



锂离子电池储能系统靶向消防装备设计与性能

管敏渊¹, 沈建良¹, 徐国华¹, 汤舜², 张炜鑫², 曹元成²

(¹国网浙江省电力有限公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313000; ²华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 锂电池储能系统是构建新型电力系统, 实现双碳战略目标的关键支撑, 但锂离子电池储能系统的消防安全问题成为了制约储能系统大规模推广的关键瓶颈, 现有基于固定建筑物式的传统气体灭火系统适用性不强, 无法扑灭锂离子电池火灾及抑制复燃。本工作面向典型预制舱式锂离子电池储能系统, 基于多层协同预警技术和不同防护灭火策略实现了对储能系统的靶向消防防控装备开发。首先, 基于烟/温感探测器、可燃气体传感器、Pack温度传感器构建了多层协同的预警技术, 实现对电气火灾、锂离子电池火灾的精准预警。其次, 在现有七氟丙烷灭火系统基础上增加锂电池火灾专用抑制系统, 满足国标电气场所消防设计要求的同时保障锂电池火灾抑制需求。通过主管道、应急管道、喷嘴的布局定位安装, 所设计的抑制系统支持Pack级主动防护, 能将锂离子电池抑制剂输送到Pack, 实现对锂离子电池火灾的早期扑灭并能多次启动, 抑制锂离子电池火灾复燃及蔓延。灭火系统和抑制系统协同作战, 各自发挥优势, 全方位保障锂离子电池储能系统的安全。

关键词: 储能系统; 锂离子电池; 预警; 消防装备; 精准定位

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0719

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 04-1131-08

Design and performance research of targeted-fire fighting equipment for lithium-ion battery energy storage system

GUAN Minyuan¹, SHEN Jianliang¹, XU Guohua¹, TANG Shun², ZHANG Weixin²,
CAO Yuancheng²

(¹State Grid Huzhou Electric Power Supply Company, Huzhou 313000, Zhejiang, China; ²School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Lithium-ion battery energy storage system has a fire safety problem that has become a key bottleneck restricting its large-scale promotion. The existing traditional gas fire extinguishing system based on fixed buildings has low fire extinguishing efficiency. Thus, this research work aimed at developing a prefabricated cabin-type lithium-ion battery energy storage system. Here, a targeted fire prevention and control equipment for an energy storage system was developed based on multi-layer collaborative early warning technology and different protection and fire-extinguishing strategies. First, a combustible gas sensor and Pack temperature sensor, which is an accurate, reliable, economical and practical multi-layer early warning technology, were built based on smoke/temperature detector. Second, lithium-ion

收稿日期: 2022-12-02; 修改稿日期: 2022-12-14。

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (B311UZ220001)。

第一作者: 管敏渊 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统, E-mail: 1509706893@qq.com; 通讯作者: 张炜鑫, 副研究员, 研究方向为高安全锂电池储能关键技术及储能安全, E-mail: weixinzhang@hust.edu.cn。

引用本文: 管敏渊, 沈建良, 徐国华, 等. 锂离子电池储能系统靶向消防装备设计与性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1131-1138.

Citation: GUAN Minyuan, SHEN Jianliang, XU Guohua, et al. Design and performance research of targeted-fire fighting equipment for lithium-ion battery energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1131-1138.

battery fire-suppression system was added based on a heptafluoropropane fire-suppression system to meet the requirements of fire suppression of lithium batteries and the national standard electrical and fire protection design. The designed fire-fighting equipment supports multiple start of multi-point packs, which can effectively inhibit the re ignition of lithium battery fire. The combination of a fire-extinguishing system and a fire-suppression system ensure the safety of lithium battery energy storage system in all aspects.

Keywords: energy storage system; lithium ion battery; early warning; fire-fighting equipment; precise positioning

储能能够为电网运行提供调峰、调频、备用、需求响应支撑等多种服务,是提升传统电力系统灵活性、经济性和安全性的重要手段^[1-2]。加快储能技术与产业发展,对于构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源产业体系,推进我国能源行业供给侧改革、推动能源生产和利用方式变革具有重要战略意义,同时还利于实现我国“力争2030年前实现碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和”的伟大目标^[3-5]。

