固态电池电解质技术研究进展*

曹晋恺　宋琛　张岩

（西安职业技术学院，西安 710077）

【摘要】固态电池兼具高安全性与高能量密度，在电动汽车动力电池领域具有广阔的应用前景，但固态电解质面临的离子电导率低、界面阻抗高及锂枝晶生长等问题制约了其实际应用。基于固态电解质技术在动力电池中的应用，系统梳理了固态电解质材料的分类、性能特点与不足，重点围绕枝晶抑制策略，对固态电解质薄膜制备、有机框架构建、新型电解质设计及界面工程等方面的研究进展进行了分析，并针对粒径分布调控、涂层改性、真空烧结与高能球磨等工艺手段在离子电导率优化中的应用进行了总结。最后，对固态电解质技术的未来发展进行了展望。

关键词：电动汽车　固态电池　电解质　枝晶抑制

中图分类号：U469.72；TM91　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260078

Recent Advances in Solid-State Battery Electrolyte Technology

Cao Jinkai, Song Chen, Zhang Yan

(Xi'an Vocational and Technical College, Xi'an 710077)

【**Abstract**】Solid-state batteries combine high safety with high energy density and hold broad application prospects in the field of electric vehicle power batteries; however, issues such as low ionic conductivity, high interfacial impedance, and lithium dendrite growth in solid-state electrolytes limit their practical application. Based on the application of solid-state electrolyte technology in power batteries, the paper systematically reviews the classification, performance characteristics and limitations of solid-state electrolyte materials. Focusing on dendrite suppression strategies, it analyzes research progress in areas such as the preparation of solid-state electrolyte films, the construction of organic frameworks, the design of novel electrolytes, and interface engineering. It also summarizes the application of process techniques—including particle size distribution control, coating modification, vacuum sintering, and high-energy ball milling—in optimizing ionic conductivity. Finally, the paper looks into the future for development of solid-state electrolyte technology.

Key words: Electric vehicle, Solid-state batteries, Electrolyte, Dendrite suppression

【引用格式】曹晋恺, 宋琛, 张岩. 固态电池电解质技术研究进展[J]. 汽车工程师, 2026(9): 15-22+29.

CAO J K, SONG C, ZHANG Y. Recent Advances in Solid-State Battery Electrolyte Technology[J]. Automotive Engineer, 2026(9): 15-22+29.

1　前言

目前，新能源汽车使用的动力电池以磷酸铁锂电池和三元锂电池为主，普遍存在电池容量衰减问题和热失控风险[1-3]。固态电池的电解质具有稳定的电化学环境，以及更高的能量密度和安全性，被视为下一代电池技术的核心方向[4-5]。

欧洲固态电池技术正朝着由硅基负极、高镍三元正极和硫化物电解质构成的方向发展，要求能量密度达到275 W·h/kg、650 W·h/L[6-8]。美国计划在2030年实现电池能量密度500 W·h/kg，并进一步降低电池包成本，实现固态电池规模化量产。日本提出在2030年实现全固态电池的大规模商业化应用。中国最早在2020年就提出了关于加快固态电池技术研究与产业化的发展规划[4-9]，中国企业在固态电池技术研发方面也取得了显著进展。2025年，中国首条大容量全固态电池产线正式建成并启动小批量测试，能量密度突破400 W·h/kg[10]。国轩高科在2025

*基金项目：陕西省"十四五"教育科学规划2025年度课题项目（SGH25Y4126）。

年11月建成国内首条具备60 A·h以上大容量全固态电池量产条件的中试产线[11]。2025年12月,华中科技大学郭新教授团队研发51 A·h车规级固态电池系列产品,并通过中汽研检测认证,能量密度突破520 W·h/kg,工作温域达-45~120 ℃[12]。2025年9月,亿纬锂能旗下主要面向人形机器人、低空飞行器等高端应用领域的"龙泉二号"全固态电池成功下线[13]。中固时代于2025年12月发布了容量达540 A·h、循环寿命达12 000次的中心液冷大容量固态电池[14]。

固态电池虽然具有抑制枝晶生长、不易燃烧、能量密度大、循环寿命长等优点,但其应用仍受到三个核心问题的制约,即锂金属枝晶生长仍会出现在高机械强度的固态电解质中、物理化学过程(如界面电化学、离子传输等)具有多场耦合特征、固态电解质体相与表界面的锂离子迁移面临体相内的高阻力和界面上更复杂的物理化学障碍。为此,本文首先梳理固态电解质材料的分类与性能差异,分析负极材料替代与正极界面优化的匹配策略,进而围绕枝晶抑制这一关键问题,综述固态电解质薄膜制备、有机框架构建、新型电解质设计及界面工程等领域的最新进展,并归纳工艺优化对提升离子电导率的贡献。

2 固态电解质材料与界面工程

2.1 固态电解质材料及性能差异

固态电解质材料通常由聚合物基体与陶瓷填料相结合构成,可分为无机陶瓷电解质(Inorganic Ceramic Electrolyte,ICE)、固态聚合物电解质(Solid Polymer Electrolyte,SPE)和无机聚合物电解质(Inorganic-Polymer Composite Electrolyte,IPC)[10,15-16]。

