

外加物理场对锂离子电池界面反应的影响

吕苗苗^{1,2}, 胡欣怡^{1,2}, 王 鹏^{1,2}, 周俊飞^{1,2}, 朱 煜^{1,2}, 张宁霜^{1,2*}

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃低碳能源化工重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 本文综述了外加物理场对界面调控的研究进展, 详细阐述了外加物理场在加强传质、抑制锂枝晶的生长、降低电化学阻抗和改善金属沉积形貌等方面的作用机理, 并对锂电池中外加物理场的研究现状和发展前景做了总结和展望。

关键词: 锂离子电池; 界面反应; 物理场; 界面阻抗; 固态电解质界面膜

中图分类号: TQ086

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0023-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.005

Effect of external physical field on the interfacial reaction of lithium-ion batteries

LV Miao-miao^{1,2}, HU Xin-yi^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, ZHOU Jun-fei^{1,2},
ZHU Yu^{1,2}, ZHANG Ning-shuang^{1,2*}

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Low Carbon Energy and Chemical Engineering, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This review summarizes research progress in interfacial modulation via external physical fields, elaborates thoroughly on the underlying mechanisms of external physical fields for boosting mass transfer, restraining lithium dendrite propagation, lowering electrochemical impedance, and optimizing metal deposition morphology. Finally, the current research status and future development prospects of external physical fields in lithium batteries are summarized and discussed.

Key words: lithium-ion batteries; interfacial reaction; physical field; interfacial impedance; solid electrolyte interface film

随着社会的发展, 人类对能源的需求增加, 导致传统化石燃料消耗加剧以及生态环境的恶化, 这使得人们将视线逐渐转向可再生能源^[1]。在绿色能源储能领域中, 锂离子电池(LIBs)因具有高能量密度、高输出电压和长循环寿命的特点, 被广泛应用于手机、电脑、电动汽车和其他便携式产品中。目前商用锂离子电池的性能依然还存在提升空间, 研究者们常从正负极材料、新型电解液配方等方面寻找优化方法^[2], 最常见的是使用新型添加剂提升固体电解质界面膜性能或者对电极材料改性。然而无论是开发新型的添加剂或者电极材料, 都需要消耗大量的时间和成本, 不能短时间看到效果。令人欣喜的是, 近几年提出了外加物理场的策略来提高锂离子传输速率、改变锂沉积形貌、调控相界面形貌及组分, 达到增强电池性能的目的。

常见物理场一般包括磁场、电场、温度场、声场、力场等。其中, 采用磁场强化传质、调控金属形貌技术在磁电化学中较为常见。锂离子为顺磁离子, 在外加磁场下可被磁化进行微观运动, 从而实现原位

调控锂离子的沉积; 通过改变施加电场的大小和方向, 可以改变电极界面处锂离子的浓度梯度, 起到抑制锂枝晶生长、增强传质的作用^[3]; 适当提高温度可增强电解液中微观粒子运动, 提高锂离子扩散系数^[4]; 超声技术也可以作为强化传质、调控界面的手段以优化电池性能; 在LIBs的装配及电化学反应过程中容易产生压力, 适当的压力可以使界面接触更均匀紧密, 降低界面阻抗。本文中综述了磁场、电场、温度场、声场、力场对界面反应的作用机理, 总结了国内外近年来利用外加物理场进行界面调控的研究进展, 并对外加物理场的发展以及前景做出总结和展望。

1 物理场对锂离子电池界面反应的作用机理

外加物理场可以通过提高传质速率、均匀锂沉积、调控电极/电解液界面膜(SEI膜)组分及结构等方式来影响锂离子电池的性能。外加物理场主要有磁场、电场、温度场、声场和力场等, 本节将描述各个物理场的作用效果, 并分析其作用机理。

收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2026-07-11

基金项目: 兰州市青年科技人才创新项目(2020-QN-90); 金昌市重点科技计划—工业类(2023GY013z)

作者简介: 吕苗苗(2000-), 女, 硕士生; 张宁霜(1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电化学储能技术与工程, 通讯联系人, ningshuangzh@163.com。

1.1 磁场

19 世纪法拉第提出了电磁感应定律,为电磁效应的应用奠定了基础。20 世纪至今,分子磁场、原子磁矩、电子自旋等理论先后被提出,使磁理论体系逐渐完整。物质都具备磁性,并且在显示磁性的微小区域(即磁畴)存在自己的磁矩。根据同性磁场相互排斥,异性磁场相互吸引的特点,各个磁畴的磁矩方向不同,所以磁场互相抵消,宏观上便不显磁性。对不显磁性的物质外加磁场改变其性质(即磁化过程),也就是说可以通过磁场调控得到理想的磁畴排列,实现对物质的磁性调节^[5]。