以锂离子电池为代表的电化学储能技术由于其循环性能好、无记忆效应、比能量高等优点,成为目前电力储能领域装机容量增长最快的储能技术^[6-9]。但目前储能电池包括锂离子电池、铅酸电池等仍未达到本质安全,一旦电池处于短路、过热、挤压等滥用条件下,电池可能产生大量的热,从而引发内部电解液和电极材料的链式反应,进而发生热失控,并可能发展为大规模的爆炸、火灾事故^[10-12]。电化学储能系统是以电池为基础的,具有发生火灾或爆炸的危险本质,特别是在密闭空间,一旦某一储能单元发生火灾,将会引起相邻多台储能单元的连锁火灾反应甚至箱体爆炸,火灾荷载大、危险性高且难于扑救。

当前电化学储能系统的消防设计中的消防系统建设标准是基于固定建筑消防火灾,通过实施全淹没灭火方式进行灭火^[13]。采用的灭火剂主要是以七氟丙烷为代表的卤代烷烃灭火剂,常温下为气态,其灭火机理主要是切断燃烧链,适用于扑灭表面火灾,可用于电气火灾。然而锂离子电池火灾是由内至外发热类型的深位火灾,采用七氟丙烷灭火剂往往扑灭明火后会复燃。同时,火灾预警系统采用的是烟感探测器和温感探测器。基于烟感和温感探测器的误报率非常高,火灾控制系统工作原理是只有当火灾预警系统同时接收到烟感报警信号和温感报

警信号时,才能发出启动灭火系统的控制信号。锂离子电池着火部位基本在Pack(电池模组)内,当火灾预警系统探测到火灾信号时,锂离子电池火灾已经发展到一定规模了。在灭火装置方面,针对电化学储能系统火灾应用的灭火装置主要包括:悬挂式灭火装置、柜式灭火装置、探火管灭火装置。传统悬挂式灭火装置,保护范围有限,动作响应严重滞后,其一般吊装在集装箱的顶部,依靠感温玻璃泡探测周围环境达到68℃则自行启动^[14]。针对锂离子电池火灾,传统悬挂式灭火装置响应速度慢,且一套装置的灭火剂容量有限,装置保护的面积较小。柜式灭火装置,是目前储能系统中应用最多的灭火装置,其灭火装置布置在集装箱开门角落。柜式灭火装置存在的主要问题是保护的半径有限,针对集装箱狭长型的结构特点,存在保护死角,且灭火剂很难及时到达电池Pack箱内起火位置,不利于第一时间控制火灾。探火管灭火装置是通过探火管缠绕在火灾隐患附近,进而实现点对点喷射灭火,存在动作响应慢、灭火范围小的问题,并且经过工程应用发现,往往明火持续5s以后,探火管灭火装置才会启动,因此其保护的面积相对有限,不能对整个集装箱储能系统实施防护。

因此针对电化学储能系统,结合储能系统结构特点研发一种高效率且结构和布局设计合理的灭火装置迫在眉睫。本工作基于锂离子电池储能系统预制舱结构特点,构建了多层协同预警技术,实现对电气火灾、电池火灾的精准火灾预警。参考现有消防建设标准的基础上,在现有七氟丙烷灭火系统基础上增加锂离子电池火灾抑制系统,通过抑制系统中的Pack级释放管道布置及时将全氟己酮灭火剂输送至热失控Pack,实现对热失控电池的精准防控,防止电池火灾蔓延。灭火系统和抑制系统协同作战,发挥各自优势,全面保障电化学储能系统安全运行。

1 多层系统预警技术

目前，国内锂离子电池储能系统中的消防系统是参照固定建筑物式标准 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》进行设计和验收，采用的是标准的感烟/温感应器，系统为集中控制方式，如图 1 所示。基于烟感和温感探测器的误报率非常

高，火灾控制系统工作原理是只有当火灾预警系统同时接收到烟感报警信号和温感报警信号时，才能发出启动灭火系统的控制信号。对于锂离子电池而言，锂离子电池着火部位基本在 Pack 内，当火灾预警系统探测到火灾信号时，储能系统中电池火灾已经发展到一定规模了。因此，目前电化学储能系统的火灾预警系统设置亟需改进。

