

锂电池火灾特性分析与调查取证技术研究

苏秦义

上杭县消防救援局, 福建省龙岩市, 364200;

摘要: 伴随着新能源产业的发展, 锂电池火灾已经成为消防救援领域面临的主要问题。本文对锂电池热失控机理、燃烧蔓延特性、毒害烟气释放行为和灭火救援难点等问题进行了系统的分析, 探究了火灾现场勘查的方法、痕迹物证的提取技术、原因认定的方法以及调查程序的规范化。经过研究可知, 锂电池火灾有突发性、燃烧速度快、复燃危险大、调查难等特性, 需要创建起包含现场保护、安全评价、专业鉴定以及各种因素综合判定的技术系统。本文从技术方法、标准规范、能力建设、信息化支撑等几个方面提出系统的改进对策, 目的是给消防救援机构开展科学、高效、规范的锂电池火灾调查工作提供理论指导和实践参考, 提高此类火灾事故应急处置及原因认定的能力。

关键词: 锂电池; 火灾特性; 调查取证; 消防救援

DOI: 10.69979/3041-0673.26.05.027

锂电池在电动车辆、储能系统和消费电子等领域得到了广泛的应用, 在推进能源结构转型的同时, 也给电池安全带来越来越明显的问题。近几年来, 锂电池火灾事故呈多发、频发趋势, 它的燃烧猛烈、容易复燃、烟气毒性大等特点, 给传统的灭火救援和火灾调查工作带来了极大的困难。国务院及相关部门多次强调要加强新能源火灾的防控工作, 提高事故调查的专业能力。目前基层消防救援机构在对锂电池火灾的处置, 特别是对起火原因调查上还存在着认识不清、技术手段缺乏、标准体系不健全、专业支撑薄弱等一些问题。因此, 本文从消防救援实战出发, 围绕锂电池火灾特性分析和调查取证关键技术展开综合研究, 以期给建立科学化、规范化、专业的锂电池火灾调查技术体系提供理论依据和实践途径, 对提高公共消防安全治理水平有重要的意义。

1 锂电池火灾的燃烧特性分析

1.1 热失控引发机理

锂电池火灾主要是热失控, 即当电池内部温度超过临界值时, 正负极材料和电解液之间发生的化学反应失控放热, 产生大量的热量, 导致无法停止的连锁反应。它的诱因有过充过放、内部及外部短路、机械损伤和高温环境等。过充电会造成锂枝晶的生长, 并且把隔膜刺破形成内部短路, 外部冲击、挤压也会造成隔膜的破损。热失控一旦发生, 无论外部电源是否断开, 反应都会继续进行, 使火灾扑救十分困难。

1.2 燃烧蔓延特征

锂电池组火灾有明显的热蔓延特征, 一个电池的热失控很容易因为热量和喷溅物而引起相邻电池的连锁反应, 在串联或并联结构中很快就会发展成整个电池组

的火灾。电池外壳破裂之后, 高温电解液喷溅并燃烧起来, 温度可以达到几百摄氏度, 对周围的可燃物产生强烈的引燃作用。密闭空间内烟气积聚容易引起轰燃, 加快火势。即使表面的明火被扑灭了, 但是内部的反应还在继续, 还存在着复燃的风险, 加大了灭火的难度。

1.3 毒害烟气释放

锂电池燃烧产生的烟气中含有大量的有毒物质, 一氧化碳、氟化氢、氰化氢等, 还有金属氧化物颗粒。这些有毒成分会严重危害人体呼吸系统和神经系统, 在密闭或者半密闭的空间里迅速扩散, 既影响人员疏散, 又增大了消防救援人员吸入的风险。烟气毒性大、扩散速度快的特点需要救援人员及调查人员都必须佩戴专业防护装备, 在充分通风之后才能进入现场进行作业, 保证作业安全。

1.4 灭火救援难点

锂电池火灾扑救存在着诸多难题。传统的灭火剂不能有效地进入电池内部去阻止热失控反应的进行, 大量的用水来降低温度也存在着触电、复燃的风险。密封结构使灭火剂无法到达反应的核心部位, 即使表面的火焰熄灭了, 内部仍然会继续发生反应, 容易造成反复燃烧, 增大现场处置的难度。对储能电站这类大量的电池组火灾来说, 能量密度大、持续时间长, 因此要制定专门的预案、配备相应的专用装备, 并开展相关的训练来提高应急处置能力。

2 锂电池火灾现场勘查方法

2.1 现场保护与安全评估

火灾扑灭后应立即划定警戒区并进行现场保护, 由于锂电池复燃的风险较大, 保护要持续进行。调查人员

进入前要进行全面的安全评价,包括检测有毒气体浓度、评估建筑结构稳定性、排查电击和坍塌等风险。用热成像仪测得电池温度低于安全值之后,大型储能设施需要由专业的人员配合才能进行断电和隔离的操作。勘查时必须配备防护用品和应急器材,保证通讯畅通,并制订好紧急撤退预案。通过科学的安全管理保证调查工作在安全的前提下有条不紊地进行。

