

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202212016



储能电站磷酸铁锂电池模组 灭火参数的仿真优化

叶祥虎^{1,2}, 杜建华^{1,2}, 谭必蓉^{1,2}, 瞿常^{1,2}

(1. 华侨大学 机电装备过程监测及系统优化福建省高校重点实验室, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究储能场景下磷酸铁锂电池组热失控火灾的最佳灭火方式,通过火灾动力学模拟软件建立储能电池模组等尺寸模型;对模型开展不同热失控位置、细水雾流量、雾滴直径和细水雾喷头布置位置的仿真实验。仿真结果表明:细水雾流量和雾滴直径对灭火效果有很大影响,适当增大细水雾流量、减小雾滴直径可以明显提升灭火效果;综合灭火系统设计安全性及制造成本,确定最佳灭火参数组合为细水雾流量 $2.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、雾滴直径 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、细水雾喷头布置位置为电池箱顶部中央。

关键词: 储能电站; 磷酸铁锂电池; 火灾动力学模拟; 灭火仿真; 细水雾

中图分类号: X 932 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)04-0435-07

Simulation and Optimization of Fire Extinguishing Parameters for Lithium Phosphate Battery Modules in Energy Storage Power Plants

YE Xianghu^{1,2}, DU Jianhua^{1,2}, TAN Birong^{1,2}, QU Chang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanical and Electrical Equipment Process Monitoring and System Optimization of
University of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; ,
2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the best fire extinguishing method of thermal runaway fire of lithium phosphate battery modules under the energy storage scenario, the fire dynamics simulation software is used to establish the energy storage battery module model, and the simulation experiments are carried out on the model with different thermal runaway position, water mist flow rate, droplet diameter and water mist nozzle placement. The simulation results show that the water mist flow rate and droplet diameter have great influence on the fire extinguishing effect. Appropriately increasing the water mist flow rate and decreasing droplet diameter can obviously improve the fire extinguishing effect. Comprehensively considering the fire extinguishing system design safety and manufacturing cost, the best fire extinguishing parameter combination is determined as: water mist flow rate of $2.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, droplet diameter of $200\text{ }\mu\text{m}$, and water mist nozzle layout position is the top center of the battery box.

Keywords: energy storage power station; lithium phosphate battery; fire dynamics simulation; fire extinguishing simulation; water mist

收稿日期: 2022-12-13

通信作者: 杜建华(1979-),男,副教授,博士,主要从事新能源动力电池系统安全状态监测技术及消防技术的研究。
E-mail: dujh@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2022Y0030)

电化学储能技术是目前电力储能系统中应用最广泛的技术^[1]. 磷酸铁锂电池比三元锂电池具备更好的安全性和循环性,成本较低,更适用于电力存储系统^[2]. 电化学储能系统的火灾安全在储能系统中有着重要地位,探究储能磷酸铁锂电池的火灾最佳灭火方式对电化学储能消防安全具有重要意义.

目前,国内外关于锂电池火灾灭火方式、灭火剂、火灾特点的研究颇多. 饶慧等^[3]使用 4 种灭火系统分别对三元和磷酸铁锂电池引发的火灾进行灭火实验,结果发现压力水雾的灭火效果最佳. 赵蓝天等^[4]使用细水雾对储能单个磷酸铁锂电池模组和簇级磷酸铁锂电池模组进行热失控灭火实验,结果表明,细水雾对磷酸铁锂储能电池热失控引发的火灾具有良好的灭火效果. Zhu 等^[5]将表面活性剂添加到细水雾进行锂电池火灾灭火实验,结果表明,含有表面活性剂的细水雾可以有效抑制锂电池热失控. 王文和等^[6]使用火灾动力学模拟(FDS)软件研究不同细水雾特性对 18650 锂电池火灾的影响. 刘得星^[7]利用 FDS 软件研究不同细水雾参数对车载锂电池火灾的影响,得出车载电池包最佳细水雾流量、雾滴直径、初速度等参数组合. 陆佳政等^[8]使用氟基快速灭火和钝化降温防复燃方法对储能电池模组火灾进行灭火,实验结果表明,该方法可以扑灭火灾初期明火且不复燃. 陈吉清等^[9]使用 FDS 软件建立车用锂电池单体燃烧数值模拟,通过与实验结果的对比仿真模型可以准确模拟出单体电池燃烧火情演变过程. 禹进等^[10]基于实际储能柜建立 1:1 模型,提出改良二分法修正热释放速率,从而提高 FDS 软件中储能电站锂电池火灾模拟的准确性. 蔡兴初等^[11]通过模型检验全氟己酮灭火系统应用于储能电池舱的灭火效果,验证了该灭火系统应用于储能电池舱的可行性. 然而,针对储能场景下的磷酸铁锂电池模组火灾,其细水雾流量、雾滴直径、喷头布置位置等关键参数的灭火仿真研究仍存在较大的空缺.