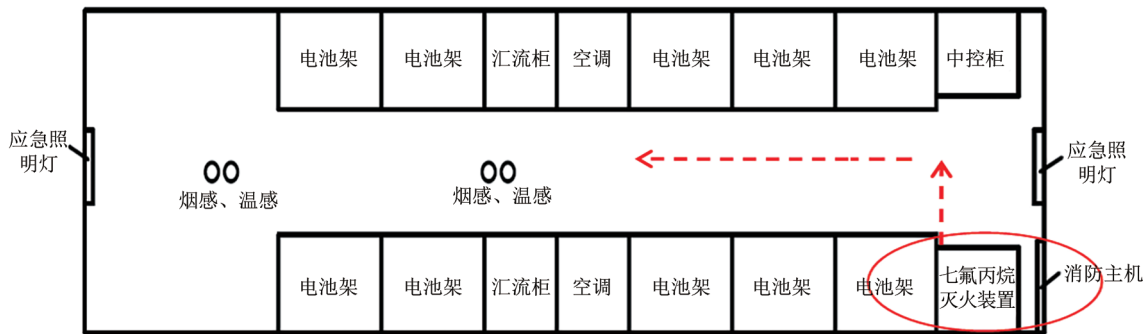


图 1 现有锂离子电池储能系统典型消防系统
Fig. 1 Typical fire protection system of existing lithium-ion battery energy storage system

储能系统火灾除了锂离子电池因热失控引发的电池火灾外，还存在电气设备短路、老化所引起的电气火灾，电气火灾分为电气柜内部火灾和舱级电气火灾。因此，针对储能系统不同火灾类型，可选择不同的预警探测器，以实现储能系统安全预警精准可靠和维护便捷等功能。

1.1 烟/温感探测器

针对传统舱级电气火灾，选用烟/温感探测器来探测。烟/温感探测器具有成本低和维护简单等优势，以 40 尺(1 尺=0.333 m)集装箱为例，在集装箱顶部及内部空间可选择性地安装部分烟/温感探

测器。电气火灾燃烧猛、蔓延快、易形成大面积燃烧，燃烧时会产生大量烟雾，并引起环境温度升高。因此，可通过监测烟雾浓度和温度来实现舱级电气火灾的防范。

烟感探测器内部采用离子式烟雾传感，离子式烟雾传感器性能远优于气敏电阻类的火灾报警器。温感探测器是利用探测器中的热敏元件发生物理变化，响应异常温度、温度速率等将温度信号转变为电信号，并进行报警处理。如表 1 所示，烟/温感探测器具有成本低、维护简单等优势，适用于探测锂离子电池储能系统中的传统电气火灾。

表 1 烟/温感探测器的选取及应用
Table 1 Selection and application of smoke/temperature detectors

类型	参数型号	优势	应用场景
烟感探测器	报警阈值 0.1~0.2 dB/m；工作电流：静态<50 μA；信号灵敏度-128 dBm；发射功率 23 dBm	24 小时不间断地对空气中的气体和烟雾进行检测，一旦空气中的气体和烟雾浓度达到所设定的阈值，就会报警	适用于电池舱+电气舱，探测传统电气火灾
温感探测器	不凝露，坚实电流<0.6 mA；报警电流<1.8 mA；报警声压>80 dB/m	低功耗、长待机时间，当周围环境达到所设置的温度阈值就会报警	

注：1.dB/m 表示 1 mW 功率为参考功率的分贝数，数值越小，灵敏度越高。
2.dB/m 表示 1 mW 光功率为基础的绝对功率，是探测器灵敏度的单位。

1.2 可燃气体传感器

可燃气体传感器是将某一种可燃性气体的体积分数转化为对应电信号的转换器，主要由电极装置和传感材料组成，电极装置采用标准实验装置。储

能系统中锂离子电池会在多种使用不恰当的条件下发生热失控，随着热失控进一步恶化，可燃气体逐渐加速溢出，且在电池爆破时，可燃气体瞬间大量喷出，并伴有大量烟雾产生。在具体实验测试过程

中,发现当电池表面温度达到60℃时,会检测到CO、H₂等可燃气体。这说明可燃气体传感器能在锂离子电池发生明火之前探测到电池热失控现象,但依然滞后于电池温度。

当前可燃气体传感器虽然能一定程度上检测到锂离子电池热失控的发生,但易受到其他杂质气体的影响,并且寿命短,通常只有一到两年的使用周期,后续维护成本高。可燃气体传感器的价格远高于烟/温感探测器,将可燃气体传感器布置到每一个Pack内,会大大增加储能系统成本,在当前储能系统难以盈利的现状下是很难推广应用的。因此,本解决方案将可燃气体传感器用于舱级布置,当检测到一定浓度的可燃气体时,联动预制舱排烟风机进行排风,从而降低舱内爆炸浓度。