目前,微 MHD 效应开始应用于降低 Li^+ 极化浓度和抑制枝晶的生长等方面。当电化学过程在磁场中进行时,等离子体和磁场相互作用产生磁流体动力学效应(MHD 效应,如图 1 所示)。电解质中的带电物质受到垂直于电场和磁场的洛伦兹力从而可以改变移动方向, Li^+ 在突起周围盘旋,有利于降低浓度极化,抑制锂枝晶的生长,形成致密均匀的界面膜^[6]。

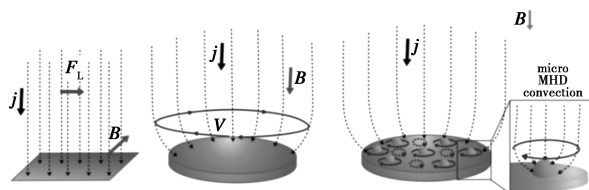


图 1 MHD 效应示意图

磁场也会通过自由基机制影响自旋效应(图 2)。在外加磁场的作用下,自由基的自旋排列会从无序状态变为有序状态,使得其表面能发生了变化,这会影响反应物的吸附,从而改变催化剂的催化活性和反应物的反应活性^[7]。

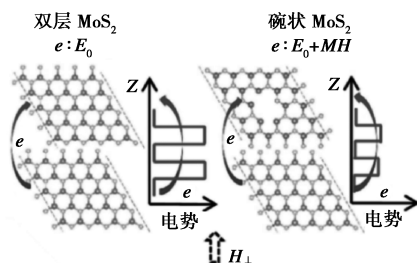


图 2 自旋效应示意图

1.2 电场

19 世纪法拉第提出了“电荷的周围存在着由它产生的电场”这一观点,随后大量的物理学理论和实验不仅证实了这一观点,还证明了电场是一种客观存在的物质,任何带电体在电场中都将受到电场力的作用。随着对电场及其性质逐渐深入的研究,

人们开始利用外加电场对锂离子电池的电极/电解液界面性能进行调控。

首先,外加交流电场能够影响锂离子在电极界面的沉积形貌(图 3)。电池充电时, Li^+ 在负极表面突起处优先还原,这会导致不均匀的锂沉积。外加交流电场可以使负极处 Li^+ 受到不断变化的库伦力,此时电场方向平行于负极表面,与 Li^+ 运动方向垂直,库伦力促进了锂离子在负极表面的均匀分布,从而降低浓度梯度和局部电流密度的不均匀性,引导锂离子在负极表面沿着特定路径运动,避免局部富集,实现枝晶的抑制。另外,外加直流电场也可以促进锂离子传质动力学。此时外加电场方向平行于内部电场,与 Li^+ 运动方向相同,通过增加的电场强度可加速 Li^+ 迁移和扩散,削弱沉积界面处浓度梯度,促进均匀的锂沉积^[8]。

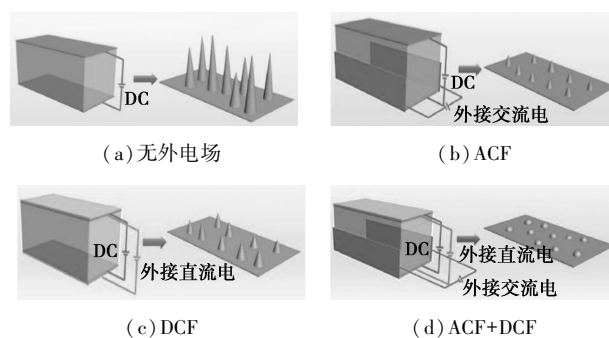


图 3 外加电场抑制锂枝晶生长示意图

外加电场可以有效增强阴阳离子极性以及缔合性。在电场中,带负电荷的阴离子倾向于在负极表面积聚,阴阳离子形成缔合物的聚合能力会增强,因此电场可通过这种方式增加溶剂化结构中阴离子的含量,富含阴离子的溶剂化鞘在电极表面更容易发生脱溶剂化,有效提高界面处离子电导率^[9]。交流电场的方向变换时,溶剂化鞘随电场的方向移动,并且移动速率随着交流频率的增加而增加,40 Hz 的电场足以将溶剂化鞘均匀分布在电极表面上,从而促进 SEI 膜成分及结构的均匀性^[3]。

1.3 温度场

温度是影响锂离子电池性能的关键因素之一。适当提升温度会使 SEI 膜中的无机成分增多,可增强锂离子传输;升高温度也会引起 SEI 膜增厚,使其表现出更稳定的特性,这主要是因为高温促进了 Li^+ 以外其他组分在 SEI 膜中的传输,同时界面膜增厚减少了电解液的持续消耗^[4]。此外,高温会使聚合物膜中的结晶畴在接近熔点时发生熔化,分子链运动能力增强,流动性提高,进而提升离子电导率^[10]。

