

动力电池安全性问题及防护技术探讨

王卫建 411421199304107336

摘要

随着新能源汽车与电化学储能产业规模化发展,锂离子动力电池已成为交通与储能领域核心储能器件,但热失控、内短路、机械损伤等安全故障频发,制约行业高质量发展。本文从电芯本体、系统集成、外部滥用三个维度梳理动力电池现存安全隐患,剖析热失控形成机理与故障诱因,围绕材料改性、结构优化、热管理控制、BMS 智能预警、被动防火五大方向梳理主流防护技术,结合现行国标与行业研究成果,分析各类防护方案优缺点,针对全生命周期安全管控现存短板提出优化思路,为动力电池安全设计、生产制造与运维管理提供理论参考。

关键词: 动力电池; 热失控; 安全隐患; 热管理; 防护技术

引言

在“双碳”战略推动下,新能源汽车、固定式储能电站装机量连年攀升,锂离子动力电池凭借能量密度高、循环寿命长的优势实现大规模产业化应用。据行业统计,车辆起火事故中超七成由动力电池碰撞破损、过充过热引发热失控所致,电芯内部短路、电解液泄漏、模组热扩散是事故主要诱因。GB38031-2020《电动汽车用动力蓄电池安全要求》从国家标准层面对电芯、模组、整包安全提出强制试验规范,但受材料体系、生产工艺、使用工况影响,动力电池全链条安全风险仍无法彻底根除。深挖安全故障成因,迭代优化主动与被动防护技术,是现阶段动力电池产业亟需解决的关键课题。

一、动力电池主要安全性问题分析

1.1 电芯本体固有安全缺陷

电芯内部隐患是热失控的源头,主要分为内短路与电解液失效两类故障。内短路分为渐变型与猝死型:渐变型多因极片毛刺、隔膜局部破损,正负极缓慢接触,内阻偏高、温升缓慢,故障隐蔽性强,长期循环后热量累积诱发热失控;猝死型常见于满电电芯集流体搭接短路,短时间电压骤降、温度突破 300℃,电解液瞬间分解产气、起火爆炸。电解液为有机易燃溶剂,高温下易分解生成氢气、一氧化碳等可燃气体,电芯密封失效发生漏液后,遇电路电火花即可引燃爆燃。同时三元锂电池正极热稳定性弱于磷酸铁锂,高温脱氧加速电解液放热反应,进一步放大安全风险。

1.2 电池系统集成安全隐患

动力电池由单体电芯串并联组成模组与电池包,PACK 集成环节设计缺陷极易放大单体故障影响。一是电芯一致性偏差,量产电芯容量、内阻细微差异随充放电循环持续放大,部分电芯提前过充过放,成为整包故障起爆点;二是散热结构设计不合理,模组排布密集、风道狭窄,快充与爬坡大电流工况下热量堆积,局部超温触发连锁热扩散;三是高压线束、接插件选型不达标,长期颠簸震动出现绝缘破损,造成整包外部短路。BMS(电池管理系统)软硬

件故障同样不可忽视，传感器采集失真、均衡算法失效会导致电压、温度失控，失去过充过放保护能力。

1.3 外部滥用诱发安全故障

外部滥用分为机械、电气、热三类滥用场景。机械滥用集中在车辆磕碰、托底撞击，外力挤压造成电池包壳体变形、电芯刺穿短路，是交通事故起火首要诱因；电气滥用源于非标快充、私改车载电路、充电桩故障，过充使电芯嵌锂饱和、SEI膜破裂，副反应剧烈放热；热滥用多发生在夏季露天暴晒、低温大功率快充，环境温度异常叠加产热超标，突破电芯安全临界温度，诱发链式热失控。此外老旧电池老化后隔膜收缩、极片粉化，日常使用故障概率显著提升。

二、动力电池主流安全防护技术

2.1 材料改性本源防护技术

从电芯原材料优化实现本质安全，是主动防护的基础。正极材料方面，磷酸铁锂凭借高热稳定性成为储能与商用车优选，三元材料通过单晶化、表面包覆氧化铝提升高温稳定性；负极采用硅碳复合改性、涂层处理，抑制析锂刺破隔膜；电解液添加阻燃添加剂、采用全氟化电解液，提升溶剂闪点，高温下抑制剧烈分解；隔膜选用陶瓷涂覆耐高温隔膜，高温下闭孔阻断离子导通，从源头遏制内短路扩展。

