

新能源汽车电池热失控引发火灾的机理与防控对策研究

杨东鑫

山东海川司法鉴定中心 山东 青岛 266400

摘要: 新能源汽车产业蓬勃发展,但电池热失控引发的火灾问题成为制约其进一步普及的关键瓶颈。本文深入剖析新能源汽车电池热失控引发火灾的机理,从电池内部反应、热积累过程及外部诱因等方面展开详细探讨,并针对性地提出涵盖电池设计优化、热管理系统改进、安全标准完善、应急处理及用户教育等多维度的防控对策,为新能源汽车电池安全提供全面且深入的指导。

关键词: 新能源汽车; 电池热失控; 火灾机理; 防控对策

1 引言

在全球能源转型和环保需求日益迫切的背景下,新能源汽车凭借其节能减排的优势,成为汽车产业转型升级的核心方向。近年来,新能源汽车市场呈现出爆发式增长态势。然而,电池热失控引发的火灾事故频发,严重威胁着人们的生命财产安全,也对新能源汽车产业的可持续发展造成了负面影响。深入研究电池热失控引发火灾的机理并制定有效的防控对策,对于推动新能源汽车产业的健康前行至关重要。

2 新能源汽车电池热失控引发火灾的机理

2.1 电池内部反应机制

新能源汽车锂离子电池由正极、负极、电解液和隔膜等构成,正常充放电时锂离子在正负极间可逆嵌入、脱嵌实现电能存取。异常情况下,内部化学反应会失控:(1)过充:充电电压超额定上限,锂离子在负极沉积加速形成锂枝晶。电压超正常工作电压10%-15%时,锂枝晶生长加快,可能刺穿隔膜致正负极短路。如额定电流100A的电池,短路电流可达500A-1000A,产生高热使电池升温。(2)过放:以三元锂电池为例,放电至截止电压以下,正极材料过渡金属离子溶解致结构坍塌,影响锂离子嵌入、脱嵌;电解液分解产生可燃气体并放热。过放至2.0V以下,几分钟内电池温度可升50-100℃。

(3)短路:根据焦耳定律,瞬间大电流在电池内部产生高热。如电阻 0.01Ω 的电池短路电流500A时,每秒产热2500J。高温加速电池内部反应,电解液在100-150℃剧烈分解,产生气体和热量,形成升温恶性循环。

2.2 热积累过程

电池异常反应产生的热量若不能及时散发,会在内部积累。电池热传导依赖电极材料、电解液和隔膜,但它们导热系数低,如石墨负极约 $100\sim 200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,电解液 $0.1\sim 0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,隔膜 $0.01\sim 0.1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,导致热

量局部聚集。温度升高使电池内部化学反应速率指数级增长,按阿伦尼乌斯方程,温度每升 10°C ,反应速率增2-4倍,热量随之剧增。温度过高时,隔膜会收缩或熔化,如聚烯烃隔膜熔化温度 $130\sim 160^\circ\text{C}$,熔化后短路面积扩大、电流增大、热量更多^[1]。同时,电解液高温分解产生氢气等可燃气体,每克电解液分解气体体积达数百毫升,在电池内积聚形成高压,外壳破裂后与空气混合成爆炸性混合物,遇明火或高温易引发火灾爆炸。

2.3 外部诱因

(1)机械损伤:车辆行驶中碰撞、挤压等事故,电池会受巨大外力冲击,如 60km/h 正面碰撞冲击力可达数吨至数十吨,可能破坏电池内部结构、隔膜,引发短路。生产、运输、安装操作不当,如组装压力不均、连接件松动,也会造成电池内部损伤,埋下热失控隐患。

(2)环境高温:高温下电池散热效率降低,按散热公式,环境温度升高使温差 ΔT 减小,散热量 Q 减少,如 40°C 时散热效率比 25°C 低30%-50%,加速电池老化与热失控。高温还可能引发BMS故障,环境温度超 50°C 时,BMS电子元件故障率显著增加,致监测控制失效。(3)电气故障:电池连接线松动、接触不良会使局部电阻增大,按焦耳定律,电阻增大热量大幅增加,如 0.1Ω 接触电阻、100A电流时,每秒产热1000J。长时间高温使绝缘材料老化损坏,引发短路等故障,最终致电池热失控。

3 新能源汽车电池热失控引发火灾的防控对策

3.1 电池设计优化

3.1.1 材料改进

材料改进是提升新能源汽车电池安全性的关键。正极材料方面,通过掺杂、包覆等手段提高其结构与热稳定性,如在三元锂电池正极掺杂5%-10%的铝元素,可使热分解温度提高 $20\sim 30^\circ\text{C}$;包覆氧化铝等氧化物,高温下产气量可降低30%-50%。负极材料上,开发钛酸锂等新