但温度过高会使电极-电解液界面的副反应加剧,可能带来产气、短路等安全隐患,使电池的循环寿命和容量发生大幅衰减。而在低温环境中,电解液黏度增加、电导率下降,导致锂离子扩散缓慢,易发生不均匀沉积诱发锂枝晶的生长;此外,低温下带电子迁移能力减弱,难以有效穿过电极与电解液之间的钝化膜,膜阻抗显著增大。

1.4 声场

超声效应是超声波导致介质发生物理化学变化引起的。在锂离子电池中,超声主要通过机械效应、空化作用和热效应等影响电池界面性能。超声的机械效应在宏观上可以促进固体物质在液体中的分散,在压电材料和磁致伸缩材料中引起感生电极化和感生磁化;在锂电池中超声的机械效应可以提高传质速率,使锂离子在锂金属表面均匀沉积,从而形成性能更均匀致密的 SEI 膜。超声场可使液体内部出现拉应力从而形成负压,压强的降低使原溶于液

体中的气体过饱和逸出,成为小气泡,空化效应就是利用周围液态介质的振动使气泡不断运动、长大、破灭,空化气泡破裂产生巨大的瞬时压力,形成微射流,从而影响界面传质及界面均匀性、光滑平整度等,进而提升循环稳定性及能量密度^[11]。除此之外,由于超声波频率高、能量大,被介质吸收时会产生显著的热效应,可使离子迁移速度加快。

通过机械效应、空化效应和热效应,超声可以影响 Li^+ 在界面中的传输过程。一方面,超声波可促进电极表面成分的更新。由于施加超声后产生的流体微射流和压力波的作用,在电极表面形成的钝化膜被部分破坏甚至清除,有利于促进 Li^+ 传输和均匀沉积。另一方面,通过超声振荡提高了电解液中 Li^+ 的动态能量,从而提高传质速率^[12]。另外,超声波还可以防止电解质的分解产物在电极表面堆积,促进其从电极向电解液本体的扩散,从而促进 Li^+ 传输和添加剂的后续分解,提高添加剂的利用率(图 4)^[13]。

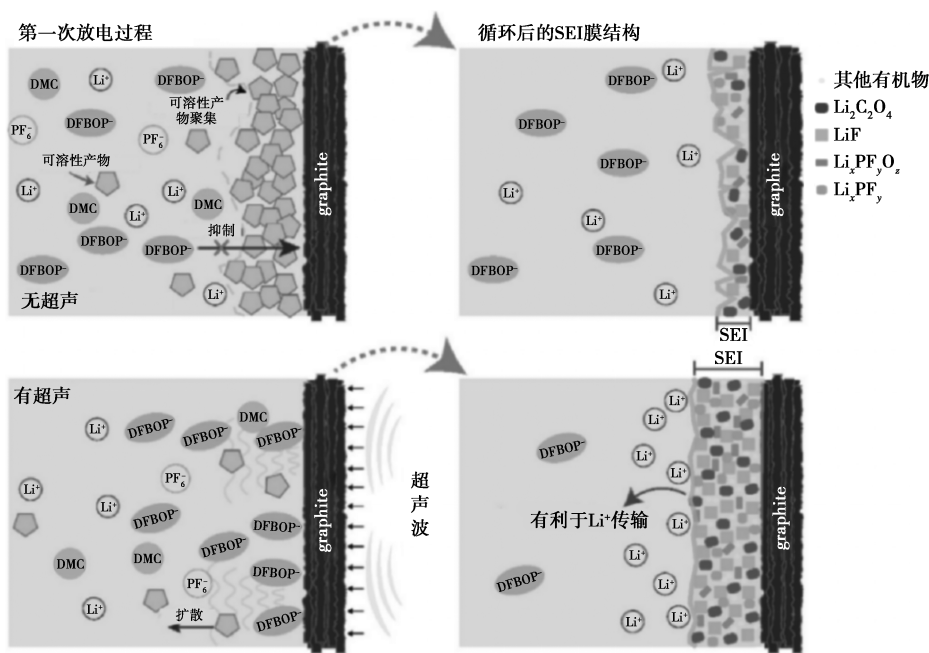


图 4 超声促进添加剂分解产物扩散机理

1.5 力场

锂离子电池从装配到应用会受到各种力场作用。封装电池时压力不足会造成电极和电解质界面接触不良,增大界面转移阻抗;压力过大会导致隔膜部分闭孔,影响 Li^+ 的迁移,增加内阻,最终导致容量衰减。适当的外部压力能有效降低电池组件的界面接触电阻,保证电池各组件紧密接触,并优化电流分布,防止局部失效;另外,实施可控的外部压力可以降低枝晶形成和气体生成的风险^[14]。电池受到的压力还包括脱嵌锂过程及内部副反应造成的体积变

