高性能SEI膜的构筑策略——原位生成与人工修饰

孔月琴[1,2],崔孝玲[1,2,3*],权 银[1,2],何劲作[1,2],王 鹏[1,2,3],李世友[1,2,3]
(1.兰州理工大学石油化工学院,甘肃 兰州 730050; 2.甘肃省低碳能源化工重点实验室,甘肃 兰州 730050;
3.新能源产业废弃物资源化与利废材料工程研究中心,甘肃 兰州 730050)

摘要:从SEI成膜添加剂和人工构建SEI膜2个方面,系统综述了近年来锂金属电池界面优化技术的研究进展。针对锂金属电池发展的实际情况提出了一些前瞻性观点。

关键词:锂离子电池;固态电解质界面(SEI);成膜添加剂;人造SEI膜
中图分类号:O646 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)10-0063-06
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.012

Construction strategies for high-performance SEI: In situ formation and artificial modification

KONG Yue-qin[1,2], *CUI Xiao-ling*[1,2,3*], *QUAN Yin*[1,2], *HE Jin-zuo*[1,2], *WANG Peng*[1,2,3], *Li Shi-you*[1,2,3]
(1.School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2.Gansu Key Laboratory of Low-Carbon Energy and Chemical Engineering, Lanzhou 730050, China;
3.Engineering Research Center for Waste Recycling of New Energy Industry, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This article systematically reviews recent advances in interfacial optimization techniques for lithium-metal batteries from two aspects: SEI-forming additives and artificial SEI construction. Finally, some forward-looking perspectives are proposed in light of the practical development of lithium-metal batteries.

Key words: lithium-ion battery; solid electrolyte interphase (SEI); film-forming additives; artificial SEI film

锂金属电池(LMBs)是后锂离子电池时代的代表,有望通过利用金属锂的低工作电压和高比容量来大幅提高电池的能量密度[1]。然而,锂金属由于较低的氧化还原电位会与电解液发生反应,在锂表面形成不稳定的固体电解质界面(SEI)。不稳定的SEI膜会导致锂枝晶的不良生长、死锂的形成及电解液的过度消耗。这可能会造成较高的界面阻抗,严重阻碍锂离子的传输,影响电池的库仑效率和循环寿命。因此,构建具有优异力学与电化学性能的SEI膜,调控其化学组成、微观结构及形貌特征,已成为锂金属电池研究中的重要方向与焦点。

近年来,国内外研究机构围绕此问题开展了较多的工作,取得了许多进展和经验,但对该领域研究还缺乏系统总结和分析。本文中综述了成膜添加剂和人工SEI膜等改性策略的最新研究,这些方法为调控SEI的组成与结构提供了有效途径,对提升锂金属电池的界面稳定性和综合性能具有重要的参考价值。

1 SEI膜概述

关于SEI膜结构及其生长机理的认知是一个逐步深化与细化的过程,几个重要的模型见图1。1979年,以色列希伯来大学的Peled教授[2]提出了SEI的经验模型,核心是将SEI结构类比为锂离子化合物的单晶。由于该钝化膜具有离子导电性,但同时是电子绝缘体,其导电行为与电解质类似,因此被命名为“固体电解液界面”。自50年前Peled将此类钝化物质定义为SEI膜以来,陆续有更多结构模型被提出。1994年,Aurbach[3]提出了“多层模型”,认为SEI膜具有双层或多层结构,内层富含无机物,外层则富含有机物。1997年,Peled等[4]进一步提出“马赛克模型”,假定SEI由多个微相组成,整体呈现马赛克状的复合结构。2020年,Xu等[5]发表了“梅子布丁模型”,指出SEI膜主要以非晶相存在,其中结晶微相并非富集于金属锂表面,而是随机分散于非晶基质中。

收稿日期:2025-12-24;**修回日期**:2026-07-27
基金项目:甘肃省基础研究创新群体项目(25JRRA450);甘肃省科技专员项目(25CXGA071)
作者简介:孔月琴(1999-),女,硕士,研究方向为电化学储能技术与工程,kongyq315@163.com;崔孝玲(1980-),女,学位,正高级工程师,研究方向为电化学储能技术与工程,通讯联系人,xlcuilw@163.com。