1.3 Pack温度传感器

对于锂离子电池储能系统而言,将火灾控制在Pack级别是保障整个储能系统安全的重要一环。要想实现Pack级火灾安全防控,首先需要利用传感器精准识别电池热失控发生情况。对于锂离子电池火灾过程而言,首先是升温,然后是初爆、漏液、火灾。因此,如图2所示,选择合适的温度传感器进行Pack级布置,能实现发生热失控锂离子电池的精准定位。

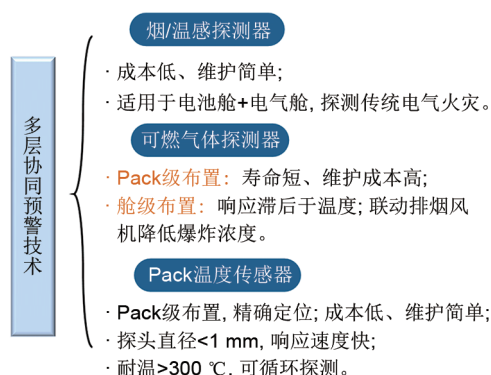


图2 预警探测器选择

Fig. 2 Selection of early warning detectors

温度传感器成本低、维护简单,能实现锂离子电池储能系统Pack预警效果。依据锂离子电池热失控典型温度特征和工程应用实践,适用于Pack温度传感器的探头直径不能超过1 mm,并且需要响应速度快,能经受住300℃以上的高温,从而实现多次探测的目的。

2 储能系统防护装备设计

如图3所示,预制舱式锂离子电池储能系统火灾可分为电气火灾和电池火灾两种。电气火灾和电池火灾是两种不同类型的火灾,电气火灾主要由于线路漏电、短路、过负荷、老化等,进而产生局部高温,致使电气设备中可燃物着火。电池火灾主要是由于单体遭到滥用(包括机械滥用、电滥用和热滥用等)时,电池内部材料发生一系列不可控的放热电化学反应直至热失控,引发电池燃烧、爆炸。并且单体电芯的热失控极易发生蔓延,导致整个电池模组、电池簇、电池系统发生大规模的火灾,造成极大的经济损失和人员安全风险。针对电化学储能系统,需要做到能够精准识别两种火灾类型,通过消防装备的设计和优化,结合适用性强的灭火剂,从而实现火灾的快速有效扑灭。

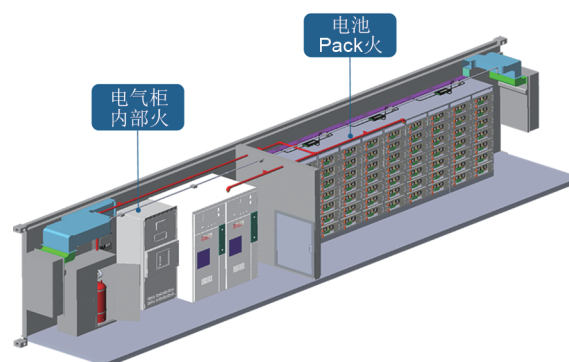


图3 预制舱式电化学储能系统防控系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of prevention and control system for prefabricated electrochemical energy storage system

对于电气火灾,可采用七氟丙烷气体灭火剂。现有预制舱式电化学储能系统配套的是七氟丙烷灭火剂,虽然对电池火灾适用性不强,但能够满足电气火灾的灭火需求。当控制模块接收到报警信号时,七氟丙烷灭火剂通过全淹没管道、全淹没喷嘴进行释放,实现对电气火灾的扑灭。

由于电池火灾是一种内源性火灾,用传统隔绝空气的原理来实现灭火不具备适用性,电化学反应过程中的热失控是火灾的根源,电池火灾灭火剂应具备扑灭明火和降温防复燃两种特征。现有配套的七氟丙烷并不具备降温能力,因此对于电池火灾,不能使用七氟丙烷灭火剂。全氟己酮是一种氢氟碳灭火剂,是一种清澈、无色、无味的液体,具有良

好的绝缘性能,对锂离子电池火灾能起到快速扑灭和持续降温的效果,并且不会伤害电子元器件和其他正常电池,避免二次损伤。基于全氟己酮灭火剂和释放管道布置,可构建用于扑灭锂离子电池火灾的抑制系统,与七氟丙烷灭火系统协同作用,全面保障储能系统安全。