化而产生的压力^[15]。内压的波动不仅会导致极片龟裂和脱落、锂枝晶的生长及死锂的增多,还会破坏电池结构,造成电池鼓包、破裂等。但对于固态电解质而言,适当提升压应力有利于锂离子的扩散,能够有效减少电解质裂纹,防止锂枝晶刺穿电解质。另外在电池充放电过程中,电极/电解液界面处晶格间距变化及 SEI 膜持续生长造成的应力容易产生界面处空孔,增加界面阻抗。调节压力可使负极锂在压力下的蠕变速率高于电流导致的锂剥离速度,能够有效避免空孔的形成,减少电池的体积膨胀,抑制极

片的开裂,还能降低电池的内阻和极化,增强循环稳定性(图 5)^[16-17]。

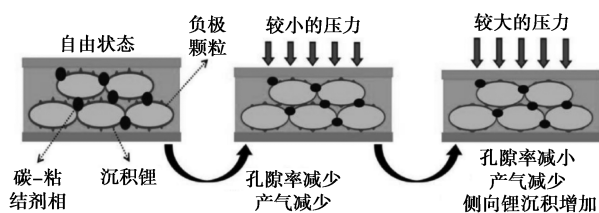


图 5 外部压力抑制枝晶生长示意图

2 外加物理场在锂电池中的应用

越来越多的研究证明外加物理场对锂离子电池的界面反应及界面处各物理过程会产生影响,进而影响界面性质;其在加强传质,抑制锂枝晶的生长、降低电化学阻抗、改善金属沉积形貌和影响催化活性等方面都有积极作用。本节总结了这些非接触能量传递方法的研究进展。

2.1 加强传质

锂离子电池的充放电是 Li^+ 和电子在正负极之间通过电解质和外部电路的协同迁移进行的。由于涉及固液相之间的界面反应,界面传质过程在整个电池的反应动力学中占据主导地位。增强界面传质对于提高充放电速率,强化电池性能等具有重要意义。

电解质中的带电粒子受到垂直于电场和磁场的洛伦兹力会改变移动方向。Yu 等^[18]通过设计实验,使带电粒子在电解质中螺旋并诱导对流,有效地促进了 Li^+ 的传质和均匀分布;另外在沉积过程中,洛伦兹力可以使带电的 Li^+ 旋转搅拌电解质,从而加速传质并促进电极反应;在正极材料的制备过程中,磁场通过影响晶体的成核和生长来影响其最终形态,导致反应速率和电池循环性能的变化。Sagar 等^[19]利用外加磁场作用于具有特定缺陷的碳包覆二氧化硅(C-SiO_2)负极,通过缺陷在磁场下形成的纳米磁体效应产生负磁阻(NMR),从而有效排列电荷载流子、显著降低电极阻抗,大幅提升了离子传输动力学及倍率性能。

在温度方面,适当提升温度有利于加剧热运动,增强界面传质。不过,Rodrigues 等^[4]发现在 90°C 下形成的更厚的 SEI 膜会减缓 Li^+ 传输,但膜的弹性及电解质对石墨的润湿性得到了增强,适当提升温度在某种程度上可以辅助构建起钝化作用的界面膜。

不同于高温条件下 SEI 膜厚度增加,超声处理可以减小扩散层的厚度,增加极限扩散电流密度,进一步增强传质。超声波的空化、机械效应不仅具有

促进电解液渗透及物质均匀扩散的作用,还可以破坏电极表面不均匀的钝化层,减小离子扩散阻力,提升离子迁移速率。Li 等^[13]证明了添加剂 LiDFBOP 在电极表面分解产生的可溶性产物会积累成浓度屏障,其团队利用超声波空化效应——通过微气泡破裂产生的高压冲击波和微射流打破扩散限制动力学瓶颈,促进界面产物扩散;同时降低还原分解能垒,促使 LiDFBOP 更多地分解生成富含无机物的 SEI 膜,促进界面离子传导,降低阻抗。

在传统的小电流恒流放电(CC)模式下,锂盐型添加剂分解产生的可溶性产物堆积在电极表面,阻碍了后续的分解,使添加剂利用率降低。所以 Li 等^[20]采用交流脉冲(AC)放电技术,通过充、放电脉冲的周期性切换,促进添加剂的分解成膜,这种方法既有利于促进可溶性产物扩散,为添加剂的分解提供更多的反应位点,又能减轻电子聚集和电池极化(图 6)。