由于进行真实磷酸铁锂储能场景下的灭火实验成本巨大、危险系数高,因此,本文采用 FDS 软件对磷酸铁锂储能电站场景下的储能柜中磷酸铁锂电池模组进行等尺寸模型建模,对模型的关键参数开展仿真实验,研究磷酸铁锂储能电站场景下的最佳细水雾灭火方式.

1 仿真模型的建立

1.1 控制方程

FDS 软件是为火灾模拟开发的计算流体动力学软件^[12],采用数值方法求解热驱动的低速流动 N-S 方程,主要用于火灾中烟气流动和热传递过程的数值模拟^[13]. FDS 运算求解的基本控制方程^[14]如下.

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0.$$
 (1)

式(1)中: ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{u} 为速度矢量.

动量守恒方程为

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \cdot |\mathbf{u}|^2 - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} \right) + \nabla p - \rho \mathbf{g} = \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}.$$
 (2)

式(2)中: \mathbf{f} 为施加在流体上的外力矢量; p 为压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性力张量; $\boldsymbol{\omega}$ 为涡度; \mathbf{g} 为重力加速度.

组分守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{u}) = (\rho D_i \nabla^2 Y_i) + \dot{m}_i'''. \quad (3)$$

式(3)中: i 为第 i 种组分; Y_i 为第 i 种组分的浓度; D_i 为第 i 种组分的扩散系数; \dot{m}_i''' 为第 i 种组分的质量产生速率.

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p - \nabla q_r + \nabla \cdot (k \nabla T) + \sum_i \nabla (h_i \rho h D_i \nabla Y_i).$$
 (4)

式(4)中: h 为比焓; q_r 为辐射通量; T 为温度; k 为热导率.

状态方程为

$$p_0 = \rho TR \sum_i (Y_i / M_i).$$
 (5)

式(5)中: R 为气体常数; M 为混合气体的相对分子质量.

FDS 软件通过大涡模型对这些方程和模型进行求解，可得到温度、气体浓度等参数的空间分布^[14]。

1.2 物理模型与计算区域

对储能式磷酸铁锂电池以某储能柜等尺寸建立热失控物理模型，如图 1 所示。储能柜模型长、宽、高分别为 0.685,0.550,0.330 m，单元格大小为 1.96 mm×1.96 mm×1.94 mm。网格单元应尽量接近立方体，这样计算结果会更加准确^[15]。模型中有 24 块磷酸铁锂单体电池，每个单体电池长、宽、高分别为 0.17,0.07,0.20 m。每个电池中心布置 1 个温度热电偶，一共 24 个温度热电偶，分别编号为 THCP1~THCP24，用以求取数值模拟中储能柜的温度变化。设置 4 个 Z 方向 XY 平面温度切片，分别位于电池上、中、下和电池箱顶部，用以比较电池箱内部空间温度分布。

由于电池内部结构过于复杂，难以建成与实际电池结构一致的仿真模型。磷酸铁锂电池主要由电解液、正极、负极和隔膜组成，根据磷酸铁锂电池 4 种材料比例将电池模型简化为 1 个电芯单元^[16]。电池模型中材料的热力学参数，如表 1 所示。表 1 中： c 为比热容； α 为热吸收系数。

