

电动汽车电池火灾扑救技战术难点与对策研究

王松鹏

北京市通州区消防救援支队商务园消防救援站 北京 101100

摘要: 随着电动汽车产业快速发展,保有量持续增长,电池火灾事故频发,其扑救难度大、危害严重,成为制约产业安全发展的关键问题。本文围绕电动汽车电池火灾扑救技战术展开研究,分析了电池结构与火灾特性,明确了锂离子电池多层级结构、内外部火灾诱因及高温、产气、复燃、定向蔓延的燃烧特点;剖析了探测预警、灭火介质应用、现场防护救援、灾后处理四大技战术难点;最后从优化探测预警体系、改进灭火技术、完善防护战术、规范灾后流程四方面提出对策,涵盖多参数探测、专用灭火介质、标准化救援流程等具体方案。研究可为提升电动汽车电池火灾应急处置能力提供技术支撑,助力保障人员财产安全与产业健康发展。

关键词: 电动汽车电池火灾; 扑救技战术难点; 对策

引言: 现有研究对电池火灾特性与扑救技战术的系统性探索不足,传统灭火方式难以应对电池热失控等特殊问题,救援人员安全防护与现场协同也存在短板。因此深入分析电动汽车电池结构与火灾特性,梳理扑救技战术难点,提出科学可行的对策,对完善消防救援体系、降低火灾损失、推动电动汽车产业安全可持续发展具有重要现实意义。

1 电动汽车电池的结构与火灾特性

1.1 电动汽车电池的类型与结构

电动汽车电池核心类型以锂离子电池为主,其结构呈现多层级复合体系。从微观层面看,电池单体由正极、负极、电解质与隔膜构成,正极材料多为锂过渡金属氧化物,负极以石墨类碳材料为主,电解质为含锂盐的有机溶液,隔膜则采用多孔聚合物材料,起离子导通与电子隔离作用。从宏观层面,单体电池通过串并联方式组成模组,模组进一步集成形成电池包,电池包内部包含热管理系统、电压采集模块与安全防护结构,热管理系统通过液冷或风冷维持电池工作温度稳定,电压采集模块实时监测单体电压状态,安全防护结构则通过壳体强度设计与绝缘层布置,抵御外部冲击并防止漏电风险,各层级结构协同保障电池的能量输出与使用安全。

1.2 电动汽车电池火灾的引发原因

电动汽车电池火灾的诱因可分为内部缺陷与外部因素两类。(1)内部缺陷源于电池生产与老化过程,生产环节中若电极材料混料不均、隔膜存在针孔或极耳焊接不良,会导致电池内部出现微短路,长期使用后电极材料结构衰减、电解质分解产生气体,进一步加剧内部短路风险;(2)外部因素则包括机械、热、电气三类作用,机械作用如碰撞、挤压导致电池壳体变形、隔膜破

损,引发正负极直接接触;热作用如环境高温或相邻部件起火,使电池温度超过热失控阈值;电气作用如充电过压、放电过流或线路短路,造成电池局部能量集中释放,两类诱因最终均会触发电池内部的热失控反应,进而引发火灾。

1.3 电动汽车电池火灾的燃烧特性

电动汽车电池火灾具有以下特性。(1)燃烧温度极高,热失控过程中电池内部反应释放大量热量,火焰温度可达1000℃以上,且热量集中于电池包内部,形成局部高温环境;(2)燃烧过程伴随剧烈产气,电解液分解与电极材料反应会产生大量可燃气体与有毒气体,气体释放速率快且浓度高,不仅加剧火势蔓延,还对救援环境造成危害;(3)存在持续复燃风险,电池内部的热失控反应具有连锁性,即使外部明火扑灭,若电池核心区域温度未降至安全阈值,残留的活性物质仍会继续发生反应,导致火灾再次引燃;(4)火势蔓延具有定向性,电池包内部的模组排列与热传导路径,使火势易沿串并联电路方向扩散,形成区域性燃烧态势,增加扑救难度^[1]。

2 电动汽车电池火灾扑救技战术难点

2.1 火灾探测与预警难点

电动汽车电池火灾的早期探测面临以下多方面技术瓶颈。(1)从探测对象来看,电池热失控初期反应集中于内部,释放的特征信号(如微量气体、局部温升)易被电池包结构屏蔽,传统火灾探测器难以捕捉微弱信息;(2)从预警响应来看,电池系统与消防预警系统缺乏协同联动机制,即使探测到异常,信号传输需经过多环节转换,易出现延迟,无法为初期扑救争取时间;(3)从环境干扰来看,电动汽车运行过程中,电池正常充放电会产生温度波动、气体释放等现象,与火灾初期特征信