无机陶瓷电解质包括硫化物电解质、卤化物电解质、氧化物电解质3种[17]。硫化物电解质(如$Li_{10}GeP_2S_{12}$)离子电导率高(≈10^{-2} S/cm),与液态电解质近似,具有晶界电阻较小和延展性良好的特点,适合采用冷压成型工艺,但电化学稳定性较差,易在2.0~2.5 V条件下氧化。卤化物电解质(如Li_3YCl_6)具有电化学窗口宽、与正极相容性好的特点,离子电导率通常较低(mS/cm级),通常通过掺杂其他材料(如Ta掺杂$LaCl_3$)提高电导率。氧化物电解质(如$Li_7La_3Zr_2O_{12}$(LLZO)、Na超离子导体(Na Super Ionic Conductor,NASICON))具有空气稳定性好、电化学窗口宽的特点,其离子电导率一般较低,晶界电阻较大,可通过掺杂(如Ta、Al掺杂LLZO)提高电导率。此外,无机电解质中的磷酸锂铝钛在电导率和热稳定性方面存在优势,但同时展现出机械脆性[18]。

3种无机陶瓷电解质的离子导电性、电化学氧化稳定性及临界电流密度对比情况如表1所示。由表1可知:氧化物电解质最稳定,但导电性能偏弱;硫化物电解质导电性能最好,但抗氧化性差;卤化物电解质介于两者之间,且在抑制枝晶方面表现突出。

表1 3种无机陶瓷电解质的离子导电性、电化学氧化稳定性和临界电流密度[17]

固态电解质类型	固态电解质构成	离子电导率/mS·cm^{-1}	电化学稳定窗口的阳极极限/V	临界电流密度/mA·cm^{-2}
硫化物	$Li_{9.54}Si_{1.74}P_{1.44}S_{11.7}Cl_{0.3}$(LSiPSCl)	25(室温)	2.6	
	Li_3PS_4-Li_4SiS_4	2.21(25 ℃)		1.2(25 ℃)
	LiF@$Li_{10}GeP_2S_{12}$	2.54(25 ℃)	≈4.6	3.0(25 ℃)
	$Li_{5.5}PS_{4.5}Cl_{1.5}$	9.03(室温)		
卤化物	$Li_{0.388}Ta_{0.238}La_{0.475}Cl_3$	3.02(30 ℃)	4.35	5.0(室温)
	$LiNbOCl_4$	10.4(室温)	5	
	1.6Li_2O-$TaCl_5$	6.60(25 ℃)	4.15	
氧化物	LLZO	1.00(25 ℃)	≈3.0	
	Ta-LLZO	0.51(25 ℃)		3.2(25 ℃)
	AI-LLZO	0.29(25 ℃)		2.6(25 ℃)
	Ta-LLZO	0.44(25 ℃)	≈6.0	2.0(25 ℃)
	Ta-LLZO	0.23(室温)		1.6(25 ℃)

固态聚合物电解质常用的聚合物为聚环氧乙烷(Poly (Ethylene Oxide),PEO)、聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate,PMMA)、聚偏氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride,PVDF)、聚丙烯腈

(Polyacrylonitrile,PAN)等,具有室温下结晶度高,离子电导率低、Li^+迁移数低(0.2~0.5)的特点,通常通过掺杂塑性晶体(如丁二腈)提高离子电导率,可通过共聚、交联、接枝等方式改善聚合物结构,还可以通过制备超薄电解质膜(如 8.6 μm 聚酰亚胺(Polyimide,PI)膜)缩短 Li^+传输路径。此外,聚氧化乙烯和聚偏二氟乙烯等有机固态电解质可提供良好的弹性,同时具有较低的离子电导率。

无机聚合物电解质的结构为在聚合物基质(如PEO、PVDF)中掺入无机填料(如 Al_2O_3、LLZO、金属-有机框架(Metal-Organic Framework,MOF)),离子电导率和机械强度较高,但存在填料分散不均导致离子传导网络不连续和陶瓷/聚合物界面相容性差的问题[18-22]。

2.2 电极材料与正极-电解质界面优化

从固态电解质的匹配性出发,负极材料的选择必须兼顾与电解质的化学兼容性和界面稳定性。锂金属常用作固态电池的负极材料,具有较低的电化学电位、良好的轻量化特性和较高的理论容量,但存在易氧化、反应性强和易形成枝晶的问题[18,23-24]。目前,碳基材料、金属合金、硫和硅逐渐替代锂金属作为固态电池的负极材料,以抑制枝晶穿透电解质。

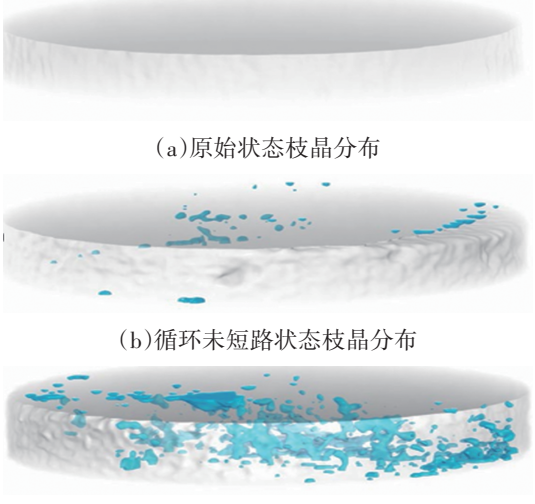
正极材料决定了电池的整体性能和能量密度。$LiCoO_2$、$LiFePO_4$和 $LiNiMnCoO_2$等材料具有能量密度高、稳定性良好以及制造成本低的特点,但也存在高负载下活性材料利用率低的问题。正极材料的选择与电解质材料密切相关,为进一步改善固态电池的性能,研究人员在固态电解质与正极间的连接策略方面提出了多种优化方案。Kim 等[25]提出一种新型正极设计方案,利用活性材料固态电解质核壳复合颗粒在高活性材料含量下具有高体积能量密度和优异电化学性能的特点,通过机械加工工艺制备出均匀涂覆的薄固态电解质壳和小颗粒固态电解质,在活性材料质量分数为85%的条件下实现了 1 258 W·h/L 的体积能量密度。Lee 等[26]提出使用 Li_3InCl_6卤化物代替无机固态电解质作为正极材料,不仅可以增强电池的热稳定性,还可以延缓 NCM622 的分解并抑制固态电解质氧化分解释放氧气。

