

锂离子电池用聚乙烯复合隔膜进展

郑 帅 杨 婷 吴 鹏

康辉南通新材料科技有限公司, 江苏 南通 226368

摘 要:围绕锂离子电池用聚乙烯(PE)复合隔膜展开全面论述。介绍了聚烯烃基多孔膜中,以聚乙烯为代表的材料在锂离子电池领域的广泛应用。探讨了 PE 隔膜存在热稳定性差、电解液润湿性不足及易受机械损伤等问题,科研人员将无机纳米材料与 PE 隔膜复合,形成无机颗粒涂层、接枝和填充这 3 类复合隔膜。指出这些改性方法显著提升了隔膜的热稳定性、离子电导率和电化学性能,且需在多尺度复合与梯度结构设计、绿色制备技术开发以及适配新兴电池体系等方面深入研究。研究为未来高性能电池隔膜的国产化与产业化提供支撑。

关键词: 锂离子电池;聚乙烯;改性隔膜;电池安全

中图分类号: TS101.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)04-0010-07

Progress in polyethylene composite separators for lithium-ion batteries

Zheng Shuai, Yang Ting, Wu Peng

Kanghui Nantong New Materials Technology Co., Ltd., Nantong 226368, Jiangsu, China

Abstract: A comprehensive discussion on polyethylene(PE) composite separators for lithium-ion batteries were presented. The wide application of polyethylene as a representative material among polyolefin-based porous membranes in the field of lithium-ion batteries was introduced. The issues such as poor thermal stability, insufficient wettability with electrolytes, and vulnerability to mechanical damage of PE separators were discussed. Researchers combined inorganic nanomaterials with PE separators to form three types of composite separators: coated, grafted and filled. It was pointed out that these modifications significantly improved the thermal stability, ionic conductivity, and electrochemical performance of the separators. And in-depth research should be conducted on multi-scale composites and gradient structure design, the development of green preparation technologies, and adaptation to emerging battery systems. The research provides support for the localization and industrialization of high-performance battery separators in the future.

Keywords: lithium-ion battery; polyethylene; modified separator; battery safety

基金项目:南通市自然科学基金青年基金项目(JC2024002)

收稿日期:2025-08-16

作者简介:郑帅,男,1997年生,硕士,助理工程师,主要研究方向为电池隔膜,779540151@qq.com

通信作者:吴鹏,工程师,主要研究方向为固态电解质设计与制备,wupeng@hengli.com

随着现代工业的蓬勃发展与社会需求的日益增长,膜工程已深度融入各领域,成为推动社会进步的关键技术支撑。在储能系统的技术革新浪潮中,聚合物基多孔隔膜凭借其多元优势脱颖而出,展现出强大的市场竞争力与广阔的发展前景^[1-2]。其成本低廉、质地轻盈,能大幅降低储能系统的生产与运输成本;制造工艺具备良好的可扩展性,能够满足日益增长的市场需求;对环境友好,符合可持续发展理念;孔径结构可调与离子传输效率高,使其能精准适配不同储能场景;此外,可根据实际需求灵活优化性能^[3]。在二次电池体系,尤其是锂离子电池中,聚合物隔膜凭借其独特优势,成为锂离子电池稳定运行的核心组件。其核心功能在于可有效隔离正负极,防止短路,同时为离子传输构建高效通道,保障电池充放电过程的顺利进行。长期以来,科研工作者围绕聚合物隔膜的研发持续深耕,致力于开发兼具高可扩展性、高可靠性、高性价比及环境友好的新型材料,力求通过提升电池性能、延长使用寿命、强化安全防护等方式,全面增强储能系统的综合性能与应用价值^[4]。

