

刘通,黄建华,朱国庆,等. 电动汽车全尺寸火灾蔓延特性试验及模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2332–2340.
LIU T, HUANG J H, ZHU G Q, et al. Experimental and numerical simulation study on full-scale fire spread characteristics of electric vehicles[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2332–2340.

电动汽车全尺寸火灾蔓延特性试验及模拟研究*

刘通^{1,2}, 黄建华^{1,2}, 朱国庆^{1,2}, 戚绪尧², 袁狄平^{1,2}

(1 中国矿业大学深圳研究院, 广东深圳 518000; 2 中国矿业大学安全工程学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 电动汽车火灾安全问题日益凸显, 起火后蔓延路径尚不明晰。为此, 通过试验和数值模拟研究了外部过热条件下电动汽车火灾燃烧特性及蔓延路径。结果表明, 电池包起火后会出现拉弧现象, 且早期动力电池热失控及底盘塑料部件熔融滴落形成的油池火标志着整车火灾进入了加速发展阶段, 火灾蔓延路径主要是电池包—后轮—前轮—乘客舱—后备箱—前引擎舱。基于试验数据, 利用火灾动力学仿真软件搭建了全尺寸电动汽车模型, 数值模拟结果与试验结果吻合较好。整车峰值热释放速率为 7.88 MW, 可近似模拟 70 kWh 左右的整车火灾。研究结果有助于充分理解电动汽车火灾发展过程, 相关试验数据及数值模型可为后续充电站火灾特性研究提供数据支持及参考。

关键词: 安全工程; 电动汽车火灾; 全尺寸试验; 火灾蔓延; 火灾动力学仿真

中图分类号: X951; U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1009-6094(2026)06-2332-09

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1154

0 引言

为应对全球变暖及化石燃料短缺等挑战, 各国均向可持续发展路径转变^[1]。如中国、美国等能源消耗大国在多个行业领域采取措施, 大力推动新能源产业发展, 其中新能源汽车作为未来燃油车的替代品, 日渐普及。锂离子电池凭借其高能量密度、高功率密度、长循环寿命及环保等优势成为当下新能源汽车的主流储能媒介^[2-4]。锂离子电池技术的快速进步推动了新能源汽车的发展, 全球电动汽车产销量逐年增长, 但随之而来的安全问题也日益突出^[5-6]。

锂离子电池的最佳工作温度通常为 15 ~ 40 °C^[7], 超过该温度区间可能造成电池热失控, 温度过低则可能导致性能下降。Peng 等^[8]研究发现, 锂离子电池的固体电解质界面膜大约在 90 °C 开始分解, 通常标志着热失控的起始。2019 年, Feng 等^[9]首次建立了电池热失控数据库, 提出了较为系统的电池热失控特性研究思路, 为后续研究工作提供了重要数据样本。锂离子电池作为电动汽车的核心部件, 其安全性在一定程度上决定了电动汽车的安全性。为保障电池在舒适温度区间运行, 电动汽车电池包均配有电池管理系统, 但仍无法避免火灾事故的发生。

为研究电动汽车的火灾行为和燃烧特性, 目前主要有试验和数值模拟两种方法。在试验层面, Kang 等^[10]对 64 kWh 的纯电动汽车开展了全尺寸火灾试验, 结果表明, 火灾初期电池包的喷射火促使了火灾的快速发展, 且整车峰值热释放速率在 6.51 ~ 7.25 MW。2023 年, Hynynen 等^[11]首次对比了全尺寸电动汽车与燃油车的燃烧特性, 研究发现, 车辆能源类型对总释热的影响较小, 但对于产气种类及产量存在较大影响。此外, Cui 等^[12]对插电式混合动力汽车进行了全尺寸火灾试验, 探讨了火灾演化过程和燃烧特性参数。在数值模拟方面, 目前对锂离子电池开展数值研究较多, 如潘鸣宇等^[13]利用火灾动力学仿真(Fire Dynamics Simulator, FDS)软件搭建了电动汽车锂离子电池组数值模型, 研究了电动汽车火灾过程中的能见度、烟气及 CO 浓度变化规律。崔辉等^[14]利用 FDS 搭建了全尺寸电动汽车数值模型, 研究了不同工况下水喷淋对电动车热释放速率的抑制效果。陈长坤等^[15]针对滚装船场景, 搭建了电动汽车燃爆数值模型, 分析了电动车起火过程中温度及气体演化规律。然而, 已有全尺寸电动汽车火灾数值模型缺少相应的试验验证, 模型有效性仍待确定。

可见, 由于大尺度火灾试验测量数据有限且成

* 收稿日期: 2025-07-02

作者简介: 刘通, 副教授, 从事锂离子电池储能及电动汽车相关领域的火灾防治研究, 6423@cumt.edu.cn。

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2024B1111080003); 江苏省自然科学基金项目(BK20241657); 国家重点研发计划项目(2023YFC3009900); 江苏省青年科技人才托举工程项目(JSTJ-2024-076)