因此,负极材料的替代、正极材料的选择及正极-电解质界面的结构调控共同实现了离子传输和界面稳定性的优化。

3 固态电解质枝晶问题及其改善策略

3.1 锂枝晶抑制的多路径材料与界面设计策略

在实际生产过程中,固态电池的长寿命循环仍面临问题,这是因为固态电池电解质界面锂离子传输缓慢,导致锂枝晶生长和副反应严重。而枝晶生长会引发短路和安全事故,同时降低电池容量、破坏电极结构。Liu 等[27]通过非侵入性的固态核磁共振和磁共振成像技术发现了枝晶产生的原因为在电极-电解质界面存在非均匀的锂沉积,并且在 $Li_7La_3Zr_2O_{12}$晶界出现局部锂还原,随后发生由锂离子还原引发的缓慢体相枝晶成核,枝晶生成的位置如图 1 所示。另外,Diallo 等[28]发现,在相对密度超过 95% 的固态电解质颗粒中,锂丝生长会被抑制,相对密度低于 95% 时,锂丝生长加快,电池更易短路。为解决枝晶生长问题,研究者提出了多种解决方案。



(a)原始状态枝晶分布

(b)循环未短路状态枝晶分布

(c)短路状态时枝晶分布

图 1 LLZO 固态电解质中的枝晶分布[27]

3.1.1 固态电解质薄膜制备与优化

在固态电解质中,硫化物具有室温下离子电导率高及可实现低温加工的优势,但在制备大面积电解质膜时由于需要压制硫化物粉末,使得硫化物薄膜制备十分复杂。Li 等[29]研究了一种以聚合物作为粘合剂制备高离子电导率柔性硫化物复合电解质膜的方法,并对比了不同制备工艺的优缺点,其中湿法制备的复合电解质膜虽然尺寸受限,但用于全固态电池在 25 ℃、0.1 C 条件下循环 100 次后,仍能提供 485.1 mA·h/g 的高放电容量,并具有约 78.5% 的容量保持率。另外,干法制备与之相比具有能耗

低、粘结剂使用少、防止固态电解质降解以及能够保持硫化物的高离子电导率等优点[30]。以聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene,PTFE)为例,其纤维化对干法制备的固态电解质膜的综合性能影响深远。Lee等[31]展示了一种物理-电化学耐久型固态电解质(Solid-State Electrolyte,SSE)薄膜的双层结构,以进一步强调PTFE纤维化在保持SSE薄膜离子电导率和保证拉伸强度方面的重要影响,以及全固态电池的储能能力。

3.1.2 基于有机框架的电解质结构设计

MOF是一种由金属节点和有机连接体组成的多孔晶体材料,具有孔隙率可调、纳米通道有序和表面化学性质高度可调控的特点,使锂离子传输、树突抑制和界面稳定性等特性得以改善[32]。Zhao等[33]提出了一种基于分子内电荷转移相互作用的D-A连接共价有机框架(Covalent Organic Framework,COF)高性能固态电解质。引入COF电解质中的高电负性氟基配体,使锂离子具有高选择性(迁移数0.83)、高离子电导率(6.7×10^{-4} S/cm)、在锂金属对称电池中优异的循环能力(1 000 h)以及在Li/$LiFePO_4$电池中的高容量保持率(5 C下300次循环后容量保持率为90.8%),相比被替代的氮基体和碳基体,氟基配体更能加快锂离子传输动力学。

3.1.3 新型固态电解质材料开发

Liu等[34]提出一种基于离子液体的复合聚合物电解质,LLZO@0.075Bpy质量分数为8%,与锂金属负极具有出色的界面兼容性,使锂离子传输更加高效,减小了聚合物-无机界面的界面电阻,实现了超过600 h的稳定循环。Aruchamy等[35]讨论了凝胶聚合物电解质(Gel Polymer Electrolyte,GPE)在固态电池上的应用,替代前体、3D打印技术、掺杂、复合设计、引入离子液体以及采用可再生和可生物降解材料为固态电池的性能改善提供了技术支持,使固态电池锂-电解质界面更稳定、无枝晶形成、剥离/沉积效率提高,并改善了界面化学性能和循环性能。杜玉霖等[36]基于同轴静电纺丝方法制备了一种核壳纤维结构PEO-LiTFSI-SiO_2复合固态电解质,离子电导率可达1.4×10^{-4} S/cm,抗拉强度为5.64 MPa,电流密度为0.1 mA/cm^2时锂对称电池的循环寿命大幅延长至900 h,表明该复合固态电解质可以显著提高锂离子的传导性能,并防止枝晶的形成。Li等[37]提出一种超离子氯化物材料$NaTaCl_6$,其在27 ℃下表现出高达3.3 mS/cm的离子电导率,比$NaNbCl_6$(0.01 mS/cm)高2个数量级,表明其具有较高的离子电导率和良好的电化学稳定性,适用于汽车固态电池。Ye等[38]设计了一种新型高熵氯化物固态电解质HE-5($Li_{2.2}In_{0.2}Sc_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Ta_{0.2}Cl_6$),并在30 ℃下实现了4.69 mS/cm的阴离子电导率,激活能为0.300 eV,原因是高熵无序晶格结构促进了锂离子的迁移,实现了出色的电化学性能且高构型熵稳定了电解质在高电压下的结构。Wang等[39]研究了一种采用硫银锗矿(Argyrodite)型固态电解质的无负极全固态电池,揭示了其电化学稳定性取决于锂在“空”铜集流体和预先存在的锂金属上均匀电沉积,同时Li-固态电解质和Cu-固态电解质界面(SEI-1和SEI-2)必须保持稳定且腐蚀最小,通过物理气相沉积实现复杂界面和界面层的微观结构控制并通过腐蚀试验表明,单独的Mg不能防止铜硫化物的生成。以上结论均为无负极系统的设计提供了思路。

