放宽至 10^2 以内），即实现“电子-离子双连续且速率匹配”的传输状态。在这一目标下，单纯提高导电剂含量的策略是低效的，必须通过重构孔隙几何拓扑来同时优化离子扩散路径。具体如图 1 所示。

同时，离子传输速率与电极微观结构密切相关。根据 Fick 扩散定律^[5]及 Butler-Volmer 方程建立的关联模型表明，电极的孔隙率直接影响电解液的储量与离子迁移通道的体积；曲折度决定了离子扩散路径的有效长度；比表面积影响电极/电解液界面面积，进而影响电荷转移速率。其中，孔隙率 ε 与曲折度 τ 之间存在经典的 Bruggeman 关系为 $D_{\text{eff}} = D_{\text{bulk}} \varepsilon / \tau$ ，但这一关系在非均质多尺度结构中往往偏离（ $n \neq 1.5$ ）。本实验中测得的曲折度值（样品 A 为 2.3，样品 B 为 1.6，样品 C 为 1.6）远高于理想多孔介质的理论下限（1.2~1.4），说明传统电极的离子扩散路径存在显著的迂回浪费。因此，优化导电网络的结构参数是改善离子传输动力学的关键。

1.2 三维导电网络对电池离子传输的调控机制

三维连续导电网络通过构建贯穿电极的“电子高速公路”，显著降低了电子传导电阻，确保了电流在电极厚度方向的均匀分布，避免了局部过充/过放^[6]。在电子传导调控方面，三维导电网络通过各尺度导电相的交错连通，构建高密度、低阻力的电子传导网络，降低电子传导路径的曲折度与电阻。微观尺度的石墨烯与碳纳米管形成致密的电子传导节点，确保电子在活性物质颗粒间的快速传递；宏观尺度的拓扑结构则为电子传导提供整体支撑，避免局部电子积累，提升电流分布均匀性，如

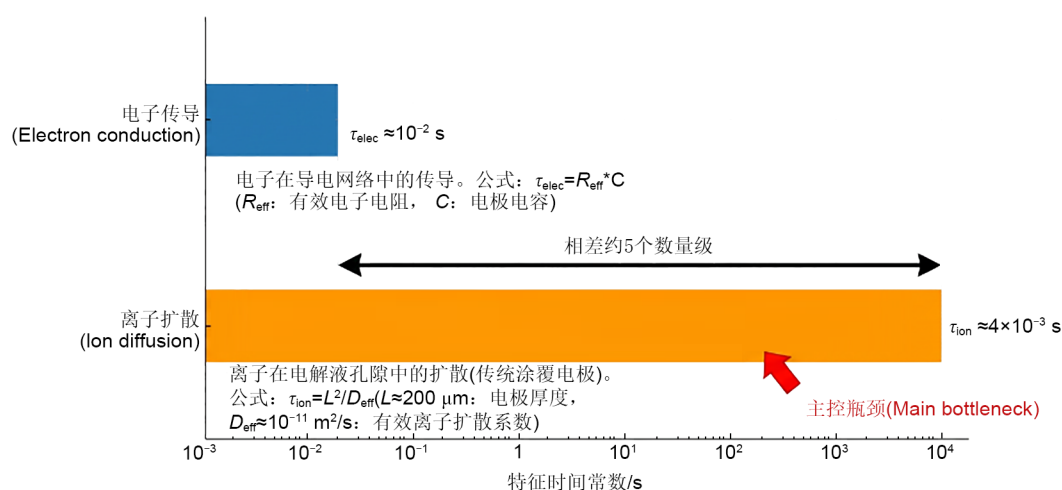


图1 快充条件下电子传导与离子扩散特征时间对比

Fig. 1 Comparison of characteristic times for electron conduction and ion diffusion under fast-charging conditions

图2所示。实验表明,多尺度三维导电网络的体积电阻率可低至 $8.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,较传统导电网络降低35.2%。然而,上述电子传导性能的改善对快充的直接贡献有限。根据特征时间分析可知,即使电子电阻降低50%, τ_{elec} 仍远小于 τ_{ion} ,快充瓶颈并未因此解除。而多尺度结构通过介观孔隙的梯度设计和宏观骨架的规整排布,降低了离子扩散的曲折因子 τ ,从而显著提升了 D_{eff} 。在离子扩散通道优化方面,多尺度三维导电网络通过介观孔隙结构的梯度设计,构建通畅的离子扩散通道,提升电解质浸润性与离子扩散速率。介观尺度的多孔碳球形成尺寸为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的梯度孔隙,既保障电解质快速浸润,又避免孔隙堵塞;微观尺度的石墨烯片层间隙形成纳米级辅助扩散通道,缩短锂离子扩散路径^[7]。同时,三维拓扑结构的交错连通性可降低离子扩散的曲折因子,使离子扩散路径缩短15%~20%,显著提升离子传输效率。

2 多尺度三维导电网络结构设计原理与参数优化

2.1 多尺度结构设计研究

构建微观($10 \sim 100 \text{ nm}$)、介观($1 \sim 10 \mu\text{m}$)与宏观($100 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$)的三级协同多尺度三维导电网络设计框架。为了从参数筛选上升到设计准则,进一步提出了两个无量纲设计参数用于指导结构优化:

