

高温封装材料对热电池安全性与寿命的影响

祝雨

贵州梅岭电源有限公司，贵州省遵义市，563003；

摘要：热电池在航空航天与国防军事领域的应用开始不断拓展与深化，其性能要求也变得愈发严格。热电池需要在极端环境中保持高度稳定性和可靠性，封装材料是热电池不可缺少的组成部分，通常会直接接触电池内部化学体系和外部环境，其性能也影响着热电池整体表现。尤其高温环境下的封装材料伴随着热应力和化学腐蚀等问题。本文将分析高温封装材料主要特性以及对热电池安全性与寿命的影响，提出优化高温封装材料的有效策略，如优化封装材料选择、改进封装工艺、加强质量检测、构建三维导热网络以及开发智能响应型封装材料，为热电池在高端技术领域的应用发展提供有力参考。

关键词：高温封装材料；热电池安全性；寿命；封装工艺；三维导热网络

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.023

在能源需求多样化发展背景下，热电池凭借独特优势开始在航天航空与国防军事领域得到了广泛应用。热电池主要是以熔盐作为电解质，长期运行在高温环境条件下。高温封装材料是热电池不可缺少的一部分，在保护内部电化学体系和防止电解液泄漏问题方面都发挥着重要价值。封装材料的性能水平也关系着热电池在极端环境条件下的安全性。因此，深入研究高温封装材料对热电池安全性与寿命的影响具有重要现实意义。

1 高温封装材料的主要特性

1.1 热稳定性

高温封装材料在保证电子器件在极端环境稳定性方面发挥着重要优势，其热稳定性决定着材料在高温条件下的运行寿命和安全性。材料在高温环境下具备良好的热分解抗性特点，在分子结构设计或无机有机负荷改性设计过程中，高温材料可以在300℃以上的工作环境中避免化学键断裂和主链降解问题^[1]。聚酰亚胺基复合材料在引入芳香环结构后，其热分解温度可以提高到550℃以上，在航空航天领域和深井勘探等极端热环境中始终保持结构完整性。高温封装材料还具备低热膨胀系数和高尺寸稳定优势，在-50℃~300℃温度领域内，高质量封装材料的线膨胀系数能够控制在10~6/℃量级，能够与基底材料建立热匹配关系。高温封装材料在热老化期间还能保持良好的性能稳定性，部分陶瓷基封装材料在经过纳米晶化处理之后，能够在1200℃的高温环境下保持良好弯曲程度。

1.2 阻隔性

高温封装材料是保证电气器件在极端环境稳定运

行的重要屏障，高温封装材料具有较高的渗透率，分子结构密度较高。材料自身还具有较为优良的化学稳定性，即使在高温环境下也不会与封装内的铜、铝等半导体材料发生界面反应，不会出现低熔点化合物或导电通路。高温封装材料能够经受热循环冲击，始终保持阻隔性能稳定性，在引入梯度结构设计或柔性中间层基础上，可有效缓解因热膨胀系数失配引发的界面开裂现象。这些特性可保证高温封装材料在高温与高辐射等恶劣环境下始终保持稳定性。

1.3 机械强度

高温封装材料透气率较低，材料可以在高温环境下阻隔氧气和水蒸气等气体渗透。比如化工领域应用的高温封装材料可以抵御外界高温液体的侵蚀，将液体与关键设备材料隔离，避免液体泄漏对设备造成损坏。高温封装材料具备较强的热阻隔性，能够降低高温条件对器件性能的影响，使器件使用寿命得到延长，使整个系统在高温环境下稳定性。

2 高温封装材料对热电池安全性与寿命的影响

2.1 强化了热电池隔膜稳定性

高温运行条件下的热电池隔膜是防止内部短路和隔离正负极的核心组件，其热稳定性与电池使用寿命、安全性都存在密切联系。以往聚烯烃类的隔膜在高温环境下容易出现热收缩问题，正负极在直接接触后会出现短路情况，导致热电池失控与爆炸^[2]。根据相关实验数据表明，普通聚烯烃隔膜在160℃温度下具有更加显著的收缩率，应用氧化铝复合隔膜在相同条件下几乎不会出现收缩，保证了结构完整性。这种热稳定性的提升可

以有效减少电解液氧化反应，降低热失控风险几率。从使用寿命角度来看，隔膜稳定性和热电池的热寿命存在直接联系，热电池在外部加热过程中会激活电解质，工作温度一般在400–700°C，隔膜的耐热性能决定着电池在高温条件下的持续工作时长。比如选择高温耐热性的陶瓷涂层隔膜可以有效缓解电解质凝固点下降速度，使电池在放电状态下保持稳定的离子传导性，不会出现因隔膜形变引发的局部过热问题。