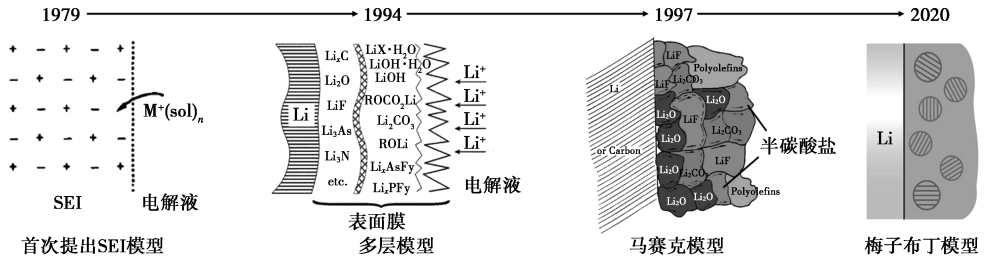


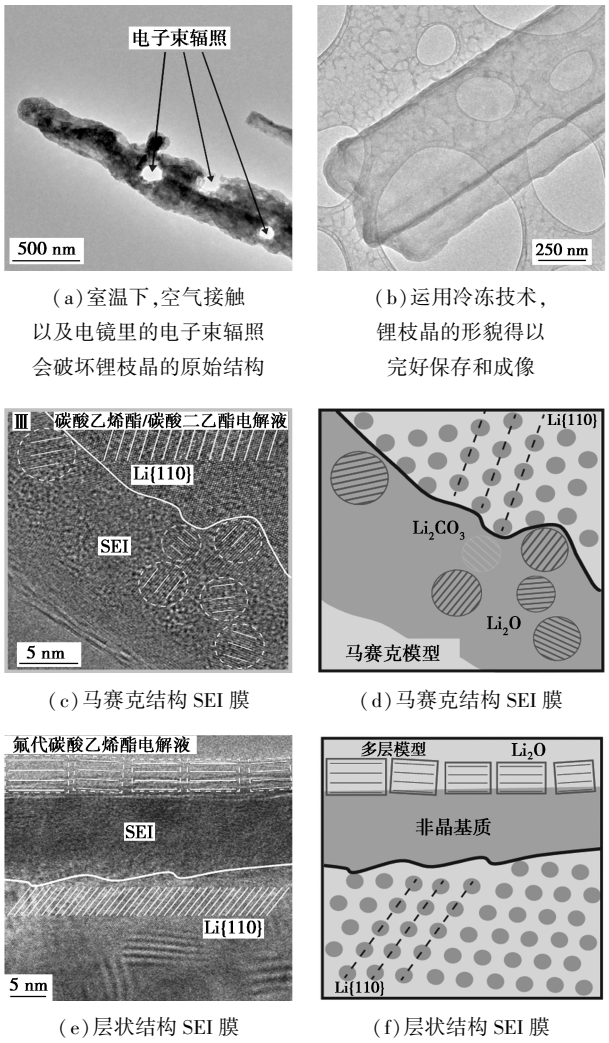
图 1　SEI 膜结构模型

在锂离子电池的实际化成过程中,由于涉及复杂的化学反应、杂质的存在以及电流分布不均等因素,SEI 膜的结构呈现高度复杂性。目前主流观点认为其为双层结构:靠近电解液的一侧多孔且疏松,主要成分为有机化合物,如 $ROCO_2Li$、ROLi、$RCOO_2Li$(R 为有机基团)等,该层中空隙由电解液填充,可能在后续循环中进一步发生还原反应并发生结构演变;靠近负极的一侧则致密且孔隙较少,主要由 Li_2CO_3、LiF、Li_2O 等无机物构成[6]。

尽管上述理论模型描绘了 SEI 膜的部分特征,许多实验现象仍未能得到充分解释。例如,为什么微晶相会随机地分散于无定形的 SEI 中,而不是生长成完整的晶体;无定形结构的组成和结构是什么,上述问题仍是当前研究的重点。

