

设计经验

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 18. 009

磷酸铁锂电池储能预制舱消防给水设施及设计参数

蔡兴初¹, 郭莉², 朱一鸣¹, 沈杰¹

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘要: 在碳达峰、碳中和背景下, 风、光等可再生能源将逐渐成为主导能源, 但其发电不连续、不稳定, 需要配置储能设施。磷酸铁锂电池储能预制舱在储能市场应用较多, 但磷酸铁锂电池热失控风险大, 具有较大火灾危险性, 而现行的消防设计标准偏低。研究了磷酸铁锂电池的火灾特点及其灭火介质的适用性, 确定水基灭火剂是其较好的灭火介质。结合储能电站磷酸铁锂电池模组火灾细水雾灭火实体试验等相关试验成果以及有关储能电站火灾事故教训, 研究了适用于磷酸铁锂电池储能预制舱的消防给水措施, 提出了相关设计参数。并结合工程实例论述了磷酸铁锂电池储能预制舱消防给水设计方案, 即磷酸铁锂电池储能预制舱内设置细水雾灭火系统, 着火舱和邻近舱设置外部冷却水系统。

关键词: 储能电池; 磷酸铁锂电池; 细水雾; 冷却; 预制舱

中图分类号: TU998 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)18-0047-07

Fire Water Supply Facilities and Design Parameters of Lithium Iron Phosphate Battery Energy Storage Prefabricated Cabin

CAI Xing-chu¹, GUO Li², ZHU Yi-ming¹, SHEN Jie¹

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Economic Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co. Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: Under the background of carbon peaking and carbon neutralization, renewable energy such as wind and light will gradually become the dominant energy. However, its power generation is discontinuous and unstable, which requires to install energy storage facilities. Lithium iron phosphate battery energy storage prefabricated cabin is widely used in the market. However, lithium iron phosphate batteries have high risk of thermal runaway and fire hazard, and the current fire protection design standards are low. The fire characteristics of lithium iron phosphate battery and the applicability of fire extinguishing medium were investigated, and water-based fire extinguishing agent was determined to be more suitable to be selected as the extinguishing medium. Based on the results of fire water mist extinguishing test of lithium iron phosphate battery module in energy storage power station and the lessons of fire accident in energy storage power station, the fire water supply measures suitable for lithium iron phosphate battery energy storage prefabricated cabin were explored, and the relevant design parameters were proposed. Combined with engineering examples, the design scheme of fire water supply system for lithium iron phosphate battery energy storage prefabricated cabin was determined: a water mist

fire extinguishing system was installed in the energy storage prefabricated cabin, and an external cooling water system was installed in the fire cabin and adjacent cabins.

Key words: energy storage battery; lithium iron phosphate battery; water mist; cooling; prefabricated cabin

碳达峰、碳中和背景下,以磷酸铁锂电池储能预制舱(以下称储能电池舱)为主要储能设备的锂电池储能市场迎来了爆发式增长。磷酸铁锂电池存在热失控致火的风险,具有较大火灾危险性^[1],国内外已发生多起储能电池舱起火并烧毁的事故^[2],其中2021年4月16日北京丰台储能电站起火爆炸致2名消防人员牺牲^[3],其火灾引起的经济损失以及社会影响均较大。储能电池舱消防设计一般遵循《电化学储能电站设计规范》(GB 51048—2014),但规范编制时对磷酸铁锂电池安全性的认知有限,因此规范的安全标准偏低:规范将磷酸铁锂电池的火灾危险性定为戊类,对储能电池舱灭火设施无特殊要求。但储能电池舱的火灾危险性较大,其大规模应用需要解决消防问题。

1 储能电池舱火灾危险性

储能电池舱是化学储能电站的主要设备,一般利用标准集装箱建造,箱内设置数百块磷酸铁锂电池模组,每块电池模组又由几十个单体电池组成(见图1),单台储能电池舱市场价约400万元。储能电池舱内的磷酸铁锂电池在过充、过载等条件下,电池内部会发生化学反应而不断产热,热量聚集致热失控会引起火灾甚至爆炸,具有较大的火灾危险性。