型材料,其充放电平台稳定、体积变化小,能有效避免锂枝晶形成,循环寿命较石墨负极提高3-5倍,安全性大幅提升。电解液优化则选择高闪点、低挥发性且热稳定性好的溶剂和添加剂,添加5%-10%的氟代碳酸乙烯酯,可使电解液热分解温度提高15-25℃,闪点提高10-20℃。

3.1.2 结构设计优化

采用多层结构与热隔离设计,合理布局电池组件。如在电池模块设多层隔板分隔正负极片,增加热传导路径以提升散热效率;在模块间用气凝胶毡、陶瓷纤维毡等热隔离材料,其导热系数极低,像气凝胶毡可低至0.015W/(m·K)以下,能阻止热失控蔓延。同时优化电池外壳,用高强度铝合金或钢制外壳并做特殊处理增强抗冲击能力,采用密封胶圈、焊接等工艺确保密封,防止电解液泄漏和短路。优化后外壳可承受10-15吨压力,密封性达IP67等级以上。

3.2 热管理系统改进

3.2.1 高效散热技术

高效散热技术包含液冷与相变材料散热两种方式。液冷散热是在电池模块内或周围布置冷却液管道,利用乙二醇水溶液等比热容大的冷却液循环流动带走热量,通过调节流量和温度精确控温。如在60kWh电池组中,3C倍率放电时,冷却液流量10-15L/min,能将电池温度控制在35-45℃,散热效率比风冷高30%-50%^[2]。相变材料散热则是利用石蜡、脂肪酸等在相变时吸放热的特性,将石蜡封装成微胶囊制成相变材料板置于电池模块间,可减小电池在高温环境下的温度波动10-15℃,散热效果良好。

3.2.2 智能温度监测与控制

建立完善电池温度监测系统,在电池内部和表面布置热电偶、热敏电阻等高精度、高可靠性温度传感器,如一个电池模块布置5-10个,实时准确获取温度信息并传至电池管理系统。管理系统依据数据自动调节散热系统,电池超40℃启动液冷,超50℃增大冷却液流量、降低温度,保障电池安全运行。同时,电池温度异常升高时,系统能及时发出警报并采取保护措施,如切断充放电回路,通过设置温度阈值和报警延迟时间,在温度达危险水平前行动,如10秒内升温超5℃即警报,5秒内切断回路防热失控。

3.3 电池管理系统(BMS)功能强化

3.3.1 精准状态监测

BMS需具备精准电池状态监测功能,能实时、准确获取电池电压、电流、温度、SOC、SOH等参数,采用测量精度达±0.1%以内的高精度传感器,借助卡尔曼滤

波、神经网络等先进算法精确估算SOC和SOH,如卡尔曼滤波算法估算SOC误差可控制在±3%以内,神经网络算法估算SOH误差在±5%以内。通过对参数分析处理,能及时发现电池过充、过放、短路等异常。一旦检测到过充,如电压超额定电压105%,BMS会在0.1秒内切断充电回路,防止热失控。

3.3.2 故障诊断与预警

需建立完善故障诊断算法以提前预警电池潜在故障。通过对电池历史数据分析和学习,构建基于支持向量机(SVM)、深度学习等的故障模型。当电池运行状态与模型有偏差,能及时判断故障类型与严重程度,并向驾驶员或车辆管理系统示警,如电池内阻增大超20%发黄色预警,超50%发红色预警。此外,BMS应具备故障记录和存储功能,记录故障发生时间、类型、参数等信息,存储时长可达数月甚至数年,为后续故障分析和维修提供有力依据。

3.3.3 均衡管理

由于电池单体之间存在性能差异,在充放电过程中容易出现不一致性,导致部分电池单体过充或过放,影响电池的整体性能和安全性。BMS应具备均衡管理功能,通过主动或被动均衡技术,调整电池单体之间的电量差异。主动均衡技术通过能量转移的方式,将电量高的电池单体的能量转移到电量低的电池单体中;被动均衡技术则通过电阻放电的方式,消耗电量高的电池单体的能量。例如,在一个由100个电池单体组成的电池组中,采用主动均衡技术,可使电池单体之间的电量差异控制在±2%以内,提高电池组的安全性和使用寿命。

3.4 安全标准完善与监管加强

3.4.1 制定严格的安全标准

政府和相关部门应加快制定和完善新能源汽车电池安全标准,明确电池在热失控、过充、过放、短路等异常情况下的安全要求和测试方法。例如,规定电池在热失控试验中,从开始出现热失控到火焰熄灭的时间不得超过30分钟,且不能引发相邻电池的热失控;在过充试验中,电池在超过额定电压120%的情况下充电1小时,不能发生起火、爆炸等危险情况^[3]。标准应涵盖电池的设计、生产、测试、使用等各个环节,确保电池在全生命周期内都具备较高的安全性。同时,随着电池技术的不断发展和应用场景的变化,及时对安全标准进行修订和更新,保持标准的先进性和适用性。例如,每2-3年对安全标准进行一次全面评估和修订。