(1) 电子/离子传输能力比 $\alpha = \sigma_{\text{eff}} / \kappa_{\text{eff}}$ 。其中 σ_{eff}

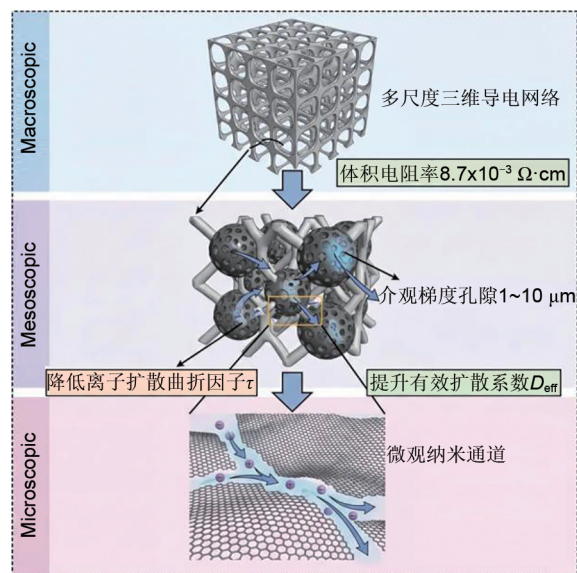


图2 多尺度三维导电网络结构与传输机制

Fig. 2 Schematic diagram of multi-scale three-dimensional conductive network structure and transport mechanisms

为有效电子电导率, κ_{eff} 为有效离子电导率。 $\alpha \gg 1$ 表示电子传输远优于离子传输,快充受限于离子扩散; $\alpha \leq 1$ 则相反。理想设计目标是使 α 与电极工作倍率所要求的传输通量相匹配。在10 C倍率下,由实验数据反推 $\alpha \approx 8.5$,表明离子传输仍相对滞后,但已较传统电极($\alpha \approx 35$)大幅改善。

(2) 结构效率因子 $\beta = \varepsilon / \tau$,如前所述,用于统一评价离子传输路径的几何效率。通过绘制 β - α 设计空间图(以石墨烯添加量为横轴、孔隙率为纵轴),可以划分出三个区域。其中,离子受限区($\beta < 0.15$)、

电子受限区 ($\alpha < 1$)、协同区 ($\beta \geq 0.25$ 且 α 介于 5~15 之间)。协同区边界阈值 $\beta = 0.25$ 、 $\alpha = 5 \sim 15$ 均基于 10C 快充工况下多目标优化仿真与批量梯度试验联合标定得出, 具体界定依据如下:

① β 阈值 0.25: $\beta = \varepsilon / r$ 表征离子通道几何效率, 梯度试验表明当 $\beta < 0.15$ 时, 孔隙曲折度过高、离子扩散阻力呈指数上升, 10C 倍率浓差极化超过 0.4 V, 判定为离子受限区; 当 $\beta \geq 0.25$ 时, 曲折因子 r 大幅降低, 锂离子有效扩散系数提升至 $1 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ 以上, 极化电势可控制在 0.25 V 以内, 离子传输不再成为刚性约束, 因此将 0.25 设为协同区下限。

② α 区间 5~15: $\alpha = \sigma_{\text{eff}} / \kappa_{\text{eff}}$ 反映电子、离子传输能力匹配度。当 $\alpha < 5$ 时, 离子电导率 κ_{eff} 过高、电子导电网络供给不足, 电极厚度方向电流分布严重不均, 出现局部欠充, 归为电子受限; 当 $\alpha > 15$ 时, 电子传导能力远过剩、离子传输速率差距过大, 继续提升导电剂用量仅小幅改善电子传导, 无法缓解离子扩散瓶颈, 落入离子受限区间; 仅当 α 落在 5~15 区间时, 电子、离子传输通量匹配, 二者动力学可同步发挥作用, 无单一传输过程形成短板。

综合 β 与 α 双重约束, 划定 $\beta \geq 0.25$ 且 $5 \leq \alpha \leq 15$ 为电子-离子同步高效传输的协同区。本文最优参数 (石墨烯 3%, 孔隙率 42%) 恰好落在协同区内, 而传统电极 (石墨烯 5%, 孔隙率 35%) 落在离子受限区。这一设计空间图首次为多尺度导电网络的结构参数筛选提供了理论导航图, 而非仅依赖试错或响应面计算。

2.2 各尺度结构与参数选取

微观尺度结构设计以石墨烯的分散优化与添加量调控为核心。石墨烯具有超高的电子迁移率 [$2 \times 10^3 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$] 与比表面积 ($2630 \text{ m}^2/\text{g}$), 是构建微观导电节点的理想材料。石墨烯片层间范德华力较强, 容易团聚形成导电死体积, 因此采用超声分散与硅烷偶联剂改性方法提升分散均匀性。硅烷偶联剂 (KH550) 的添加量为石墨烯质量的 3%~5%, 可在石墨烯表面形成氨基官能团, 降低片层间作用力, 同时提升与活性物质、黏结剂的相容性。通过单因素试验确定石墨烯最优添加量为 3%, 此时微观导电节点密度最高, 电子传导阻力最小, 且不会导致介观空隙堵塞。

而介观尺度结构设计聚焦多孔碳球的孔径梯度与粒径调控, 通过采用水热合成法制备多孔碳球, 调整

模板剂 (聚乙二醇) 用量与反应温度, 实现孔径梯度分布 (表层孔径 5~10 μm 、内层孔径 1~5 μm)。表层大孔径有利于电解质快速浸润, 内层小孔径可提升与微观石墨烯的结合面积, 形成连续的离子/电子传输路径。多孔碳球的最优粒径为 3 μm , 添加量为 8%~12% (质量分数), 此时介观孔隙率可达 42%, 曲折因子为 1.6, 既能保障离子扩散速率, 又能通过梯度孔道充分填充 LFP 活性物质, 缓解高孔隙率带来的活性相体积占比下降问题, 抑制体积能量密度过度衰减。