3.1.4 混合电解质体系构建

Edison等[40]提出了一种基于固态钠金属电池的混合电解质体系,即将聚(二烯丙基二甲基铵)双(氟磺酰)亚胺聚合物基体与N-丁基-N-甲基吡咯烷铵双(三氟甲磺酰)亚胺离子液体中的钠双(氟磺酰)亚胺结合,制备方法如图2所示。基于该电解质和钠钒磷酸盐阴极的钠金属全固态电池在60 ℃环境下实现稳定循环,经过2 000次循环后容量保持率为75%,突出了混合电解质的发展潜力。另外,还有研究通过掺入羟基磷灰石、有机磷酸盐类溶剂以及三氟啶磺隆钠(Trifloxysulfuron-sodium,TFSI)改善界面稳定性、溶剂能力和热稳定性。Woolley等[41]总结了混合固液电解质体系的发展,重点阐述了液态电解质的化学稳定性在形成稳定的固-液电化学界面(Solid Liquid Electrolyte Interphase,SLEI)中的重要作用,可见混合电解质正逐步应用于固态电池。王媛媛等[42]通过Y^{3+}异价掺杂$Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$制备$Na_{3+x}Zr_{2-x}Y_xSi_2PO_{12}$($x$=0,0.05,0.10,0.15)系列固态电解质,并对固态钠电池中Y^{3+}掺杂$Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$固态电解质进行了性能分析,结果显示,适量Y^{3+}掺杂(x=0.10)在不破坏NASICON型$Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$晶体结构的前提下,其致密度(91.93%)和室温离子电导率(8.91×10^{-4} S/cm)均有所改善,揭示了钠离子固态电解质材料研究的新方向。

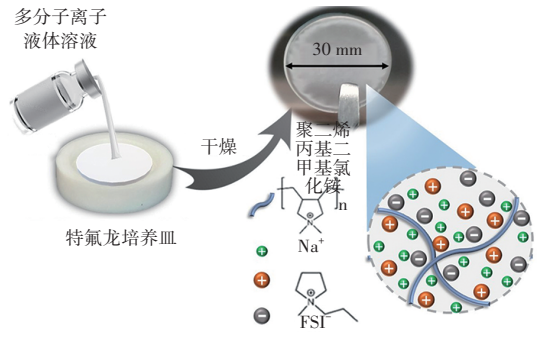


图2　聚合物离子液体混合电解质制备示意[40]

3.1.5　固态电解质界面工程

建立新型固态电解质界面(Solid Electrolyte Interphase,SEI),可以改善因SEI的脆性特性导致锂离子传输缓慢,进而产生锂枝晶和严重副反应的问题。Mi等[30]建立了一种具有延展性的无机富集SEI,这种SEI由Ag_2S和AgF组成,并通过SEI中的Li_2S/LiF与介电复合电解质中的$AgNO_3$的置换反应形成。具备这种SEI的固态电池可实现在15 mA/cm²的电流密度和15 mA·h/cm²的面积容量下,实现超过4 500 h的长循环寿命。此外,这种具有延展性的SEI在−30 ℃的极端温度、5 mA/cm²的电流密度和5 mA·h/cm²的面积容量下,可工作超过7 000 h。

3.2　固态电解质离子传导的微观结构与工艺优化策略

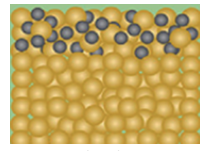
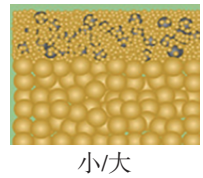
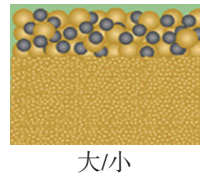
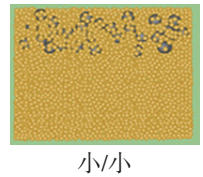
除了上述枝晶生长的改善方案外,还可以从微观结构与工艺方面进行优化。

3.2.1　粒径分布调控与空隙抑制

固态复合电极的微观结构决定了离子和电子通道特性,由于颗粒尺寸普遍不匹配而产生的空隙往往是阻碍电荷载流子传输的关键因素。Schlautmann等[43]研究了Li_6PS_5Cl颗粒尺寸对电荷载流子传输特性及全固态电池性能的影响,结果表明,使用较小的Li_6PS_5Cl颗粒可以优化电荷传输特性,并与活性材料形成更大的界面面积,使全固态电池的性能得以改善。Peng等[44]对电解质颗粒尺寸分布调控进行了研究,不同配置对各种固体接触的影响如表2所示。

由表2可知:当小颗粒固态电解质用于复合正极、大颗粒固态电解质用于电解质层时,固态电池在室温(0.2 C下质量比容量为168 mA·h/g,容量保持率99%,循环100次)和−20 ℃(0.05 C下质量比容量为89 mA·h/g)时表现最佳。可见,全固态电池受到电解质颗粒大小的影响。