在现代商业锂离子电池领域,聚烯烃基多孔隔膜凭借其卓越性能占据主导地位。以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)及其复合体系(如 PE/PP、PP/PE/PP)为代表的聚烯烃材料,因具备优异的力学强度、出色的化学稳定性、适宜的孔隙率及精准可控的厚度,成为构筑高性能锂离子电池隔膜的理想基材。目前,湿法双轴拉伸聚乙烯与干法单轴拉伸聚丙烯工艺已成为工业制备锂离子电池用聚烯烃基多孔隔膜的核心技术路径。本研究将围绕锂离子电池复合聚乙烯隔膜展开介绍。

1 聚烯烃隔膜制备方法

1.1 湿法工艺

湿法制备工艺是一种集成化的精密制造工艺,涵盖混合、加热、固化(挤出)、拉伸、溶剂提取及热处理等关键环节。制备过程中,首先将聚烯烃原料与烃类液体(如石蜡油)、抗氧化剂及其他功能性添加剂,在高于聚烯烃熔融温度的严苛条件下,借助双螺杆挤出机进行充分混炼,形成均匀稳定的共混体系。随后,该体系经挤出机挤出至冷却辊表面,快速冷却固化形

成凝胶状流延膜。紧接着,对凝胶膜实施纵向与横向逐次或同步双轴拉伸处理,使膜内分子链定向排列。最后,经溶剂萃取法去除低分子添加剂,并通过热处理优化膜的微观结构,获得具有连续贯通孔道网络与优良力学性能的微孔聚烯烃隔膜^[5]。

湿法工艺制备的隔膜具有相互贯通的孔道网络与曲折复杂的微观结构。该结构特征在抑制锂枝晶生长方面优势独特。曲折的孔道结构能有效阻碍枝晶的直线生长,大幅降低充放电过程中枝晶刺穿隔膜引发短路的风险。同时,互连的孔道结构可确保电解液的均匀浸润与离子的稳定传输,为锂离子电池的长期循环稳定性提供了可靠保障。因此,在追求长循环寿命的锂离子电池应用场景中,湿法隔膜表现卓越。

1.2 干法工艺

干法制备工艺遵循“挤压-退火-拉伸-热定型”的四步工艺路线。聚烯烃原料经高温熔融后,通过挤出、浇铸或吹塑成型工艺得到初始膜片。随后,对膜片进行退火处理,促使聚合物结晶度提升,并实现晶粒尺寸的精准调控,形成致密无孔的前驱体膜^[6]。干法又可细分为单向拉伸法和双向拉伸法。在单向拉伸阶段,于高温环境下沿机器的纵向对膜片施加拉伸应力,导致晶体界面分离,形成层状晶体阵列。随着拉伸过程的持续,层状晶体间界面逐步撕裂,构建出高度取向的狭缝状微孔结构。然而,所得隔膜横向力学性能较弱,生产过程中存在膜片撕裂风险,这一问题已成为该技术亟待突破的瓶颈。双向拉伸则是在单向拉伸的基础上,进一步对隔膜进行横向拉伸,以改善隔膜在两个方向上的力学性能,使隔膜性能更加均衡。

经干法工艺处理的聚烯烃隔膜,凭借其规整笔直且高度开放的多孔结构,可为离子传输构筑低阻力通道,显著降低电池内部的电荷迁移阻抗。这种独特的孔道形态能够实现离子的快速穿梭与高效传导,尤其适用于高功率密度电池体系,可满足设备瞬间大电流充放电的性能需求。

2 聚乙烯隔膜的安全隐患与高性能指标要求

2.1 聚乙烯隔膜的安全隐患

在现代锂离子电池体系中,隔膜作为隔离正负

极、构建离子传输通道的关键组件,其性能直接决定了电池的安全性与电化学性能。隔膜通过物理分隔电极,并为充放电过程中离子的定向迁移提供路径,有效规避了电池内部短路风险,保障了电池系统的稳定运行。然而,PE 隔膜在实际应用中仍存在显著的性能缺陷。其一,在高温工况下隔膜会发生软化、收缩,甚至熔融燃烧,进而破坏电池内部结构;其二,外力挤压、碰撞等机械损伤会导致正负极直接接触,引发短路故障;其三,电池过充过程中产生的金属枝晶会穿透隔膜,造成内部短路^[7]。