根据文献[17]电解液材料的质量损失率、热释放速率(HRR)和总释放热量(THR)曲线，可得到电解液热释放速率峰值约为 $550\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ，总释放热量约为 $131\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ，燃烧热值约为 $16.8\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。根据文献[9]中锂电池正极、负极和隔膜的燃烧特性参数曲线图，可得到正极、负极和隔膜的 HRR 峰值为 $30.12,133.06,57.64\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ，有效燃烧热为 $1.36,4.91,18.63\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

FDS 中设置燃烧模型有两种方式^[18]：一是通过直接定义材料的热释放速率；二是根据燃烧物在空气中的燃烧反应的化学方程式推出燃烧物的化学属性。混合燃烧模型化学反应方程式为

$$\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_e\rightarrow x\text{CO}_2+y\text{H}_2\text{O}+z\text{CO}+m\text{N}_2+\text{Soot}.$$
 (6)

式(6)中：Soot 为物体燃烧产生的烟气。

电池燃烧采用混合燃烧模型，由于电解液在电池热失控热量释放中具有主要影响^[7]，所以，以电解液化学成分为基础得到的等效燃烧物为 $\text{C}_{6.3}\text{H}_{7.1}\text{O}_{2.1}\text{N}$ 。设定电池表面的起始燃烧功率为 $25\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ，持续 5 s 引起电池热失控。

2 仿真结果与数值分析

2.1 不同流量灭火效果

选用的中间电池为热失控电池，如图 2 所示。对比热失控电池周围热电偶温度变化，采用最高温度点(THCP12)的温度变化表示细水雾灭火效果，细水雾作用时间为 10 s。

根据 GB 50898—2013《细水雾灭火系统技术规范》^[19]中细水雾灭火流量的相关规定，当在类似配电箱、电子机房等区域灭火时，细水雾流量不小于 $2\text{ L}\cdot(\text{min}\cdot\text{m}^3)^{-1}$ ，结合模型尺寸，可计算出流量不应小于 $0.25\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

水粒直径不大于 $1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 为细水雾^[20]，为了得到最佳流量，选择不同雾滴直径(d)进行 5 种细水雾流量(q)的细水雾灭火仿真，细水雾喷头位于电池箱顶部中央位置，得到电池箱内温度-时间曲线，如图 3 所示。图 3 中： θ 为电箱内的温度； t 为仿真时间。

由图 3 可知：各工况下，在 70~80 s 时温升速率最快，在 80~90 s 时温度达到最高，随后逐渐下降，最终在某一温度点达到平衡；当雾滴直径为 500,400,300 μm 时，细水雾流量为 0.3,0.5 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况下，电池箱内温度没有明显降低，流量越高，降温效果越明显；当细水雾流量从 2.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 提升到 5.0

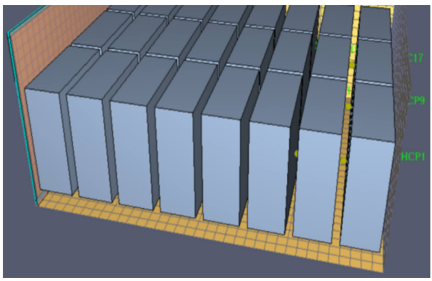


图 1 储能式磷酸铁锂电池储能柜模型
Fig.1 Model of energy storage type lithium phosphate battery energy storage cabinet

表 1 电池模型中材料的热力学参数
Tab.1 Thermodynamic parameters of materials in battery models

参数	电解液	负极	正极	隔膜
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 290	2 660	4 202	492
$c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	133.9	1 437.0	672.0	1 978.0
$\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.45	1.04	6.20	0.33
α	0.9	0.8	0.8	0.8