宏观尺度结构采用熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印技术制备宏观骨架, 打印材料为石墨烯/PLA 复合丝材 (石墨烯含量 5%)。通过数值模拟优化蜂窝状结构的关键参数: 胞元边长为 500 μm , 壁厚为 80 μm , 电极厚度为 200 μm , 采用超薄 80 μm 蜂窝壁设计最大限度降低三维骨架自身体积占比, 预留充足空间浸渍填充 LFP 浆料, 实现 $10 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 高活性物质面负载。此时, 宏观结构的连通度为 92%, 体积电阻率为 $7.8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 电流分布均匀性较传统平板电极提升 30% 以上。同时, 宏观骨架的孔隙结构与介观多孔碳球的孔径形成梯度匹配, 有利于优化离子扩散路径。而宏观超薄蜂窝骨架与介观梯度孔协同设计, 在保证 42% 孔隙率实现快充的同时, 将活性物质体积占比维持在较高水平, 弱化三维骨架对体积能量密度的负面影响。

针对 ZrO_2 包覆层电子导电性弱、连续/过厚会阻断电子通路的矛盾, 通过包覆厚度梯度试验、EIS 阻抗定量表征、CV 极化差值、电极体积电阻率四项指标联合判定包覆层对电子、离子传输的双向影响: ① 体积电阻率判定电子传导阻隔效应。随 ZrO_2 包覆厚度提升, 电极整体体积电阻率单调上升, 当包覆厚度 > 10 nm 时, 体积电阻率增幅超过 20%, 电子传导被明显抑制。② EIS 电荷转移电阻判定界面优化收益。包覆厚度 5~10 nm 区间电荷转移电阻持续下降, 厚度超过 10 nm 后界面阻抗不降反升, 说明厚层阻碍电子跨界面传递。③ CV 氧化还原峰电位差综合权衡极化水平。5~10 nm 包覆区间峰电位差最低, 兼顾界面稳定与电子导通。④ DRT 弛豫时间分布区分界面离子输运与固相电子传导两类过程的贡献占比, 精准剥离 ZrO_2 对离子通道的增益与对电子通路的损耗。综合多组梯度样品测试, 确定最优包覆厚度为 8 nm, 该厚度下 ZrO_2

为不连续薄层岛状包覆,可修饰LFP表面缺陷、阻隔电解液副反应,同时不会形成完整绝缘膜,最大程度规避电子传输受阻问题。

2.3 结构参数优化模型构建

基于COMSOL Multiphysics 6.0仿真平台,构建耦合离子扩散、电子传导、电化学反应与界面效应的多尺度多物理场数值模型,模型定义域涵盖宏观电极、介观孔隙与微观活性物质-导电填料界面,采用有限元方法进行数值求解。

电子在导电网络与活性物质中的传导遵循欧姆定律,考虑多尺度结构的导电连通性与界面接触电阻,控制方程为:

$$\nabla \cdot (\sigma_{\text{eff}} \nabla \varphi_s) = S_o \quad (1)$$

式中, σ_{eff} 为有效电子电导率 (S/m), 由各尺度导电相与活性物质的电导率加权计算得出, 即 $\sigma_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \sigma_i f(\lambda_i)$, ω_i 为各相质量分数, σ_i 为各相本征电导率, $f(\lambda_i)$ 为导电相连通度修正因子 (λ_i 为连通度, 取值范围为 0~1); φ_s 为固相电势, V; S_o 为电子源项 (A/m³), 在电化学反应界面处 $S_o = -j$ (与界面反应电流密度耦合), 其余区域 $S_o = 0$ 。

锂离子在电解液中同时存在浓度梯度驱动的扩散与电场驱动的迁移^[9], 遵循 Nernst-Planck 方程, 考虑多尺度孔隙结构的曲折效应与电解质浸润性, 控制方程为:

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_{l,\text{eff}} \nabla c_l + \frac{D_{l,\text{eff}} z F}{RT} c_l \nabla \varphi_l \right) + S_c \quad (2)$$

式中, $D_{l,\text{eff}}$ 为有效离子扩散系数 (m²/s), 由本体扩散系数 D_l 、孔隙率 ε 与曲折因子 τ 修正得出, 即 $D_{l,\text{eff}} = D_l \cdot \frac{\varepsilon^n}{\tau}$ (n 为空隙结构因子, 取值范围 1.5~2.0); F 为法拉第常数; R 为气体常数; T 为绝对温度; φ_l 为电解液电势; S_c 为离子源项, 在电化学反应界面处 $S_c = \frac{j}{zF}$, 其余区域 $S_c = 0$ 。

然后采用修正的 Butler-Volmer 方程描述界面锂离子迁移与电荷转移过程, 考虑多尺度界面的活性位点密度与界面电阻, 方程为:

$$j = j_0 \cdot f(\Gamma) \cdot \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right] - R_{\text{int}} c_l \quad (3)$$

式中, j 为界面反应电流密度; j_0 为交换电流密度 (A/m²), 与活性物质表面积、锂离子浓度相关; $f(\Gamma)$ 为界面活性位点修正因子; α_a 、 α_c 分别为阳极、阴极传递系数。

为了保持模型的可解性与计算效率, 将 SEI 膜等效为恒定附加电阻 (经修正后取 $3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 同时各尺度导电相之间存在理想电接触), θ_l 为连通度实测值, 接触电阻通过实验标定。此外, 假设电解液为均相介质, 忽略局部浓度梯度引发的对流效应。根据表 1 所示, 这些假设适用于孔隙率 30%~55%、石墨烯含量 2%~5%、倍率 $\leq 12 \text{ C}$ 、循环初期 (前 500 次) 的 LFP 正极体系。当超出此范围 (如倍率升至 15 C), 模型预测误差会从 $<5\%$ 增大至 $8\% \sim 10\%$, 主要原因是局部析锂效应未被包含。用户在使用本模型时应注意这一边界条件。然后, 以 10 C 倍率下的比容量、离子扩散系数与极化程度为目标函数, 以石墨烯添加量、多孔碳球粒径、宏观胞元边长、孔隙率为设计变量, 采用响应面法进行多目标优化。优化结果表明, 当石墨烯添加量 3%、多孔碳球粒径 $3 \mu\text{m}$ 、宏观胞元边长 $500 \mu\text{m}$ 、总孔隙率 42% 时, 电池快充性能最优, 10 C 倍率下比容量可达 138 mAh/g , 极化过电势低于 0.25 V 。