2.2 聚乙烯隔膜高性能指标要求

理想的锂离子电池隔膜需具备多元性能特征^[8-9]:应具备抑制枝晶生长的特殊功能;在有机液体电解质和电极材料环境中保持优异的化学与电化学稳定性^[10];在高温条件下维持良好的尺寸稳定性与结构完整性;应具备高强度、高韧性的力学性能,以抵御锂离子电池组装及使用过程中的应力作用;应具备合理的孔隙设计,以确保高效的离子传输;应具备优异的电解液浸润性,实现高离子电导率与电解液保有量;同时满足适度的厚度要求与出色的耐腐蚀性能。这些性能参数的协同优化与平衡设计,是当前锂离子电池隔膜材料研发与技术创新的核心方向,对推动高性能电池技术的发展具有至关重要的意义。

3 聚乙烯基复合隔膜分类

科研人员聚焦复合改性技术,引入高熔点、高电解质亲和性的陶瓷氧化物纳米材料,如二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)等,对 PE 隔膜开展性能优化研究。通过采用涂层、接枝或填充等方式,将这些无机陶瓷纳米粒子与 PE 隔膜进行复合^[11],进而衍生出无机颗粒涂层复合膜、无机颗粒接枝复合膜和无机颗粒填充复合膜这 3 类新型隔膜材料。纳米粒子的引入不仅降低了 PE 隔膜的结晶度,促进了离子的迁移,还可凭借其高比表面积和强亲水性,显著改善隔膜的电解液润湿性^[12]。相较于传统 PE 隔膜,复合 PE 隔膜的热稳定性、电解质浸润性和离子电导率等显著提升,这为锂离子电池性能优化与安全性能增强提供了有效解决方案^[13]。

3.1 无机纳米粒子涂层聚乙烯隔膜

聚乙烯隔膜是可充电锂离子电池中应用最广泛的隔膜之一,其具备诸多优势,例如优异的力学性能、相对较低的成本以及良好的化学/电化学稳定性等。然而,PE 隔膜的表面呈非极性,对有机电解质的润湿性较差。此外,它的熔点较低($130 \sim 138\text{ }^\circ\text{C}$),在高温下容易收缩,这对锂离子电池构成了重大安全隐患。一种直接的方法是在 PE 隔膜表面引入多功能、耐热的无机材料。

如今,复合膜的开发方法主要是,使用复合陶瓷溶液或无机陶瓷材料对 PE 隔膜进行表面涂层,或将复合凝胶聚合物涂覆在隔膜上,又或是将 2 种方法联用。陶瓷材料可以防止锂离子电池受到高温损伤,并维持电池结构的稳定性。作为一类复合材料,陶瓷涂层材料因兼具无机粉末的耐热性与 PE 隔膜基材本身特性,而受到研究人员的关注。这类聚乙烯复合隔膜具有以下特点:以聚乙烯隔膜为基材,可较好地保持其高力学强度和化学稳定性;引入耐热材料显著改善了聚乙烯隔膜热稳定性较差的问题;由于制备工艺简单,且市售聚乙烯隔膜价格低廉,使得此类复合隔膜的成本也得到了合理控制,有利于在储能装置中大规模应用;涂覆的颗粒层增强了隔膜的润湿性和电解质吸收能力,但它可能会增加锂离子扩散的阻力^[14]。