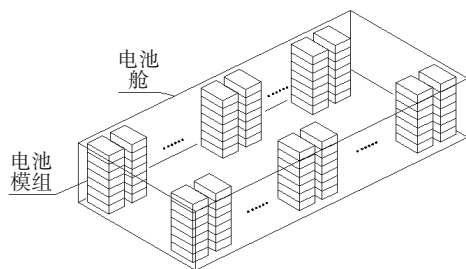


图1 储能电池舱布置示意

Fig.1 Layout diagram of energy storage prefabricated cabin

从各方研究成果^[1,4-9]看,磷酸铁锂电池的火灾危险性主要表现在:①发生热失控的温度较低(约140℃);②电池燃烧温度高,电池模组燃烧时最高

温度可达1 000℃以上;③在热失控过程产生大量可燃气体,在密闭空间具有爆炸风险;④储能电池舱储能容量越大,单体电芯数量越多,其火灾隐患越大;⑤储能电池舱空间密闭,能量堆积密度高,火灾危险性较大。

2 磷酸铁锂电池火灾的灭火介质

很多研究成果^[6,10-13]表明:①适用于扑灭磷酸铁锂电池火灾的灭火剂最重要的特征是在其迅速灭火的同时还具有较强的持续冷却能力;②六氟丙烷无法在短时间内扑灭磷酸铁锂电池模块明火;③干粉灭火剂可以在短时间内扑灭磷酸铁锂电池明火,但无法抑制其热失控,电池易复燃;④一定浓度下的全氟己酮(商标名Novec1230)和七氟丙烷可扑灭磷酸铁锂电池明火,但部分试验表明其降温效果受制于其灭火浓度(剂量),浓度(剂量)不够时,电池容易发生复燃;⑤水基灭火剂具有良好的冷却效能,可有效抑制锂电池热失控,是较好的灭火介质。

3 储能电池舱消防给水设施研究

3.1 储能电池舱内固定灭火设施

虽然上述研究明确了水是磷酸铁锂电池火灾较好的灭火介质,但储能电池舱内数百块电池模组紧密堆砌,每块模组内又有几十个单体电池,设备布置特点限制了消防水枪的充实水柱或储能电池舱水喷淋直接作用于模组内的单体电池来扑灭明火并持续冷却,尚需要寻找一种能直接作用于模组内单体电池的固定灭火方式。郭莉等^[9]开展了“不同压强细水雾对磷酸铁锂电池模组的灭火效果”专项试验研究,研究成果表明一定喷头工作压力的细水雾系统可应用于磷酸铁锂电池模组灭火。

3.1.1 细水雾灭火试验

试验^[9]搭建1:1真实储能电池舱(舱体规格为12 m×2.4 m×2.8 m),选用某一类储能用磷酸铁锂电池模组[0.6 m×0.42 m×0.24 m,由32块单体电池四并八串组成,模组容量344 Ah(1 Ah=3.6 kC)]置于储能电池舱内,将细水雾通过1个喷头注入电池模组壳内灭火。

试验结果表明:①对于单块电池模组,喷头工作压力为 1.2 MPa 的细水雾系统无法抑制热失控。②喷头工作压力为 2 MPa 及以上等级的细水雾系统能够有效扑灭明火并抑制热失控。其中,喷头工作压力为 6 MPa 的细水雾系统能够在 30 s 内熄灭明火,喷头工作压力为 2 MPa 的细水雾系统在 90 s 内熄灭明火,两者都需要持续 10 min 以上的喷射才能使得电池不发生复燃。③喷头工作压力为 2 MPa 的细水雾包络性不强,当细水雾喷头工作压力达到 10 MPa 左右后,再提高喷头工作压力对于雾化性能以及灭火时间的影响不大。

