

[储能系统]

集装箱式锂离子电池储能系统消防技术研究进展

文/云南省能源研究院有限公司 茹毅 黄孟阳
 储能技术工程研究中心（北方工业大学） 屈树慷 李建林

分析锂离子电池火灾特征及热失控机理，总结锂离子电池热失控诱因及热失控行为监测方法。综述了目前典型的锂离子电池火灾防护技术及储能安全相关标准，对集装箱式锂离子电池储能系统消防技术的发展应用给出相应的建议，为开展集装箱式锂离子电池储能系统消防安全技术研究提供参考。

随着我国碳达峰与碳中和目标的提出，新能源在一次能源消费中的比重不断提高，加速替代化石能源。习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上指出：要实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，构建以新能源为主体的新型电力系统。随着新能源成为主力能源，逐步增量替代火电，将给电网的稳定运行带来挑战。储能由于具有选址容易、配置灵活等特点，是实现可再生能源消纳和保证电网安全、稳定运行的有效手段，已经在电源侧、电网侧和用户侧等领域得到应用。

集装箱式锂离子电池储能系统作为一种新型储能装备，兼具较高的功率密度和能量密度，同时具有寿命长、可靠性高及环境适应性强等优点，在电源侧、电网侧和用户侧都具有广泛的应用前景。近年来，江苏、河南、湖南、青海和福建等电网侧百兆瓦级锂离子电池储能电站相继建设投运，见表1，在平抑新能源电力波动、提升清洁能源外送能力、电网调峰、调频和电力辅助服务等领域发挥重要作用，大容量集装箱式锂离子电池储能系统成为未来发展的趋势。

表1 国内外典型兆瓦级锂离子电池储能电站

项目名称	储能规模	应用功能
智利安加莫斯20 MW电池储能电站	20 MW × 0.33 h	电网调频及备用电源
日本仙台变电站锂离子电池试点项目	40 MW/200 MW·h	可再生能源并网、改善电能质量
智利阿塔卡马电池储能工程	12 MW × 0.33 h	电网调频及备用电源
中国张北风光储示范工程	14 MW × 4.5 h	平抑波动、校正预测误差、削峰填谷
国网江苏镇江储能电站项目	101 MW/202 MW·h	调峰、调频、紧急功率支撑
河南电网100 MW电池储能示范项目	100 MW/100 MW·h	平滑出力曲线、削峰填谷
甘肃720 MW·h网域大规模储能项目	182 MW/720 MW·h	平抑新能源电力波动、提升清洁能源外送能力

集装箱式锂离子电池储能系统是以标准集装箱为载体，将锂离子电池、电池管理系统、监控系统、空调系统、消防系统和配电系统集成在集装箱内，以实现高集成度、大容量和可移动的储能装置。

锂离子电池能量密度高，其电解液的溶剂通常为有机碳酸酯类化合物，具有闪点低、化学活性高和极易燃烧的特点。即使在集装箱设计中考虑了防护措施，仍很难避免由于锂电池过充电、过放电、短路和机械性

基金项目：云南省能源研究院有限公司科技研发项目（YNTYJY-2021-11-0001）。

破坏时所导致的储能电池内部热失控，进而导致爆炸、燃烧等连锁反应。由于集装箱内的锂离子电池采用集成化设计，当某一组锂电池发生热失控后，会对周围的电池产生强烈的热冲击，造成热失控蔓延，同时生成大量烷烃类可燃气体，可能发生严重的火灾甚至爆炸事故。近年来，电化学储能电站安全事故时有发生，国内外已总计发生30多起储能电站起火事故，造成财产损失和人员伤亡。锂离子电池储能系统的安全问题成为制约行业快速发展的重要因素，越来越受到社会各界关注。