SiO_2 凭借环保、低成本、易于生产、高化学/热稳定性以及极性,成为制备锂离子电池隔膜最有价值和最富有成效的一种材料^[15]。Mun 等^[16]采用化学改性后的 SiO_2 对 PE 隔膜进行浸渍处理,在维持隔膜厚度及孔结构不变的前提下,显著提升了 PE 隔膜在 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 高温条件下的热稳定性,且改性后的 PE 隔膜所组装的锂离子电池展现出低极化、长循环寿命及高倍率性能。Lü 等^[17]研发了一种海绵状纳米多孔二氧化硅涂层隔膜,这种纳米多孔 SiO_2 不仅提高了 PE 隔膜的热稳定性,还增强了其与电解质的润湿性。

Al_2O_3 作为聚合物基复合材料中极具优势的无机增强相,具有高表面活性、优异亲水性、宽电化学窗口及良好热稳定性等特性,因而被广泛用作隔膜材料的改性添加剂。此类陶瓷材料通过界面修饰与功能调控,能够显著改善隔膜与电解液的润湿行为,提升离子传输效率,并增强体系热稳

定性,为锂离子电池的隔膜材料设计提供了重要技术路径。Cheng 等^[18]将优化配比的 Al_2O_3 与聚乙烯吡咯烷酮(PVP)陶瓷浆料单面涂覆于 PE 隔膜表面,成功制备出新型 Al_2O_3 /PVP-PE 复合隔膜。该隔膜在 180 °C 高温环境下表现出优异的尺寸稳定性,几乎未出现热收缩现象。Ahn 等^[19]以水溶性黏合剂制备反应性 Al_2O_3 颗粒,并在其涂覆于 PE 隔膜后与凝胶前体热交联,形成三维网络。研究发现,该隔膜与凝胶电解质协同作用,能使锂离子电池在高温下循环稳定,其高孔隙结构能增强电解液浸润与储液能力,优化离子传输,提升电池安全与电化学性能。

3.2 无机纳米粒子接枝聚乙烯隔膜

陶瓷涂层 PE 隔膜凭借优异的力学强度与热稳定性,在保障锂离子电池安全性、提升电化学性能方面已成为研究热点。该隔膜通过物理阻隔作用有效抑制电池内部短路,为锂离子电池的安全运行构筑关键屏障。然而,该类隔膜存在一些固有缺陷,例如涂层厚度的增加与多孔结构的阻塞,会导致锂离子电池的能量密度与功率密度显著下降^[20];陶瓷颗粒分布不均、聚合物黏合剂结合力较弱等问题,易引发颗粒在锂离子电池制备及运行过程中脱落,进而影响电池的长期稳定性^[21]。

针对上述挑战,表面接枝改性技术展现出良好的应用潜力。在适宜的辐射条件下进行表面接枝,

既能提升隔膜的耐热性能,又可避免对聚合物基质造成不可逆损伤。其中,电子束接枝、等离子体和 γ 射线等物理辐射处理手段,成为优化 PE 隔膜结构、润湿性及电化学性能的前沿方法^[22]。此类辐射过程中产生的自由基,可引发聚合物链交联反应,显著改善隔膜的物理化学性能,为高性能锂离子电池隔膜的开发提供了新思路。

电子束辐射技术依托电子加速器产生的具有高能量的电子束流轰击隔膜表面,促使活性自由基生成。该技术具备能量密度高、处理效率优异、参数调控便捷的优势,且在应用过程中绿色环保,产生的污染较少。Jiang 等^[23]用高能电子束(EB)处理 PE 隔膜,使其产生自由基以引发与乙烯基三(2-甲氧基乙氧基)硅烷(VTMEOS)的接枝反应,之后将经过接枝处理的隔膜置于 Al^{3+} 溶液中进行水解反应(图 1),最终成功制备出 Al_2O_3 接枝 PE 隔膜(Al_2O_3 -CGS 隔膜),与纯 PE 隔膜相比, Al_2O_3 -CGS 隔膜的多孔结构和厚度无明显变化,而电解液润湿性、离子电导率及热稳定性均有显著提高。Zhu 等^[24]先通过电子束辐射,将乙烯基三甲氧基硅烷(VTMS)接枝到 PE 隔膜表面,随后将隔膜置于酸性溶液中,与硅酸钠(Na_2SiO_3)发生共水解缩合反应,最终成功将 SiO_2 颗粒接枝到 PE 隔膜上。所得复合隔膜不仅保留了 PE 隔膜原有的形貌与孔隙率,还显著提升了自身的电解液润湿性、离子电导率及热稳定性。