表2　不同颗粒尺寸固态电解质电荷传输特性对比

固态电解质颗粒大小	电荷传输特性		
	复合阴极层	中间层	电解质层
 大/大	差	差	差
 小/大	优	优	差
 大/小	差	差	优
 小/小	优	优	优

3.2.2　表面涂层改性技术

使用涂层可以解决硫化物固态电解质暴露在常温空气中时的不稳定性问题。Hood等[45]提出使用原子层沉积技术在Li_6PS_5Cl粉末上生长薄的Al_2O_3涂层,研究表明,利用含涂层粉末制备的颗粒离子电导率最高,可达无涂层材料的2倍,且电子电导率降低,同时抑制Li−固态电解质界面化学反应。这使得硫化物固态电解质在具有较高离子电导率和良好机械性能的同时具有更长的室温下循环寿命。

3.2.3　先进烧结工艺优化

改善烧结工艺的目的是解决石榴石型固态电解质锂镧锆氧($Li_7La_3Zr_2O_{12}$,LLZTO)在室温下实际有效离子电导率偏低、固−固界面接触不良及致密化困难等问题。张正等[46]提出使用真空烧结工艺制备LLZTO,结果显示,材料的微观结构致密性与元素分布均匀性均得到改善,且离子电导率达0.8 mS/cm,电化学窗口扩展至5.1 V,临界电流密度达2.5 mA/cm²。这是由于该工艺能在一定程度上抑制杂质形成并改善界面稳定性。目前,氧化物固态电解质的制备工艺分为固态加工工艺、湿化学溶液工艺和气相沉积。固态加工是一种将固态前驱体粉末混合并经过高温煅烧、烧结等工序制备固态电

解质的方法,因具有工艺简单、可精确控制等特点而大规模应用,其缺点是反应速度缓慢且难以控制颗粒尺寸和微观结构。湿化学溶液工艺是一种通过对溶液前驱体进行旋涂、浸涂、喷涂处理后生成膜,再对膜进行热处理形成固态电解质的工艺方法,具有成本低、制备温度低及可制备纳米级薄膜的优点,但也存在易出现裂纹、锂损失和溶液配置与稳定性要求高的缺点。气相沉积是指在真空环境下前驱体蒸发后在基低上沉积成膜的工艺方法,具有薄膜厚度可控、可制备非晶或晶态薄膜等优点,同时具有工艺复杂、对设备要求高、沉积速率低和锂流失严重的缺点。

3.2.4 高能球磨与硫化物电解质分解调控

Qian 等[47]使用高能球磨(High-Energy Ball Milling,HEBM)技术促进了硫化物基电解质在硫上的沉积,从而获得比放电容量更高的充电容量,并超过金属硫化物的理论极限。研究人员以Cr_2S_3作为活性材料,硫化物基电解质分解出的硫在放电后转化为Li_2S,使容量增加约439.6 mA·h/g,并提高了循环稳定性。因此,其表现出超过1 200 mA·h/g的比容量,在650个循环后容量保持率超过80%,循环稳定性可维持超过1 900次,库仑效率超过99.9%。此外,这种方法用作制造MoS_2、NbS_2和FeS_2等过渡金属时,也表现出循环寿命延长和超过理论极限容量的现象。

综上,粒径分布调控、表面涂层改性、先进制备工艺(真空烧结、高能球磨)是提升固态电解质离子电导率、界面稳定性和全固态电池综合性能的关键方法。

4 结束语

本文系统总结了固态电解质材料的发展,首先分析了无机陶瓷、聚合物及复合电解质的离子电导率、电化学窗口及机械性能等核心指标差异,并讨论了负极(锂金属替代)与正极(核壳结构、卤化物包覆)在电解质匹配下的界面优化策略。在此基础上,重点梳理了枝晶生长的抑制路径,涵盖电解质薄膜制备、有机框架(MOF、COF)构建、新型高熵或富卤化物设计、混合电解质体系及界面工程等手段,其中更换或优化电解质组成被视为提升本征抗枝晶能力的根本措施。进一步,针对电化学性质的改善,归纳了调控电解质颗粒尺寸分布以优化复合电极离子/电子通道的方法,以及原子层沉积涂层、真空烧结和高能球磨等工艺在提升离子电导率与界面稳定性方面的应用。

展望未来,固态电解质的突破需在材料创新、工艺优化与智能预测方面协同推进,在保障离子传导与界面稳定的同时,构建动态试验数据库并结合机器学习与特征分析的方法,加速高离子电导率材料的筛选,还可以利用固态电解质数据库-大型语言模型-从头算元动力学(MetaD)模拟一体化人工智能框架为解析离子运输路径和预测活化能提供新方法,最终实现全固态电池的大规模商业应用。

参 考 文 献

[1] SANG V T D, DUONG Q H, ZHOU L, et al. Electric Vehicle Battery Technologies and Capacity Prediction: A Comprehensive Literature Review of Trends and Influencing Factors[J]. Batteries, 2024, 10(12).

[2] 王楠, 赵宁, 郭向欣. 超薄固态电解质应用于高能量密度固态锂电池研究进展[J]. 科学通报, 2026, 71(10): 2187-2203.
WANG N, ZHAO N, GUO X X. Research Progress on Ultrathin Solid Electrolytes for High-Energy-Density Solid-State Lithium Batteries[J]. Chinese Science Bulletin, 2026, 71(10): 2187-2203.

[3] 李洋, 马振, 李露莹, 等. 流延工艺制备全固态锂电池薄膜器件的研究进展[J]. 材料导报, 2026, 40(4): 12-18.
LI Y, MA Z, LI L Y, et al. Research Progress on Thin-Film Devices for All-Solid-State Lithium Batteries Prepared by Tape-Casting Process[J]. Materials Reports, 2026, 40(4): 12-18.