不同喷头工作压力下的细水雾灭火系统作用下电池模组温度变化见图 2。

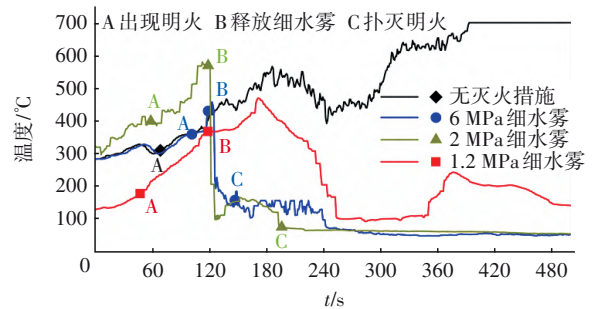


图2 不同灭火措施下电池模组温度变化曲线
Fig.2 Temperature change curve of battery module under different fire extinguishing measures

3.1.2 细水雾灭火系统设计参数

① 喷头工作压力
提高细水雾喷头工作压力,一方面增加了喷头流量及水雾的比表面积,另一方面扩大了水雾喷射的包络面。a. 按喷头设计流量公式($q=K\sqrt{10P}$)计算,喷头工作压力为 2、6、10 MPa 等级的细水雾喷头流量分别是工作压力为 1.2 MPa 等级喷头流量的 1.3、2.2、2.9 倍。较高的工作压力下细水雾的雾滴更小,比表面积更大,更有利于冷却灭火对象,这在试验^[9]中均有体现:随着细水雾喷头工作压力的增大,灭火时间缩短(见表 1)。b. 较高工作压力下的水雾喷头的水雾包络面面积更大,利于冷却模组内单体电池。试验中发现喷头工作压力为 1.2、2 MPa 细水雾喷出后形成的包络面呈扇形,覆盖的面积较小;喷头工作压力为 6、10 MPa 时,包络面呈弧形,水雾包络面积较大(见图 3)。综上,笔者建议细水雾系统应选择较大流量系数、较高压力等级的喷头。基于每个厂家生产的电池模组规格不一,具体应以

实体模拟试验结果来选择相应喷头参数。

表 1 不同细水雾的灭火时间
Tab.1 Fire extinguishing time of different water mist

| 细水雾压力/MPa | 10 | 6 | 2 | 1.2 |
|-------------|---------|---------|--------|---------|
| 明火扑灭时间/s | 15 | 28 | 77 | 480 |
| 明火扑灭前、后温度/℃ | 456、137 | 431、157 | 570、74 | 367、131 |
| 持续降温时间/min | 10 | 10 | 9 | |
| 降温后温度/℃ | 35 | 37 | 46 | |

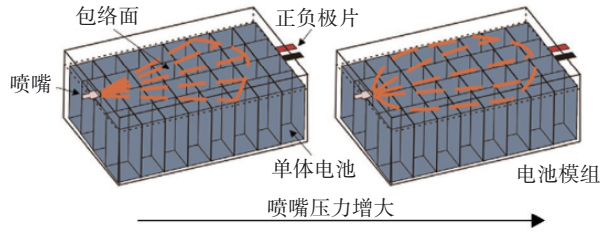


图3 水雾包络面随喷嘴压强的变化
Fig.3 Variation of envelope surface of the water mist with pressure of the nozzle

② 喷头结构
为了使细水雾较好地覆盖电池模组内的单体电池,建议采用新型细水雾喷头^[14](见图 4)。不同于传统的细水雾喷头结构,新型细水雾喷头为扁平扇形结构,在扇形曲面上沿弧线方向设置有一排喷嘴,可使水雾呈水平带状射入模组内。