2.2 起火点位置判定

准确判定起火点属于认定火灾原因的一个重要部分。锂电池火灾多发生在电池本体或者充电设备附近,可以通过燃烧痕迹的分布情况、火势蔓延的方向以及烧损的程度来做出综合判断^[1]。主要对电池壳体进行热变形、熔融或者爆裂等试验检测,并且查看充电设备以及线路有无熔痕或者是短路痕迹。根据证人对爆炸声、火光的位置和气味等进行缩小范围的工作。经由现场测绘、摄影并做标记来确定可疑区域,在该区域内提取物证送检,给科学认定提供依据。

2.3 痕迹物证提取

物证的提取与固定为认定火灾原因打下了基础。主要物证有电池残骸、充电设备、电气线路和燃烧残留物等。提取前要对原始状态进行拍照记录,防止破坏痕迹。电池残骸必须全部提取出来,并且要特别注意保护极片、隔膜等重要部件,严重的变形电池需要使用专门的工具小心分离。对整体上的充电设备及线路进行检查,看有无改装、故障等情况。线路短路熔痕要保留足够的长度供鉴定分析,燃烧残留物需要取样做成分检测。所有的物证都要进行规范的封装、标识,并且要建立起完整的保管记录链,保证物证的法律效力。

2.4 现场访问调查

现场访问是获得火灾有关信息的途径之一。及时向当事人、目击者以及有关人员询问起火时间、发现经过及初期处置情况。主要对电池使用状况、充电方式、维护记录和异常历史情况进行调查,核对产品来源及合规性。注意起火前异响、异味或冒烟等征兆,对电动车火灾要查明停放位置、充电时间以及充电行为是否规范。访问记录要准确、完整,并经被访人确认,关键的证言可以制作成正式笔录。利用多种信息互相印证,还原火灾的过程,给原因的分析提供事实根据。

3 锂电池火灾原因认定技术

3.1 电池质量缺陷分析

电池质量缺陷属于引起火灾的主要原因。通过对电池残骸进行拆解来检测内部结构,可以发现极片毛刺、

隔膜破损、极耳焊接不良等制造缺陷。利用显微技术分析隔膜的微观形态,区分制造缺陷和使用损伤。检测电池的容量、内阻等参数来评价电性能是否合格。进行材料成分分析,确定电解液和电极材料的质量是否合格。根据同一批次的产品数据可以发现个别或者系统的质量缺陷。劣质电池一般存在材料不合格、工艺控制不好、安全设计不够等缺陷。专业的鉴定意见给责任的认定以及产品召回提供重要的参考依据。

3.2 充电设备故障检测

充电设备故障会造成过充。必须对充电器输出电压和电流的稳定性进行检测,检验过充保护等各项功能是否正常工作。对内部的电路板元器件做拆解以查明,能够发觉烧毁、掉落或虚焊等状况。测重要元件的参数来确定电路工作状态,评价充电器外壳、插头、电源线的绝缘性能以及连接可靠性。对智能充电设备进行读取控制芯片的数据来分析充电过程中有无异常。检查充电器和电池的匹配性,不相配的充电参数会引起安全隐患。确定充电设备故障性质可以给责任认定赋予技术依据。

3.3 外部因素排查

除电池和充电设备本身的问题之外,外部因素也会成为火灾的起火原因。机械损伤会导致电池结构被破坏而发生短路,需要结合外壳的变形情况以及环境因素来对受力情况进行分析。高温环境会加快电池的老化并且降低其安全性,需要调查实际使用的和存放的环境温度情况。对电气线路敷设的规范性、接头的可靠性以及绝缘的老化情况进行检查,判断出有引起火灾危险的地方^[2]。违规改装行为破坏原有的安全设计,需要调查有无私自更换电池或者拆除保护装置等行为。同时人为因素比如充电操作不规范、环境使用不当等也应该成为重点调查的内容,综合判定因果关系。

3.4 专业鉴定与论证

对复杂或者有争议的火灾案件,应当委托具有资质的专业机构进行技术鉴定。通过对产品质量检验、电性能测试、材料分析和故障模拟等检测项目进行检测来评价物证的状态。用扫描电子显微镜、X射线衍射等设备来分析电池内部的微观结构,利用热分析技术研究材料的热稳定性。开展电池滥用试验,模拟过充、短路等异常工况来考察热失控触发条件。专业鉴定报告有法律效力,是认定火灾原因的根据。对于重要案件可以召集多学科专家进行综合论证来提高结论的科学性、权威性。