[4] 姜磊, 马丽娜·马木提, 张月星, 等. 基于专利分析的固态电池产业发展趋势[J]. 北京汽车, 2024(6): 42-46.
JIANG L, MAMUTI M, ZHANG Y X, et al. Development Trends of Solid-State Battery Industry Based on Patent Analysis[J]. Beijing Automotive Engineering, 2024(6): 42-46.

[5] 余帆, 林雨, 刘凝, 等. 固态锂电池研究现状与进展[J]. 船电技术, 2025, 45(7): 16-20+27.
YU F, LIN Y, LIU N, et al. Research Status and Progress of Solid-State Lithium Batteries[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2025, 45(7): 16-20+27.

[6] 徐廉, 陈虹瑾, 陈虹运. 德国电动汽车行业发展现状与挑战分析[J]. 中国汽车(中英文对照), 2025, 35(9): 526-531.
XU L, CHEN H J, CHEN H Y. Analysis of the Current Status and Challenges of the Electric Vehicle Industry in Germany[J]. China Automobile, 2025, 35(9): 526-531.

[7] 毛正昊, 章泽锴, 郑威, 等. 固态电解质的最新研究进展

与商业化前景[J]. 浙江化工, 2026, 57(3): 13-22.
MAO Z H, ZHANG Z K, ZHENG W, et al. Recent Advances and Commercialization Prospects of Solid-State Electrolytes[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2026, 57(3): 13-22.

[8] 张正, 杜泽谱, 侯敏, 等. 真空烧结优化氧化物固态电解质的性能研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(11): 1927-1934.
ZHANG Z, DU Z P, HOU M, et al. Study on Performance Improvement of Oxide Solid Electrolytes by Vacuum Sintering[J]. Nonferrous Metals (Chinese-English), 2025, 15(11): 1927-1934.

[9] 脱凯用, 卢普顺, 周志民, 等. 氧卤化物固态电解质及其全固态电池研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2025, 53(6): 1435-1455.
TUO K Y, LU P S, ZHOU Z M, et al. Research Progress on Oxyhalide Solid Electrolytes and Their All-Solid-State Batteries[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(6): 1435-1455.

[10] 李映泉. 广汽集团全固态电池中试产线正式投产[EB/OL]. (2025-11-24)[2026-08-23]. https://www.stcn.com/article/detail/3508512.html.
LI Y Q. GAC Group's All-Solid-State Battery Pilot Production Line Officially Put into Operation[EB/OL]. (2025-11-24)[2026-08-23]. https://www.stcn.com/article/detail/3508512.html.

[11] 朱雨蒙. 国轩高科:金石全固态电池处于中试量产阶段[EB/OL]. (2025-10-20)[2026-08-22]. https://www.egsea.com/news/detail/2155570.html.
ZHU Y M. Guoxuan High-Tech: "Jinshi" All-Solid-State Battery is in the Pilot Mass Production Stage[EB/OL]. (2025-10-20)[2026-08-22]. https://www.egsea.com/news/detail/2155570.html.

[12] 薛海燕, 蒋波. 固态动力电池技术成果在江苏盐城发布[EB/OL]. (2025-12-23) [2026-08-22]. http://finance.yunnan.cn/system/2025/12/23/033796511.shtml.
XUE H Y, JIANG B. Solid-State Power Battery Technology Achievements Released in Yancheng, Jiangsu[EB/OL]. (2025-12-23) [2026-08-22]. http://finance.yunnan.cn/system/2025/12/23/033796511.shtml

[13] 谭梦桐. 固态电池商用进阶之路[EB/OL]. (2025-11-26)[2026-08-22]. http://finance.china.com.cn/industry/20251126/6280043.shtml.
TAN M T. The Progressive Road to Commercialization of Solid-State Batteries[EB/OL]. (2025-11-26) [2026-08-22]. http://finance.china.com.cn/industry/20251126/6280043.shtm.

[14] 王艺霖. 颠覆性技术亮相保定!中固时代发布两款固态电池新品[EB/OL]. (2025-12-30)[2026-08-23]. https://news.cnr.cn/local/dftj/20251230/t20251230_527477527.shtml.
WANG Y L. Disruptive Technology Debuts in Baoding! Zhonggu Times Launches Two New Solid-State Battery Products[EB/OL]. (2025-12-30) [2026-08-23]. https://news.cnr.cn/local/dftj/20251230/t20251230_527477527.shtml.

[15] MUZAKIR M, MANICKAVASAKAM K, CHENG E J, et al. Inorganic Solid Electrolytes for All-Solid-State Lithium/Sodium-Ion Batteries: Recent Developments and Applications[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(1): 73-135.

[16] 马腾, 冯洁秋, 胡洋坡, 等. 微波辅助制备镓-铌双掺杂锂镧锆氧化物固态电解质及其固态电池性能[J/OL]. 济南大学学报(自然科学版), (2026-06-01)[2026-07-02]. https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20260529.001.
MA T, FENG J Q, HU Y P, et al. Microwave-Assisted Preparation of Ga-Nb Co-Doped Li-La-Zr-O Solid Electrolyte and Its Solid-State Battery Performance[J/OL]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), (2026-06-01) [2026-07-02]. https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20260529.001.

[17] YU J, WANG Y H, SHEN L Y, et al. Fast-Charging Solid-State Li Batteries: Materials, Strategies, and Prospects[J]. Advanced Materials, 2025, 37(23).

[18] MACHÍN A, MORANT C, MÁRQUEZ F. Advancements and Challenges in Solid-State Battery Technology: An In-Depth Review of Solid Electrolytes and Anode Innovations [J]. Batteries, 2024, 10(1).