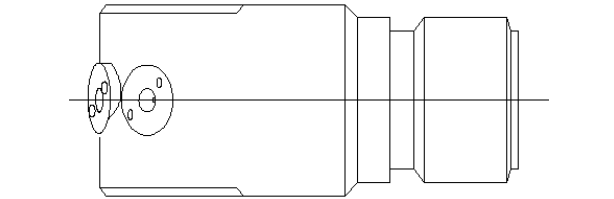


图4 新型喷头示意
Fig.4 Schematic diagram of the new nozzle

③ 系统持续喷雾时间
《细水雾灭火系统技术规范》(GB 50898—2013,以下简称《细规》)第 3.4.9 条针对固体火灾的系统持续喷雾时间要求不小于 30 min,针对液体火灾系统持续喷雾时间要求不小于 20 min。锂电池火灾是固体及电解液火灾^[1],其明火扑灭后未持续冷却的状态会使电池内部持续发生热失控致其再次复燃,《细规》中没有明确的针对锂电池火灾系统持续喷雾时间的规定。试验^[9]中,喷头工作压力为 6 MPa 的细水雾系统能够在 30 s 内扑灭明火,喷头工作压力为 2 MPa 的细水雾系统在 90 s 内扑灭明火,

两者都需要持续 10 min 以上的喷雾降温才能使电池不发生复燃。就单块模组而言,按《细规》中针对固体火灾的 30 min 持续喷雾时间基本能将其灭火、控火。但试验针对的是单块模组,而 1 座预制舱内设有约 300 块模组,且舱内空间狭促,有连锁反应风险,建议设计持续喷雾时间应有足够的冗余度。有条件时(比如采取 2 路供水至系统存储水箱,该类措施基本不影响细水雾系统造价),细水雾系统持续喷雾宜与舱外冷却水系统持续作用时间相呼应。最佳的设计持续喷雾时间还需要通过整舱级的灭火试验做进一步的研究。

3.2 储能电池舱外消防给水

外部消防用水是事后补救及外部救援的基本手段,针对储能电池舱的舱外消防用水主要用于冷却储能电池舱外壁以达到控火并防止火灾扩散之目的。在冷却水设计中需要解决以下问题:冷却范围、冷却强度和冷却时间,但现行规范缺乏针对性的规定。

3.2.1 冷却范围

磷酸铁锂电池火灾温度高(最高超过 1 000 ℃),而其发生热失控的温度较低(约 140 ℃),如着火舱和邻近舱距离较近,在对着火舱控火的同时,应给较近邻近舱降温以防止火灾扩散。曹丽英等^[15]针对某一类锂电池燃烧的实验发现:电池燃烧时火焰最远距离达到了 5 m,同时有大量的喷射物喷溅至火焰外围,并伴随着燃烧,这种强度的火焰将对周边很大范围造成破坏。基于该研究成果,建议舱距不超过 10 m 范围的邻近舱(防火墙隔断的除外)均应设置冷却水系统。

3.2.2 冷却强度及冷却时间

锂电池火灾是固体及电解液火灾,王青松等^[1]建议将存放锂离子电池的仓库或厂房的火灾危险性归类为甲类。在不采取灭火措施情况下,单块电池模块燃烧持续 10 min 以上^[9],电池舱内有约 300 块电池模组,若连锁反应,其火灾会持续较长时间,如某储能站火灾事故从起火到明火完全扑灭总历时 11 h。笔者建议将储能电池舱比照甲类可燃液体卧式储罐设置冷却水系统。依据《消防给水及消火栓系统技术规范》(GB 50974—2014,以下称《消规》)表 3.4.2-2、表 3.6.2,着火舱和邻近舱的冷却强度(移动和固定冷却)均为 0.1 L/(s·m²),火灾延续时间为 4 h。

4 工程实例

4.1 工程概况

某综合能源站由集中式储能站、变电站(兼升压站)等组成,见图 5。其中储能区域设 88 座储能电池舱。考虑安装和检修条件,以每两座相邻储能电池舱为一组,组内相邻储能电池舱的间距为 3 m,组与组之间设防火墙。储能电池舱利用标准集装箱建造,规格为 12.2 m×2.4 m×2.8 m。每座预制舱内置 10 簇 300 块磷酸铁锂电池模组,单座储能电池舱最大放电功率为 1.26 MW,存储容量为 2.26 MWh。