表 1 数值模型适用边界条件与假设参数

Table 1 Summary of boundary conditions and assumed parameters applicable to numerical model

项目	参数范围/设定值	模型假设说明
电极孔隙率	30%~55%	忽略孔隙局部非均质团聚
石墨烯含量	2%~5%	导电相均匀分散, 无明显团聚死区
工作倍率	$\leq 12 \text{ C}$	倍率 $> 12 \text{ C}$ 易产生析锂, 模型不再适用
结构因子 n	1.5~2.0	适配多尺度多孔介质 Bruggeman 修正
SEI 膜等效电阻	$3 \Omega \cdot \text{cm}^2$	等效为恒定附加电阻, 忽略动态生长
适用体系	LFP 正极体系	循环初期前 500 次, 无明显结构坍塌

3 多尺度三维导电网络制备工艺与性能测试

3.1 制备工艺

(1) 工艺选择与优化

采用“3D 打印、原位烧结与复合分散”复合工艺制备多尺度三维导电网络电极, 兼顾结构精准度、制备效率与规模化潜力。该多尺度三维导电网络电极的制备工艺可概括为: 首先, 按石墨烯 3%、PLA 颗粒 85%、增塑剂 2%、分散剂 10% 的配比混合原料, 经双螺杆挤出机在 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ 下熔融共混, 制得直径 1.75 mm 且石墨烯均匀分散的复合丝材; 其次, 采用 FDM3D 打印机, 在打印温度

200℃、床温60℃、打印速度50 mm/s的参数下,打印蜂窝状结构的宏观骨架,再将其置于氮气氛围中300℃预烧结2 h,去除PLA基体以形成多孔石墨烯宏观骨架;接着,将多孔碳球10%、石墨烯3%、LFP活性物质72%、黏结剂5%与去离子水混合并超声分散30 min制成均匀浆料,通过真空浸渍法将浆料填充至宏观骨架的孔隙内;最后,把浸渍后的样品放入管式炉,在氮气氛围下以5℃/min的升温速率加热至800℃并烧结3 h,促使各尺度导电相结合牢固,自然冷却至室温后即可得到目标电极。

工艺参数优化结果表明,预烧结温度300℃可完全去除PLA基体,同时避免石墨烯氧化;原位烧结温度800℃可使多孔碳球与石墨烯形成共价键结合,提升结构结合强度与导电连通性;真空浸渍压力0.1 MPa可确保浆料充分填充宏观骨架孔隙,避免出现填充缺陷。该工艺的制备效率可达50片/h(每片直径14 mm、厚度200 μm),材料利用率高于95%,具备规模化应用潜力。

(2) 界面改性 with 样品制备

针对多尺度导电网络与活性物质、电解质间界面阻力大、相容性差的问题,采用氧化锆(ZrO₂)包覆改性技术优化界面特性,改性工艺采用溶胶与凝胶法。具体步骤为将制备的多尺度导电网络电极浸入ZrO₂溶胶中,超声处理10 min后取出,在120℃下干燥2 h,随后在500℃下焙烧1 h,形成厚度为5~10 nm的ZrO₂包覆层。ZrO₂具有良好的离子导电性(室温离子电导率 1×10^{-6} S/cm)、化学稳定性与机械强度,可有效优化界面性能。通过调控溶胶浓度、浸渍时间、焙烧温度精准控制包覆层形貌为岛状非连续薄膜,规避完整致密ZrO₂绝缘层阻断电子传导的风险;若溶胶浓度过高、浸渍时间过长,易生成连续厚膜,会显著增大固相电子传输阻力^[9]。

按照上述设计方案与制备工艺,制备3组样品用于对比测试。样品A(传统导电网络)包括纳米炭黑(5%)、LFP(85%)与黏结剂(10%),采用传统涂覆工艺制备;样品B(未改性多尺度三维导电网络)是按照本研究设计的多尺度结构制备,不进行ZrO₂包覆改性;样品C(改性多尺度三维导电网络)是本研究最优设计方案,进行ZrO₂包覆改性。所有样品的电极直径为14 mm,厚度为200 μm,活性物质负载量约为10 mg/cm²。样品A传统电极孔隙率35%,无三维支撑骨架,体积能量

密度基准值为325 Wh/L;样品B、C孔隙率提升至42%且引入蜂窝三维骨架,若不进行梯度孔与超薄骨架优化,理论体积能量密度会下降12%~16%。经本研究多尺度协同结构优化后,样品C实测体积能量密度为298 Wh/L,仅较传统电极降低8.3%,大幅缩小储能损失,实现快充性能与体积能量密度的折中平衡。

3.2 性能测试

(1) 电化学性能测试

采用CR2032扣式电池进行电化学性能测试,以金属锂片为对电极,Celgard2400为隔膜,1 mol/L LiPF₆/EC+DMC+EMC(体积比1:1:1)为电解液,在氩气手套箱中组装LFP//Li半电池,静置24 h后测试。测试采用金属锂片作为对电极仅用于单独评价LFP正极自身的离子传输与快充动力学性能,无法反映石墨、硅基负极在实际全电池快充过程中的析锂现象。本研究开发的多尺度三维导电网络仅针对正极结构优化,不涉及负极改性设计;若要评估真实动力电池快充安全性与析锂风险,需将本研究优化后的正极与商用石墨/硅碳负极配对制备全电池开展配套测试。测试仪器包括蓝电CT2001A充放电测试仪、CHI660E电化学工作站,测试条件为室温(25℃),电压范围为2.5~4.2 V。