为精确解析电极材料表面固态电解质界面相(SEI)的微观形貌,Li 等[7]于 2017 年借助冷冻电镜技术首次获得了原子级分辨率的 SEI 膜透射电镜图像,并成功解析了锂枝晶的原子级结构(图 2)。进一步地,该研究对比了具有不同结构 SEI 膜的金属锂在脱锂过程中的形貌演变行为。研究发现,具有马赛克结构 SEI 的金属锂在脱锂过程中表现出明显的不均匀性,导致大量金属锂与电极主体失去电接触,形成所谓的“死锂”,从而造成电池循环效率下降。相比之下,具有层状结构 SEI 的金属锂则表现出均匀的脱锂行为,“死锂”残留较少,因此循环效率较高。通过对 SEI 中无机纳米颗粒(如 Li_2O、Li_2CO_3 等)空间分布的分析,研究揭示其内在机制:在马赛克结构 SEI 膜中,无机纳米颗粒分布不均,其中高密度区域具有较高的锂离子传导速率,导致局部脱锂过快;当该区域金属锂被完全脱出后,残余锂金属无法维持连续导电通路,从而形成“死锂”。而在层状结构 SEI 膜中,无机纳米颗粒分布较为均匀,锂离子传导速率一致,因此实现了均匀脱锂,减少了“死锂”的生成。

这种稳定的 SEI 膜能够有效改善电极材料的界面特性,有助于提升电池的长期循环性能。SEI 膜



(a)室温下,空气接触以及电镜里的电子束辐照会破坏锂枝晶的原始结构　(b)运用冷冻技术,锂枝晶的形貌得以完好保存和成像

(c)马赛克结构 SEI 膜　(d)马赛克结构 SEI 膜

(e)层状结构 SEI 膜　(f)层状结构 SEI 膜

图 2　电极材料表面固态电解质界面相(SEI)的微观形貌

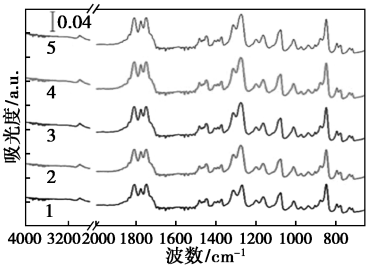
在有机溶剂中具有不溶解性,可使溶剂化的锂离子在穿过 SEI 膜时发生去溶剂化作用,仅允许锂离子通过,从而有效阻隔溶剂分子的共嵌入行为。这一特性避免了溶剂共嵌入对电极材料造成的结构损伤,显著提高了电极的循环稳定性与使用寿命。此外,随着 SEI 膜厚度增加至电子无法隧穿的程度时,转变为钝化层,可抑制持续的界面氧化还原副反应,进一步增强电极的界面稳定性。

2　SEI 成膜添加剂

随着对 SEI 膜的深入研究,研究者发现通过调控电解液组成可有效提升 SEI 膜的性能。其中,成膜添加剂因具有用量少、效果显著和操作简便等特点,广泛用于促进电解液各组分在电极/电解液界面形成结构稳定、性能优良的 SEI 膜。根据化学组成的不同,成膜添加剂可分为溶剂型、锂盐型和气态型添加剂。不同类型的添加剂凭借独特的分解机制与反应产物,显著影响 SEI 膜的化学组成、微观结构和理化性质。下文将重点介绍分别利用上述 3 类成膜添加剂以优化电极/电解液界面的相关研究进展。