图5 综合能源站鸟瞰图

Fig.5 Aerial view of integrated energy station

4.2 储能电池舱细水雾灭火系统

4.2.1 系统概述

集中式储能站区域设 2 套局部应用方式的泵组式开式细水雾灭火系统,每套配置 1 套泵组和 1 套存储水箱,以 1 座储能电池舱为 1 个防护区。每套细水雾灭火系统设 44 个防护区,即每套系统保护 44 座储能电池舱(见图 6)。

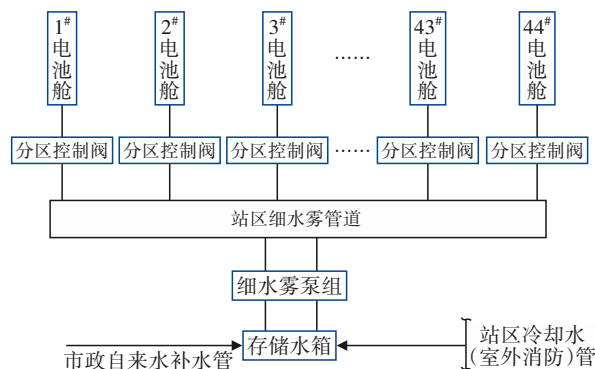


图6 细水雾灭火系统原理

Fig.6 Schematic diagram of principle of water mist fire extinguishing system

设计采用 1 个喷头保护 1 块电池模块,在储能

电池舱的每块电池模组内均安装 1 个细水雾喷头,每座储能电池舱共设计安装 300 个喷头(见图 7)。当储能电池舱内任意电池模组起火后,细水雾灭火系统开启,整个储能电池舱内所有电池模组内的细水雾喷头均喷放细水雾。系统一方面扑灭起火电池模组火灾,另一方面对未起火电池模组进行冷却保护,防止热失控和火灾蔓延。

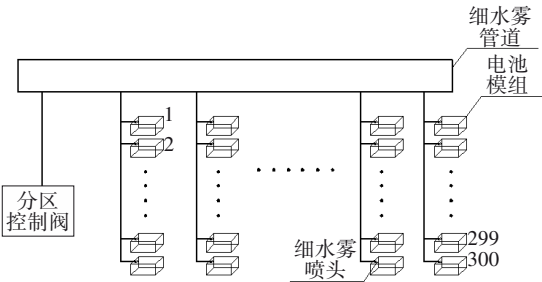


图 7 储能电池舱内细水雾灭火系统原理
Fig.7 Principle of the water mist fire extinguishing system in the energy storage battery cabin

4.2.2 细水雾喷头参数

细水雾喷头设计压力为 6 MPa,喷射强度基于模组级磷酸铁锂电池火灾试验结果确定:单个喷头设计用水量约 3 L/min,整舱设计用水量约 54 m³/h。细水雾喷头为扁平扇形结构。电池模组内电池顶部与上盖净空约 50 mm,喷头安装在该空间、模组的短边侧,水雾可呈水平带状射入模块内(见图 8)。

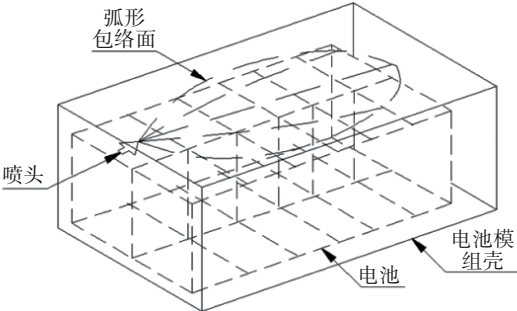


图 8 电池模组内喷头布置示意
Fig.8 Schematic diagram of nozzle arrangement in battery module

4.2.3 设计持续喷雾时间及系统消防用水量

综合能源站设计火灾次数为 1 次,全站设 1 套室内外消火栓系统、1 套变压器水喷雾灭火系统、2 套储能电池舱细水雾灭火系统,其中室内外消火栓合用 1 套消防给水管网,室外栓系统兼作储能电池舱外移动式冷却水系统。变电站部分是综合能源站最大消防用水点(消防用水量近 900 m³),全站设