本高昂,目前全尺寸电动汽车火灾试验研究相对较少。已有数值模拟研究多着眼于电池单体—模组级别,虽然当前已有电动汽车火灾全尺寸数值模型,但尚缺乏足够的试验验证,模型精准度难以研判。并且,现有关于电动汽车火灾的研究多集中于小尺度试验或单一的数值模拟,难以全面揭示整车火灾行为及蔓延路径。为此,本文从试验和数值模拟两个角度出发,开展电芯—电池包—全尺寸电动汽车火灾试验,并 1:1 搭建整车数值模型,研究电动汽车的火灾行为、燃烧特性和蔓延路径,并且通过试验结果对比验证模型的可靠性。所搭建的整车数值模型可为后续整车火灾基础性研究及充电站火灾特性研究提供数据支撑,研究中观察到的现象有助于充分理解整车火灾蔓延路径及其危险性。

1 试 验

1.1 试验样本

设计了系统性热失控试验方案,依次从电池单体、电池包到电动汽车整车三个层级进行试验。试验对象包括:100 Ah 的磷酸铁锂动力电池单体、相应电芯构成的磷酸铁锂电池包,以及一辆搭载磷酸铁锂电池系统的五座中型 SUV。该车型车身长、宽、高分别约为 4.9 m、2.0 m、1.7 m,动力电池总容量约为 70 kWh,整车纯电续航能力约为 500 km,电池包安装于整车底盘。所选电池和整车具备较强的代表性,广泛应用于当前电动汽车储能系统中。

为模拟热失控的最不利工况,并增强不同层级试验之间的可比性与一致性,试验前将电池单体、电池包及整车电池系统均充至满电状态。已有研究表明,锂离子电池的热失控风险与荷电状态相关,高荷电状态下副反应更加剧烈,火灾危险性显著提升^[16],因此,本文聚焦于最具风险的高荷电状态下的热失控行为展开系统试验。

通过电池单体到电池包再到整车的系统试验,既可深入分析单体尺度下的微观热失控机制,又可逐步扩展至模组内部热传播行为与整车系统级火灾演化特性,整体构成了一个由局部到整体、由实验室场景到近实际应用场景的递进式试验体系。

1.2 试验布置

针对电池单体、电池包及整车三个层级开展了热失控试验,整体试验布置如图 1 所示。试验通过外部热源诱导的方式引发电池热失控。在电池单体试验中用夹具依次将隔热板、加热片、电池夹紧以确保试验安全,并在自主搭建的热失控试验平台内开

展电芯热失控试验;电池包和整车火灾试验均在室外开放空间内进行。

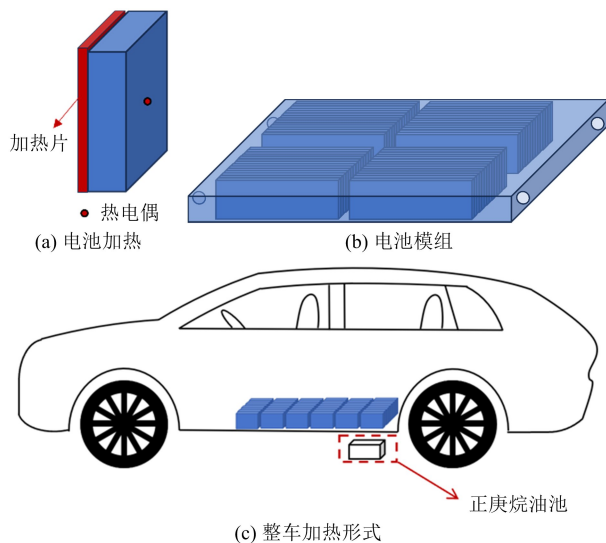


图 1 试验布置图

Fig. 1 Illustration of experiment layout

为获取试验过程中各类关键特征参数,试验中布置了多种类型的传感器进行数据采集。温度监测采用欧米茄 K 型铠装热电偶,热电偶与无纸记录仪连接,实现温度数据的实时记录与存储。在单体试验中,热电偶布置于电池表面中心位置;在电池包和整车试验中,则分别布设于壳体外部、模块接口及整车电池舱关键节点等位置,从而全面捕捉热扩散路径及局部热点变化趋势。为进一步分析试验过程中的气体释放行为,试验采用德国仪康 ecom-D 便携式烟气分析仪对火灾过程中的气体产物进行实时在线监测,包括 O_2 、CO 及 CO_2 的体积分数,并具备高温烟气预处理功能。此外,试验还配备高分辨率、高帧率的摄像系统,实现全过程动态录像,用于辅助分析热失控触发时序、喷射行为及火焰蔓延路径等宏观现象。各传感器具体参数如表 1 所示。

表 1 设备参数表

Table 1 Table of equipment parameter

设备	精度	量程
K 型热电偶	$\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0 \sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$
气体分析仪	O_2 (0.1%, 体积分数)	O_2 (0 ~ 25%)
	CO (10^{-6} , 体积分数)	CO (0 ~ $10\,000 \times 10^{-6}$)
	CO_2 (0.01%, 体积分数)	CO_2 (0 ~ 20%)