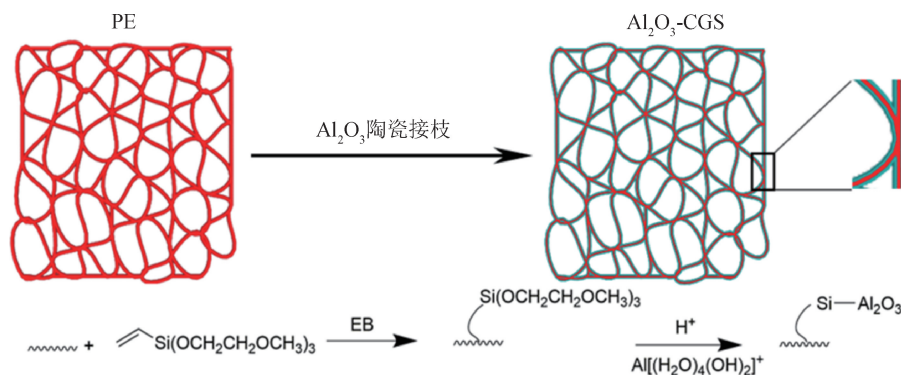


图 1 Al_2O_3 -CGS 隔膜的制备流程示意和机理

Fig. 1 Illustration and mechanism of the preparation process of Al_2O_3 -CGS separator

等离子体处理技术作为一种绿色高效的表面改性方法,具备干燥化、零污染及节能显著等特性,能够有效提升材料表面能、改善材料的润湿性、增强与结合材料间的化学相容性,可实现对各类基材表面

性能的精准调控,在材料表面工程领域具有广阔的应用前景^[25]。李妍等^[26]用自制的动态连续常压等离子体增强化学气相沉积装置(图 2)对 PE 隔膜进行改性,成功在 PE 隔膜表面涂覆了有机无机杂化

颗粒 $\text{SiO}_{3.5}\text{C}_{1.1}\text{H}_x$ 。研究表明,隔膜亲水性和稳定性得到显著提升,透湿性、抗热收缩性得到改善,且透气性能稳定。装配这种处理后的隔膜后,锂离子电池在低温条件下的阻抗降低, Li^+ 传导性与电池性能得到提升。覃思成^[27]采用常压等离子体沉积装置,首先对 PE 隔膜表面进行活化处理,成功引入羟基、羰基等极性活性基团;然后在聚烯烃隔膜表面逐步沉积 SiO_2 ,最终制得有机-无机杂化改性隔膜。研究表明,该改性隔膜的熔融温度、热稳定性及工作安全性均得到提升,同时锂离子电池容量显著

增加。此外,在低电流密度下,采用该隔膜组装的锂离子电池,其倍率性能也有所改善。Na 等^[28]通过紫外线臭氧(UVO)等离子体处理实现 PE 隔膜表面活化,结合硅烷杂交技术,在隔膜表面构建起无聚合物黏合剂的 SiO_2 纳米颗粒薄涂层。研究表明,相较于传统陶瓷颗粒基聚合物复合材料物理涂层,该化学接枝方法所得隔膜展现出显著性能优势,涂层黏合强度超 2.5 N/cm , 120°C 下热收缩率低于 5%,离子电导率可达 0.84 mS/cm ,这为高性能隔膜制备提供了新思路。