1 座 900 m³ 的消防水池。
考虑到本工程非储能电池舱火灾消防用水量较大的有利条件,确定储能电池舱内细水雾灭火系统设计持续喷雾时间与电池舱外冷却水系统作用时间一致,均为 4 h。储能电池舱火灾时,细水雾灭火系统整舱设计用水量约 54 m³/h,设计持续喷雾时间 4 h,细水雾灭火系统消防用水量约 216 m³,加上电池舱冷却用水量 360 m³(计算见表 2),储能电池舱消防用水量合计为 576 m³,未超过站区消防水池有效容积。细水雾灭火系统的主要补给水措施如下:①设置 1 座存储 30 min 细水雾灭火系统用水量的不锈钢水箱作为其存储水箱;②设置一路市政水(管径 DN100)直接补充至细水雾存储水箱作为主水源,另从冷却水供水系统(室外消火栓给水管网)上引一路补水管(管径 DN100)至细水雾存储水箱作为备用水源(见图 6)。

表 2 储能电池舱冷却用水量
Tab.2 Water consumption for cooling of energy storage prefabricated cabin

| 消防对象 | 消防标准 (冷却强度)/ (L·s ⁻¹ ·m ⁻²) | 计算用水量 (L·s ⁻¹) | 设计用水量 (L·s ⁻¹) | 火灾延 续时间/h | 设计总用 水量/m ³ |
|---------|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------------|
| 着火 舱 | 0.1,保护范围 为舱壁表面积 | 11.2 | 15 | 4 | 360 |
| 邻近 舱 | 0.1,保护范围 为舱壁表面积 的一半 | 5.6 | 10 | 4 | |

注: 着火舱冷却水系统计算流量为 11.2 L/s,小于 15 L/s,按规范取 15 L/s,考虑 3 支水枪同时使用。邻近舱计算消防用水量为 5.6 L/s,考虑 2 支水枪同时使用,设计用水量 10 L/s。

4.2.4 探测与控制

考虑到锂电池的热失控会冒出大量白烟,同时产生大量 CO、CH₄ 等气体,在火灾探测器的配置上除了传统的感温、感烟探测器外,在储能电池舱内增设可燃气体探测器,用于探测舱内单体电池开始发生热失控时的可燃气体浓度。细水雾灭火系统设置 4 种控制方式:自动控制、本地手动、远程手动控制和应急操作。

4.3 储能电池舱冷却水设施

储能电池舱以 2 座为 1 组,每组之间用防火墙隔断。1 座储能电池舱发生火灾,10 m 范围内其邻

近舱为1座(不含防火墙隔离的邻近舱)。着火舱和邻近舱设计采用移动式冷却水系统,在储能电池舱外的室外消火栓给水管网上适当加密室外消火栓,利用消防水枪移动冷却。冷却水量的设计标准参考甲类可燃液体卧式储罐,依据《消规》第3.4.2条,其用水量见表2。在室外栓设置上考虑以下几点:①着火舱10 m范围内的室外栓不计入设计;②锂电池存储有大量电能,消防水枪采用喷雾水枪以减少电击危害;③考虑施救人员与着火电池舱的距离不小于10 m,消防水枪有效射程应考虑该距离及储能电池舱的长度(12.2 m)。

5 结论及建议

磷酸铁锂电池储能预制舱空间密闭,能量堆积密度高,火灾危险性较大,而相应的安全标准滞后。

适用于扑灭磷酸铁锂火灾的灭火剂最重要的特征是:在迅速灭火的同时还具有较强的持续冷却能力。水基灭火剂具有良好的冷却效能,可有效抑制储能电池舱内磷酸铁锂电池的热失控,是较好的灭火介质。