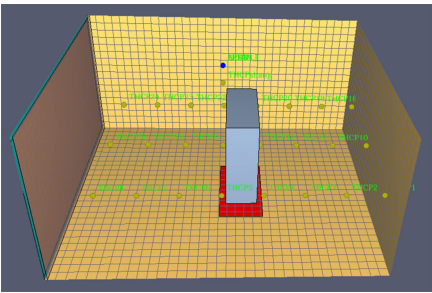


图 2 热失控电池
Fig.2 Thermal runaway battery

$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,雾滴直径 $500, 400 \mu\text{m}$ 工况下的降温效果没有明显提升,雾滴直径 $300, 200 \mu\text{m}$ 工况下的最终温度平衡点几乎相同. 虽然细水雾流量升高 2.5 倍,但是对温度的抑制并没有明显提升,流量超出一定的阈值时,增大流量也无法达到明显的降温效果,因此,选择细水雾流量为 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 最合适.

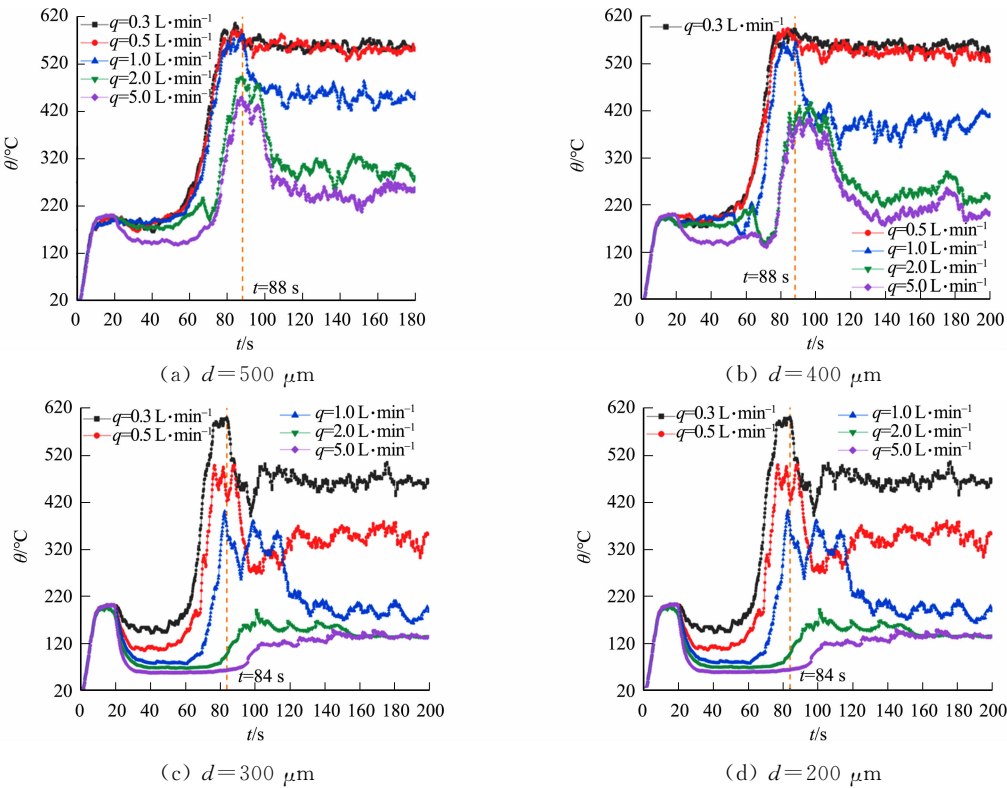


图 3 不同雾滴直径下 5 种细水雾流量的电池箱内温度-时间曲线
Fig. 3 Temperature-time curves of five types of water mist flow rates in battery compartment under different droplet diameters

2.2 不同雾滴直径灭火效果

在最佳细水雾流量 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 下进行不同雾滴直径的灭火效果仿真,其温度-时间曲线,如图 4 所示. 由图 4 可知:电池箱内的整体温度随着雾滴直径的减小不断降低,这是因为相同流量下,直径越小的雾滴表面积比更大,气化过程中可以吸收更多的热量以达到更好的降温效果;当 $d < 200 \mu\text{m}$ 时,减小雾滴直径,降温效果不明显. 雾滴直径大小与细水雾喷淋系统管道压力及喷头的设计有关,雾滴直径越小,对系统的压力和喷头要求越高,系统设计制造成本就会增加. 因此,选择雾滴直径为 $200 \mu\text{m}$ 最合适.