锂离子电池火灾特征及热失控机理

一般来说，锂离子电池安全问题发生主要是因为锂离子电池电解液体系是 LiPF_6 的混合碳酸酯溶液，此类溶剂挥发性高，闪点低，易燃烧。当内部短路、过充电时，会产生大量的热，导致电池温度上升。当达到一定温度时，会发生一系列分解反应，使电池的热平衡受到破坏。由副反应产生的异常热量如果得不到及时释放，则进一步加剧反应，导致电池急剧增温造成热失控，进而发生燃烧、爆炸等连锁反应。锂电池火灾过程大致分为升温、初爆、漏液和复燃阶段。当单个电池燃爆后，可能引发相邻电池发生燃爆，随着每个电池发生爆裂并泄漏电解液，就会产生一种反复燃烧的火焰。当一定数量的锂电池热失控蓄积了一定的热量和温度时，就会引起大规模同时燃爆。此时若没有采取有效措施，那么集装箱内锂电池就会燃爆，造成严重危害，越到后期，危害越大。锂电池燃爆产生大量有毒烟雾，严重污染周围环境，导致头晕恶心。可以认定锂电池火灾为B、C、D、E类的复合型火灾，给扑灭锂电池火灾造成极大的困难。

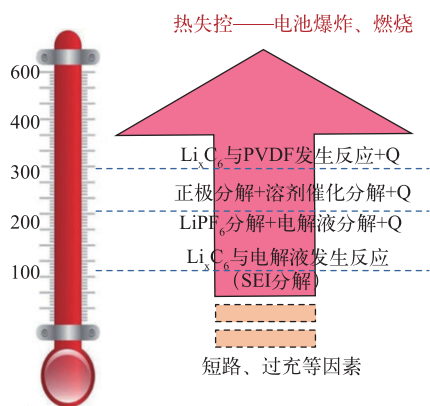


图1 锂离子电池热失控过程分析

作为一种化学储能装置，锂离子电池在滥用时造成内短路，引发内部放热反应是诱发其安全问题的根源。研究表明，随着温度升高，锂离子电池经历以下化学转变：SEI膜分解、负极材料与电解液反应、电解液分解、正极材料与电解液反应及负极与粘合剂反应。SEI膜的分解通常发生在70~120℃，放热量约为238 J/g；负极材料与电解液反应通常在155℃达到放热峰值，放热量约为1 058 J/g；以 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ LiPF}_6/\text{EC}:\text{DEC} (1:1)$ 电解液为例，电解液在186℃达到放热峰值，放热量约为163.5 J/g；以三元正极材料为例，在230℃正极材料与电解液开始发生反应，305℃达到放热峰值，放热量约为429 J/g；当温度达到250~300℃时，负极材料与PVDF粘合剂发生剧烈放热反应，放热量约为1 058 J/g。

锂离子电池热失控诱因及监测

对于全电池在高温下具体的热失控行为，可以分析得到每个热失控行为阶段相关反应的热、动力学特性，从而说明全电池的热失控机理。锂离子电池的安全问题主要表现在过热、过充电和机械冲击下导致的短路或者因为自身化学反应因素导致锂离子电池的热不稳定，造成电池内部温度上升，导致热失控并造成安全事故的发生。当电池内部短路、过充电时，就会产生大量的热，导致电池温度上升。当达到一定温度时，导致一系列分解反应，使电池的热平衡受到破坏。由副反应产生的异常热量如果得不到及时释放，就会进一步加剧反应的进行，电池温度急剧升高，液态电解质达到沸点，在正极析氧、内部热失控的条件下，具备燃烧的三要素（氧化剂、还原剂和温度），最终导致电池的燃烧引发电池火灾。当一定数量的锂电池热失控蓄积了热量和温度时，引起大规模锂离子电池同时燃爆。

Donal P. Finegan通过诱导和监测内部短路来表征锂离子电池内的热失控。通过它的使用，热失控起始的位置和时间是预先确定的，从而能够通过使用每秒2 000帧的高速X射线成像来分析18 650电池内的成核和故障传播。阐述了电池模块内侧壁破裂、电池爆裂和电池间传播等不良现象产生的原因，讨论了提高18650电池和电池安全性的措施。