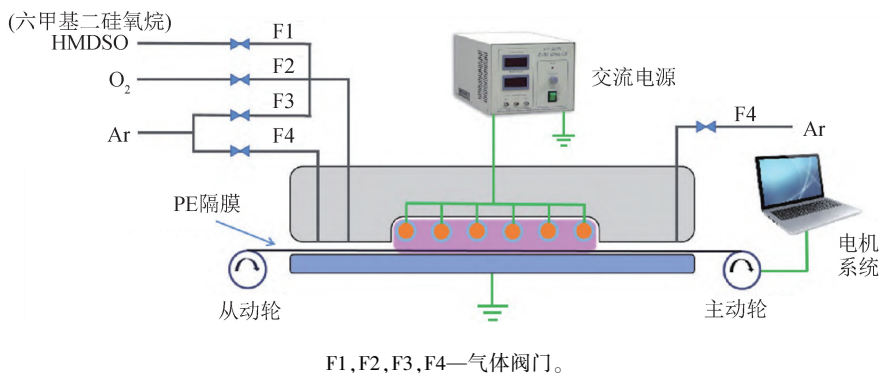


图2 动态连续常压等离子体增强化学气相沉积装置

Fig. 2 Dynamic continuous atmospheric pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition device

γ 射线辐射接枝作为极具潜力的聚合物表面修饰技术,其作用机制基于自由基引发聚合反应。该技术可精准调控材料表面极性基团的接枝情况,有效改善材料原本的非极性与化学惰性特征,在提升界面性能、拓展应用领域等方面优势显著,已成为国内外材料科学领域的研究热点。刘汶朋^[29]采用 γ 射线辐射接枝技术,以甲基丙烯酸甲酯(MMA)为单体,对 PE 隔膜的表面进行接枝改性。发现该方法能够在不破坏隔膜原始多孔结构的前提下,维持 PE 隔膜稳定的孔隙率,确保离子传输通道畅通。接枝形成的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)通过引入极性基团,能显著提升 PE 隔膜的表面极性,大幅增强其对电解液的浸润能力与亲和性,这为优化锂离子电池内部界面性能、提升电化学稳定性提供了切实可行的解决方案。杨振萍等^[30]以甲氧基聚氧化乙烯丙烯酸酯作为改性剂,先经溶液浸渍处理 PE 隔膜,再结合 γ 射线辐照技术引发表面聚合反应,在 PE 隔膜表面接枝功能层。研究发现,这种改性后的 PE 隔膜具备更优异的电解液保持能力,并且在高倍率放电性能方面也表现出色。

3.3 无机纳米粒子填充复合隔膜

在复合隔膜制备技术中,相较于传统的无机颗粒涂层与接枝策略,无机纳米颗粒直接填充 PE 隔膜被视为一种高效且直接的制备方法。该方法通过精准调控材料特性,可实现多种功能间的优化平衡。其核心在于,深入考量无机填料引入机制高性能锂离子电池、隔膜关键参数的协同关系,以达成性能上的突破。研究表明,在 PE 隔膜中引入无机纳米填料能够有效降低 PE 隔膜结晶度,为锂离子的快速迁移创造有利条件,进而显著提升锂离子电池充放电效率与循环稳定性。这一发现对推动高性能锂离子电池隔膜材料的发展具有重要意义。Babiker 等^[31]通过双轴拉伸工艺制备了一种混合超分子量聚乙烯(UHMWPE)/ SiO_2 纳米复合膜。发现, SiO_2 纳米粒子融入 UHMWPE 结构,可以提高电解质的吸收和润湿性,增强热稳定性,保持力学性能,确保电化学稳定性和电池性能。张玉梅等^[32]将耐热陶瓷勃姆石(BH)与 UHMWPE 进行共混,发现当 BH 质量分数为 4%时,锂离子电池隔膜综合性能较好,穿刺强度提高 20%、透气度提升 25%、纵向热