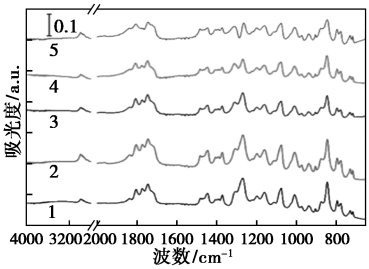
2.1　溶剂型成膜添加剂

溶剂型成膜添加剂因选择范围广、经济效益高,已成为当前应用最广泛的成膜添加剂类型之一[8]。该类添加剂能够主动调控界面化学过程,而非被动依赖基础电解液的还原产物。其中,碳酸亚乙烯酯(VC)是一种经典的溶剂型成膜添加剂,作用机制在于可优先于电解液中的其他组分发生还原反应,从而率先在电极表面形成 SEI 膜。Lin 等[9]研究发现,电解液中添加 1%的 VC 可在较高电位下促进初始 SEI 膜的形成,并有效抑制碳酸乙烯酯(EC)的还原。VC 先于 EC 在 HOPG 基面上还原生成颗粒状产物,随后 EC 在未被覆盖的区域还原并形成薄层结构,共同构建 SEI 膜。Quan 等[10]通过 $LiNO_3$ 和 VC 的协同作用提高了电池的电化学性能。$LiNO_3$ 能够在较高电位下优先还原,形成富无机但不完整的 SEI 内层,而 SEI 内层不完整导致的裸露电极表面为 VC 的后续分解提供了场所。然后,在较低电位下,VC 被还原生成富 poly(VC)的 SEI 外层,该外层可以提供亲锂位点,大大削弱了 Li^+ 与 EC 之间的相互作用。此外,Yohannes 等[11]采用原位漫反射红外光谱研究了不同添加剂对中间相碳微球表面 SEI 膜的影响(图 3)。添加 5%氟代碳酸乙烯酯(FEC)



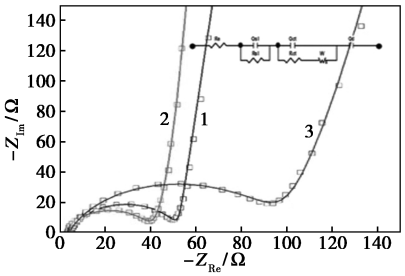
1—循环 2;2—循环 3;3—循环 4;4—循环 5;5—循环 6

(a)加入 VC 的原位漫反射红外光谱



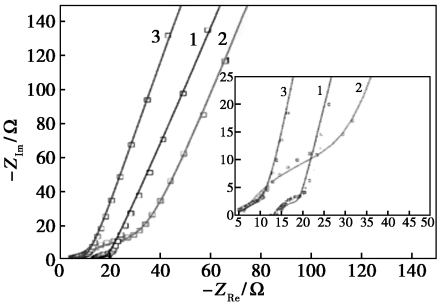
1—循环 2;2—循环 3;3—循环 4;4—循环 5;5—循环 6

(b)加入 FEC 的原位漫反射红外光谱



1—STD;2—STD+2% VC;3—STD+5% FEC

(c)循环前后的阻抗谱



1—STD;2—STD+2% VC;3—STD+5% FEC

(d)循环前后的阻抗谱

图 3　不同添加剂对中间相碳微球表面 SEI 膜的影响

所形成的 SEI 膜富含有机氟化磷和聚氟代碳酸乙烯酯等组分,界面阻抗低于 VC 所形成的 SEI 膜,更有利于锂离子的快速传输,从而进一步提升锂离子电池的整体电化学性能。

此外,常用作负极成膜添加剂的还包括碳酸乙烯亚乙酯(VEC)、亚硫酸丙烯酯(PS)和亚硫酸丁烯酯(BS)等有机化合物[12]。大量研究表明,有机溶剂的电化学活性越高,越有利于 SEI 膜的形成。常见有机溶剂的电化学活性大致顺序为:链状醚>环醚>开链碳酸酯及普通酯>环状碳酸酯。

溶剂型成膜添加剂已成为构建 SEI 膜最常用的策略之一。通过对其分子结构进行精准设计,可预先调控其还原电位与分解路径,从而定向生成以理想组分(如弹性聚合物、高杨氏模量 LiF 等)为主、结构稳定的 SEI 膜。

2.2 锂盐型成膜添加剂

尽管溶剂型成膜添加剂被广泛应用于优化电极/电解液界面,但通常会在 0.5~0.8 V(vs.Li/Li^+)电位范围内发生进一步的还原反应,导致不可逆容量损失。为此,研究者致力于开发锂盐型成膜添加剂,以缓解成膜过程中有机溶剂过度分解的问题。此类添加剂兼具成膜与导电双重功能,能够同时提升正、负极界面的稳定性。

目前,$LiPF_6$ 仍是锂离子电池中最广泛使用的锂盐。尽管其他锂盐在某些性能上可能优于 $LiPF_6$,但尚无法如 $LiPF_6$ 一样全面兼顾多项要求[13]。然而,$LiPF_6$ 存在对痕量水敏感和热稳定性较差等问题,制约了锂离子电池性能的进一步提升。为应对这一挑战,研究人员尝试通过设计新型锂盐来改善电解质的性质,其中阴离子种类的调控尤为关键,特别是以配合物阴离子为基础的新型锂盐,如 LiTFSI、LiBOB、LiODFB 等(常见结构参见图 4)。尽管如此,这些新型锂盐仍存在一定的局限性,目前尚无法完全替代 $LiPF_6$,因此大多仍以添加剂形式用于优化电解液体系。