1.3 试验步骤

试验均在开放空间内进行,为避免天气等因素

的干扰,试验选择在风速小于1 m/s的时间段进行。在电池单体试验中,通过控制加热控制箱来激活加热片;在电池包试验中,通过导管将盐水注入电池包;在整车试验前,清除后备箱及车内所有可燃杂物,并对四个轮胎进行放气处理,以消除由轮胎破裂引发的爆炸隐患。为降低乘客舱爆炸风险,试验过程中保持后车窗全程开启,以形成通风通道,使新鲜氧气持续进入车厢,确保内饰材料燃烧过程的平稳进行。正庚烷燃烧较为稳定,与大多数碳氢类燃料燃烧特征相似,因此试验点火环节采用引火线远程点燃布设于车底的正庚烷油池,从而触发整车外部热源诱导的热失控过程。此外,试验前对烟气分析仪进行标定,并将气体传感探头固定在合适位置,以获取热失控过程中关键阶段的气体释放数据。在试验启动前,依次打开温度、气体及图像等各类数据采集设备,确保数据完整记录。各项准备工作完成并确认无误后,启动触发装置正式开展试验。

2 数值模拟

FDS是基于计算流体动力学原理,通过求解质量、动量和能量守恒方程,精确量化火灾中的烟气流动、热传递及化学反应过程的火灾模拟软件。在电动汽车火灾研究中,FDS可构建包含电池包、车身结构的三维模型,通过设定各电池材料燃烧参数,模拟电池热失控触发、火势蔓延及有毒气体扩散等关键过程,进而预测火焰传播时间和路径及车厢温度分布。

2.1 模型建立

参考试验车辆按照1:1的比例搭建了电动汽车模型,并且同样在电动汽车底部设置了一个功率1 000 kW/m²的火源来诱发整车火灾,并且设定火源在80 s自动熄灭。模型的具体参数见表2。

当特征火焰直径与最小网格尺寸的比值在4~16时,模拟计算精度与计算时间之间可以取得较好的平衡。特征火焰直径 D^* 计算式为

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中 Q 为火源的热释放速率,kW; ρ_{∞} 为空气密度,取1.2 kg/m³; c_p 为空气比热容,取1 kJ/(kg·K); T_{∞} 为环境空气温度,取293 K; g 为重力加速度,取9.8 m/s²。

表2 模型参数表

Table 2 Table of model parameter

部件	尺寸(长×宽×高)/m ³
整车	4.6×1.8×1.5
电池包	1.7×1.3×0.15
火源	0.3×0.3×0.1

经计算本模型的火源特征尺寸 D^* 为0.367 m,因此选取的网格尺寸为0.05 m×0.05 m×0.05 m,可以保证计算结果的可靠性,总网格数达到了171 360。

2.2 参数设置

2.2.1 材料参数

电动汽车与传统燃油车的主要区别是能源供应系统,电动汽车所采用的动力系统主要由动力电池和电机组成,与传统的内燃机截然不同。除此之外,两者的其他组件如内饰、轮胎、钢制框架及前机舱部件等所采用的材料差别不大。模拟中包含的材料类型主要有聚氯乙烯(Polyvinyl Chloride,PVC)、聚丙烯(Polypropylene,PP)、橡胶、钢材、油漆及动力电池组成材料。其中动力电池组成材料(主要包含正极材料、负极材料、电解液、隔膜)构成整个动力电池模组,由模组再通过串并联的方式构成电池包。所采用的材料的热力学参数参照已有研究设定,具体如表3所示^[17]。其中依据所测试电池内部材料占比,将正极材料、负极材料、电解液、隔膜四种组成材料的混合质量比设为0.43:0.29:0.21:0.07。

2.2.2 表面参数设定

FDS软件对实体模型材料属性的定义是通过表

表3 电池组成材料热物性参数表

Table 3 Thermophysical parameter table of battery composition materials

电池组成材料	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	比热容 c_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热率 k /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	热吸收系数
电解液	1 290	133.9	0.45	0.9
负极	2 660	1 437.4	1.04	0.8
隔膜	492	1 978	0.334	0.8
正极	4 202	672	6.20	0.8

面的形式来实现的。本模型中 PVC、PP 用于构成电动汽车内饰、前机舱部件和后备箱部件的表面,橡胶材料用来定义轮胎表面,钢和车漆用来定义汽车框架表面,电池表面则由电池组成材料定义,所有实体模型均由分层表面定义材料属性,具体的表面参数如表 4 所示。其中,本文通过磷酸铁锂电池单体热失控试验,获取了电池热失控表面温度变化曲线,如图 2 所示,电芯在 130 ℃ 时触发热失控,因此数值模拟中将动力电池着火温度设为 130 ℃。

表 4 表面参数

Table 4 Surface parameters

材料	热释放速率/ (kW · m ⁻²)	火灾增长系数/ (kW · s ⁻²)	着火 温度/℃
PVC	438.0	0.039	220.0
PP	1 004.7	0.069	238.5
橡胶	220.0	0.083	180.0
油漆	200.0	0.006	200.0