在 $t = 150 \text{ s}, q = 2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 雾滴直径分别为 $800, 400, 200 \mu\text{m}$ 的工况下, Z 轴方向的温度切片图,如图 5 所示. 由图 5 可知:在 $d = 200 \mu\text{m}$ 工况下,降温效果更明显.

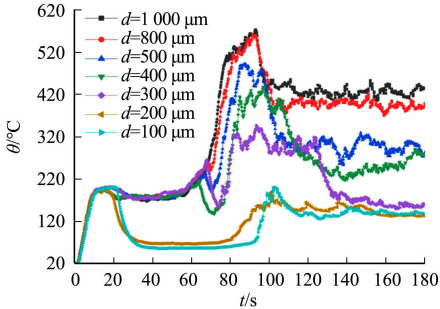
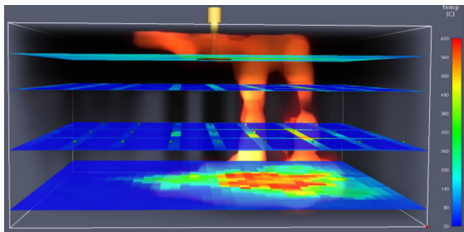
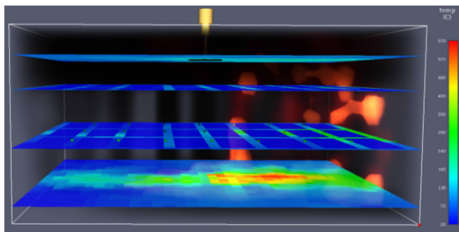


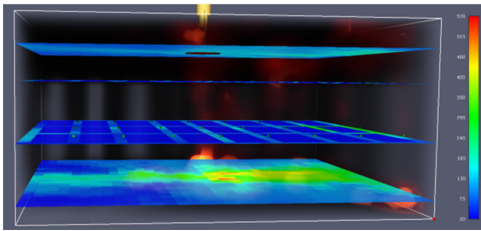
图 4 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 细水雾流量下不同雾滴直径的温度-时间曲线
Fig. 4 Temperature-time curves of different water mist diameters at water mist flow rate of $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$



(a) $d = 800 \mu\text{m}$



(b) $d = 400 \mu\text{m}$



(c) $d=200\ \mu\text{m}$

图 5 不同雾滴直径下的 Z 轴方向温度切片图

Fig. 5 Temperature slice diagrams in Z-axis direction under different droplet diameters

2.3 细水雾喷头最佳布置位置

实际场景下,电池箱内热失控电池可以是任意电池,为使仿真结果更具有代表性,将热失控电池分别设置为中间及角落,细水雾的喷头布置位置分别为顶部中央 1 个、顶部对角 2 个、顶部左右 2 个. 仿真中细水雾采用的参数为 $q=2.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$, $d=200\ \mu\text{m}$,两喷头布置单个喷头流量为 $1.0\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$. 对细水雾喷头布置的基本要求是能将细水雾均匀分布填充防护空间^[17],由于电池箱体积不大,单个喷头中央布置也能保证细水雾填充整个防护区域.

对喷头布置位置进行编号,分别为 A1(中间热失控、喷头顶部中央)、A2(中间热失控、喷头顶部对角)、A3(中间热失控、喷头顶部左右)、A4(角落热失控、喷头顶部中央)、A5(角落热失控、喷头顶部对角)、A6(角落热失控、喷头顶部左右). 不同细水雾喷头布置位置的仿真模型图,如图 6 所示.