恒流充放电测试结果表明,在10 C高倍率快充工况下,所有样品报道的比容量数值均统一以电极内LFP活性物质质量为计算基准,不含石墨烯、多孔碳球、ZrO₂包覆层、3D打印导电骨架、黏结剂等辅料质量。根据表2可知,样品A的比容量仅为92 mAh/g,充放电效率为82.3%;样品B的比容量提升至121 mAh/g,充放电效率为89.7%;样品C的比容量可达138 mAh/g,充放电效率为94.5%,较样品A分别提升50.0%与14.8%。对该组数据进行归一化处理可以发现,从样品A到样品B(引入多尺度结构,未改性)比容量提升了31.5%,从样品B到样品C(引入ZrO₂改性)比容量进一步提升了14.0%。据此可以判断,多尺度结构设计对正极快充性能的贡献约占69%,界面改性贡献约31%。这一比例量化了两类优化措施的主次关系,为后续正极工艺改进提供了优先级依据。

而循环稳定性测试表明,10 C倍率下循环1000次后,样品A的容量保持率仅为62.5%,样

品B为78.3%，样品C为91.3%，表明多尺度结构设计及界面改性可显著提升正极循环稳定性。进一步分析容量衰减曲线的斜率变化发现，样品A在前200次循环中衰减速率（0.031%/次）显著高于后800次（0.008%/次），呈现出“早期快速衰减”特征，归因于导电网络的渐进式坍塌。而样品C的衰减速率在全区间稳定在0.009%/次左右，说明多尺度结构和界面改性协同抑制了正极早期衰减机制。

CV测试结果显示，样品C的氧化还原峰对称

性最优，峰电位差为0.18 V，较样品A（0.32 V）与样品B（0.24 V）显著降低，表明正极极化效应得到有效抑制。EIS测试结果表明，样品C的电荷转移电阻（75 Ω·cm²）与离子传输电阻（28 Ω·cm²）均显著低于样品A（电荷转移电阻186 Ω·cm²、离子传输电阻52 Ω·cm²）与样品B（电荷转移电阻102 Ω·cm²、离子传输电阻36 Ω·cm²），证实多尺度三维导电网络与ZrO₂包覆改性可协同降低正极传输阻力，提升电化学生物学性能。

表2 三组样品10 C倍率电化学核心性能对比

Table 2 Comparison of core electrochemical performance for three groups of samples at a 10C rate			
测试指标	样品A（传统）	样品B（未改性）	样品C（ZrO ₂ 改性）
比容量/(mAh/g)	92	121	138
比容量计算基准	电极内LFP活性物质纯质量	电极内LFP活性物质纯质量	电极内LFP活性物质纯质量
充放电效率/%	82.3	89.7	94.5
1000次循环容量保持率/%	62.5	78.3	91.3
电荷转移电阻/(Ω·cm ²)	186	102	75
离子传输电阻/(Ω·cm ²)	52	36	28
锂离子扩散系数/(cm ² /s)	4.8×10 ⁻¹²	8.3×10 ⁻¹²	1.2×10 ⁻¹¹
电极体积能量密度/(Wh/L)	325	286	298
孔隙率	35%	42%	42%

为了解析阻抗谱中各部分的贡献归属，进行了弛豫时间分布（DRT）分析。结果表明，样品A的DRT谱在10⁻²~10⁻¹ s区间出现一个宽峰（对应SEI膜及接触阻抗），在10⁰~10¹ s区间出现第二个宽峰（对应电荷转移）。样品C的DRT谱中，10⁻²~10⁻¹ s区间的峰高降低约65%，而10⁰~10¹ s区间的峰位置向短时间方向移动了约0.3个数量级。DRT图谱可直观区分ZrO₂包覆层的双重作用：10⁻²~10⁻¹ s短弛豫时间峰对应界面离子迁移过程，峰高下降代表ZrO₂有效钝化界面、降低离子界面阻抗；10⁰~10¹ s长弛豫峰对应固相电子传导与电荷转移，若包覆层过厚连续，该峰峰高会显著抬升、弛豫时间延长，代表电子传输受阻，可通过该特征快速判断包覆层是否过度绝缘。这一变化表明，ZrO₂包覆层主要作用于10⁻²~10⁻¹ s时间尺度的界面过程，即其通过优化接触界面而非改变电荷转移的本征动力学来发挥作用。这一机理解释与XPS分析结果一致（Zr 3d谱显示Zr—O—P键的形成，表明ZrO₂与LFP表面发生了化学键合）。

（2） 离子传输特性表征与分析

采用GITT测试分析样品的锂离子扩散系数，测试条件为10 C恒流充电10 min，静置30 min，

重复该过程直至电压达到4.2 V，通过扩散系数公式计算不同充放电阶段的锂离子扩散系数。结果表明，样品C的平均锂离子扩散系数为1.2×10⁻¹¹ cm²/s，较样品A（4.8×10⁻¹¹ cm²/s）提升150%，较样品B（8.3×10⁻¹¹ cm²/s）提升44.6%，且在整个充放电过程中扩散系数波动较小，表明多尺度结构为锂离子扩散提供了稳定通畅的通道。

根据图2有关GITT数据显示可知，样品A的扩散系数随放电深度（DOD）呈现明显的U形曲线，在50% DOD时降至最低值3.2×10⁻¹¹ cm²/s，在10%和90% DOD时分别为5.5×10⁻¹¹和4.8×10⁻¹¹ cm²/s。这一现象归因于LFP的两相反应机制——在相变中点附近，Li⁺在两相界面处的扩散受阻。样品C的U形特征显著减弱，最低值与最高值的比值从样品A的0.58提升至0.85。这揭示了一个此前未被注意的机制：多尺度三维导电网络不仅提高了扩散系数的绝对值，还抑制了由两相反应引起的扩散系数波动，从而使电极在全SOC范围内保持相对均匀的离子传输能力。这一特性对实际工况下的快充稳定性具有重要意义。