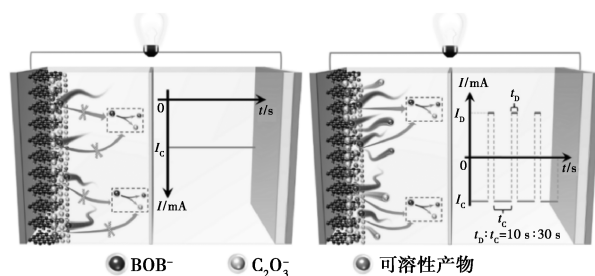


图 6 交流脉冲充放电技术促进添加剂的分解示意图

2.2 抑制锂枝晶生长

锂枝晶的形成是由于金属锂负极表面凹凸不平,突起处电子电荷分布增多,吸引更多的 Li^+ 还原,还原的活性锂在电解质和 SEI 膜之间的界面上发生不规则沉积,产生类似树枝状的锂晶体。

通过外加磁场可以改善锂沉积的形态和结构。 Li^+ 在磁场作用下受到洛伦兹力的作用,促使其螺旋移动并产生 MHD 效应,该效应降低了 Li^+ 浓度梯度,从而抑制枝晶的生长,得到均匀和致密的渡锂层^[6];通过微 MHD 效应还可以显著细化金属枝晶的微观结构和方向。Shen 等^[21]在负极施加 350 mT 的磁场,产生的 MHD 效应可以有效地促进 Li^+ 的传质和均匀分布,抑制枝晶生长,获得均匀光滑的锂沉积层;同时磁场的叠加可提高传导干扰并降低电压过电势,从而增强了循环性能。

Wang 等^[8]通过外部叠加的交流(AC)和直流(DC)电场对抑制锂枝晶形成的作用机制进行了数

值分析。通过耦合相场、电场和离子浓度场建立了预测锂枝晶生长的理论模型。垂直于内场施加的外部 AC/DC 场通过扭曲电场分布来增强锂离子扩散,从而降低电极表面附近的浓度梯度和局部电流密度。类似地,平行于内部场排列的 AC/DC 场通过经由增强的电场加速锂离子迁移和扩散来促进均匀的锂沉积。因此,交直流场的同时叠加显示出最佳的枝晶抑制效果。

Lin 等^[22]综合利用了外加压力和致密的 Li_3P 和 LiCl 界面层,将外加压力有效传递到锂电极表面,从而减少了 Li^+ 和电解质之间的副反应,实现压力对锂枝晶的有效抑制。Shen 等^[23]通过构筑力学-电化学相场耦合模型,对外加压力引起的内应力分布和枝晶形貌的系统分析,揭示并量化了外部压力对锂枝晶生长的影响机制。外部压力能有效调控锂沉积形貌,当压力足够大时,会在枝晶尖端形成高压区,迫使锂离子横向扩散,从而抑制枝晶纵向分支生长,使其转变为光滑致密结构。然而,外压也会使应力集中点从枝晶分叉处转移至根部,虽抑制分叉但可能引发根部断裂形成“死锂”。该效应受电解质弹性模量调控,因此需优化压力以平衡枝晶抑制与断裂风险(图 7)。

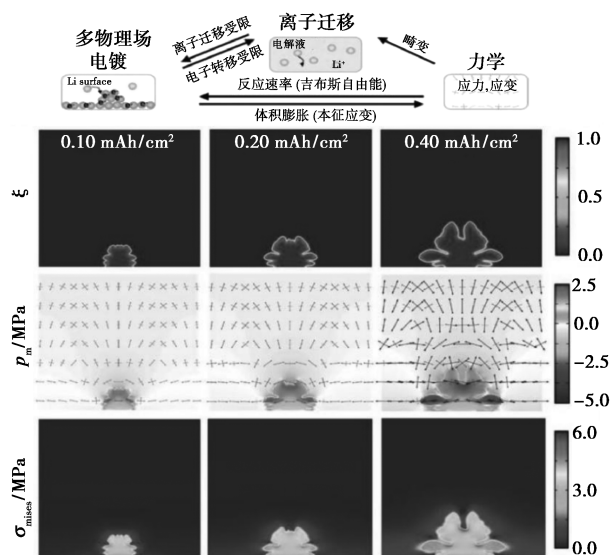


图 7 锂电池多物理场示意图及力学-电化学相场耦合模型

Zhang 等^[24]引入超声波技术以解决锂金属电池中锂枝晶生长引发的安全隐患和性能衰减问题。研究通过在充放电过程中施加特定频率的超声波,利用机械效应与空化效应实现双重调控:一方面促进锂离子均匀沉积,抑制枝晶不规则生长,避免枝晶过度生长刺穿隔膜;另一方面通过空化气泡的溃灭与微