较大喷头工作压力和喷头流量的细水雾灭火系统可应用于储能电池舱内部灭火,舱外则宜设置冷却水系统。

电池舱内细水雾灭火系统为局部应用方式,以1座电池舱为保护单元,每块电池模块设1个细水雾喷头,喷射强度基于模组级磷酸铁锂电池火灾试验结果确定。建议设计持续喷雾时间应留有冗余度,在工程条件许可的前提下,宜与舱外冷却水系统作用时间相呼应。

建议舱距不超过10 m范围的邻近舱(防火墙隔断的除外)均应设置冷却水系统。参照石油库卧式罐消防标准,着火舱和邻近舱的冷却强度(移动和固定冷却)均为 $0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,火灾延续时间为4 h。

利用室外消火栓移动冷却储能电池舱时,建议:①着火舱10 m范围内的室外栓不计入设计;②消防水枪采用喷雾水枪以减少电击危害;③消防水枪有效射程应考虑施救人员与着火电池舱的距离(不小于10 m)及储能电池舱的长度。

参考文献:

[1] 王青松,班新焱,黄沛丰,等. 锂离子电池火灾危险性分级初探[C]//中国消防协会. 2015中国消防协会科学技术年会论文集. 北京:中国消防协会,2015:1-3.

WANG Qingsong, BAN Xinyan, HUANG Peifeng, et al. Preliminary study on the fire classification of lithium ion batteries [C]//China Fire Protection Association. Proceedings of 2015 Annual Conference of China Fire Protection Association Science and Technology. Beijing: China Fire Protection Association, 2015: 1-3 (in Chinese).

[2] 董梓童. 事故频发拷问储能电站安全性[N]. 中国能源报,2019-06-03.

DONG Zitong. Frequent accidents torture the safety of energy power stations [N]. China Energy News, 2019-06-03(in Chinese).

[3] 姜慧梓. 北京丰台南四环某公司储能电站大火已扑灭[N]. 新京报,2021-04-17.

JIANG Huizi. The fire at the energy storage power station of a company on the South Fourth Ring Road in Beijing Fengtai has been extinguished [N]. Beijing News, 2021-04-17(in Chinese).

[4] 张磊,张永丰,黄昊,等. 热过载锂电池失控特性及其早期探测模式研究[J]. 消防科学与技术,2018,37(1):55-58.

ZHANG Lei, ZHANG Yongfeng, HUANG Hao, et al. Study on the lithium battery thermal runaway characteristics under overheating and the detection mode on battery fires [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(1):55-58(in Chinese).

[5] 张磊,张永丰,黄昊. LFP锂电池热失控特性及其爆炸危险性分析[C]//中国消防协会. 2017中国消防协会科学技术年会论文集. 南宁:中国消防协会,2017:117-119.

ZHANG Lei, ZHANG Yongfeng, HUANG Hao. Analysis of thermal runaway characteristics and explosion hazard of LFP lithium battery [C]//China Fire Protection Association. Proceedings of 2017 Annual Conference of China Fire Protection Association Science and Technology. Nanning: China Fire Protection Association, 2017:117-119(in Chinese).

[6] 张磊,黄昊,张永丰,等. 锂电池穿刺燃烧特性及其抑制技术研究[J]. 消防科学与技术,2020,39(4):526-529.

ZHANG Lei, HUANG Hao, ZHANG Yongfeng, et al. Study on combustion characteristics and suppression technology of lithium batteries by puncture [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(4):526-529 (in Chinese).