Mohammed B从电化学模型、电化学-热耦合模型、LIB冷却和滥用及热失控四个模型探讨了如何保证在运行过程中长期保持热管理的安全性。

平平分析并解释了全电池的热失控行为与机理,采用去卷积方法,对复杂的全电池热流数据进行了详细分析,提出了接近商用电池所用物质比例的全电池在高温下具体的热失控行为和全电池的热失控机理。建立了大型高能量锂离子电池全尺寸火灾行为测试平台,结合全电池热失控分析结果,制定了有效的消防控制方案。该团队研究了密闭空间中18650型锂离子电池热失控爆炸的危险性分析,研究结果表明电池在密闭空间中的爆炸危险性随着SOC的增加而增大。

单明新以10 A·h三元材料锂离子电池为研究对象,采用不同倍率过充电方式刺激锂离子电池,利用高速摄影仪、红外热像仪和压力传感器记录该锂离子电池爆炸、燃烧的图像、温度和压力。结果表明:电池在过充电的过程中,其温度变化分为三个阶段;发生爆炸后,电池的能量主要以燃烧的形式释放,燃烧的火球面积高达770.64 cm²;距电池爆炸15 cm处,最大压强为0.03 MPa,可见电池爆炸对周围环境造成一定破坏。

陈玉红研究了锂离子电池正极材料、负极材料和电解液等的热分解及电池在加热、过充电和短路等状态下的爆炸机理。在热冲击、过充电、过放电和短路等滥用状态下,电池内部的活性物质及电解液等组分间将发生化学反应,放出大量的热,产生易燃气体,引起电池爆炸。

锂离子电池火灾防护技术研究

我国部分研究机构近年来开展了储能电池火灾防护技术研究、电化学储能电池热失控实验检测技术研究等基础性课题研究。研究主要针对单体电池及电池模块级别,对锂离子电池储能柜、电池簇及储能系统开展的相关实验研究较少,相关安全测试方法、标准规范尚未建立健全。在产品应用方面,目前针对锂离子电池,消防普遍采用传统的七氟丙烷灭火装置,该装置灭火针对性不强,对大规模锂离子电池储能系统的灭火效果不明晰,满足不了当前储能电站建设及发展的需要。

李毅研究了CO₂、泡沫和干粉三种灭火剂对扑

灭锂电池火灾的有效性,结果表明:CO₂、泡沫和干粉灭火剂均能有效扑灭锂电池火灾的明火,但灭火后均出现复燃现象,复燃时间与灭火剂的冷却能力成正比。尽管这三种灭火剂能通过冷却窒息、化学抑制方式扑灭电池明火,但锂离子电池发生热失控后持续释放出可燃气体和O₂,灭火效果受到影响。此外,明火被扑灭后,内部副反应仍在大量放热并释放,影响灭火剂的冷却效果,电池金属外壳的温度不断升高。热成像仪观察发现明火完全扑灭,仍有可燃气体从电池安全阀处喷出,可燃气体遇高温金属外壳后被重新引燃,同时电极在热失控后由于自身分解会产生O₂,因而干粉灭火剂的灭火效果受到影响。

李翔分析了锂离子电池的充电制度及循环次数对过充电的影响,并分析了锂离子电池爆炸、起火的机理。根据锂离子电池在过充电、短路等实验过程中易产生有毒、有害气体的特点,设计了实验过程中的防护设施。根据锂离子电池容量测试过程中数据繁多的特点,开发了锂离子电池产品检测管理系统。

周会会从锂离子电池特殊的燃烧过程、火灾蔓延速度和传统灭火手段扑救困难几个方面分析了影响锂离子电池起火的因素、火灾特性及火灾扑救技术,提出了锂离子电池火灾灭火对策。

集装箱式锂离子电池储能系统电池簇单体数量多,电池簇并联数量大。单体锂离子电池一旦热失控发生火灾,燃烧温度高,燃烧速度快,扑救难度大。不同化学体系的锂离子电池燃烧差异性大,产生大量的有毒、有害烟气,在燃烧过程中可能存在爆炸的危险。锂离子电池模组中,单体锂离子电池热失控引发相邻电池发生热失控的多米诺效应,当火灾发生后造成剧烈燃烧,导致储能系统整体失火或爆炸,给消防灭火救援工作带来巨大的挑战。