3.4.2 加强市场监管

加强对新能源汽车电池生产企业和市场的监管力

度,建立健全的质量监督和认证体系。对电池生产企业进行严格的资质审查,要求企业具备先进的生产设备、完善的质量管理体系和专业的技术人员。例如,生产企业应通过ISO9001质量管理体系认证、IATF16949汽车行业质量管理体系认证等。加强对电池产品的质量抽检,对不符合安全标准的产品坚决予以召回和处理。每年对市场上的电池产品进行抽检,抽检比例不低于10%。对于抽检不合格的产品,责令企业召回,并处以高额罚款。同时,加强对新能源汽车销售和售后服务的监管,规范企业的经营行为,保障消费者的合法权益。

3.5 应急处理与救援能力提升

3.5.1 车辆应急设计

在新能源汽车设计中,应充分考虑应急处理的需求,配备相应的应急装置和设施。例如,在车辆内部设置自动灭火装置,如七氟丙烷灭火系统、细水雾灭火系统等。当检测到电池热失控引发火灾时,自动灭火装置能够在5-10秒内启动,迅速扑灭火灾。七氟丙烷灭火系统具有灭火效率高、对环境影响小等优点,能够在短时间内将火势控制住。同时,在车辆外壳上设置应急排气口,在电池发生热失控产生大量气体时,能够及时将气体排出,降低车内压力,减少爆炸的风险。应急排气口应具备自动开启和关闭功能,当车内压力超过一定值时,自动打开排气;当压力恢复正常时,自动关闭。

3.5.2 应急救援培训

加强对消防、急救等应急救援人员的培训,提高其对新能源汽车电池火灾的应急处理能力。培训内容应包括新能源汽车电池的结构和工作原理、火灾特点、灭火方法和救援技巧等方面^[4]。例如,培训消防人员如何正确使用针对电池火灾的灭火器材,如何避免在救援过程中引发电池爆炸等危险情况。通过开展模拟演练和实战训练,使应急救援人员熟悉新能源汽车电池火灾的处置流程,能够迅速、有效地进行救援行动,减少人员伤亡和财产损失。每年至少组织2-3次模拟演练和实战训练。

3.6 用户安全教育与宣传

3.6.1 安全使用知识普及

加强对新能源汽车用户的安全教育,通过多种渠道向用户普及电池安全使用知识。例如,在车辆使用手册

中详细介绍电池的正确使用方法、充电注意事项、异常情况处理等内容。手册应采用通俗易懂的语言和图表,方便用户理解。利用汽车制造商的官方网站、社交媒体平台等渠道,发布电池安全使用提示和案例分析。定期推送电池安全知识文章、视频等内容,提高用户的安全意识。例如,每月发布一篇电池安全知识文章,每季度发布一个电池安全案例分析视频。

3.6.2 定期维护与检查提醒

提醒用户定期对新能源汽车进行维护和检查,特别是对电池系统的检查。建议用户按照车辆使用手册的要求,定期到专业的维修机构进行电池检测和维护,如每6-12个月进行一次全面检测。维修机构应具备专业的电池检测设备和技术人员,能够对电池的性能、安全性等进行全面评估。同时,告知用户在车辆发生碰撞、涉水等异常情况后,应及时对电池进行检查和维修,确保电池的安全性。

结语

新能源汽车电池热失控引发火灾是复杂问题,机理复杂且危害大。深入研究可知,电池内部反应、热积累及外部诱因等共同作用致火灾。防控需综合施策:优化电池设计,改进材料与结构;改进热管理系统,高效散热并智能控温;强化电池管理系统,精准监测、诊断预警与均衡管理;完善安全标准与监管;提升应急处理与救援能力;加强用户安全教育。但随技术发展场景复杂,电池安全仍面临挑战。未来需多方协作,加强安全技术研究创新,完善标准监管体系,提升安全性能,推动产业可持续发展,并加强国际合作,共克全球性难题。

参考文献

- [1]贾丙硕,许冀阳,孟妮,等.新能源汽车锂离子电池热失控研究[J].粘接,2025,52(01):134-136+140.
- [2]林树潮,胡宝林.新能源汽车动力电池热失控分析[J].汽车与新动力,2024,7(04):32-34.
- [3]黄阔,李倩,王绪.新能源汽车动力电池热失控机理及防治对策研究[J].汽车测试报告,2024,(13):41-43.
- [4]周少杰.新能源汽车动力电池热失控机理和安全风险管控方法的研究[J].时代汽车,2024,(03):80-82.