射流作用破碎已形成的枝晶,使其重新参与锂离子的传输与沉积过程,有效抑制了锂枝晶的生长(图 8)。

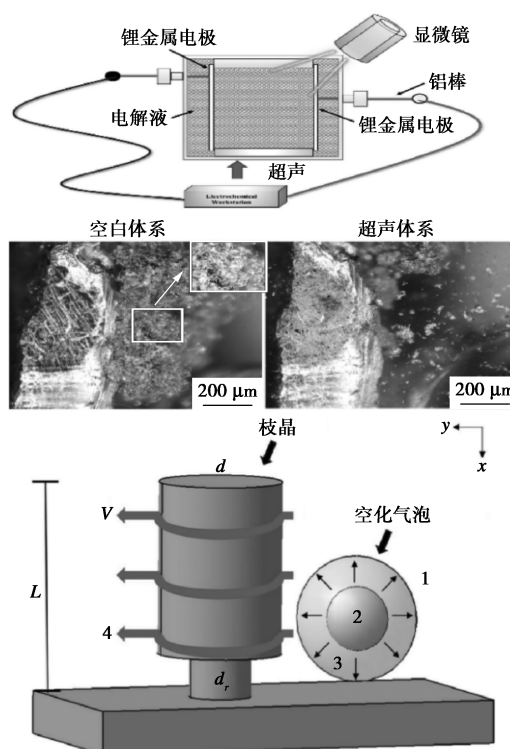


图 8 超声波作用机理、效果及空化气泡与枝晶间的相互作用

Li 等^[25]通过相场模拟,系统研究了锂枝晶生长对温度的依赖性机理。研究揭示了温度对锂离子扩散、沉积过程以及枝晶成核与生长动力学的显著影响,发现温度变化会调控锂离子在电极/电解质界面的传输行为,进而影响枝晶的形貌特征和生长速率。基于模拟结果提出了优化电池工作温度区间和电解质设计的策略,为抑制锂枝晶生长、提升锂金属电池的安全性和循环稳定性提供了理论指导(图 9)。

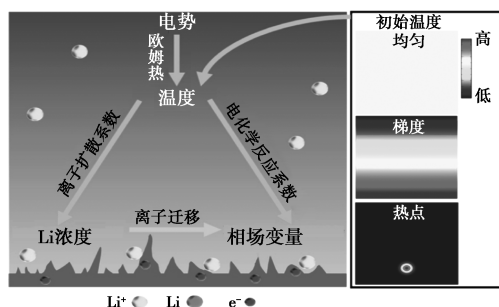


图 9 温度场对锂枝晶形貌(利用相场变量描述)的影响示意图

2.3 降低电化学阻抗

电化学阻抗测试是一种通过施加小幅正弦交流电信号并测量系统响应,来研究电极/电解质界面电

化学过程的技术,能够提供关于电荷转移、离子扩散、界面结构等动力学信息,并且可以通过阻抗谱分析揭示电池内部的复杂过程。

电化学阻抗和电池的倍率及长循环性能息息相关。Sharafi 等^[26]将 $\text{Li-Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO) 界面的稳定性和动力学表征为温度和电流密度的函数,采用快速热压技术使多晶 LLZO 致密化,通过加热室温 LiLLZ 界面电阻急剧降低。

Gupta 等^[10]研究了不同温度及外加压力下聚氧化乙烯(PEO)的 Li/PEO-Li TFSI/Li 对电池界面电阻和体相电阻的变化;在 60、80℃,界面阻抗随着压力的增加呈现递减趋势,与膜厚度的减小一致,并在一定压力后趋于稳定;100℃时电池阻抗突然下降,可能是因为锂枝晶的生长使表面积呈指数增加,也减少了 2 个电极之间的有效距离,从而降低了电压。

超声对电池负极具有明显去极化效果,不仅通过降低扩散层的厚度和增加极限扩散电流密度强化了电化学体系的传质过程,更是提高了电极动力学行为,消除高速充电时的正极过电位^[27-28]。

2.4 其他

除了以上所述的常见界面问题外,外加物理场还在其他方面有研究潜力。

Gong 等^[29]提出了一种非侵入性的“再生”策略,通过磁电化学协同活化(MEA)来增强 NCM 基电池的电化学性能。通过对锂离子电池正极材料施加外部磁场,在电化学激活过程中诱导 Ni^{3+} 从高自旋态向低自旋态转变,减少 Ni-O -过渡金属(TM)的超交换相互作用。同时电化学反应驱动 Li^+ 从材料中脱出,促进 Ni^{3+} 占据 Li 位点,延长电池循环寿命(图 10)。