2.1 Pack级主动防护

图4为本工作中锂离子电池储能系统消防装备设计图,包括七氟丙烷灭火系统和全氟己酮抑制系统,两种灭火介质分别存储(七氟丙烷灭火剂瓶组、全氟己酮抑制剂瓶组),全淹没管道、全淹没喷嘴, Pack级主管道、Pack级应急管道, Pack喷嘴等。两种系统互相独立又彼此支撑配合,由区控电磁阀进行控制。

现有预制舱式电化学储能系统消防装备只有一套基于全淹没灭火方式的七氟丙烷装置,不具备对电池火灾的早期识别、精准定位和及时扑灭防止蔓延等功能。本工作所设计的 Pack级主管道按照 Pack级喷嘴设计,能将抑制剂精准输送到每一个 Pack,从而实现对电池火灾的精准扑灭,防止电池明火向周围电池 Pack蔓延,造成系统级别火灾。

除了通过消防装置主管道和喷嘴的设计实现 Pack防护灭火外,消防装置还需具备启停可控、应急机械启动等功能。锂离子电池发生热失控产生燃爆后,采用全氟己酮一定程度上能快速扑灭明火,但内部热失控反应依然在继续,热量继续产生,当热量累积到一定程度时会发生复燃现象。因此,消防装置需启停可控,可多次释放,从而实现对锂离子电池火灾的持续抑制。

2.2 喷放功能测试

2.2.1 试验模型与布置

对于预制舱式锂离子电池储能系统消防装备的性能检测至关重要,本工作针对预制舱式锂离子电池储能系统结构特点和火灾特性,进行了一种能及时预警、精准定位、启停可控的靶向安全防控技术和装备。在此基础上,进行了一整套消防装置的喷放功能测试和验证。

图5为靶向消防装置测试模型。抑制剂存储装置内充装全氟己酮抑制剂,并充压至存储压力,搭建40尺集装箱模型,集装箱内两侧根据应用场景布满电池架,共设置15个电池架排成一排,每个电池架7层,电池架长550 mm,宽600 mm,高