2.2 优化了电解液体系

电解液体系是影响热电池安全性与寿命的主要因素之一，高温封装材料的应用可以引入高浓度电解液和添加剂，二者协同作用发挥可以在电极表面形成致密的保护层。从界面调控层面来看，新型添加剂可以优先参与成膜反应，形成稳定的CEI膜，在电解液体系优化过程中，高温封装材料可有效提升热电池安全性边界范围，使电池在120°C高温环境下保持结构稳定性，延长了电池在高温环境中的使用寿命，为电动汽车与储能系统在极端气候条件下的稳定运行提供了技术支持。

2.3 可精准匹配封装材料热膨胀

高温封装材料的热膨胀特性对热电池安全性与寿命具有关键影响，其匹配度直接决定电池在极端热环境下的结构稳定性与性能衰减程度。当封装材料与电池活性材料热膨胀系数差异过大时，高温环境下材料应力会导致界面剥离甚至结构断裂，进而引发电解液泄漏或热失控风险。在热电池激活过程中，如果隔热层与电极材料的热膨胀不匹配，就会因应力集中导致隔热层破裂，电池就会因局部过热而提前失效。采用梯度热膨胀系数的封装结构可有效缓冲应力，避免界面失效。封装材料能与电池内部实现CTE精准匹配能有效抑制热应力积累，维持界面的物理稳定与电化学相容性，避免密封结构疲劳损伤，保证电池在长期高温运行中的结构完整性与性能可靠性，这也是实现热电池高安全性和长寿命循环的关键途径。

2.4 能够主动防御热失控

高温封装材料在提升热电池安全性与延长其使用寿命方面具有主动防御热失控问题的作用。热电池工作期间因内部化学反应会产生大量热量，若热量不能有效控制就会引发热失控，导致电池性能急剧下降甚至爆炸等严重后果。优质的高温封装材料凭借卓越隔热性能可以有效阻隔电池内部热量的快速传递与扩散，降低电池内部温度的急剧上升速度，为热电池营造一个相对稳定的内部温度环境，从源头上减少热失控发生的风险。这

种材料还具有良好的化学稳定性，在高温环境下不易与电池内部的活性物质发生化学反应，避免因材料自身反应产生额外热量或有害气体，进一步保障电池安全。智能封装材料还可与电池管理系统协同，通过嵌入的温度/压力传感器实时反馈状态，形成一体化防御体系。这种设计能够减少循环过程中的累积损伤，为高能量密度电池系统提供了本质安全解决方案。

3 优化高温封装材料提升热电池安全性与寿命的策略

3.1 优化封装材料选择

优化高温封装材料提升热电池安全性与寿命的关键就是要优化风险材料的选择，综合考虑热电池工作范围筛选合适材料。热电池在运行期间会释放大量热量，封装材料要在高温环境下保持稳定性。部分陶瓷材料就具备较高的熔点和热稳定性，能够在极端环境中始终保持结构稳定性。封装材料的选择还要关注化学稳定性，避免因化学腐蚀出现性能下降的安全隐患问题。对此可开展化学兼容性测试，排除与热电池内部成分容易产生不良反应的材料，使封装材料在长时间使用中不会掺入有害气体。在此基础上还要考虑材料机械性能，封装材料要具备良好的强度与韧性，使其能够承受热电池在制造和运输环节产生的机械应力。除此之外，材料选择要考虑综合成本与可加工性，在满足基本性能要求基础上选择成本较低且容易加工的材料，以此降低热电池的生产成本，提高整体生产效率。材料的选择要保证无毒无污染的类型，为热电池安全性和寿命提供保障。

3.2 改进封装工艺

高温封装材料在优化环节的关键要点就是优化封装工艺，精准控制封装温度曲线，根据材料热特性利用热分析仪测定熔融与固化温度范围，以此为基础制定精准、细致的温度控制程序。加热阶段可选择阶梯式升温方法、缓慢、均匀地提升温度，避免温度突然升高导致封装材料内部应力集中引发裂纹问题。保温阶段应严格不控制时间，使材料能够充分熔融与流动，冷却阶段也要选择缓慢降温措施，减少因收缩率差异引发的内应力，避免封装层和电池内部组建出现开裂风险。设计人员还要设计单独的压力控制装置，在封装环节根据材料状态调整压力，封装材料熔融初始阶段要施加较小的压力，始终保持材料均匀铺展，避免出现局部堆积问题。在材料逐渐固化之后可逐渐提升压力大小。除此之外，电池组件和封装材料要提前对接触表面进行预处理，采取离子清洗和化学蚀刻等技术去除表面杂质，加强表面粗糙