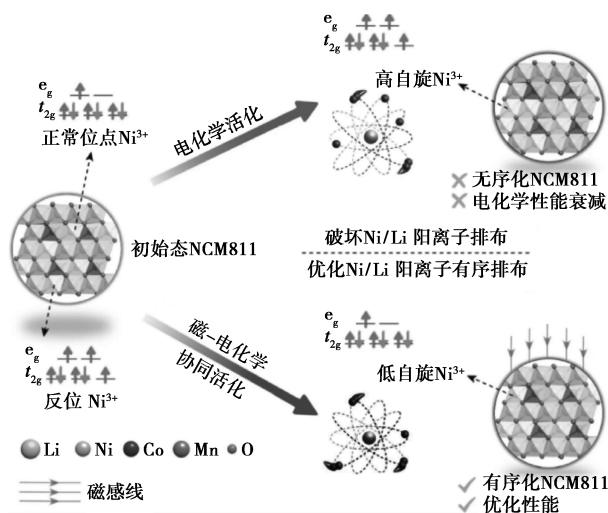


图 10 磁-电化学协同活化(MEA)机理

Zhang 等^[28]聚焦锂氧电池性能提升的难题,利用超声波的空化效应在电解液中产生局部高温高压及微射流,改善电极表面活性物质分布,促进氧气在电极表面的吸附与解吸,加快反应动力学过程,降低电池充放电过电位;另外,超声波的机械振动可有效破碎电极表面反应生成的产物堆积层,疏通电极孔隙,增加电极与电解液、氧气的接触面积,从而解决了锂氧电池因反应动力学缓慢和放电产物堆积导致的容量衰减快、循环稳定性差等问题。

Zhang 等^[30]系统研究了外部压力对硅基锂离子电池循环性能的影响。研究表明,在 0.1~0.4 MPa 范围内,存在最佳压力值(0.2 MPa),此时循环后电极裂纹最少、表面最光滑,电池性能最优。通过单/双粒子模型的数值模拟发现,适度压力可缓解颗粒拉伸应力并改善接触,但压力过高会因接触变形引入新应力。该工作证实了压力控制在缓解硅材料体积膨胀、提升循环稳定性中的关键作用。

3 总结和展望

物理场在锂离子电池中发挥多方面的积极作用。在增强传质方面,磁场通过洛伦兹力驱动 Li^+ 旋转并搅拌电解质,还可以通过实现晶轴或电荷载流子的有效排列,促进离子传输;适当升高温度可减小离子迁移阻力;超声空化效应和交流脉冲电场能强化界面传质及提高添加剂利用率。在抑制枝晶方面,磁场的 MHD 效应和外加电场可降低浓度梯度、促进均匀沉积,而超声和压力则能改善沉积形貌、破碎已有枝晶。此外,物理场还有助于降低电化学阻抗,并对反应物活性、溶剂化效应、材料结构及界面性质具有潜在调控作用。目前枝晶抑制研究较为成熟,而界面传质优化与阻抗控制仍需进一步探索,以拓展物理场在电池中的应用潜力。未来物理场对界面反应仍有较大研究空间,如紫外、处于初探阶段的光场和 X 射线等电磁波手段,可能通过加热、激发共振等方式提供能量、增强传质、降低极化,并对电池密封性等产生影响。

目前各物理场在锂离子电池中的应用仍面临许多挑战:①除了单一物理场的作用,各个物理场之间的耦合也值得探究。最常见的是温度的影响,比如磁热效应,并且长时间超声、光照等都会使温度升高。在未来可以考虑多物理场叠加耦合以取得更理想的效果。②由于物理场的实际操作需要一定条件,考虑到操作的成本和安全问题,可以先用 COMSOL 计算模拟、第一性原理计算、分子动力学模拟等预先