[19] 高伟, 王嘉莹, 崔昊, 等. LLZO基固态电解质及电极热稳定性研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(7): 2614-2626.
GAO W, WANG J Y, CUI H, et al. Study on Thermal Stability of LLZO-Based Solid Electrolytes and Electrodes [J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(7): 2614-2626.

[20] 窦悦珊, 吕晓东, 罗佐县, 等. 我国固态电池产业发展思考[J]. 当代石油石化, 2025, 33(10): 13-17.
DOU Y S, LÜ X D, LUO Z X, et al. Thoughts on the Development of China's Solid-State Battery Industry[J]. Contemporary Petrochemicals, 2025, 33(10): 13-17.

[21] THOMAS F, MAHDI L, LEMAIRE J, et al. Technological Advances and Market Developments of Solid-State Batteries: A Review[J]. Materials, 2024, 17(1).

[22] 刘长洋, 孙蔷馥, 岑官骏, 等. 锂电池百篇论文点评(2025.10.1—2025.11.30)[J]. 储能科学与技术, 2026, 15

(1): 1-21.
LIU C Y, SUN Q F, CEN G J, et al. Reviews of Selected 100 Recent Papers on Lithium Batteries (Oct. 1, 2025-Nov. 30, 2025) [J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(1): 1-21.

[23] 何开源, 陈其强, 黄敬尧, 等. 薄膜固态电解质在钠离子固态电池中的应用进展[J]. 功能材料, 2025, 56(12): 12081-12091.
HE K Y, CHEN Q Q, HUANG J Y, et al. Progress in Application of Thin-Film Solid Electrolytes in Sodium-Ion Solid-State Batteries[J]. Journal of Functional Materials, 2025, 56(12): 12081-12091.

[24] 罗磊, 陈涛, 王双, 等. 硅基负极在全固态电池应用中面临的挑战和解决策略[J]. 矿冶工程, 2025, 45(6): 172-180.
LUO L, CHEN T, WANG S, et al. Challenges and Solutions of Silicon-Based Anodes in All-Solid-State Batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(6): 172-180.

[25] KIM M J, PARK J S, LEE J W, et al. Half-Covered "Glitter-Cake" AM@ SE Composite: A Novel Electrode Design for High Energy Density All-Solid-State Batteries [J]. Nano-Micro Letters, 2025, 17.

[26] LEE S, KIM Y, PARK C, et al. Interplay of Cathode-Halide Solid Electrolyte in Enhancing Thermal Stability of Charged Cathode Material in All-Solid-State Batteries[J]. ACS Energy Letters, 2024, 9(4): 1369-1380.

[27] LIU H Y, CHEN Y D, CHIEN P H, et al. Dendrite Formation in Solid-State Batteries Arising from Lithium Plating and Electrolyte Reduction[J]. Nature Materials, 2025, 24(4): 581-588.

[28] DIALLO M S, SHI T, ZHANG Y Q, et al. Effect of Solid-Electrolyte Pellet Density on Failure of Solid-State Batteries[J]. Nature Communications, 2024, 15(1).

[29] LI S H, YANG Z H, WANG S B, et al. Sulfide-Based Composite Solid Electrolyte Films for All-Solid-State Batteries[J]. Communications Materials, 2024, 5(1).

[30] MI J S, YANG J, CHEN L K, et al. A Ductile Solid Electrolyte Interphase for Solid-State Batteries[J]. Nature, 2025, 647: 86-92.

[31] LEE D J, JANG J, LEE J P, et al. Physio-Electrochemically Durable Dry-Processed Solid-State Electrolyte Films for All-Solid-State Batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(28).

[32] DAI Z J, SU Y Y, LIU D, et al. Metal-Organic Frameworks Based Solid-State Electrolytes for High-Performance Lithium Metal Batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 524.

[33] ZHAO G F, MA H, ZHANG C H, et al. Constructing Donor-Acceptor-Linked COFs Electrolytes to Regulate Electron Density and Accelerate the Li^+ Migration in Quasi-Solid-State Battery[J]. Nano-Micro Letters, 2025, 17(1): 464-479.

[34] LIU Q F, LI Y, HUANG Q F, et al. Interfacial Engineering of Poly (Ionic Liquid)-Based Composite Electrolyte via Ionic Liquid Modification for High-Performance Solid-State Lithium Batteries[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2026, 9(1): 63-73.

[35] ARUCHAMY K, RAMASUNDARAM S, DIVYA S, et al. Gel Polymer Electrolytes: Advancing Solid-State Batteries for High-Performance Applications[J]. Gels, 2023, 9(7).

[36] 杜玉霖, 郭祖民, 庞越鹏. 核壳纤维结构 PEO-LiTFSI-SiO_2复合固体电解质[J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(6): 16-23.
DU Y L, GUO Z M, PANG Y P. Core-Shell Fiber Structure PEO-LiTFSI-SiO_2 Composite Solid Electrolyte[J]. Nonferrous Materials and Engineering, 2024, 45(6): 16-23.

[37] LI R, XU K Q, WEN S H, et al. A Sodium Superionic Chloride Electrolyte Driven by Paddle Wheel Mechanism for Solid State Batteries[J]. Nature Communications, 2025, 16(1).

[38] YE Y, GU Z, GENG J Z, et al. Advanced High-Entropy Halide Solid Electrolytes Enabling High-Voltage, Long-Cycling All-Solid-State Batteries[J]. Nano Letters, 2025, 25(10): 3747-3755.

[39] WANG Y X, RAJ V, NAIK K G, et al. Control of Two Solid Electrolyte Interphases at the Negative Electrode of an Anode-Free All Solid-State Battery Based on Argyrodite Electrolyte[J]. Advanced Materials, 2025, 37(11).

