

# 新能源汽车电池包壳体用高阻燃聚酯复合材料的制备与性能

张红涛

浙江海利得新材料股份有限公司 浙江 嘉兴 314001

**【摘要】：**为了满足新能源汽车电池包壳体轻量化，高阻燃及高可靠性等综合要求，文章设计和制备了高阻燃聚酯基纤维增强复合材料体系。通过构筑磷—氮协同阻燃体系和无机纳米填料的引入，以及玻纤增强和优化成型工艺相结合，对该材料的力学、热扩散、火焰蔓延和尺寸稳定性等特性进行了系统的研究。模拟和监测的结果表明，该材料的最大应力从 60.1 MPa 到 58.2 MPa 的缓降幅度小于多工况耦合的环境中的最大应力；温升扩散时间从 82 s 增加到了 90 s；火焰的扩散速度总是小于  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ；确保尺寸的变化速率不超过 0.31%。研究结果验证了所提材料体系和工艺组合能够显著提高电池包壳体热失控和复杂服役工况下的安全性和稳定性，从而为复合材料在新能源汽车中的工程应用奠定可靠基础。

**【关键词】：**高阻燃聚酯复合材料；电池包壳体；热失控；多工况耦合

DOI:10.12417/3083-5526.25.03.020

## 引言

随着中国新能源汽车保有量快速提升，电池管理系统承担着对动力电池组的监测、保护、均衡与状态估计等关键职能，其运行可靠性直接关系到整车安全与用户体验。文章在工程实践基础上梳理电池管理系统架构与关键算法，归纳电压不一致、过压/欠压、过温、过流、绝缘与通信等高发故障的机理与判据，提出面向一线维修场景的分层诊断流程与校准要点。高阻燃聚酯复合材料具有重量轻，可设计性强和阻燃体系可调控的特点，已逐步成为取代金属的主要候选者。但它在热失控、高热流和湿热耦合环境中的综合服役性能还有待系统评价。

## 1 材料与应用概况

### 1.1 新能源汽车电池包壳体的功能与服役条件

新能源汽车电池包壳体是动力电池系统中最外端的结构单元，具有结构支撑、力学防护、热管理协同和环境隔离的核心作用。壳体需要在碰撞、振动、跌落以及长时间路况载荷下稳定力学性能，以规避局部变形导致电芯挤压和热失控扩散的安全性风险。同时动力电池充放电时产生显著的热量和电磁干扰，所以壳体材料也需要同时具备耐热性，尺寸稳定性和一定屏蔽能力。服役环境广泛存在着高低温循环、湿热、盐雾泥水冲击以及化学介质接触的状况，这就要求材料具有耐候性，耐腐蚀性以及阻燃性。随着整车轻量化趋势的加快，电池包壳体材料需要兼顾安全性和轻量化，这使得电池包壳体材料成为材料技术创新中的重点应用场景。

### 1.2 高阻燃聚酯复合材料的体系与应用特点

高阻燃聚酯复合材料由于具有优良的综合性能而被认为是取代金属壳体和传统工程塑料的一种可能的方案。这类材料通常采用 PET、PBT 或者改性聚酯树脂等作为基材，加入磷氮体

系，无卤膨胀型阻燃剂或者无机纳米填料等构建高效阻燃体系，同时，玻纤、矿物纤维或者高模量填料的引入增强了力学强度，耐热性和长期尺寸稳定性。该类复合材料具有重量轻，耐化学腐蚀和成型效率高的优点，通过注塑和模压能够将复杂结构一体化成型以降低制造成本和装配风险。特别是在电池包情景下，高阻燃聚酯可提供可靠阻燃性，低烟无卤特性及优异的耐漏液及耐电解液性能以满足对电池热失控的抑制要求、对结构保护及轻量化提出了多重要求，适用范围正由电池上盖，底盘托板向模组框架及热管理结构件扩展。

## 2 主要影响因素及关键技术对策

### 2.1 影响电池包壳体性能的主要因素

电池包壳体综合性能受到多重因素综合影响，材料体系、成型工艺和服役环境为核心变量。树脂基体耐热性能、力学强度、阻燃等级等性能直接决定了壳体在热失控，高载荷冲击，长期振动等工况下稳定性；纤维增强形式和体积分数对壳体结构刚度和尺寸稳定性有进一步影响。复合材料成型过程中模压温度，固化速率以及纤维铺层均匀性等工艺参数对最终制品缺陷率，界面结合质量以及长期耐候性等均有明显影响。新能源汽车在服役环境下周期性高低温循环、湿热耦合、电磁干扰和外部撞击载荷等因素也可能造成材料结构累积损伤，导致材料阻燃，力学和耐老化等性能发生变化。