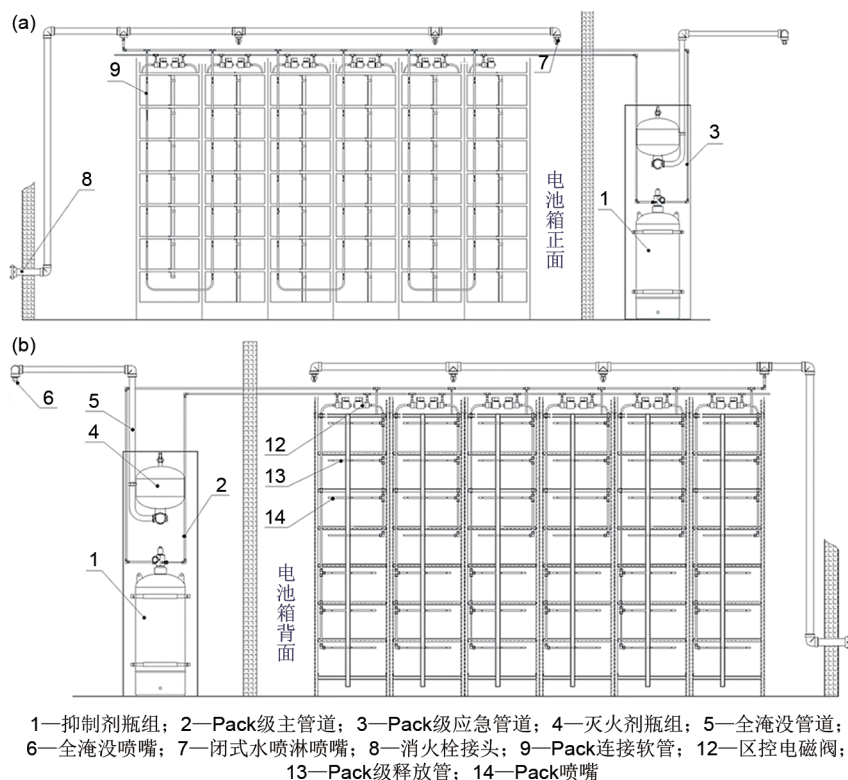


图4 消防装备设计图

Fig. 4 Design drawing of fire equipment

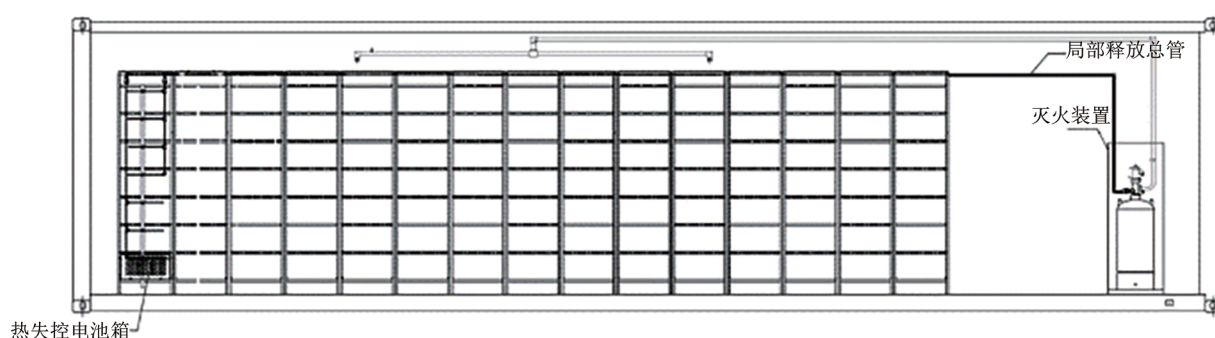


图5 集装箱内布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of inner layout of container

2200 mm, 每一层高 275 mm。最远端一个电池架根据图纸安装电池箱模型, 内部设置应急启动、温度传感器、局部释放管和喷嘴等。集装箱围护结构(含门窗)承受内压的允许压强(内外压强差)不宜低于 1200 Pa, 并参照 GB 50370 开设泄压口。在抑制剂存储装置出口处、局部释放管道的最不利点喷嘴处分别安装压力变送器, 采用记录仪同时监测驱动装置电压信号和压力变送器信号。

2.2.2 局部喷放要求

自动模式下启动局部喷放, 火灾抑制装置控制系统设置到自动状态, 触发最不利点的电池箱传感器, 抑制剂存储装置能根据设定程序启动容器阀和控制阀, 其抑制剂喷放到对应电池箱内; 驱动装置从监测到启动电压信号(抑制剂瓶组启动, 抑制剂开始从瓶组进入管道)至最不利点处的压力信号不小于 0.5 MPa(管道内抑制剂到达末端喷嘴处开始释放)的时间不大于 1 s。

测试动作流程如图 6 所示, 当布置在 Pack 级

内的传感器感应到电池发生温度异常时, 由预警主机接收感应信号并进行判定。预警主机根据所设定的程序向灭火剂瓶组和控制阀发出启动信号, 灭火剂瓶组启动, 通过主管道和分管道达到指定喷嘴位置释放灭火剂直至明火扑灭。

3 装置实况验证

为了验证所开发的靶向消防装备对锂离子电池火灾的效果, 本工作搭建了 1:1 全尺寸实验平台。具体测试方法参考 2.2 节喷放功能测试, 具体技术要求和测试方法可参考 T/CIAPS0015—2022 团体标准《预制舱式锂离子电池储能系统火灾抑制装置测试方法》。根据应用场景, 所设计的装置火灾抑制试验空间容积为 40 尺标准集装箱, 选取 1 个 100% 荷电状态(SOC)的电池模组, 安装在电池箱内, 电池单体容量为 80 Ah, 电池 Pack 容量不小于 8 kWh, 电池单体及模组之间根据实际工况串并联, 在集装箱内布置方式如图 5 所示。

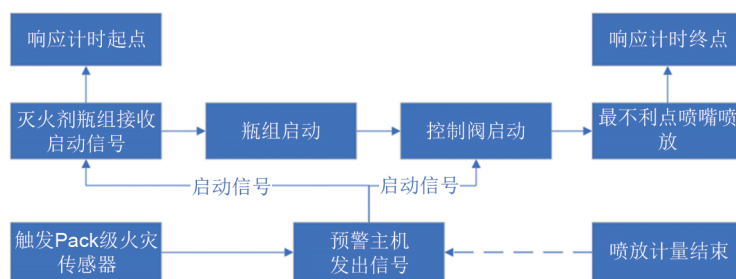


图6 自动启动动作流程

Fig. 6 Automatic start action flow

如图 7 所示, 采用加热板安装在电池模组中间, 同时加热两个电池单体, 加热装置宜选用平面状, 长宽尺寸与电池单体接近, 且与电池直接接触, 功率 500~1200 W, 电池箱内设置电磁点火