在储能电站的消防设计中,目前主要应用的消防灭火装置包括七氟丙烷灭火系统。储能电站因火灾载荷大、后期易复燃等特点,七氟丙烷灭火剂在灭火和后期降温抑制方面不能很好地起到作用。该灭火剂及灭火系统在初期可以控制火灾,但后期无法快速降温,复燃风险高,而且装置药剂量有限,占用空间较大,在灭火和后期抑制方面不理想。此外,惰性气体灭火系统因锂电池火灾燃烧产生的热

量使室内压力升高。喷放时火势越大，时间越长，压力升高值就越大，因此防护区围护结构需考虑承受内压的允许压强；设备方面，由于惰性气体灭火剂灭火浓度高，故在储能电站的防火设计中，设计用量大，占地面积广，工作压力高，存在发生安全隐患的风险。干粉灭火设备无冷却降温作用，导致火灾扑灭后极易复燃，从而导致大规模的火灾失控。虽然水喷淋系统技术比较成熟，灭火后降温效果较为理想，适用于由多个集装箱组合而成的储能系统，但不足也很明显。在灭火介质方面，由于采用水作为灭火介质，导致锂离子电池因短路而损坏，无法继续使用；在用量方面，若要扑灭明火并保持后期抑制，需要大量的水，其用量可能成倍于被保护对象的体积；在占地方面，由于用量较大，需在储能电站就近修建消防水池，占地面积较大。

储能安全相关标准

在储能系统领域，国外在基础标准规范、安装标准规范、储能系统整体标准规范和组件标准规范四个层级中形成了相对完善的标准规范体系。除了锂离子电池及电池组的安全标准测试方法之外，近年来相关国家还制定了专门针对储能系统锂离子电池安全标准。如美国UL标准UL 9540A《电池储能系统热失控火灾蔓延评价测试方法》、日本标准《电力贮存用电池规程》以及美国消防协会标准NFPA 855《固定式储能系统安装标准》等。

在储能标准体系建设方面，我国已颁布的标准涵盖了储能系统通用技术条件、储能系统规划设计、接入电网规定、电池本体技术要求和装备技术条件等方面的内容。在储能电站消防安全方面，仅中电联于2020年发布由国网江苏省电力有限公司等单位牵头组织编制的团体标准T/CEC 373—2020《预制舱式磷酸铁锂电池储能电站消防技术

规范》，对预制舱式磷酸铁锂电池储能电站的消防工程设计、建设和运维技术给出了规范性要求。目前，亟需开展电池储能系统消防安全方面的标准体系建设，最大程度降低发生危险事故的概率。

结束语

消防安全问题是影响储能行业发展的最重要因素，锂离子电池储能系统的安全性是个复杂的综合性问题。需要针对集装箱式锂离子电池储能系统消防灭火的特点和技术需求，从消防安全标准体系建设、新型消防技术及装置研发和火灾早期探测预警装置研发等方面开展系统研究。建立系统、科学的技术标准体系及测试规范，开发有针对性的锂离子电池储能系统消防灭火技术。提升集装箱式锂离子电池储能系统的安全性，促进集装箱式锂离子电池储能系统在新型电力系统中的规模化应用。具体建议主要有：

1) 开展集装箱式锂离子电池储能系统消防灭火技术的需求分析，明确集装箱式锂离子电池储能系统消防保护需求，有针对性地设计开发面向集装箱式锂离子电池储能系统应用的消防灭火装置，明确灭火装置关键组件及功能定位、关键参数及工艺过程。

2) 建设大容量储能系统故障着火模拟实验平台，开展集装箱式锂离子电池储能系统火灾演化机制及防控技术研究，构建集装箱式锂离子电池储能系统火灾危害等级及防护评价体系，验证并改善储能安全系统对不同实际环境的适应性。

3) 加快锂离子电池储能消防安全标准体系建设，用标准指导和规范锂离子电池储能行业技术发展，为实际工程应用提供技术依据。EA

(收稿日期：2021.07.13)

声 明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网www.eage.com.cn，点击“我要投稿”

咨询电话：010 - 68993981