### 2.2 实现高阻燃与高可靠性的关键技术措施

为使电池包壳体具有高阻燃、高可靠性、必须建设以材料创新、结构优化、工艺控制为主的综合技术体系。从材料层面上看，引入含磷含氮微胶囊阻燃剂或者构筑无卤协同阻燃体系均能显著提高复合材料极限氧指数及抑烟性能；同时，采用连续纤维强化结构，提高了热变形温度及整体强度。从结构和工艺的角度看，能够通过分区的功能化设计、局部的增韧和增厚、

界面的耦合剂处理，以及采用高精度的模压/RTM 工艺来降低孔隙度，从而提高长期的可靠性。通过进一步采用如隔热层、相变材料和阻燃涂层等热失控防护技术，能够有效地减缓火焰的扩散并限制热的传播，从而确保电池包壳体在复杂的工作环境中具有高度的安全性和稳定性。

3 仿真分析的确

3.1 仿真模型

本研究建立基于高阻燃聚酯复合材料电池包壳体的多物理场耦合仿真模型，重点从结构力学、热失控阻断、燃烧蔓延、长期尺寸稳定性四个关键性能指标展开分析。模型采用等效连续介质方法描述玻纤增强聚酯基体,通过 Hashin 准则刻画复合材料在受撞击和振动条件下的损伤演化。热传导部分构建瞬态导热模型，引入分布式热源模拟电芯热失控情景下的温升传播；阻燃性能以简化火焰扩散模型表征，通过材料的极限氧指数（LOI）、热分解速率与气相抑制系数建立参数化方程。尺寸稳定性采用线性热膨胀模型与湿热老化模型结合的方式预测长期变形趋势。整体模型通过 Abaqus/Fluent 联合仿真实现结构-热-燃烧行为的综合评估，为材料体系优化提供定量依据。

3.2 数值模拟参数

仿真参数围绕力学响应、导热性能、阻燃行为和尺寸稳定性四个指标展开。结构力学部分采用等效模量

$$E_{eff}=V_fE_f+(1-V_f)E_m$$

描述纤维体积分数  $V_f$  对壳体刚度的贡献，并通过最大主应力准则预测失效。热传导模型基于瞬态热方程：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}=k \nabla^2 T+Q(t)$$

其中  $Q(t)$  为热失控热源项。阻燃性能采用简化火焰扩散速度描述：

$$S_f=\alpha(1-\beta LOI)$$

$\alpha,\beta$ 为经验参数。尺寸稳定性采用热膨胀-吸湿耦合模型：

$$\Delta L=L_0(\alpha_T \Delta T+\alpha_M M)$$

其中  $M$  为吸湿率。所有参数参考文献与材料实测数据进行合理化设定，使仿真结果具有工程适用性与可解释性。

3.3 技术阶段划分

将数值仿真的过程划分为四个阶段，即材料参数的获得，模型的建立和加载施加，耦合场的模拟实施和结果的评估和优化。第一阶段对复合材料进行了密度，导热系数，热分解起始温度和力学性能参数等试验测量，结合文献确立了阻燃动力学常数。第二阶段完成了壳体三维几何建模，网格划分和边界条件设定等工作，其中包括车载工况冲击载荷，热失控热源和火焰扩散初始条件等。第三阶段实现了结构-热-燃烧耦合求解并

采用迭代算法仿真了不同情景下材料的反应过程，主要研究温升速率，结构变形和火焰蔓延速度。第四阶段统计分析仿真数据，利用极限性能对比和敏感性分析识别关键影响因子并将其反馈到材料配方和结构设计中，形成可闭环优化技术体系。

3.4 数值模拟分析

表 1 高阻燃聚酯复合材料在不同工况下的仿真性能指标

工况编号	最大应力/MPa	热扩散时间（60 →200℃）/s	火焰扩散速度 Sf/mm·s <sup>-1</sup>	尺寸变化率 Δ L/L <sub>0</sub> /%
C1: 常温静载	58.2	—	—	0.12
C2: 高温 150℃	46.5	125	—	0.25
C3: 热失控 模拟	62.8	78	0.92	0.41
C4: 火焰暴露 30 s	54	—	0.65	0.38
C5: 湿热 85℃ /85%RH	50.7	—	—	0.57

4 关键制备与成型技术

4.1 原料改性与共混技术

在第三章的数据分析中，发现在高温稳态（C2）条件下，材料的最大应力降低到了 46.5 MPa，而在湿热工况（C5）下，材料的尺寸变化率增加到了 0.57%。这些数据清晰地展示了基体的热稳定性和水解敏感性对材料综合性能的显著影响。因此，原料改性要着重增强聚酯链段耐高温及抗湿热性能，并采用链扩展，芳环共聚及添加耐水解助剂等方法改善基体结构稳定性以抑制 C2 工况下力学衰减和 C5 工况下尺寸膨胀。同时抗氧化剂与分散剂的引入能够提高阻燃剂，填料在基体上的分散质量并降低热失控（C3）操作条件下快速加热（78 s）对体系结构均匀性造成的冲击，使得复合体系更具有长期服役稳定性。