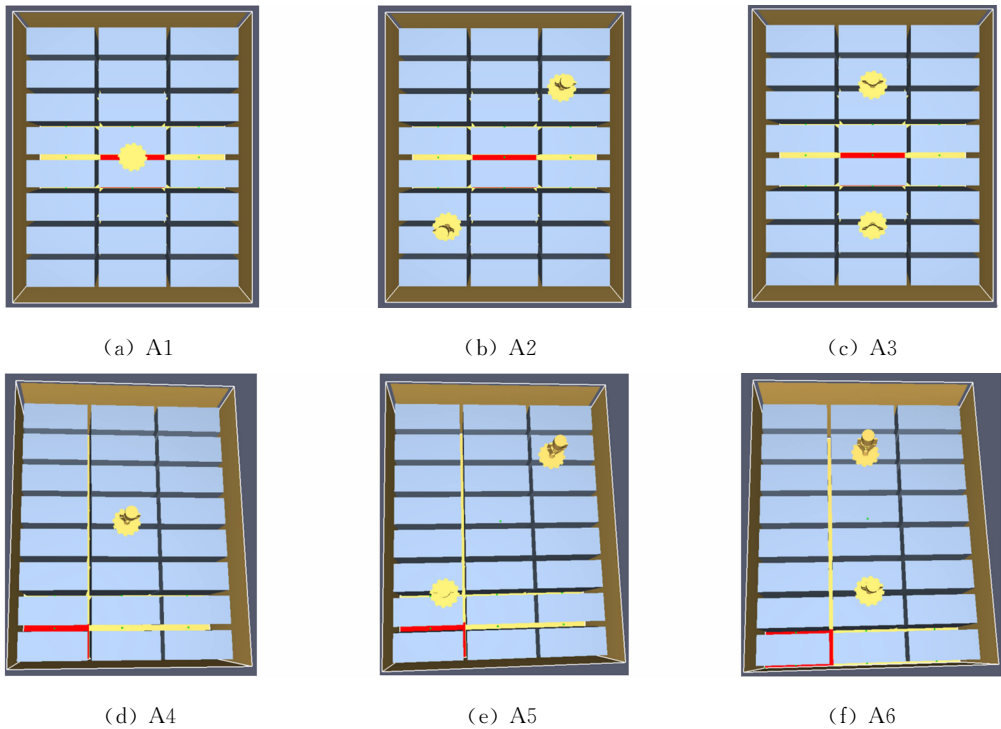
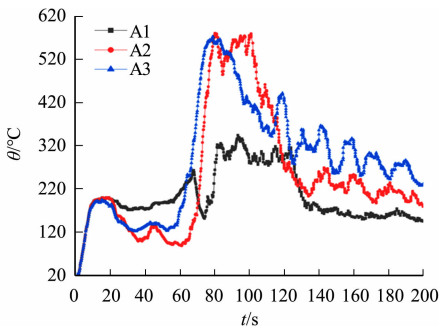


图 6 不同细水雾喷头布置位置的仿真模型图

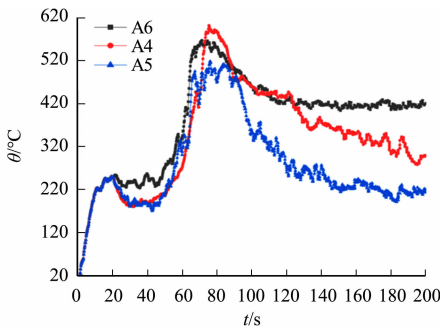
Fig. 6 Simulation model diagrams of different layout positions of water mist nozzles

不同起火位置下,不同喷头布置位置的温度-时间曲线,如图 7 所示. 由图 7 可知:当起火位置为电池箱中间位置时,相比于 A2, A3, 单个喷头位于顶部中央位置 A1 的温度曲线下降最快,由于 A1 喷头位于火源上方,雾滴可以快速达到火源,从而更快地达到降温效果,而 A2, A3 喷头离火源位置较远,降温效果不如 A1;当起火位置为电池箱角落位置时,喷头对角布置 A5 相比 A4, A6 有更好的降温效果,这是因为双喷头让细水雾在电池箱内分布得更均匀,雾滴更加容易达到火源位置.