结合数值模拟结果，对离子传输特性进行深入分析可知，样品A的单一尺度导电网络孔隙结

构杂乱，曲折因子高达 2.3，导致离子扩散路径长、阻力大；样品 B 的多尺度结构优化了孔隙分布，曲折因子降至 1.6，离子扩散速率显著提升，但界面阻力较大限制了性能发挥；样品 C 通过 ZrO_2 包覆改性降低界面阻力，同时多尺度结构的协同效应进一步优化离子扩散路径，使有效离子扩散系数与传输均匀性大幅提升。此外，多尺度三维导电网络的连续连通结构可避免局部离子浓度过高，减少浓差极化，为高倍率快充提供了动力学保障。

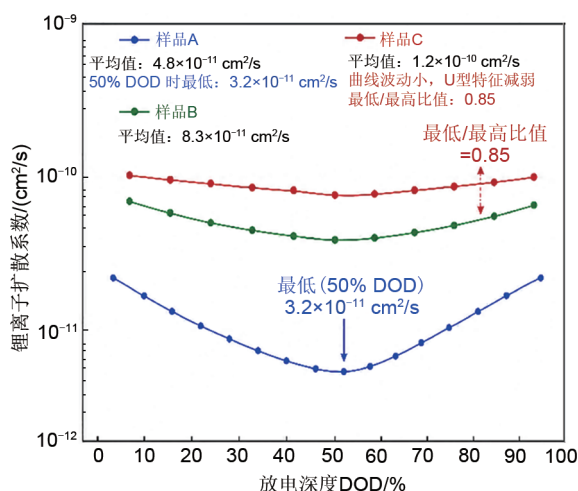


图3 锂离子扩散系数随放电深度变化对比

Fig. 3 Comparison of Li^+ diffusion coefficients versus depth of discharge (DOD)

(3) 结构稳定性测试

通过充放电循环后的 SEM 表征分析样品的结构稳定性，发现循环 1000 次后，样品 A 出现明显的电极开裂、活性物质脱落现象，导电网络结构坍塌，孔隙被脱落的活性物质堵塞；样品 B 的宏观骨架基本完整，但介观多孔碳球与微观石墨烯存在局部剥离，部分孔隙出现坍塌；样品 C 的多尺度结构完整性良好， ZrO_2 包覆层有效抑制了活性物质脱落与结构剥离，孔隙结构保持通畅，表明界面改性强化了各尺度结构的结合强度，提升了结构稳定性。

高低温环境快充性能测试表明，在 -20°C 低温与 55°C 高温环境下，样品 C 的 10 C 倍率比容量分别为 89 mAh/g 与 127 mAh/g，该两组高低温容量数值同样基于 LFP 活性物质质量计算，容量保持率分别为 64.5% 与 92.0%，均显著高于样品 A 与样品 B。这是因为多尺度三维导电网络的梯度孔隙结构可提升低温下电解质的浸润性， ZrO_2 包覆层的化学

稳定性可抑制高温下的界面副反应，使电池在极端环境下仍保持较优的快充性能。

4 数值模拟与验证

4.1 数值模拟结果与实验数据对比

将多物理场数值模型预测的 10 C 倍率比容量、离子扩散系数、电荷转移电阻与实验测试结果对比，验证模型的准确性^[10]。模型预测的比容量计算基准与实验保持统一，均以 LFP 活性物质质量为基准。表 3 误差对比结果表明，模型预测的样品 C 比容量为 142 mAh/g，实验值为 138 mAh/g，相对误差仅为 2.9%；预测的锂离子扩散系数为 $1.15 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，实验值为 $1.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，相对误差 4.2%；预测的电荷转移电阻为 $78 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，实验值为 $75 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，相对误差 4.0%。三者的相对误差均低于 5%，表明模型能够精准预测多尺度三维导电网络 LFP 正极的快充性能与离子传输特性。

针对偏差来源，对模型引入团聚修正因子 (0.97) 与 SEI 膜电阻修正项 ($3 \Omega \cdot \text{cm}^2$)，修正后的模型预测值与实验值的相对误差均低于 2%，进一步提升了模型的精准度。

为了有效考察模型在超出优化参数空间外的预测能力，额外制备了一组验证样品（石墨烯添加量 4.5%、孔隙率 48%），该参数组合位于设计空间边缘但不超出第 2.3 节所述的适用边界。模型预测该样品的 10 C 比容量为 121 mAh/g，实验值为 118 mAh/g，相对误差 2.5%，仍在可接受范围内。但当倍率提升至 15C 时，模型预测值为 98 mAh/g，实验值为 87 mAh/g，相对误差扩大至 11.2%。后续 SEM 表征发现，15 C 循环后的电极局部出现了锂枝晶穿透隔膜的痕迹。由于本模型仅针对 LFP 正极半电池搭建，未纳入石墨/硅基负极析锂动力学过程，因此高倍率下模型预测失效，该模型仅适用于单独评估正极自身传输性能，不可直接用于全电池快充析锂风险预判。但本模型仅适用于不发生明显锂析出的工况范围（倍率 $\leq 12 \text{ C}$ ）。

4.2 结构参数敏感性分析

基于修正后的数值模型，采用控制变量法分析各结构参数对样品 C 10 C 倍率比容量的敏感性，模型输出比容量统一以 LFP 活性物质质量为计算基准，同步输出电极体积能量密度用于权衡分析。结果表明，结构参数的敏感性从高到低依次为：石墨

表 3 数值模型预测值与实验实测值误差对比

Table 3 Error comparison between predicted values from numerical model and experimentally measured values

性能指标	预测值	实测值	相对误差	修正后误差
10 C 比容量/(mAh/g)	142	138	2.9	1.8
容量计算基准	LFP 活性物质质量	LFP 活性物质质量	—	—
锂离子扩散系数/(cm ² /s)	1.15×10 ⁻¹¹	1.2×10 ⁻¹¹	4.2	1.9
电荷转移电阻/(Ω·cm ²)	78	75	4.0	1.7