4 锂离子电池火灾调查工作规范化、完善化

4.1 调查程序规范化建设

建立规范的锂电池火灾调查程序,提高工作质量。制定专门的调查工作指引,对各个阶段的工作要求以及操作规范做出明确规定。规范现场勘查程序,统一勘查记录表格样式,保证现场信息采集完整无误。建立物证管理制度,严格按照物证提取、保管、送检、退还等程序进行,保证物证链条完整。规范询问调查程序,制定标准化的询问提纲,提高信息采集效率和质量。健全鉴定委托制度,确定鉴定项目的选取、鉴定机构的选定、鉴定费用的分担等问题。建立案件审核制度,重大复杂案件实行集体研究、专家论证,提高认定结论的准确性。加强与公安、市场监管等有关部门的协调配合,形成工作合力。定期对调查工作进行检查评价,及时发现并解决存在的问题,不断提高工作的质量和效果。

4.2 调查能力专业化提升

加强调查人员的专业能力提升是做好锂电池火灾调查的基础。组织专门的培训学习锂电池的基本知识、火灾特点、检验鉴定技术等专业知识。聘请高校、科研院所、检测机构的专家授课,提高理论水平。进行现场实际操作培训,提高勘查技能和物证提取水平。开展案例研讨,交流工作经验、方法。鼓励调查员参加学历教育和职业资格考試来提高自己的专业水平。配备必要的勘查装备和检测设备,热成像仪、气体检测仪、取证工具包等,并且提高现场工作效率^[1]。建立专家库和技术支撑队伍,在遇到疑难问题的时候及时向专家请教。加强同科研机构的合作,开展调查技术的研究,不断改进调查的方法和手段。依靠不断的能力建设,打造出一支政治坚定、业务精湛的专业化调查队伍。

4.3 技术标准体系完善

建立完善的技术标准体系,是保证锂电池火灾调查工作科学化、规范化开展的必要条件。需要积极推进锂电池火灾专项调查技术规范的制定工作,对勘查流程、物证检验、原因认定等环节的技术要求和操作标准做出规定。应该编制典型的火灾案例手册以及实战调查指南,给基层人员提供系统的参考资料。创建包含主流产品技术以及一般的故障特征的数据库来提高调查与判断的效率和准确率。同步对电池拆解、样品制备、检验分析等标准化操作程序进行规定,使实验室检验规范化。统一原因分类体系和法律文书格式,创建起全过程质量评价机制,并经过加强标准的宣传培训和执行监督来保证调查工作规范、一致、有权威性。

4.4 信息化手段应用

推进信息化技术的应用来提高调查的效率和水平,是提高调查效率、改善工作方式的有效途径。需要建立起集案件管理、现场记录、物证追踪和统计分析为一体的火灾调查信息系统,实现全过程信息化管理。采用三维建模、无人机航拍等技术,对火灾现场进行数字化重建和全景拍摄,提高勘查的精度和效率^[4]。建立物证电子档案系统,保证多角度的影像记录和信息永久保存。开发专家的知识、案例库来实现智能分析辅助系统的功能,使调查员可以对原因进行推理和判断。创建火灾分析平台,对规律进行挖掘和趋势预测,给火灾预防赋予科学的参考根据,用信息共享来增强各级各部门之间的协作能力。

5 结论与展望

本文对锂电池火灾的热失控机理、燃烧速度快、复燃危险大以及有毒烟气释放等特征进行了系统的分析,并建立了包含现场勘查、物证提取、专业鉴定和原因认定的调查技术体系。研究表明,必须创建起从现场保护到专业鉴定的完整的技术体系,依靠程序规范化、能力专业化、标准体系化和信息化支撑,提高火灾原因认定的科学性和准确性。展望未来,要促进锂电池火灾调查由智能化、标准化、系统化方向前进,加强基础研究、更新智能装备、健全标准体系,创建起调查、研究、改进的良性循环,完成从事后处理到事前防范的转变,给新能源产业的安全发展给予持续支持。

参考文献

- [1] 刘纪坤,段鑫濛,袁雪颖,等. 微过充三元锂电池热失控火灾安全特性研究[J]. 西安科技大学学报,2025,45(06):1158-1167.
- [2] 穆林雨. 磷酸铁锂电池在火灾事故中的自燃特性与灭火策略研究[J]. 中国设备工程,2025,(22):234-236.
- [3] 严云峰. 池火热环境下锂电池热失控行为及其燃烧特性的研究[D]. 江苏科技大学,2025.
- [4] 胡东辉,金泽. 锂电池储能系统的火灾特性分析及扑救要点[J]. 时代汽车,2024,(01):91-93.

作者简介:苏秦义,出生年月:1986年04月,性别:男,民族:汉,籍贯:厦门,学历:(大学本科),职称:初级专业技术十级。