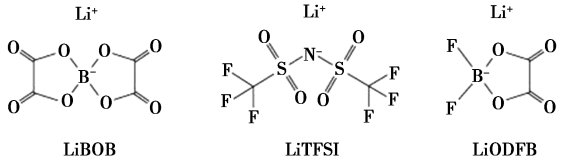


图 4 常见锂盐添加剂的分子结构

双(氟磺酰亚胺)锂(LiFSI)因较高的锂离子迁移数以及能够形成稳定 SEI 膜的特性,已获得广泛应用。Yang 等[14]通过分子动力学模拟发现,在 LiFSI 电解质中,Li^+ 的溶剂化壳层内含有较多的 FSI^- 阴离子,这些阴离子参与构成了致密的 SEI 膜,避免溶剂化锂离子的共嵌入,并抑制电解液与沉积锂之间的持续副反应,从而延长电池循环寿命。另一方面,双(草酸)硼酸锂(LiBOB)基电解液具有高离子电导率和宽电化学窗口,能够在正极与负极表面均形成有效的保护膜,被认为是一种极具应用前景的锂盐[15]。研究表明,具有螯合结构的 LiBOB 在开环反应后生成 EC-BOB^- 和 EC-Li^+ 溶剂化结构,该结构经还原反应后优先在负极表面析出富含 Li_2CO_3 的初始 SEI 膜。电化学测试进一步表明,LiBOB、LiODFB 等含硼化合物的分解还原电位约为 1.5 V,高于常见溶剂的还原电位[16]。

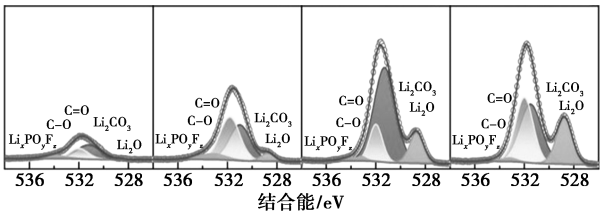
二氟(草酸)硼酸锂(LiODFB)作为一种新型锂盐,被认为兼具 LiBOB 优异成膜能力与 $LiBF_4$ 良好低温性能的特点[17]。在电解液中引入 LiODFB 可抑制烷基碳酸盐和烷基磷酸盐的生成,提高 SEI 膜中羧酸盐与 LiF 的含量,从而增强界面稳定性,使锂离子电池在高压条件下具备更长期的耐受能力。此外,Ko 等[18]的研究表明,添加 $LiClO_4$ 可显著提升电池的库仑效率与循环寿命,机制在于高氯酸锂的引入促进了 SEI 膜中 LiF 的生成,而 LiF 有助于加速锂离子的脱溶剂化过程,改善锂离子在 SEI 膜中的传输性能。值得注意的是,LiF 广泛存在于各类功能性 SEI 膜中,目前普遍认为其具备高机械强度、低溶解性、宽电化学稳定窗口以及较低的锂离子扩散能垒等特性。

与常规溶剂相比,氟化溶剂具有较低的最低未占分子轨道(LUMO)能级,能够与锂金属发生快速反应,形成薄而致密的 SEI 膜。这一动力学机制表明,通过原位构建富含 LiF 的 SEI 层以实现对锂金属表面的快速保护,可能比单纯依赖 LiF 的固有性质更为关键。当前关于锂负极表面稳定 SEI 膜构筑的研究仍存在诸多争议,尤其是对 SEI 膜中各组分具体作用机制的理解尚不充分。因此,明确 SEI 膜内各组分的功能,并通过锂盐型成膜添加剂调控其组成与结构,仍具有重要的研究价值。