装置, 温度数据采集频率 10 Hz。

预警系统开启, 打开加热装置对电池模组进行加热, 同时打开静电点火器进行持续点火, 直至电池热失控引燃明火, 断开加热装置, 预警控制装置

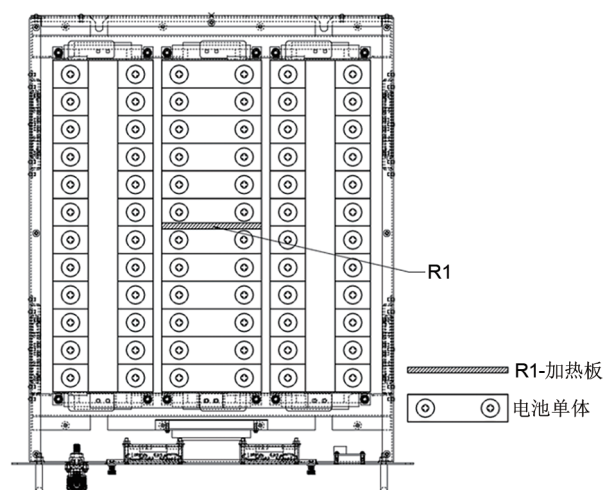


图7 热失控加热示意图

Fig. 7 Schematic diagram of uncontrolled heating

自动介入探测与灭火程序, 抑制剂分三阶段释放, 首次探测触发进行第一次释放, 时间 120 s, 中途停止 30 s, 继而第二次释放 10 s, 继续停止 30 s, 第三次继续释放 10 s, 过程循环探测, 可重复触发。通过 24 h 静电点火器持续点火, 连续视频监控、温度数据采集验证其复燃状况。试验应记录以下数据: 明火起始时间 T_0 ; 预警装置发出启动指令时间 T_1 ; 装置启动喷放时间 T_2 (参考对应喷嘴管道探测到压力变化); 明火扑灭时间 T_3 ; 24 h 内复燃情况; 火灾抑制装置响应时间为 $T_2 \sim T_1$ 。

图8为本工作所设计的靶向消防装备的实测过程图。在加热的电池单体表面布置热电偶, 实时监测电池表面温度变化情况。根据电池表面温度变化情况判断消防装置对热失控电池的实际消防性能。

图9为热失控电池表面温度曲线图。可以看到, 在 9 s 左右, 电池表面温度达到 60 °C 左右时, 电池温度急剧上升, 这是由于电池隔膜发生熔化,



图8 消防装置验证过程

Fig. 8 Fire protection device verification process

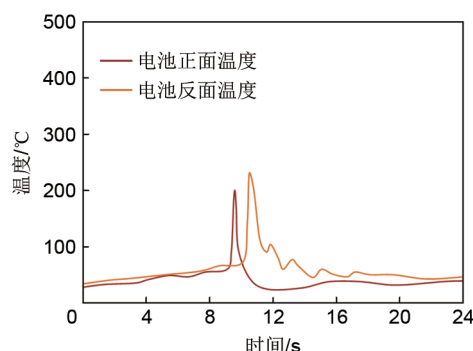


图9 热失控电池表面温度曲线

Fig. 9 Thermal runaway battery surface temperature curve

电池内部正负极短路, 从而放出大量热量。灭火装置开始启动, 释放出全氟己酮抑制剂, 在 2 s 内, 电池温度由 200 °C 以上降到 100 °C 以下, 这代表电池明火能够被迅速扑灭。除此之外, 电池温度在 10 s 内降至 50 °C。

通过实际工况验证, 本工作所设计的靶向消防装备实现了 2 s 内对热失控电池的快速降温, 并且通过装置的快速响应和精准定位功能, 能够将火灾控制在储能系统 Pack 级, 有效防止了电池火灾的蔓延。

4 结 论

预制舱式锂离子电池储能系统在密闭空间存储巨大的能量, 具有危险性。解决了储能系统安全性问题, 就解决了锂离子电池储能系统大规模应用的最后一公里。本工作基于锂离子电池储能系统结构和火灾特点, 通过不同传感器的选取和布置构建多层系统预警技术, 实现对储能系统 Pack 探测分析和精准定位。在现有七氟丙烷灭火系统的基础上设计了七氟丙烷灭火系统和全氟己酮抑制系统协同作战, 各自发挥优势, 并且更加具备经济性。通过抑制系统中管道、喷嘴的布局安装, 能够支持多点位 Pack 多次启动, 更加有效抑制锂离子电池复燃。