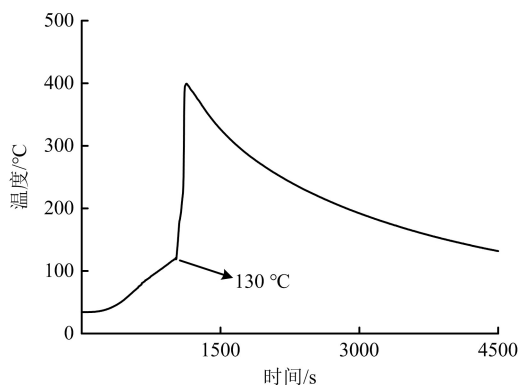


图 2 电池单体温度变化曲线

Fig. 2 Temperature variation curve of battery cells

2.3 测点布置

为了获取火灾过程中电动汽车各部位的温度数据,模型中共布置了 7 个温度测点,如图 3 所示,分别编号为 T1 ~ T7。T1 主要监测电池包温度,位于电池包下表面。T2、T3 分别位于前后轮,T4、T5 分别布置在后备箱、前引擎盖上方 10 cm 处。车辆前后客舱各布置了一根热电偶,编号分别为 T6、T7。在整车火灾试验中,分别在电池包下表面、乘客舱、后轮及后备箱位置布置了四根热电偶。

3 结果和讨论

3.1 试验结果

电池包火灾发展过程如图 4 所示,在电池包火

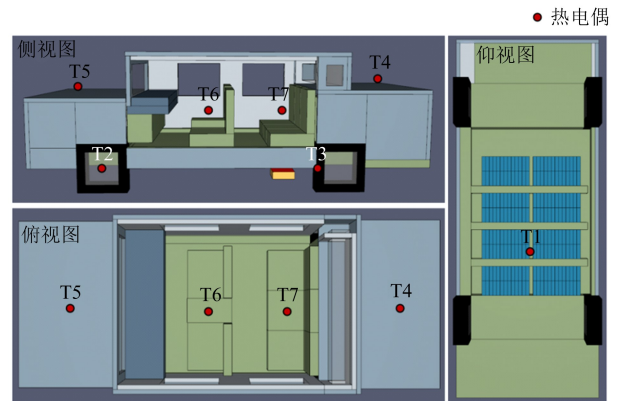


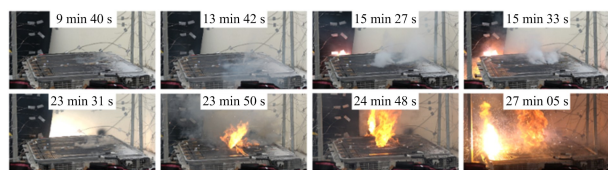
图 3 测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points

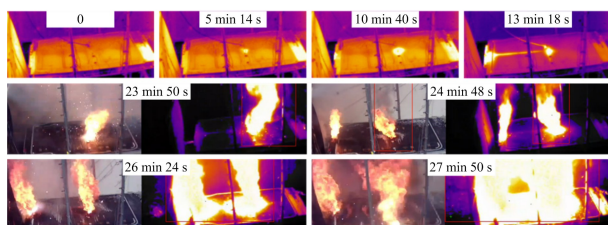
灾初始阶段,第一块电池安全阀开启后,电池内部因前期副反应积累的高压得以释放,内部冲击产生的压力将部分电解液喷出。随后,产生大量白烟,这是电池内部热失控前期的一个明显征兆。随着热量不断累积,电池温度持续攀升,电芯触发热失控,并伴随出现间断性的拉弧现象。拉弧作为一种高温、高能量的电弧放电现象,能够产生极高温度的火星,同时,拉弧还可能引发电气系统的进一步故障,使得火势得以迅速蔓延,极大地提升了电池包火灾的危险性,也给扑救工作带来了极大的难度^[18]。从火焰喷出位置来看,火焰优先从电池侧面的防爆阀喷出,该位置通常与轮胎位置相邻,因此,电池包起火后,轮胎成为最容易被引燃的物体之一。随后,防爆阀处出现了射流火。经测量,火焰峰值高度约为 2.3 m。尽管在整车电池包上方通常会布置格挡板以起到一定的防护作用,但在射流火的持续高温加热下,热量会迅速突破格挡板,传递至乘客舱,对车内人员的生命安全构成严重威胁。此外,防爆阀处的射流火还可能引燃后备箱和前引擎舱,进一步扩大火势范围。

通过红外热成像对电池包进行监测发现,电池包左侧的电芯温度优先升高。这一现象主要归因于电池整体略微向左侧倾斜。在整车实际运行过程中,可能会因爆胎等因素的影响,电池包出现这种倾斜状况。由于电池向左侧倾斜,左侧模组的电解液分布情况发生改变,更容易触发热失控。热失控过程中会释放出大量的热量和气体,这些热量和气体的不断积累和扩散,推动电池包火灾不断蔓延扩大,最终蔓延至整个电池包甚至整车。