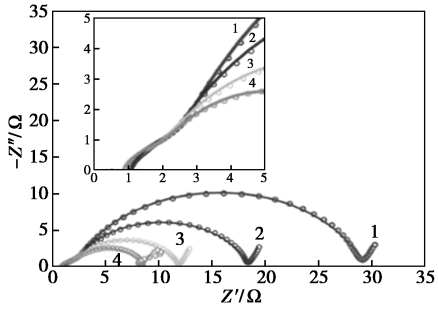
2.3 气态型成膜添加剂

气态成膜添加剂是固态电解质界面(SEI)膜研究中的一个独特而富有前景的方向。重要性源于其气态特性,使其能够快速扩散并均匀覆盖整个电极表面,在电解液溶剂分解之前形成一层均一且致密的初始保护层,这一优势是传统液态添加剂难以实现的。

自 Aurbach 等[19]首次提出将 CO_2 用作添加剂以来,多种气态添加剂逐渐受到研究者关注。目前常用的气态添加剂主要包括 CO_2、SO_2 等,可有效修饰 SEI 膜结构,增强与石墨电极的相容性,并有助于获得更光滑的电极表面。研究人员重点考察了 CO_2、CO、O_2、N_2 和 N_2O 对电池的影响,发现这些气体的引入促进了均匀无机锂盐层的形成。在所有这些气体中,CO_2 的改善效果最为显著[20]。CO_2 与金属锂反应生成 Li_2CO_3,并富集于锂负极表面膜的内层;而在无 CO_2 条件下,电极表面仅检测到微量 Li_2CO_3。富 Li_2CO_3 层的存在不仅使电极表面更光滑、过电位降低,还可减少界面阻抗,抑制锂枝晶的形成,从而显著提升负极材料的循环效率和长周期稳定性(图 5)[21-22]。

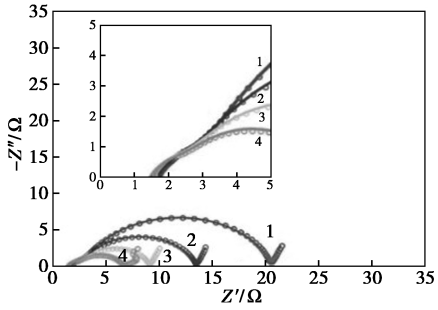


(a) O 1s 谱中不同电位下形成的 SEI 膜



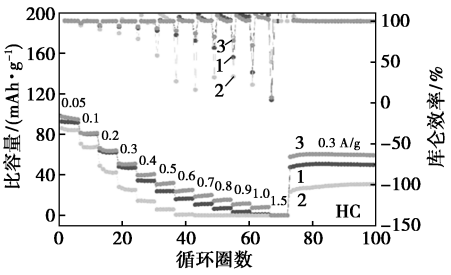
0.2 V 下形成的 SEI 膜:1—10℃;2—15℃;3—20℃;4—25℃

(b) 富含 Li_2CO_3 的 SEI 膜的阻抗



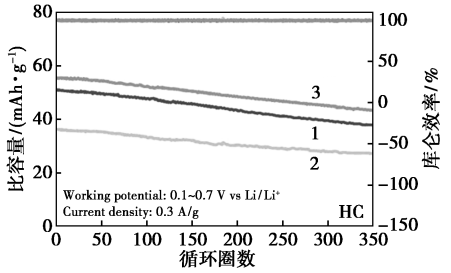
0.01 V 下形成的 SEI 膜:1—10℃;2—15℃;3—20℃;4—25℃

(c) 富含 Li_2CO_3 的 SEI 膜的阻抗



1—0.5 V;2—0.2 V;3—0.01 V

(d) 富含 Li_2CO_3 的 SEI 膜的倍率和长循环



1—0.5 V;2—0.2 V;3—0.01 V

(e) 富含 Li_2CO_3 的 SEI 膜的倍率和长循环

图 5　富含 Li_2CO_3 的 SEI 膜

此外,气态添加剂本身不可燃,相较于易燃有机溶剂,有助于提升电池的安全性。气态添加剂的研究突破了传统液态体系的局限,为电池界面工程提供了新思路。尽管电池循环过程中气体的种类与行为常被报道,但目前仍缺乏系统性的深入研究。因此,未来有必要对气体在电池中的作用机制开展更系统的研究,以更全面理解气态成膜添加剂对锂离子电池性能的影响,并进一步优化 SEI 膜结构与组成。