验证其可实施性。③需考虑外加物理场其他方面的应用,如废旧电池的回收,其他电池系统如钠电、锌电的应用等。

参考文献

- [1] Schlögl R. Chemical energy storage enables the transformation of fossil energy systems to sustainability[J]. *Green Chemistry*, 2021, 23(4): 1584–1593.
- [2] Yuan S, Ding K, Zeng X, *et al.* Advanced nonflammable organic electrolyte promises safer Li-metal batteries; from solvation structure perspectives[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(13): 2206228.
- [3] Chen Y, Chen Y, Wang R, *et al.* Generation of a highly conductive and stable solid electrolyte interphase at lithium anode under additional electric field[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137435.
- [4] Rodrigues M T F, Sayed F N, Gullapalli H, *et al.* High-temperature solid electrolyte interphases (SEI) in graphite electrodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 381: 107–115.
- [5] Zhu R, Lin S, Jiao J, *et al.* Magnetic and mesoporous Fe_3O_4 -modified glass fiber separator for high-performance lithium-sulfur battery[J]. *Ionics*, 2020, 26(5): 2325–2334.
- [6] Morimoto R, Miura M, Sugiyama A, *et al.* Theory of microscopic electrodeposition under a uniform parallel magnetic field-I. Non-equilibrium fluctuations of magnetohydrodynamic (MHD) flow[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2019, 848: 113254.
- [7] Zhou W, Chen M, Guo M, *et al.* Magnetic enhancement for hydrogen evolution reaction on ferromagnetic MoS_2 catalyst[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(4): 2923–2930.
- [8] Wang H, Wang D, Jiang H, *et al.* Numerical simulation of lithium dendrite growth in lithium metal batteries; Effect of superimposed AC/DC electric fields on dendrites suppression[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 640: 236721.
- [9] Chang Z, Yang H, Qiao Y, *et al.* Tailoring the solvation sheath of cations by constructing electrode front-faces for rechargeable batteries[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(34): 2201339.
- [10] Gupta A, Kazyak E, Craig N, *et al.* Evaluating the effects of temperature and pressure on Li/PEO-LiTFSI interfacial stability and kinetics[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(11): A2801–A2806.
- [11] Wang S, Guo Z P, Zhang X P, *et al.* On the mechanism of dendritic fragmentation by ultrasound induced cavitation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 51: 160–165.
- [12] Sun P, Lu P, Xu J, *et al.* The influence and control of ultrasonic on the transport and electrochemical properties of redox couple ions in deep eutectic solvent (DES) for redox flow battery application[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 394: 139140.
- [13] Li S, Li J, Wang P, *et al.* Interface engineering regulation by improving self-decomposition of lithium salt-type additive using ultrasound[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(2): 2307180.
- [14] Xiong R, Li H, Mei B A, *et al.* Revealing the effect of external pressure on solid-electrolyte interphase and lithium plating in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, 102: 734–744.
- [15] Li R, Li W, Singh A, *et al.* Effect of external pressure and internal stress on battery performance and lifespan[J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 52: 395–429.
- [16] 崔锦, 石川, 赵金保. 机械压力对锂电池性能影响的研究进展[J]. *化工学报*, 2021, 72(7): 3511–3523.
- [17] Kwon T Y, Kim K T, Oh D Y, *et al.* Three-dimensional networking binders prepared in situ during wet-slurry process for all-solid-state batteries operating under low external pressure[J]. *Energy Storage Materials*, 2022, 49: 219–226.
- [18] Yu Y D, Song Z L, Ge H L, *et al.* Influence of magnetic fields on cobalt electrodeposition[J]. *Surface Engineering*, 2014, 30(2): 83–86.
- [19] Sagar R U R, Mateti S, Mahmood N, *et al.* Magnetic field-governed kinetics in a silicon dioxide-based anode towards high performing lithium-ion magneto-batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12(35): 23601–23611.
- [20] Li S, Zhang Y, Wu S, *et al.* Synchronized achieving amount reduction and efficiency increase of lithium salt-type additive by alternating current pulse discharge technology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 150095.
- [21] Shen K, Wang Z, Bi X, *et al.* Magnetic field-suppressed lithium dendrite growth for stable lithium-metal batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(20): 1900260.
- [22] Lin L, Wang J, Li R, *et al.* Synergistic effect of interface layer and mechanical pressure for advanced Li metal anodes[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 26: 112–118.
- [23] Shen X, Zhang R, Shi P, *et al.* How does external pressure shape Li dendrites in Li metal batteries? [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(10): 2003416.
- [24] Zhang H, Zhang X, Shen Z, *et al.* Ultrasound overcomes dendrite puncture in Li metal batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 110976.
- [25] Li Y, Zhao W, Zhang G, *et al.* Unified picture on temperature dependence of lithium dendrite growth via phase-field simulation[J]. *Energy Material Advances*, 2023, 4: 0053.
- [26] Sharafi A, Meyer H M, Nanda J, *et al.* Characterizing the $\text{Li-Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ interface stability and kinetics as a function of temperature and current density[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 302: 135–139.
- [27] Zhang Y, Dong H, Wang T, *et al.* Ultrasonic guided wave monitoring of dendrite formation at electrode-electrolyte interface in aqueous zinc ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 542: 231730.
- [28] Zhang J, Zhou Z, Wang Y, *et al.* Ultrasonic-assisted enhancement of lithium-oxygen battery[J]. *Nano Energy*, 2022, 102: 107655.
- [29] Gong H, Cao Y, Zhang B, *et al.* Noninvasive rejuvenation strategy of nickel-rich layered positive electrode for Li-ion battery through magneto-electrochemical synergistic activation[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10243.
- [30] Zhang K, He Y, Zhou J, *et al.* Effects of external pressure on cycling performance of silicon-based lithium-ion battery: Modelling and experimental validation[J]. *RSC Advances*, 2024, 14(41): 29979–29991. ■