电动汽车火灾发展过程如图 5 所示,在火灾早期,正庚烷燃烧主要是对底盘电池进行加热,第 80 s 时正庚烷停止燃烧,此时有黑烟产生,主要是由于底



(a) 电池包热失控过程



(b) 电池包热失控表面温度及火焰形态

图4 电池包火灾发展过程

Fig. 4 Development process of battery pack fire

盘聚合物材料(如聚乙烯、聚丙烯等)的不完全燃烧,该类材料不完全燃烧的产物包括有毒气体 CO ^[19]。图6呈现了火灾早期阶段的产气特性,然而,受限于采集方式,所获取的数据仅能部分反映该阶段产气的实际特性。即便如此, CO 峰值体积分数仍处于较高状态,因此在电动汽车火灾发生时若不及时撤离将面临中毒风险。停止加热后,正庚烷正上方的电池内部自产热反应不断进行,随着热量的积累,第97 s第一块电池安全阀爆开并且形成喷射火,由于燃烧器的加热面积较大,短时间内多块电池接连触发热失控;在接下来的200多秒内,由于电池之间热传导的作用,相邻的动力电池单体也相继触发热失控。第295 s,底盘低熔点的塑料部件在高温喷射流火的作用下熔融滴落,形成油池火,该现象标志着电动汽车火灾发展到了一个新的油池火自加热阶段。滴落的熔融物逐渐扩散且持续加热汽车底盘及周围部件,导致火灾相继蔓延至后轮、乘客舱、后备箱及前轮,第524 s火灾最终吞噬了整个电动汽车。整个火灾发展进程相对短暂,表明外部过热触发的电动汽车火灾危险性较高、火灾蔓延概率较大。

图7为电动汽车全尺寸火灾试验温度曲线,电池包在直接加热条件下温度急剧攀升,峰值温度达到了699℃,在经过短暂下降后,第97 s,第一块电池热失控导致电池包测点温度再次上升,此时后轮在电池包喷射火焰的作用下开始起火,该蔓延路径验证了电池包火灾试验结果,即火焰从电池包防爆阀喷出后会优先引燃轮胎。因此,热失控产生的射流火加剧了火势的蔓延。汽车乘客舱在电池包起火后温度开始缓慢上升,第342 s乘客舱起火,其温升曲线有一个明显的转折点。由于后备箱与乘客舱相



图5 电动汽车火灾发展过程

Fig. 5 Development process of electric vehicle fires

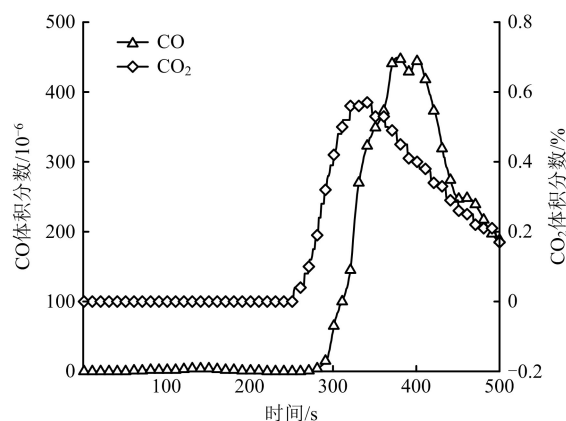


图6 产气曲线

Fig. 6 Gas production curves

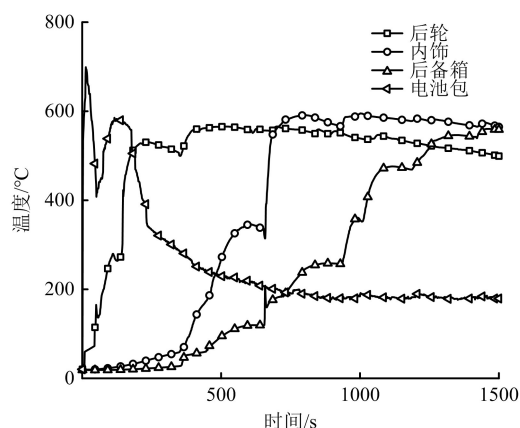


图7 整车温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of entire vehicle

距较近,且仅由一层可燃隔板隔开,在乘客舱内饰起火后,后备箱温度便加速上升。火灾蔓延速度总体呈现加速趋势,前5 min是早期灭火的黄金时间。

3.2 数值模拟结果

3.2.1 温度特性

利用数值模拟手段对电动汽车火灾进行分析的

前提是确保模型的可靠性,图 8 为试验与模拟的电池包温度曲线对比。在整体趋势上,数值模拟结果与试验结果较为一致。在试验初期,由于持续的外部加热及温度测点位于燃烧器上方,电池包温度呈线性上升趋势,模拟与试验曲线在该阶段高度吻合。随着第一块电池发生热失控,热源释放导致温度迅速升高,两条曲线仍表现出一致的跃升趋势,最终于 200 °C 均趋稳定。当温度升高至约 350 °C 时,试验曲线与模拟曲线出现交点。该交点的出现反映了数值模型理想化假设与实际试验条件之间的差异。试验过程中可能存在接触热阻、结构缝隙、非均匀散热等复杂环境因素,而模拟中这些影响被简化或忽略,导致中期温度变化过程略有偏差,进而形成温度曲线的交汇点。尽管如此,该模型在整体温度变化趋势和关键节点上的预测表现良好。