3　人工构筑 SEI 膜

随着全球经济的发展与能源需求的持续增长,开发高效的电极/电解液界面优化技术显得尤为迫切。在锂金属电池中,固态电解质与电极间的不良界面接触容易引发安全问题,而构建人造 SEI 膜被认为是提高锂金属负极可逆性、抑制锂枝晶生长的重要策略之一[23]。

相比于自然形成的富含有机-无机混合组分的 SEI 膜,直接构建人造 SEI 膜或将其与天然 SEI 结合形成复合界面,可更显著提升锂金属电池的电化学性能[24]。例如,Yan 等[25]通过在硅纳米颗粒表面合成含 $LiAlO_2$ 的人造 SEI 薄层,获得了较传统 SEI 膜更高的锂离子电导率。该人工界面促进了锂离子在电解质与硅颗粒间的扩散,实现了硅碳复合负极的深度锂化和完全脱锂,显著改善了合金化/脱合金动力学,使硅负极表现出优异的电化学性能。Wellmann 等[26]提出了一种创新的机械力化学修饰方法(图 6),该方法在滚压锂金属箔的同时使其与反应性离子液体接触,从而在机械压力作用下促使离子液体与锂表面反应,生成具有优良性能的人造 SEI 膜。相比其他修饰方法,该法制备的 SEI 膜具有更高的锂离子电导率和良好的电子绝缘性,可有效抑制电解液的持续还原,从而提升电池的容量保持率。

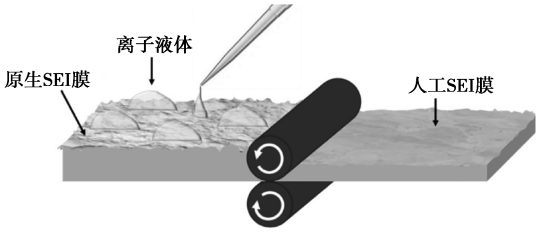


图 6　机械化学金属锂表面改性工艺示意图

4　结论

重点概述了如何使用成膜添加剂和人工构筑 SEI 膜来辅助锂负极/电解液界面的形成,并总结了

调控 SEI 膜组成、结构和结构性质对解决电池循环性差、容量衰减及锂枝晶等问题的研究进展，可以得到如下结论：溶剂型、锂盐型和气态型成膜添加剂能通过调节 SEI 膜的组分，达到增强 SEI 膜机械性、降低界面阻抗的作用；通过在锂金属/电解液界面预先构筑人造 SEI 膜可以得到更加均匀的、导锂离子电导性高的 SEI 膜，最终提升了电池的容量保持能力。

目前构筑稳定 SEI 膜的发展趋势：通过电化学测试、理论计算等方法来研究 SEI 膜组分对 SEI 膜性能的影响机理，重点开发新的有利于形成更加稳定的 SEI 膜的组分；设计更多新的物理化学修饰锂负极的方法，构筑具有更优性能的人造 SEI 膜；正确认识 SEI 膜组分对提升电池性能的作用，目前对在锂负极表面构筑稳定 SEI 膜的研究工作仍存在许多大一统的说辞，需要进行更加深入的研究，使研究者们能够正确地开展相关工作。

参考文献

[1] Kwon H, Kim S, Hyun J, *et al*. Covariance of interphasic properties and fast chargeability of energy-dense lithium metal batteries[J]. Nature Energy, 2025, 10: 1132-1145.

[2] Peled E. The electrochemical behavior of alkali and alkaline earth metals in nonaqueous battery systems—the solid electrolyte interphase model[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1979, 126(12): 2047.

[3] Aurbach D. Review of selected electrode-solution interactions which determine the performance of Li and Li ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2000, 89(2): 206-218.

[4] Peled E, Golodnitsky D, Ardel G. Advanced model for solid electrolyte interphase electrodes in liquid and polymer electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(8): L208.

[5] Xu Y B, Wu H P, He Y, *et al*. Atomic to nanoscale origin of vinylene carbonate enhanced cycling stability of lithium metal anode revealed by cryo-transmission electron microscopy[J]. Nano Letters, 2019, 20(1): 418-425.

[6] Liu P, Miao L C, Sun Z Q, *et al*. Inorganic-organic hybrid multifunctional solid electrolyte interphase layers for dendrite-free sodium metal anodes[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(47): e202312413.