度的同时提高封装材料和电池组件之间的附着力，有效延长热电池的使用寿命。

3.3 强化质量检测与监控

在优化高温封装材料提升热电池安全性与寿命的过程中，强化质量检测与监控是保障产品可靠性的关键环节。在此期间需要从原材料入厂到封装成品出厂，采用高精度光谱分析、X射线衍射等联用技术对高温封装材料的化学成分、晶体结构、热稳定性等核心参数进行多维度验证，确保材料基础性能符合设计阈值。封装工艺环节可选择在线红外热成像监控系统，实时捕捉熔封界面的温度场分布，结合机器视觉算法识别微米级裂纹或气泡缺陷，利用激光超声检测技术评估封装层与电极界面的结合强度，避免因工艺波动导致局部应力集中。成品电池则要建立加速老化试验平台，模拟高温高湿、热循环冲击等极端工况，结合电化学阻抗谱动态追踪封装材料阻抗变化，通过大数据分析建立寿命预测模型，提前识别潜在失效风险。此外，构建基于非破坏性检测的成品全检机制识别内部微裂纹、孔隙分布及封装密封性等潜在失效风险，形成检测、反馈、优化相结合的闭环质量管控体系，为提升热电池系统安全性与服役寿命提供决策支持。

3.4 构建三维导热网络

优化高温封装材料应构建三维导热网络。材料选择层面要选取具有高导热系数且热稳定性优异的基体材料，将其作为构建三维网络的基本骨架单元，使热量能够快速、高效地传导。还要采用先进的复合技术将不同尺度与形状的导热填料均匀分散在基体中，通过精准控制填料含量与分布状态形成相互交织、相互贯穿的三维立体结构，避免了局部导热死区，实现热量在材料内部的全方位、无障碍传递。在结构设计上采用定向排列、泡沫模板法或冰模板法制备各向异性导热结构或3D打印等技术构建连续互穿的三维网络，使热量能够沿预设方向快速耗散，避免热堆积。引入相变材料或热致变色单元可实现智能热调节功能，在极端工况下能够增强热缓冲能力，配合多物理场仿真模拟指导网络架构的优化设计，并通过热导率测试、红外热成像及循环老化实验验证其在真实热电池环境下的长效稳定性与可靠性，从而显著延长热电池寿命并提升其安全性。

3.5 开发智能响应型封装材料

在优化高温封装材料以提升热电池安全性与寿命的过程中，开发智能响应型封装材料是极具潜力的策略。整个开发过程要重点关注智能感知元件的集成，将能精准感知温度、压力、应力等关键参数变化的微型传感器嵌入封装材料内部，构建起全方位的实时监测网络，敏锐捕捉热电池工作过程中的细微异常。还可以根据感知信息设计智能响应机制，利用形状记忆聚合物、刺激响应性水凝胶等材料特性，使封装材料在感知到危险信号时自动触发形变、膨胀或收缩等响应动作。当电池内部温度异常升高时，材料中的热敏组分可迅速触发相变吸热或体积膨胀机制，有效吸收多余热量并扩大散热面积，延缓温升速率。此时可以引入自修复胶囊或可逆交联结构，确保材料在多次热循环后修复因热应力产生的微裂纹，维持封装结构的完整性与密封性，从而显著减少电解液泄漏、界面腐蚀等退化现象，延长其循环寿命。

4 结语

综上所述，高温封装材料在热电池体系中发挥着重要作用，使决定热电池安全性和使用寿命的关键条件。通过优化高温封装材料的选择与工艺能够减少电池内部副反应问题，降低电池的放点速率，促使热电池综合性能与使用价值得到显著提升。因此相关技术人员应优化封装材料选择，改进封装工艺，加强质量检测和监控，构建三维导热网络，开发智能响应型的封装材料，促使热电池能够在关键领域获得高温封装材料技术支持，在关键领域大放异彩。

参考文献

- [1] 罗后明,雷程,李锐锐,等.封装黏合材料对高温压力建感器性能影响研究[J].测试技术学报,2025,39(1):27-32,95.
- [2] 陆莎莎,盛楠,朱春宇.高温相变储热材料的宏封装及其热性能研究[J].新能源科技,2024,5(5):1-9.
- [3] 党伟刚,田学东,雷程,等.封装黏合层材料对碳化硅高温压力传感器性能的影响[J].半导体技术,2023,48(12):1121-1128.

作者信息:祝雨,男,1983-3,汉,贵州绥阳人,本科,工程师,热电池技术研究。