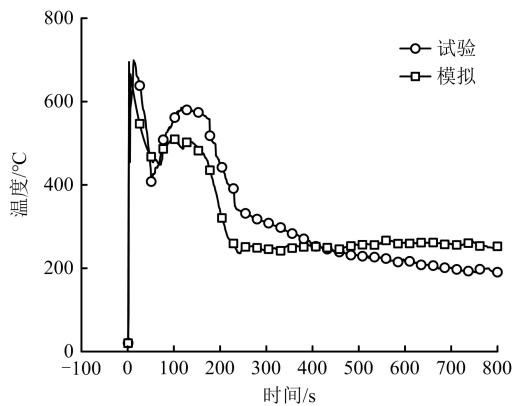


图 8 电池包温度曲线对比

Fig. 8 Comparison of battery pack temperature curves

如图 9 所示,在火灾初期,由于正庚烷的加热,T1 温度直线上升,第 60 s 电池包开始燃烧,T1 温度在经过短暂下降后再次上升,与此同时在电池包射流火的作用下,T3 温度开始上升,整个电池包剧烈燃烧大约持续了 90 s,随后温度稳定在 250 °C 左右,第 80 s 时后轮起火;正庚烷燃烧器停止加热后,电池模组之间不断进行热传导,火势迅速向周围电池蔓延。第 210 s,由于底盘电池包火灾的水平蔓延,前轮开始起火;乘客舱位于电池包上方,在底盘电池包火的加热下,前期温度缓慢升高,第 340 s 左右,舱内 T6、T7 温度急剧升高,推测是舱内高温烟气积聚导

致轰燃发生,值得注意的是前后客舱的温度曲线几乎一致,表明在发生火灾时,前后排人员面临的危险相当。后备箱的温度在 300 s 后开始上升,在 420 s 左右开始燃烧。T5 的温度在 648 s 时开始急剧上升,标志着整个电动汽车完全被火焰吞没。整个火灾蔓延过程依次是电池包—后轮—前轮—乘客舱—后备箱—前引擎舱,与试验现象基本吻合。

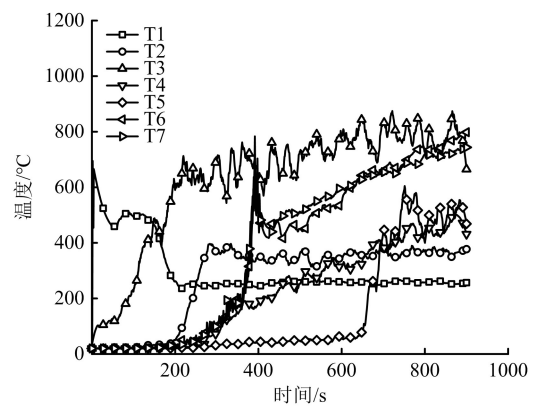


图 9 电动汽车火灾的温度曲线

Fig. 9 Temperature curves of electric vehicle fire

表 5 统计了 T1 ~ T7 的峰值温度,其中 T3 的峰值温度最高,达到了 874.7 °C,这主要归因于电池热失控的射流火到达顶部后向两边扩散,类似于顶棚射流。其次是 T6、T7,峰值温度分别是 798.3 °C、783.5 °C,一方面是由于乘客舱内饰可燃物较多,且模拟中乘客舱与外界空气连通导致燃烧更加剧烈,另一方面是因为乘客舱位于电池包正上方,电池热失控的射流火正对着乘客舱底部。这表明电动汽车火灾中乘客舱是高风险部位。

图 10 为电动汽车侧面温度场,可以看出火灾早期火场温度较低。在 0 ~ 120 s 内,火焰主要沿水平方向扩散,这主要是因为火灾初期喷射火焰触碰到电池包顶板后会向四周形成射流火,且产生的高温烟气也在底部形成顶板射流,加剧了火势沿水平方向的蔓延。120 s 之后,汽车侧面及上半部分可燃物在高温烟气和火焰的影响下也逐渐被引燃,火势迅速从电动汽车侧面开始向上蔓延,且中间部分的火焰蔓延速度最快,侧面火场中心温度最高超过了 900 °C。

表 5 热电偶 T1 ~ T7 峰值温度

Table 5 Peak temperature of thermocouple T1 - T7

热电偶编号	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
峰值温度/°C	695.0	396.7	874.7	501.7	604.5	798.3	783.5