[7] 黄昊,张永丰,张磊,等. 锂电池过充电后行为分析

- [C]//中国消防协会. 2016中国消防协会科学技术年会议论文集. 南京:中国消防协会,2016: 163-167.
- HUANG Hao, ZHANG Yongfeng, ZHANG Lei, *et al.* Behavior analysis of lithium battery after overcharge [C]// China Fire Protection Association. Proceedings of 2016 Annual Conference of China Fire Protection Association Science and Technology. Nanjing: China Fire Protection Association, 2016: 163-167 (in Chinese).
- [8] 赵蓝天,金阳,赵智兴,等. 磷酸铁锂电池模组过充热失控特性及细水雾灭火效果[J]. 电力工程技术, 2021,40(1):195-200,207.
- ZHAO Lantian, JIN Yang, ZHAO Zhixing, *et al.* Thermal runaway characteristic of lithium iron phosphate battery modules through overcharge and the fire extinguishing effect of water mist [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 195-200, 207 (in Chinese).
- [9] 郭莉,吴静云,黄峥,等. 不同压强细水雾对磷酸铁锂电池模组的灭火效果[J]. 高电压技术,2021,47(3): 1002-1011.
- GUO Li, WU Jingyun, HUANG Zheng, *et al.* Fire extinguishing effect of water mist with different pressures on LFP battery module [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1002-1011 (in Chinese).
- [10] 于东兴,李毅,张少禹,等. 七氟丙烷扑救锂离子动力电池火灾有效性研究[J]. 电源技术,2019,43(1): 60-63.
- YU Dongxing, LI Yi, ZHANG Shaoyu, *et al.* Study on efficiency of HFC-227 for extinguishing Li-ion power battery fire [J]. Power Technology, 2019, 43(1): 60-63 (in Chinese).
- [11] 蔡兴初,朱一鸣,陈彬,等. 电动汽车充电停车楼消防设施配置研究[J]. 给水排水,2017,43(9):89-92.
- CAI Xingchu, ZHU Yiming, CHEN Bin, *et al.* Study on the configuration of fire-fighting facilities for vehicle charging parking buildings [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(9): 89-92 (in Chinese).
- [12] 黄强,陶风波,刘洋,等. 气液灭火剂对磷酸铁锂电池模组灭火能效研究[J]. 中国安全科学学报,2020,30(3):53-59.
- HUANG Qiang, TAO Fengbo, LIU Yang, *et al.* Study on performance of gas-liquid extinguishing agent for lithium iron phosphate battery modules [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(3): 53-59 (in Chinese).
- [13] 吴静云,黄峥,郭鹏宇. 储能用磷酸铁锂(LFP)电池消防技术研究进展[J]. 储能科学与技术,2019,8(3): 495-499.
- WU Jingyun, HUANG Zheng, GUO Pengyu. Research progress on fire protection technology of LFP lithium-ion battery used in energy storage power station [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 495-499 (in Chinese).
- [14] 郭鹏宇,陈刚,王铭民,等. 针对磷酸铁锂储能电站电池预制舱的细水雾灭火系统及灭火方法: CN 110507928A [P]. 2019-11-29.
- GUO Pengyu, CHEN Gang, WANG Mingmin, *et al.* Water Mist Fire Extinguishing System and Fire Extinguishing Method for Battery Prefabricated Cabin of Lithium Iron Phosphate Energy Storage Power Station: CN 110507928A [P]. 2019-11-29 (in Chinese).
- [15] 曹丽英,何宁,黄昊,等. 电动汽车灭火和应急救援技术研究[C]//中国消防协会. 2015中国消防协会科学技术年会议论文集. 北京:中国消防协会,2015:632-634.
- CAO Liying, HE Ning, HUANG Hao, *et al.* Research on electric vehicle fire fighting and emergency rescue technology [C]//China Fire Protection Association. Proceedings of 2015 Annual Conference of China Fire Protection Association Science and Technology. Beijing: China Fire Protection Association, 2015: 632-634 (in Chinese).

作者简介:蔡兴初(1978-),男,浙江新昌人,硕士,教授级高级工程师,注册公用设备师(给水排水),主要研究方向为电厂及变电站水工艺及消防设计,曾获1项国家优秀设计银奖、10余项省部级(行业)优秀设计奖、1项中国电力建设科技进步二等奖(排名第一),发表期刊论文10余篇。

E-mail:caixingchu@jspdi.com.cn

收稿日期:2021-05-18

修回日期:2021-06-30

(编辑:孔红春)