[7] Li Y Z, Li Y B, Pei A L, *et al*. Atomic structure of sensitive battery materials and interfaces revealed by cryo-electron microscopy[J]. Science, 2017, 358(6362): 506-510.

[8] Li Z Z, Hu X T, Ji H J, *et al*. Microemulsion engineering reconciles propylene carbonate electrolytes and graphite anodes for all-climate lithium-ion batteries[J]. Angewandte Chemie, 2025, 137(51): e202516984.

[9] Lin L P, Yang K, Chen H B, *et al*. In situ atomic force microscope observing the effect of vinylene carbonate on the formation of solid-electrolyte interphase layer during the initial cycle[J]. Functional Materials Letters, 2017, 10(5): 1750052.

[10] Quan Y, Cui X L, Hu L, *et al*. Enhancing Li^+ transportation at graphite-low concentration electrolyte interface via interphase modulation of $LiNO_3$ and vinylene carbonate[J]. Carbon Neutralization, 2025, 4(1): e184.

[11] Yohannes Y B, Lin S, Wu N L, *et al*. SEI grown on MCMB-electrode with fluoroethylene carbonate and vinylene carbonate additives as probed by in situ DRIFTS[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(13): A2741.

[12] Wu H B, Lu G X, Dong C, *et al*. Trace molecular chelation engineering of a self-healing hybrid interphase for highly stable aqueous zinc-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(21): 9600-9610.

[13] 郭旗，宋飞，胡广宇，等. 电解液添加剂对锂电池高温电化学性能的影响研究[J]. 现代化工，2025，45(7)：151-159.

[14] Yang G J, Zhang S M, Weng S T, *et al*. Anionic effect on enhancing the stability of a solid electrolyte interphase film for lithium deposition on graphite[J]. Nano Letters, 2021, 21(12): 5316-5323.

[15] Li S Y, Zhang Y L, Wu S M, *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.

[16] Heng S, Shan X J, Wang W, *et al*. Controllable solid electrolyte interphase precursor for stabilizing natural graphite anode in lithium ion batteries[J]. Carbon, 2020, 159(15): 390-400.

[17] Xiao P T, Yun X R, Chen Y F, *et al*. Insights into the solvation chemistry in liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries[J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52(15): 5255-5316.

[18] Ko Y M, Bae J, Chen G, *et al*. Topological considerations in electrolyte additives for passivating silicon anodes with hybrid solid-electrolyte interphases[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(7): 3448-3455.

[19] Aurbach D R, Ein-Eli Y, Chusid O, *et al*. The correlation between the surface chemistry and the performance of Li-carbon intercalation anodes for rechargeable 'Rocking-Chair' type batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1994, 141(3): 603.

[20] Osaka T, Momma T, Matsumoto Y, *et al*. Surface characterization of electrodeposited lithium anode with enhanced cycleability obtained by CO_2 addition[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(5): 1709.

[21] Momma T, Matsumoto Y, Osaka T. Effect of CO_2 on the cycleability of lithium metal anode[J]. MRS Online Proceedings Library (OPL), 1995, 393: 223.

[22] Qin N, Jin L M, Lu Y Y, *et al*. Over-potential tailored thin and dense lithium carbonate growth in solid electrolyte interphase for advanced lithium ion batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(15): 2103402.

[23] 苏月，刘旭华，曾芳磊，等. 聚偏氟乙烯/聚偏氟乙烯磺酸锂/锂盐复合固态电解质的制备及其性能[J]. 储能科学与技术，2021，10(6)：2069-2076.

[24] Zeng J K, Liu Q T, Jia D Y, *et al*. A polymer brush-based robust and flexible single-ion conducting artificial SEI film for fast charging lithium metal batteries[J]. Energy Storage Materials, 2021, 41: 697-702.

[25] Yan J, Zhao X, He S, *et al*. Artificial Solid Electrolyte Interphase Coating to Reduce Lithium Trapping in Silicon Anode for High Performance Lithium-Ion Batteries[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(21): 1901187.

[26] Wellmann J L, Brinkmann J P, Wankmiller B, *et al*. Effective solid electrolyte interphase formation on lithium metal anodes by mechanochemical modification[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(29): 34227-34237.■