通过本工作所设计构建的靶向消防装备的实际工况测试, 能够及时识别锂离子电池热失控位置, 并且迅速扑灭锂离子电池火灾, 实现了对预制舱式锂离子电池储能系统的安全保障。

本工作从工程应用和实践的角度构建的靶向消防装备, 目前仍存在一些改进方向和尚待解决的问题。

(1) 气体传感器能够实现对热失控锂离子电池的早期预警, 但现有气体传感器价格昂贵、使用寿

命短,大大限制了气体传感器在锂离子电池储能系统中的大规模应用。

(2) 相较于七氟丙烷灭火系统,全氟己酮抑制系统对锂离子电池火灾适应性更强,能够有效扑灭锂离子电池明火和持续降温抑制复燃,但全氟己酮在长期存储过程中会释放出一些氢氟酸,对接触金属造成腐蚀。

(3) 在标准政策方面,针对预制舱式锂离子电池储能系统消防规范,目前尚无正式的国家标准,所采用的参考固定建筑物式消防建设规范,对锂离子电池储能系统适应性不强。

因此,锂离子电池储能系统消防装备的大规模应用目前仍面临新型材料的开发和成本的优化,以及政策标准的积极推动的问题。

参考文献

- [1] 喻航,张英,徐超航,等.锂电储能系统热失控防控技术研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(8):2653-2663.
YU H, ZHANG Y, XU C H, et al. Research progress of thermal runaway prevention and control technology for lithium battery energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2653-2663.
- [2] 于昌海,吴继平,杨海晶,等.规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J].电力工程技术,2019,38(4):68-73,105.
YU C H, WU J P, YANG H J, et al. Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 68-73, 105.
- [3] 蔡霖霖,徐青山,袁晓冬,等.基于风电消纳时序场景的电池储能系统配置策略[J].高电压技术,2019,45(3):993-1001.
CAI J L, XU Q S, YUAN X D, et al. Configuration strategy of large-scale battery storage system orienting wind power consumption based on temporal scenarios[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 993-1001.
- [4] MAO B B, HUANG P F, CHEN H D, et al. Self-heating reaction and thermal runaway criticality of the lithium ion battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119178.
- [5] 王爽,杜志明,张泽林,等.锂离子电池安全性研究进展[J].工程科学学报,2018,40(8):901-909.
WANG S, DU Z M, ZHANG Z L, et al. Research progress on safety of lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(8): 901-909.
- [6] HESSE H, SCHIMPE M, KUCEVIC D, et al. Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids[J]. Energies, 2017, 10(12): doi: 10.3390/en10122107.
- [7] CRABTREE G, KÓCS E, TRAHEY L. The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond[J]. MRS Bulletin, 2015, 40(12): 1067-1078.
- [8] 骆妮,李建林.储能技术在电力系统中的研究进展[J].电网与清洁能源,2012,28(2):71-79.
LUO N, LI J L. Research progress of energy storage technology in power system[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 71-79.
- [9] 许守平,李相俊,惠东.大规模电化学储能系统发展现状及示范应用综述[J].电力建设,2013,34(7):73-80.
XU S P, LI X J, HUI D. A review of development and demonstration application of large-scale electrochemical energy storage[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 73-80.
- [10] 汪承晔,刘英泽,罗志民,等.浅析动力电池模组过充问题[J].储能科学与技术,2018,7(6):1135-1138.
WANG C Y, LIU Y Z, LUO Z M, et al. Analysis of overcharge problem of power battery module[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1135-1138.
- [11] 张少禹,董海斌,李毅,等.动力锂离子电池热失控火灾试验模型研究[J].消防科学与技术,2018,37(3):397-400.
ZHANG S Y, DONG H B, LI Y, et al. Study on the experimental model of thermal runaway fire of lithium ion battery for EV[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(3): 397-400.
- [12] 孙杰,李吉刚,党胜男,等.锂离子电池及其材料热失控毒物研究[J].储能科学与技术,2015,4(6):609-615.
SUN J, LI J G, DANG S N, et al. Research of toxic productions from thermal runaway processes of Li-ion battery and materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(6): 609-615.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑设计防火规范:GB 50016—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [14] GAO S, LU L G, OUYANG M, et al. Experimental study on module-to-module thermal runaway-propagation in a battery pack[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(10): doi: 10.1149/2.1011910jes.