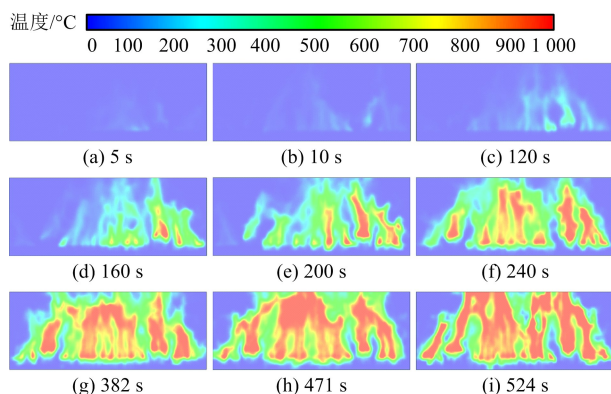


图10 电动汽车侧面的温度场

Fig. 10 Temperature field of the electric vehicle side surface

3.2.2 热释放速率

图11为整车火灾的热释放速率曲线,可大致将整车火灾划分为四个阶段;第一阶段为火源燃烧阶段(0~80 s),该时期热释放速率缓慢上升,第80 s火源熄灭,热释放速率呈现短暂下降,表明火灾初期热释放速率的主要贡献来自火源;第二阶段为动力电池热失控阶段(>80~385 s),火源上方的动力电池在外部加热的作用下被引燃,并迅速蔓延至相邻电池及电池模组,热释放速率迅速上升至4 MW左右;第三阶段为内饰燃烧阶段(>385~636 s),由于底盘电池燃烧导致车内温度上升,其内饰部件及后备箱中的可燃物被点燃,伴随有大量放热;第四阶段为整车燃烧阶段(>636~900 s),该阶段是整车火灾规模达到最大的时期,火灾热释放速率也达到了峰值7.88 MW,与前人对64.092 kWh电动汽车火灾的研究结果(燃烧时的峰值热释放速率为7.25 MW)相比^[10],该数值模型可近似模拟本文试验车辆70 kWh左右的电动汽车火灾。此外,Sun等^[20]总结的锂离子电池火灾热释放速率峰值与电池容量的关系式为

$$q_{\max} = 2E_b^{0.6} \quad (2)$$

式中 $q_{\max}$ 为热释放速率峰值,kW; E_b 为锂离子电池的容量,kWh。根据式(2)可估算出该电动汽车电池热失控时的火灾热释放速率峰值为1.61 MW,由此可以得出在火势达到峰值阶段时,热释放速率的主要贡献并非来自电池本身。但电池热失控对火灾发展速度起到了主导作用,是推动电动汽车火灾初期快速发展的关键因素。

4 结论

本文开展了全尺寸电动汽车火灾试验,通过正

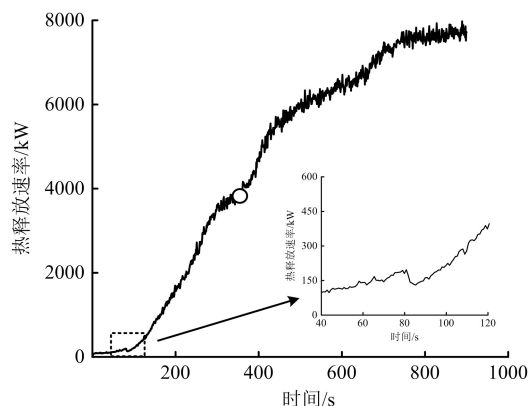


图11 热释放速率曲线

Fig. 11 Heat release rate curve

庚烷池火引燃电动汽车,分析火灾特性及蔓延路径。按照试验场景1:1搭建了整车FDS数值模型,通过与试验的对比来验证模型的可靠性,并分析了模拟中电动汽车火灾的燃烧特性、温度特征及火灾蔓延路径,主要结论如下。

(1)电池包火灾过程中会出现拉弧现象,产生高温火星会加剧火势蔓延;车辆底部油池火的形成,标志着电动汽车火灾发展到了一个新加热阶段。整车火灾蔓延路径基本沿着电池包—后轮—前轮—乘客舱—后备箱—前引擎舱发展。

(2)在整车火灾中,车辆前后排人员面临的危险基本一致,火灾蔓延到乘客舱耗时340 s,峰值温度高达798.3℃。模拟中火灾蔓延路径与试验现象基本吻合。

(3)整车热释放速率峰值达到7.88 MW,其主要贡献来自车身燃烧,电池热失控对热释放速率峰值贡献仅为1.61 MW,但对于火灾发展过程具有显著的加速效果。

本模型可以进一步优化和完善,以适应更多类型的电动汽车和更复杂的火灾场景,可为电动汽车火灾防控提供指导。

参考文献(References):

- [1] WANG H M, WANG G Q, QI J C, et al. Scarcity-weighted fossil fuel footprint of China at the provincial level[J]. Applied Energy, 2020, 258: 114081.
- [2] XU J, LAN C J, QIAO Y, et al. Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 883-890.
- [3] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles; a review[J]. Energy Storage Materials, 2018,