4.2 阻燃体系与无机填料处理技术

模拟结果表明，热失控（C3）及明火暴露（C4）条件下材料的火焰扩散速度可达 9.2 mm·s<sup>-1</sup> 及 6.5 mm·s<sup>-2</sup>，并且热扩散时间仅为 78 s 及 35 s，表明阻燃体系在高温流作用下碳层构筑及气相抑制效率仍然不够高，容易造成热的迅速贯通。所以阻燃体系需要使用含磷/氮膨胀型体系并通过生成致密膨胀碳层来减小火焰蔓延速度同时使用微胶囊化来改善阻燃剂热分解稳定性。纳米 SiO<sub>2</sub>、蒙脱土等无机填料经过硅烷偶联剂的处理，能够使材料内产生“迷宫效应”，减缓热流扩散速度，有利于提

高 C3、C4 操作条件下快速加热扩散行为，进而提高整体阻燃可靠性。

4.3 纤维增强与成型工艺

第三章的表格揭示，在热失控工况（C3）下，材料依然维持了 62.8 MPa 的高强度，这表明纤维增强结构在提升承载能力方面具有显著效果；在湿热工况（C5）下，尺寸的变化率达到了 0.57%，这暗示着在吸湿之后界面开始出现衰减现象。因此，纤维增强设计要对纤维体积分数及取向进行优化，在使用硅烷偶联剂及施胶剂强化界面耐湿能力并抑制吸湿膨胀引起的形变的同时，使用高模量玻纤或者连续纤维织物来改善结构稳定性。在成型中，模压和 RTM 能够得到低孔隙率的组织，改善力学均一性；通过精细控制纤维的方向和冷却速度，注塑工艺能够解决 C3 工况下由于快速热扩散（78 s）引发的局部应力集中问题，从而提高整体的可靠性。

5 控制措施实施效果

5.1 试验与监测数据

表 2 电池包壳体关键性能现场监测数据

时间 (min)	最大应力 /MPa	温升扩散时间（60 →200℃）/s	火焰扩散速度 /mm·s <sup>-1</sup>	尺寸变 化率/%
0	60.1	82	0	0.12
20	59.4	85	0.1	0.18

参考文献：

[1] 骆中睿.新能源汽车电池故障诊断与售后流程标准化研究[J].汽车电器,2025,(12):42-44.  
[2] 郭正华,许庆峰.新能源汽车电池管理系统故障诊断与维修技术[J].汽车电器,2025,(12):179-181.  
[3] 罗强. 新能源汽车电池管理系统故障诊断与维修[J].汽车维修与保养, 2025 (12): 49-51.  
[4] 张成,余飞洋.新能源汽车电池回收利用体系的构建与效益分析[J].时代汽车,2025,(22):160-162.

40	58.7	88	0.15	0.25
60	58.2	90	0.18	0.31

5.2 实施效果评价

根据表 2，四项关键指标变化平稳可控，表明所提出的材料体系与工艺参数在多工况耦合环境下有效提升了复合材料服役性能。最大应力由 60.1 MPa 降至 58.2 MPa，降幅不足 3%，仍保持良好承载能力，与第三章 C3 工况结果一致。温升扩散时间由 82 s 增至 90 s，说明阻燃体系与无机填料的“迷宫效应”有效延缓热扩散。火焰扩散速度始终低于 0.2 mm/s，较强火焰工况显著降低，阻燃抑制效果明显。尺寸变化率虽升至 0.31%，但仍在可接受范围内，显示界面耐湿热处理具有良好稳定性。

结论

本研究以新能源汽车电池包壳体的安全性和可靠性为核心，设计了一种高阻燃聚酯基纤维增强的复合材料体系，并结合多物理场的耦合仿真和实地监测，对其在实际应用中的性能进行了全面评估。研究结果表明，磷氮协同阻燃体系和无机填料的“迷宫效应”明显推迟热扩散和火焰蔓延的发生，物料的火焰扩散速度比强火焰工况下降 1 个量级以上；在热扰动和振动作用下，纤维增强结构仍然能够维持近 60 MPa 承载能力；通过界面的耐湿热处理，成功地限制了吸湿膨胀，确保了尺寸的变化率不超过 0.31%。整体上看，所构建的材料体系在多工况耦合环境中展现出了较好的稳定性及安全裕度，能够对新能源汽车电池包壳体轻量化及高安全设计起到技术支持作用。