收缩降低 60.7%, 横向热收缩降低 51.1%。

4 结论与展望

4.1 结论

聚烯烃基多孔膜作为现代商业锂离子电池隔膜的主流材料,以聚乙烯及其复合材料为代表,凭借优异的力学强度、化学稳定性和可控的微观结构,在锂离子电池领域占据核心地位。其中,湿法和干法工艺分别通过双轴拉伸和单向/双向拉伸技术,赋予隔膜独特的孔道结构,以满足不同电池体系对离子传输和力学性能的需求。然而,PE 隔膜在实际应用中仍面临热稳定性差、电解液润湿性不足和易受机械损伤等问题,限制了其在高性能电池中的进一步应用。

为突破上述瓶颈,科研人员通过复合改性技术,将 SiO_2 、 Al_2O_3 等无机纳米材料与 PE 隔膜复合,衍生出无机颗粒涂层、接枝和填充这 3 类复合隔膜。无机纳米粒子涂层隔膜通过表面涂覆显著提升热稳定性和电解液浸润性;表面接枝改性技术(如电子束、等离子体、 γ 射线辐射等)利用自由基引发反应优化隔膜界面性能;无机纳米粒子填充复合隔膜则通过直接掺入填料降低 PE 隔膜结晶度,促进离子迁移。这些改性策略均在不同程度上实现了隔膜热稳定性、离子电导率和电化学性能的协同提升。

4.2 展望

尽管聚乙烯基复合隔膜的研究已取得显著进展,但面向高能量密度、高安全性储能器件的发展需求,仍需在以下方向深入探索:其一,开发多尺度复合与梯度结构设计技术,实现无机填料在 PE 隔膜中的均匀分散与界面强耦合,进一步平衡隔膜的力学性能、提升离子传输能力与热稳定性,多尺度技术以微观、介观、宏观尺度的协同调控为核心,着力优化材料结构特征,梯度结构设计则通过构建材料内部组分与结构的连续变化,让材料不同区域的性能形成梯度分布;其二,探索绿色环保的制备技术,降低有机溶剂使用和能耗,推动隔膜生产向可持续方向发展;其三,针对新兴电池体系(如固态电池、锂硫电池等)的特殊需求,设计兼具高离子电导率与界面稳定性的复合隔膜材料。此外未来研究还需强化基础理论与工程应用的结合,为实现高性能电池

隔膜的产业化提供技术支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 于捷, 张文龙. 锂离子电池隔膜的发展现状与进展[J]. 化工进展, 2023, 42(4): 1760-1768.
- [2] WERBER J R, OSUJI C O, ELIMELECH M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes [J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1: 16018.
- [3] LI Y Q, YU L, HU W R, et al. Thermotolerant separators for safe lithium-ion batteries under extreme conditions[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(39): 20294-20317.
- [4] MA Z Y, XUE Y R, YANG H C, et al. Surface and interface engineering of polymer membranes: where we are and where to go [J]. Macromolecules, 2022, 55(9): 3363-3383.
- [5] 刘天一, 张汉鸿, 张明杰, 等. 湿法锂离子电池隔膜的研究进展[J]. 广东化工, 2021, 48(12): 95-97.
- [6] 闫家辉, 乔庆东, 于廷云, 等. 无机材料对于锂电池隔膜改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(9): 1-5.
- [7] ZHANG L P, LI X L, YANG M R, et al. High-safety separators for lithium-ion batteries and sodium-ion batteries: advances and perspective[J]. Energy Storage Materials, 2021, 41: 522-545.
- [8] 孙美玲, 唐浩林, 潘牧. 动力锂离子电池隔膜的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(9): 44-50.
- [9] LYU P Z, LIU X J, QU J, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage [J]. Energy Storage Materials, 2020, 31: 195-220.
- [10] 秦颖, 徐康丽, 邓霁霞, 等. 锂离子电池隔膜的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(4): 1-6.
- [11] 缪亚美, 汪林林, 陈晨, 等. 新能源汽车锂离子动力电池隔膜技术研究进展[J]. 当代化工研究, 2025(3): 15-17.
- [12] 王远铭, 史鑫然, 张信, 等. 锂离子电池隔膜改性研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(12): 1634-1645.