- 10: 246–267.
- [4] 邢志祥, 刘敏, 吴洁, 等. 锂离子电池火灾危险性的研究现状分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(6): 880–884.
- XING Z X, LIU M, WU J, et al. Analysis on the current study situation of lithium ion battery fire hazard[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(6): 880–884.
- [5] 钱广俊, 汪宇, 卢兰光, 等. 基于参比电极的析锂电池安全充电控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 71–77.
- QIAN G J, WANG Y, LU L G, et al. Charging performance of precipitating lithium batteries based on reference electrodes [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 71–77.
- [6] 张少禹, 董海斌, 李毅, 等. 动力锂离子电池热失控火灾试验模型研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(3): 397–400.
- ZHANG S Y, DONG H B, LI Y, et al. Study on the experimental model of thermal runaway fire of lithium ion battery for EV[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(3): 397–400.
- [7] WANG Q, JIANG B, LI B, et al. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64: 106–128.
- [8] PENG P, JIANG F M. Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: a numerical study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1008–1016.
- [9] FENG X N, ZHENG S Q, REN D S, et al. Investigating the thermal runaway mechanisms of lithium-ion batteries based on thermal analysis database[J]. Applied Energy, 2019, 246: 53–64.
- [10] KANG S, KWON M, YOON CHOI J, et al. Full-scale fire testing of battery electric vehicles [J]. Applied Energy, 2023, 332: 120497.
- [11] HYNENEN J, WILLSTRAND O, BLOMQVIST P, et al. Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests [J]. Fire Safety Journal, 2023, 139: 103829.
- [12] CUI Y, CONG B H, LIU J H, et al. Characteristics and hazards of plug-in hybrid electric vehicle fires caused by lithium-ion battery packs with thermal runaway [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 878035.
- [13] 潘鸣宇, 及洪泉, 邱明泉, 等. 电动汽车锂离子电池组火灾数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 104–109.
- PAN M Y, JI H Q, QIU M Q, et al. Numerical simulation study on fire of lithium-ion battery pack in electric vehicle [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(6): 104–109.
- [14] 崔辉, 王春平, 谯柳, 等. 自动喷水灭火系统抑制电动汽车火灾有效性模拟[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(3): 869–874.
- CUI H, WANG C P, QIAO L, et al. Simulation of the effectiveness of automatic sprinkler systems for suppressing electric vehicle fires [J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(3): 869–874.
- [15] 陈长坤, 王其江, 苏文东, 等. 滚装船运输新能源汽车燃爆事故特性研究[J/OL]. 安全与环境学报, 2025: 1–10[2025–8–12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4537.X.20250718.1142.002>.
- CHEN C K, WANG Q J, SU W D, et al. Investigation of combustion and explosion characteristics in new energy electric vehicles transported by ro-ro ships [J/OL]. Journal of Safety and Environment, 2025: 1–10[2025–8–12]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4537.X.20250718.1142.002>.
- [16] ZHAO J C, LU S, FU Y Y, et al. Experimental study on thermal runaway behaviors of 18650 li-ion battery under enclosed and ventilated conditions[J]. Fire Safety Journal, 2021, 125: 103417.
- [17] 刘得星. 车载电池包集成灭火系统关键参数仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- LIU D X. Simulation research on key parameters of integrated battery fire extinguishing system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [18] 刘旭晖, 朱振宇, 郭玥, 等. 一种电弧引燃电缆的电气火源模拟方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 136–142.
- LIU X H, ZHU Z Y, GUO Y, et al. Electrical fire source simulation for igniting cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 136–142.
- [19] 张引, 秦超群, 田双双, 等. 磷酸铁锂储能预制舱火灾烟气扩散及温度变化规律[J]. 电力工程技术, 2025, 44(1): 207–217.
- ZHANG Y, QIN C Q, TIAN S S, et al. The change rule of smoke dispersion and temperature evolution in fires within lithium iron phosphate energy storage prefabricated cabin [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1): 207–217.
- [20] SUN P Y, BISSCHOP R, NIU H C, et al. A review of battery fires in electric vehicles [J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361–1410.

Experimental and numerical simulation study on full-scale fire spread characteristics of electric vehicles

LIU Tong^{1,2}, HUANG Jianhua^{1,2}, ZHU Guoqing^{1,2}, QI Xuyao², YUAN Diping^{1,2}

(1 Shenzhen Research Institute of China University of Mining and Technology, Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: This study conducted a systematic experimental investigation ranging from individual battery cells to battery packs and ultimately to complete electric vehicles. Basic characteristic parameters of thermal runaway were obtained through testing of cells and modules, providing foundational data for the development of the vehicle model. A full-scale electric vehicle fire experiment was performed, utilizing n-heptane pool fire heating to induce battery thermal runaway, allowing for the assessment of fire characteristics and propagation pathways throughout the entire vehicle. The results indicate that arcing occurs after the battery pack ignites, followed by early-stage thermal runaway of the power battery and the formation of pool fires due to molten plastic components dripping from the chassis. This marks the transition of the vehicle fire into an accelerated development phase. The primary fire propagation path is as follows: battery pack → rear wheel → front wheel → passenger compartment → trunk → front engine compartment. Additionally, the fire temperatures experienced in the front and rear sections of the vehicle were similar, indicating comparable hazard levels. From the onset of ignition to the fire spreading into the passenger compartment, the process takes 340 seconds, with a peak temperature reaching 798.3 °C. Based on the experimental data, a full-scale electric vehicle model was constructed using FDS software, and the numerical simulation results demonstrated good agreement with the experimental findings. The peak Heat Release Rate (HRR) of the vehicle reached 7.88 MW, closely approximating the fire behavior of a vehicle with approximately 70 kWh capacity. The maximum contribution of battery thermal runaway to the total HRR was 1.61 MW. This indicates that the combustion heat release rate of an electric vehicle fire is primarily governed by its solid combustible materials. While battery thermal runaway does amplify the HRR, it does not play a dominant role. The findings of this study enhance the understanding of the development processes of electric vehicle fires. Additionally, the experimental data and numerical models provide valuable support and references for future research on fire characteristics in charging stations.

Key words: safety engineering; electric vehicle fire; full-scale experiment; fire spread; fire dynamics simulator