2.2 结构优化被动安全设计

电芯内置安全元器件，PTC热敏电阻高温限流、CID电流切断阀过压断路、防爆阀超压泄压，在故障初期阻断能量输入；PACK层面采用刀片电池、CTP无模组集成结构，优化电芯排布间隙，利用电芯壳体充当散热通道，缩小热扩散范围；电池包底部加装高强度防撞护板、壳体采用阻燃铝合金，抵御磕碰穿刺损伤，降低机械滥用破损概率。相变材料包裹模组是新型结构防护方案，依靠相变潜热吸收异常热量，延缓温升速率。

2.3 热管理系统管控技术

热管理是均衡电芯温度、防范热滥用的核心技术，分为风冷、液冷、复合相变温控三类。风冷依靠风道强制对流散热，成本低适配低速车与储能，温控精度有限；液冷通过水冷板、微通道管路循环换热，温控误差控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，是乘用车主流方案，适配大功率快充工况；相变复合热管理结合液冷与石蜡基相变材料，兼顾低高温预热与高温散热，低温环境避免析锂、高温抑制热堆积。整套系统配合温控传感器，超温后联动启停散热回路，把电芯工作区间稳定在 $25\sim 40^{\circ}\text{C}$ 安全范围。

2.4 BMS智能预警与电气防护

依托BMS实现全生命周期主动监控，硬件端布置电压、温度、绝缘监测传感器，实时采集单节电芯参数；软件搭载内短路识别、过充预警算法，通过电压突变、温升速率预判隐性故障，异常状态下自动切断高压回路、启动电芯均衡。高压系统增设熔断器、高压接触器，

短路瞬间快速分断回路；整包配备绝缘监测装置，线束绝缘破损后及时报警，规避电火花引燃可燃气体风险。当前基于大数据的云端预警技术逐步落地，依托车辆运行历史数据预判电池老化故障，提前维保规避隐患。

2.5 整包消防被动抑爆技术

在热失控初期无法阻断时，依靠被动消防遏制火情扩散。电池包内部填充气凝胶、阻燃泡棉，阻隔高温从故障电芯向邻芯传导；整包集成全氟己基液体喷淋、气溶胶灭火装置，检测到烟气、高温后自动喷射灭火剂，降温窒息灭火；储能电站配套细水雾消防系统，结合可燃气体探测器，泄漏气体超标提前通风泄压，避免爆炸事故发生。

三、现存防护技术短板与发展趋势

现有防护技术仍存在局限性：材料改性会小幅降低电池能量密度，制约续航提升；液冷系统结构复杂、整车成本上升；BMS对早期隐性内短路预判精度不足，渐变型故障难以提前识别；被动消防装置占用电池包空间，影响PACK集成效率。未来动力电池安全技术将向多技术融合方向发展：固态电池依托固态电解质替代易燃有机电解液，从根本上消除电解液起火隐患，是下一代本质安全电池核心路线；仿生热防护、光纤在线测温等新技术落地，实现电芯内部温度无损实时监测；全生命周期数字化管控平台打通生产、装车、运维数据，实现故障溯源与提前预警。同时行业持续完善安全测试标准，优化针刺、挤压、热滥用试验条件，倒逼产品安全性能升级。

结语

动力电池安全问题贯穿原材料制备、电芯生产、系统集成、装车使用、报废回收全流程，单一防护技术无法实现零故障管控，需坚持“本源材料优化+结构被动防护+智能热管理+电气预警+后置消防”多维度协同防控。随着新材料、智能化监测、固态电池技术持续突破，叠加国家强制性安全规范落地，动力电池安全边界将不断拓宽。产业端需持续优化制造工艺、规范终端充电使用，科研端深耕本质安全新材料研发，逐步降低热失控事故发生率，助力新能源产业安全稳健长效发展。

参考文献

- [1]王震坡,贾子润,王秋诗.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].汽车工程,2022,44(11):1689-1705.
- [2]李致远,鲁锐华,余庆华.动力电池热失控特征及防控技术研究分析[J].汽车工程,2024,46(01):92-99.
- [3]周洋捷,洪吉超,王震坡.新能源汽车动力电池“过充电-热失控”安全防控技术研究综述[J].机械工程学报,2022,58(10):112-135.
- [4]杨娟,梁焰彭,刘媛.动力锂离子电池热失控高温与冲击危害的被动防护包容性[J].爆炸与冲击,2025,45(02):021433.
- [5]凌子夜,张正国,方晓明.基于相变材料的动力电池热管理技术研究进展[J].化工学报,2021,72(09):4567-4582.