[40] EDISON E, ABBOTT D F, RAMAKRISHNA S N, et al. Non-Flammable Polymeric Ionic Liquid Hybrid Electrolytes for High-Stability Solid-State Sodium Metal Batteries[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 522.

[41] WOOLLEY H M, VARGAS-BARBOSA N M. Hybrid Solid Electrolyte-Liquid Electrolyte Systems for (Almost) Solid-State Batteries: Why, How, and Where to? [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(3): 1083-1097.

[42] 王媛媛, 李妍, 王歧, 等. 固态钠电池中 Y^{3+} 掺杂 $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ 固态电解质性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(10): 3853-3863.
WANG Y Y, LI Y, WANG Q, et al. Performance Analysis of Y^{3+}-Doped $Na_3Zr_2Si_2PO_{12}$ Solid Electrolyte in Solid-State Sodium Batteries[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(10): 3853-3863.

[43] SCHLAUTMANN E, WEIß A, MAUS O, et al. Impact of the

(下转第29页)

匀。据此提出一种低能耗、基于外部加热膜的恒温控制系统,可有效提升电池放电能量,延长电池使用寿命。

参 考 文 献

[1] 于远彬, 李新用, 闵海涛, 等. 增程式电动车动力电池组低温行车预热策略[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 209-219.
YU Y B, LI X Y, MIN H T, et al. Preheating Strategy of Extended-Range Electric Vehicle Power Battery Packs for Low-Temperature Driving[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 209-219.

[2] 肖军, 张明, 刘志强, 等. 车用电池热管理系统试验台架研制与试验研究[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(20): 13-16.
XIAO J, ZHANG M, LIU Z Q, et al. Research on the Test Bench for the Battery Thermal Management System of Electric Vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 45(20): 13-16.

[3] CHEN S L, YANG N X, ZHANG X W, et al. Low-Temperature Heating Method for Lithium-Ion Batteries Using Alternating Current: Balancing Temperature Rise Rate and Capacity Degradation[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 281.

[4] 罗玉涛, 郎春艳, 罗卜尔思. 低温环境下锂离子电池组加热系统研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 100-106.
LUO Y T, LANG C Y, LUO B E S. Investigation into Heating System of Lithium-Ion Battery Pack in Low-Temperature Environment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 100-106.

[5] 曾爽, 陈平, 陈海洋, 等. 电动汽车动力电池自加热装置设计[J]. 电源技术, 2019, 43(1): 88-90.
ZENG S, CHEN P, CHEN H Y, et al. Self-Heating System of lithium-Ion Battery for Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(1): 88-90.

[6] 孙彤辉, 何建, 张逸群. 电动飞机锂离子电池低温复合加热方法研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(2): 247-249+252.
SUN T H, HE J, ZHANG Y Q. Research on Composite Low-Temperature Heating Method for Lithium-Ion Batteries in Electric Aircraft[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(2): 247-249+252.

[7] WANG L C, ZHAO Y H, QUAN Z H, et al. Investigation of Thermal Management of Lithium-Ion Battery Based on Micro Heat Pipe Array[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39.

[8] 韩京伯, 朱翀, 李佳, 等. 基于电驱逆变器重构的车用动力锂电池自加热策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 179-187.
HAN J B, ZHU C, LI J, et al. Self-Heating Strategy for Automotive Lithium-Ion Batteries Based on Traction Motor and Inverter Reconfiguration[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 179-187.

[9] 张春秋, 徐振鹏. 纯电动车热管理系统构建研究[J]. 汽车文摘, 2020(3): 31-36.
ZHANG C Q, XU Z P. Research on the Construction of Thermal Management System for Pure Electric Vehicle[J]. Automotive Digest, 2020(3): 31-36.

[10] LEI S R, XIN S, LIU S X. Separate and Integrated Thermal Management Solutions for Electric Vehicles: A Review[J]. Journal of Power Sources, 2022, 550.

[11] ZHU T, MIN H T, YU Y B, et al. An Optimized Energy Management Strategy for Preheating Vehicle-Mounted Li-Ion Batteries at Subzero Temperatures[J]. Energies, 2017, 10(2).

[12] 李宁, 谢贵文, 李波, 等. 锂电池内部低温加热方法的研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 43-48.
LI N, XIE G W, LI B, et al. Research on Low Temperature Heating Method of Lithium Battery[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 43-48.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2026年3月25日。

(上接第22页)

Solid Electrolyte Particle Size Distribution in Sulfide-Based Solid-State Battery Composites[J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(41).

[44] PENG L F, YU C, ZHANG Z Q, et al. Tuning Solid Interfaces via Varying Electrolyte Distributions Enables High-Performance Solid-State Batteries[J]. Energy & Environmental Materials, 2023, 6(2): 114-121.

[45] HOOD Z D, MANE A U, SUNDAR A, et al. Multifunctional Coatings on Sulfide-Based Solid Electrolyte Powders with Enhanced Processability, Stability, and Performance for Solid-State Batteries[J]. Advanced Materials, 2023, 35(21).

[46] 张正, 杜泽谱, 侯敏, 等. 真空烧结优化氧化物固态电解质的性能研究[J]. 有色金属(中英文), 2025, 15(11): 1927-1934.
ZHANG Z, DU Z P, HOU M, et al. Study on Performance Improvement of Oxide Solid Electrolytes by Vacuum Sintering[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(11): 1927-1934.

[47] QIAN X T, LÜ Y X, ZHOU S Y, et al. Enhancing Long Stability of Solid-State Batteries Through High-Energy Ball Milling-Induced Decomposition of Sulfide-Based Electrolyte to Sulfur[J]. Advanced materials, 2024, 36(48).

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2026年7月7日。