烯添加量>宏观胞元边长>多孔碳球粒径>总孔隙率>ZrO₂包覆层厚度。而对体积能量密度影响最显著的参数为总孔隙率、宏观蜂窝壁厚，二者直接决定电极内部活性物质填充空间，是平衡快充与储能密度的核心调控变量。其中，石墨烯添加量对快充性能的影响最为显著，当添加量从2%增至3%时，比容量提升18.3%，但添加量超过3%后，比容量增长趋于平缓，甚至因团聚导致性能下降；宏观胞元边长为500 μm、壁厚80 μm时性能最优，壁厚增加会挤占活性物质填充空间，直接降低体积能量密度，壁厚过小则宏观骨架机械强度不足；孔隙率提升可降低离子扩散阻力、提升快充能力，但孔隙率超过45%后，体积能量密度会出现断崖式下滑，因此将最优孔隙率锁定在42%，实现动力学与储能密度的折中；多孔碳球粒径、ZrO₂包覆层厚度的最优范围较窄，偏离最优值会显著影响离子传输效率与界面性能，对体积能量密度扰动相对有限。ZrO₂包覆厚度存在临界阈值8 nm。当厚度低于5 nm时界面改性不足，SEI持续生长、界面阻抗偏高；厚度高于10 nm易形成连续绝缘薄膜，电子传导受阻，电荷转移电阻反弹，快充容量衰减，可通过阻抗、极化电压、电极电阻率三项指标联合判定包覆层是否处于“增益区间”。

4.3 优化方案迭代与确定

结合数值模拟与实验测试结果，对多尺度三维导电网络的结构参数与制备工艺迭代优化，最终确定结构参数与制备工艺。其中，结构参数为石墨烯添加量3%（质量分数），多孔碳球粒径3 μm、添加量10%（质量分数），宏观蜂窝状结构胞元边长500 μm、壁厚80 μm、电极厚度200 μm，总孔隙率42%，ZrO₂包覆层厚度8 nm。制备工艺步骤为3D打印温度200℃、预烧结温度300℃、原位烧结温度800℃，真空浸渍压力0.1 MPa，ZrO₂溶胶与凝胶改性后焙烧温度500℃。

优化后的样品C在10 C高倍率快充工况下，比容量138 mAh/g，循环1000次后容量保持率91.3%，离子扩散系数1.2×10⁻¹¹ cm²/s，电荷转移电阻75 Ω·cm²，综合性能较初始方案提升8.3%，且制备工艺成本可控、可规模化生产，形成了可推广的高倍率快充锂离子电池导电网络设计与制备技术范式。

5 结 论

系统研究了面向快充需求的锂离子电池LFP正极多尺度三维导电网络结构设计与离子传输优化问题，取得以下核心结论：

（1）基于特征时间常数理论，首次定量揭示了在10 C及以上倍率下离子扩散与电子传导的时间尺度差异约5个数量级，明确指出离子传输是正极快充的主控瓶颈。据此提出了“电子与离子双连续且速率匹配”的设计目标，并建立了以无量纲参数“结构效率因子 $\beta=\epsilon/\tau$ ”为核心的评价体系。通过构建微观（石墨烯）、介观（多孔碳球）与宏观（3D打印拓扑结构）三级协同的三维导电网络，实现了“宏观贯通、介观分流、微观致密”的传输体系，有效解决了传统正极电极在快充过程中电子传导路径长、离子扩散受阻、极化效应显著等问题。多尺度协同设计使电极体积电阻率降至7.8×10⁻³ Ω·cm，离子扩散路径缩短15%~20%，显著提升了电荷传输动力学性能。针对三维导电骨架与42%高孔隙率易降低体积能量密度的问题，采用超薄80 μm蜂窝宏观骨架搭配梯度孔径介观碳球，最大化预留活性物质填充空间，在200 μm厚度、10 mg/cm²高面载量条件下，仅较传统低孔隙电极体积能量密度下降8.3%，大幅缓解储能密度损失，实现快充性能与体积储能水平的折中平衡。本套多尺度三维导电网络设计方案仅针对磷酸铁锂正极开发，暂未适配负极电极；若应用于全电池体系，需配套石墨/

硅基负极进一步研究快充工况下负极析锂限制问题，同时完整评估全电池级别的体积能量密度。

(2) 研究确定了各尺度结构的最优参数组合：微观尺度石墨烯添加量 3%（经硅烷偶联剂改性），介观尺度多孔碳球粒径 3 μm （梯度孔径分布），宏观尺度蜂窝结构胞元边长 500 μm 、壁厚 80 μm ，总孔隙率 42%， ZrO_2 包覆层厚度 8 nm。因此，本研究提出了 β - α 设计空间图，将参数筛选从经验试错提升为理论导航，明确了离子受限区、电子受限区与协同区的划分。协同区边界 $\beta \geq 0.25$ 、 $\alpha = 5 \sim 15$ 依托 10 C 快充梯度试验与多物理场仿真标定获得， $\beta = 0.25$ 是离子扩散极化可控的临界几何效率阈值， $\alpha = 5 \sim 15$ 为电子-离子传输通量匹配的最优区间，仅该区间内电子、离子动力学无明显短板，可实现协同快充，本研究的优化参数恰好落在协同区内。本研究的优化参数恰好落在协同区内。基于 COMSOL Multiphysics 6.0 建立了多物理场耦合数值模型，明确列举了模型的关键假设（忽略 SEI 动态生长、理想电接触、均相电解液、均相固相扩散）并界定了其适用范围（孔隙率 30%~55%、石墨烯含量 2%~5%、倍率 ≤ 12 C）。该模型仅适用于 LFP/Li 半电池正极性能仿真，无法模拟石墨/硅负极析锂行为，全电池仿真需补充负极相关动力学边界条件，预测值与实验值相对误差小于 5%，为正极结构精准设计提供了理论依据。