- [13] 唐顺浩, 肖伟, 乔庆东, 等. 锂离子电池隔膜稳定性研究进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(4): 18-22.
- [14] 陈萌, 胡宗辉, 高瑛, 等. 锂离子电池用隔膜研究进展[J]. 上海轻工业, 2024(6): 103-105.
- [15] LE MONG A, SHI Q X, JEON H, et al. Tough and flexible, super ion-conductive electrolyte membranes for lithium-based secondary battery applications [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31 (12): 2008586.
- [16] MUN J, YIM T, GAP KWON Y, et al. Self-assembled nano-silica-embedded polyethylene separator with outstanding physicochemical and thermal properties for advanced sodium ion batteries [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 405: 125844.
- [17] LYU P F, HUO T L, GAO S, et al. Sponge-like nanoporous SiO₂-based polyethylene separators for safe fast-charging lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(24): 28553-28562.
- [18] CHENG S Y, DENG R, ZHANG Z, et al. A novel Al₂O₃/polyvinyl pyrrolidone-coated polyethylene separator for high-safety lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2024, 614: 234964.
- [19] AHN J H, KIM H M, LEE Y J, et al. Nanostructured reactive alumina particles coated with water-soluble binder on the polyethylene separator for highly safe lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2021, 506: 230119.
- [20] ZHAO H J, YAN J, DENG N P, et al. A versatile nano-TiO₂ decorated gel separator with derived multi-scale nanofibers towards dendrite-blocking and polysulfide-inhibiting lithium-metal batteries [J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 55: 190-201.
- [21] NA W, LEE A S, LEE J H, et al. Lithium dendrite suppression with UV-curable polysilsesquioxane separator binders [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(20): 12852-12858.
- [22] BABIKER D M D, YU R, USHA Z R, et al. High performance ultra-high molecular weight polyethylene nanocomposite separators with excellent rate capabilities designed for next-generation lithium-ion batteries [J]. Materials Today Physics, 2022, 23: 100626.
- [23] JIANG X Y, ZHU X M, AI X P, et al. Novel ceramic-grafted separator with highly thermal stability for safe lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(31): 25970-25975.
- [24] ZHU X M, JIANG X Y, AI X P, et al. A highly thermostable ceramic-grafted microporous polyethylene separator for safer lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7 (43): 24119-24126.
- [25] 王明, 覃思成, 王超梁, 等. 连续硅基杂化隔膜涂层对锂离子电池性能的影响[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(6): 966-972.
- [26] 李妍, 王超梁, 覃思成, 等. 常压连续等离子体制备长效亲水锂离子电池隔膜[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 29-35.
- [27] 覃思成. 常压等离子体连续涂覆锂离子电池隔膜的研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [28] NA W, KOH K H, LEE A S, et al. Binder-less chemical grafting of SiO₂ nanoparticles onto polyethylene separators for lithium-ion batteries [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 573: 621-627.
- [29] 刘汶朋. 可用作钠离子电池隔膜的聚乙烯和聚丙烯膜的改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2024.
- [30] 杨振萍, 吴月浩, 边清泉. 聚烯烃型隔膜的亲液改性[J]. 功能材料, 2013, 44(13): 1829-1832.
- [31] BABIKER D M D, WAN C X, MANSOOR B, et al. Superior lithium battery separator with extraordinary electrochemical performance and thermal stability based on hybrid UHMWPE/SiO₂ nanocomposites via the scalable biaxial stretching process [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 211: 108658.
- [32] 张玉梅, 茆汉军, 王新威. 勃姆石改性 UHMWPE 锂电池隔膜性能的研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(7): 171-174.

维护国家安全人人有责