号叠加,导致探测器误判率升高,影响预警准确性。

2.2 灭火介质选择与应用难点

以下灭火介质的适配性与作用效率是核心难题。

(1)从介质特性来看,水虽能实现降温,但电池包的密封结构阻碍水流渗透,无法作用于内部火源,且可能引发电解液飞溅,扩大危险范围;干粉、二氧化碳等介质虽能抑制明火,却难以阻断电池内部的热失控连锁反应,灭火后复燃风险极高;专用灭火介质虽针对性更强,但受限于存储条件与使用场景,难以在各类救援现场快速部署。(2)从应用操作来看,电池包的模块化设计使火源位置隐蔽,灭火介质难以精准覆盖所有燃烧区域,需拆解电池包才能深入灭火,而拆解过程不仅耗时,还可能破坏电池结构,引发二次爆炸。

2.3 火灾现场安全防护与救援难点

救援人员安全保障与救援效率存在矛盾,具体如下:(1)从防护需求来看,电池火灾释放的有毒气体(如一氧化碳、氟化氢)具有强腐蚀性 & 毒性,且扩散速度快,现有个人防护装备的防毒时长、防腐蚀性能难以满足长时间救援需求;现场高温环境会加速防护装备老化,降低防护效果,增加救援人员受伤风险。(2)从救援战术来看,传统救援战术以快速扑灭火焰为核心,而电池火灾需优先控制热失控扩散,两者战术逻辑差异较大,若沿用传统战术,易导致火势反复;同时救援过程中需兼顾周边人员疏散、交通疏导等工作,现场协调难度大,进一步制约救援效率。

2.4 火灾后电池处理与现场清理难点

灾后处理的安全性与彻底性难以兼顾,具体如下:(1)从残余电池处理来看,火灾扑灭后,部分电池单体可能处于“热失控潜伏期”,表面无明火但内部温度持续升高,常规检测手段难以判断其安全状态,若处理不当易引发复燃或爆炸;且残余电池存在电解液泄漏风险,泄漏液体具有强腐蚀性,会污染土壤与水源,需专业处理设备与技术,普通救援队伍缺乏相应条件。(2)从现场清理来看,电池燃烧产生的残留物(如电极材料碎屑、有毒粉尘)与车辆残骸混合,清理过程中需避免残留物扩散,同时需对污染区域进行无害化处理,现有清理工具与流程难以实现高效、彻底的清理,易留下安全隐患^[2]。

3 电动汽车电池火灾扑救技术难点与对策研究

3.1 优化火灾探测与预警技术体系

优化火灾探测与预警技术体系,具体对策如下:

(1)构建多参数融合探测网络。针对电池火灾早期信号隐蔽问题,整合温度、气体、电压、振动传感器形成

立体化探测网络。在电池包内部关键位置布设微型温度传感器,实时监测单体及模组温度,精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内以捕捉微小温升;于电池包通风口及车辆底盘关键区域装气体传感器,检测电解液分解特征气体,浓度超阈值即触发预警;同时接入电池管理系统(BMS)电压与电流数据,通过算法分析异常波动与骤变,实现多参数交叉验证,降低误判率。(2)开发车-路-消防协同预警系统。建立电动汽车与道路基础设施、消防指挥中心的实时数据通道,打通数据壁垒。借助车联网(V2X)技术,将车辆电池状态信息上传至路边单元(RSU),再由RSU汇总至区域交通管理平台,平台对接消防指挥中心系统,形成“车辆-道路-消防”三级预警链路。探测到电池异常时,优先向驾驶员推预警提示停车;异常加剧则自动向消防指挥中心发送定位、电池类型、异常参数,为消防部署与方案制定争取时间,缩短应急响应周期。(3)优化预警信号处理算法。采用机器学习算法对多源探测数据智能分析,构建电池火灾风险评估模型。收集海量电池正常运行与火灾事故数据,训练模型识别火灾不同阶段特征模式,区分正常工况波动与早期信号;引入实时数据更新机制,依新事故数据与技术迭代优化模型参数,提升预警准确性。设计分级预警机制,按风险等级发不同强度信号,配套对应应急措施,避免预警与处置力度不匹配。

3.2 改进灭火介质与灭火技术方案

改进灭火介质与灭火技术方案如下:(1)研发专用高效灭火介质。针对电池火灾热失控难阻断问题,开发兼具冷却、抑制链式反应的复合灭火介质。以水为载体,添加高效吸热剂与链式反应抑制剂,优化配比,使介质接触火源时快速吸热降电池核心温度,同时通过化学反应抑制电解液分解与电极氧化,阻断热失控连锁反应。添加表面活性剂提升渗透性,降低表面张力,使其渗透电池包内部缝隙,覆盖隐蔽火源,减少复燃风险。