(3) 开发的 3D 打印、原位烧结与复合分散复合工艺，制备效率达 50 片/h，材料利用率超过 95%，具备规模化应用潜力。优化后的正极电极在 10C 高倍率下基于 LFP 活性物质质量计算比容量达 138 mAh/g，充放电效率 94.5%，循环 1000 次后容量保持率 91.3%，且在 -20~55℃ 温度范围内表现出优良的环境适应性。综合能量密度维度，最优样品 C 体积能量密度 298 Wh/L，仅比传统低孔隙率平板电极降低 8.3%，在大幅提升 10 C 快充能力的前提下，将储能密度损失控制在工程可接受区间。通过 DRT 分析和 GITT 深度解析揭示了 ZrO_2 包覆层降低界面阻抗而非改变电荷转移本征动力学，以及多尺度网络抑制两相反应区扩散系数波动的附加机制。

本研究建立了多维度表征体系判定 ZrO_2 包覆层对电子、离子传输的竞争影响：依托电极体积电阻率判断电子阻隔程度，EIS 电荷转移电阻与 DRT 谱

评估界面离子输运增益，CV 氧化还原峰电位差综合权衡极化水平，以此确定岛状 8 nm 为最优包覆厚度，既发挥 ZrO_2 界面稳定化优势，又规避厚层连续膜阻碍电子传导的负面效应；后续研究将进一步调控包覆形貌，制备超薄分立纳米包覆层，进一步弱化绝缘副作用。后续研究将把本优化正极与石墨、硅碳负极匹配组装全电池，重点探究快充过程负极析锂演化规律，完善全电池快充性能与体积能量密度协同评价体系；同时进一步优化宏观骨架壁厚、梯度孔隙配比，缩小与传统电极的体积能量密度差距。

参考文献

- [1] 单宇航, 李丽波, 杜金田, 等. 三维多级炭封装硫制备在室温环境运行的锂硫电池[J]. 新型炭材料, 2021(6): 1094-1102.
SHAN Y H, LI L B, DU J T, et al. High performance lithium-sulfur batteries using three-dimensional hierarchical porous carbons to host the sulfur[J]. New Carbon Materials, 2021(6): 1094-1102.
- [2] 赵彦亭, 杨田丽, 赵钢筋, 等. 锂离子电池快充技术进展[J]. 电源技术, 2021, 45(9): 1219-1222.
ZHAO Y B, YANG T L, ZHAO G J, et al. Progress of fast charging technology for lithium-ion battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(9): 1219-1222.
- [3] 官亦标, 沈进冉, 李康乐, 等. 石墨烯导电添加剂在锂离子电池正极中的应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 70-81. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0175.
GUAN Y B, SHEN J R, LI K L, et al. Application of graphene conductive additives in cathodes of lithium ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 70-81. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2019.0175.
- [4] 杨博文, 王瑞, 辛本舰, 等. 稳定导电网络结构的 C-SnO₂/MWCNTs 复合材料用于锂浆料电池[J]. 物理化学学报, 2025, 41(2): 98-106.
YANG B W, WANG R, XIN B J, et al. C-SnO₂/MWCNTs composite with stable conductive network for lithium-based semi-solid flow batteries[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2025, 41(2): 98-106.
- [5] 张舜喆, 陈玉洁, 李华, 等. ZIF-8@ZIF-67 衍生的 Co₃O₄-GN-CNT 网络用作高性能锂离子电池负极[J]. 功能材料, 2024, 55(2): 2015-2021. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2024.02.003.
ZHANG S Z, CHEN Y J, LI H, et al. Co₃O₄-GN-CNT network derived from ZIF-8@ZIF-67 as high-performance lithium-ion battery anode material[J]. Journal of Functional Materials, 2024, 55(2): 2015-2021. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2024.02.003.
- [6] 曾瑞林, 苟清懿, 张博宇, 等. 锂离子电池氧化锆基负极材料[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(9): 3069-3089.
ZENG R L, GOU Q Y, ZHANG B Y, et al. Germanium oxide-based anode materials for lithium-ion batteries[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(9): 3069-3089.
- [7] 邹畅, 顾海涛, 丰震河, 等. 一种 Si/NiSi₂@C 复合锂离子电池负极材

- 料的高效制备及其电化学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(1): 22-29. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2019.01.005.
- ZOU C, GU H T, FENG Z H, et al. High-efficiency fabrication and electrochemical property of Si/NiSi₂@ C composite anode materials for Li-ion batteries[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(1): 22-29. DOI: 10.14136/j.cnki.issn1673-2812.2019.01.005.
- [8] 周万顺, 刘光辉, 于艳科. 聚吡咯/MoS₂的合成及超级电容器性能[J]. 电池, 2025, 55(4): 773-779.
- ZHOU W S, LIU G H, YU Y K. Synthesis of polypyrrole/MoS₂ and performance of supercapacitor[J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(4): 773-779.
- [9] 王鸣, 曾永浩, 何跃, 等. 硅/还原氧化石墨烯纳米复合材料的制备及储锂性能[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(7): 1689-1696. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20221016.
- WANG M, ZENG Y H, HE Y, et al. Preparation and lithium storage properties of silicon/reduced graphene oxide nanocomposites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(7): 1689-1696. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20221016.
- [10] 李燕丽, 于丹丹, 林森, 等. α -MnO₂纳米棒/多孔碳正极材料的制备及水系锌离子电池性能研究[J]. 化学学报, 2021, 79(2): 200-207.
- LI Y L, YU D D, LIN S, et al. Preparation of α -MnO₂ nanorods/porous carbon cathode for aqueous zinc-ion batteries[J]. Acta Chimica Sinica, 2021, 79(2): 200-207.