(2)设计模块化灭火装置。依不同车型电池包结构,研发适配模块化灭火装置。乘用车用集成式车载灭火系统,在电池包内预设喷放管路与喷嘴,按模组排列优化喷嘴布局,确保介质均匀覆盖所有单体;系统联动BMS,检测到火灾信号自动喷放,实现“探测-灭火”一体化。商用车用便携式模块化装备,由多个独立单元组成,可按电池包尺寸灵活组合,配备快速连接接口,便于救援人员现场快速组装备,提升通用性与响应速度。(3)推广浸没式与定向冷却灭火技术。针对电池包密封导致介质难作用问题,推广浸没式灭火技术。研发可快速展开的柔性密封罩,救援人员到场后覆盖电池包

并密封,通过专用管路注入灭火介质,使电池包完全浸没,利用介质高效吸热与隔热作用快速控火、冷却。优化定向冷却技术,开发专用喷头与管路,依电池包热分布将冷却介质精准输送至高温核心区,避免盲目冷却浪费与低效,通过定向降温将电池温度快速降至热失控阈值以下,从根源抑复燃^[3]。

3.3 完善现场安全防护与救援战术

完善现场安全防护与救援战术,应采取以下对策:

(1) 升级救援人员个人防护装备。针对现场高温、有毒气体风险,优化防护装备性能。防护服采用多层复合材料,外层用耐高温(1200℃短时)、防腐蚀芳纶纤维,内层加隔热与防毒渗透层,提升防护能力;呼吸器用长管供气与压缩空气瓶双模式,长管满足长时间救援,气瓶作备用,避免供气中断风险;防护手套与靴子加强指尖、鞋底耐磨防穿刺性,提升整体隔热性,确保接触高温电池包或尖锐残骸时安全。(2) 制定标准化救援战术流程。构建“风险评估-区域划分-分步处置”标准化流程。救援力量到场后,用专用检测设备评估风险,确定高温区、有毒气体扩散范围、电池包位置;依评估结果划分警戒区、作业区、安全区,设标识与隔离设施;处置分“冷却控火-灭火-持续冷却”三步:第一步用喷雾水枪冷却电池包及周边,降环境与电池温度;第二步用专用装备灭火;第三步持续冷却至温度低于60℃,监测2小时以上防复燃。(3) 强化现场协同指挥机制。建立消防、公安、医疗、环保多部门协同指挥体系,明确职责与流程。消防负责灭火与现场管控;公安负责交通疏导、警戒与人员疏散;医疗负责人员医疗保障,现场设临时医疗点,配有毒气体中毒急救设备与药品;环保监测有毒气体、液体泄漏,评估环境风险,指导后续处置。配专职现场指挥官,统一协调各部门,用无线通信建实时沟通渠道,确保信息顺畅,避免配合不畅致救援延误或隐患。

3.4 规范火灾后处理与现场清理流程

规范火灾后处理与现场清理流程,具体做好以下方面:(1) 建立残余电池检测与处置标准。制定残余电

池检测处置技术规范,明确项目、流程与要求。火灾扑灭后,救援人员用专用设备逐单体检测,评估电压、内阻、温度,判断潜在热失控风险;无风险电池按危废规定,由资质单位运至专业场所拆解回收;有风险电池用专用密封容器封装,运至指定区域惰性气体保护或深度放电,彻底消风险。建处置台账,记录来源、检测结果、方式与去向,实现全流程追溯。(2) 优化现场清理技术与装备。研发针对性清理装备与技术,提升效率与安全性。电池燃烧残留物用带高效过滤的真空设备收集,防扩散;电解液泄漏腐蚀性液体用高吸附专用材料吸附,封装处理防土壤水源污染;清理中用便携式气体与水质检测仪实时监测,确保污染物含量达标。制定操作规程,明确清理顺序(先危险残留物后普通残骸)、人员防护要求与废弃物分类标准,避免二次事故。(3) 建立现场环境监测与修复机制。清理后开展持续环境监测与修复。环保部门定期采样检测现场及周边土壤、水体、空气质量,周期不少于3个月,确保污染物未扩散且浓度下降;发现污染用化学氧化、生物修复等技术治理,直至指标正常。建环境监测档案,记录数据、措施与效果,为后续事故处置提供参考,避免污染留存^[4]。

结束语:本文系统完成了电动汽车电池火灾扑救技战术的研究,明确了电池火灾从特性、难点到对策的完整逻辑链,提出的多参数探测、专用灭火介质、标准化救援流程等对策,具有较强的实操性与针对性。愿本文研究成果能为消防部门、车企等提供参考,推动各方协同完善电池火灾防控体系,为电动汽车安全应用筑牢防线。

参考文献

- [1]安绍光.电动汽车火灾扑救难点与处置措施研究[J].消防界(电子版),2021,7(2):48-49.
- [2]谢克强.电动汽车锂离子电池火灾爆炸成因分析与应对策略[J].时代汽车,2022(9):145-146.
- [3]田龙祯,谢春丽,王昊洁.电动汽车电池火灾预警报警及自动灭火装置设计[J].科学技术创新,2020(11):155-156.
- [4]林俊.锂电池电动汽车火灾灭火救援技术研究[J].产业创新研究,2025(12):97-99.