由此可知,当起火位置位于电池箱中央位置时,单个喷头灭火效果更佳;当起火位置位于电池箱角落位置时,双喷头对角布置灭火效果更佳. 现实中电池箱内电池热失控位置具有不确定性,而位于电池箱中间位置周围有更多的锂电池,热失控影响更为恶劣,安全性更重要,因此,选取单喷头中央布置为最



(a) 中央电池起火



(b) 角落电池起火

图 7 不同喷头布置位置的温度-时间曲线

Fig. 7 Temperature-time curves of different nozzle layout positions

佳细水雾喷头布置位置.

2.4 仿真实验对比验证

由仿真实验结果可得,最佳灭火参数组合为 $q = 2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 200 \text{ }\mu\text{m}$,单个喷头顶部中央布置. 为了更加直观地证明该参数组合为最佳灭火参数组合,选取 2 种不同细水雾流量和雾滴直径组合与其进行对比,喷头布置位置皆为顶部中央. 3 种灭火参数组合的温度-时间曲线,如图 8 所示. 仿真时间为 150 s 时,不同参数组合的 Z 轴温度切片图,如图 9 所示.

由图 8,9 可知:相比参数组合 $q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 400 \text{ }\mu\text{m}$,最佳参数组合($q = 2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 200 \text{ }\mu\text{m}$)减小了雾滴直径,增大了细水雾流量,使降温效果有近 $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的提升;而相比最佳参数组合,参数组合 $q = 5.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 100 \text{ }\mu\text{m}$ 继续增大细水雾流量、减小雾滴直径,但其降温效果并没有明显的提升.

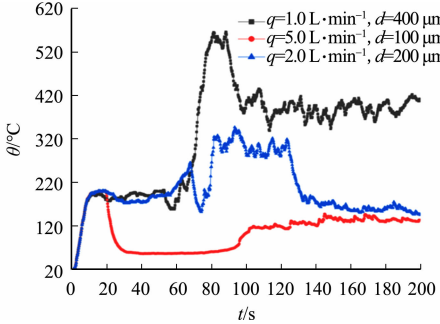
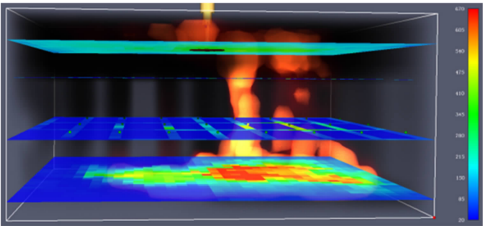
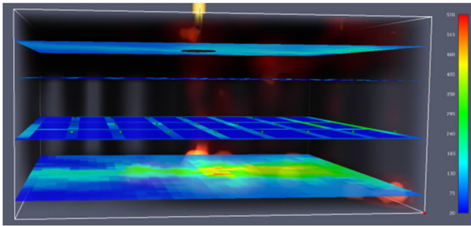


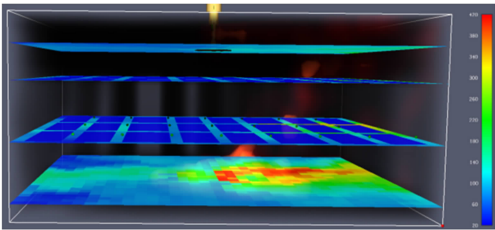
图 8 3 种灭火参数组合的温度-时间曲线
Fig. 8 Temperature-time curves of three fire extinguishing parameter combinations



(a) $q = 1.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 400 \text{ }\mu\text{m}$



(b) $q = 2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 200 \text{ }\mu\text{m}$



(c) $q = 5.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}, d = 100 \text{ }\mu\text{m}$

图 9 不同参数组合的 Z 轴方向温度切片图

Fig. 9 Temperature slice diagrams in Z-axis direction of different parameter combinations

3 结束语

为了研究储能场景下磷酸铁锂电池组热失控火灾的最佳灭火方式,建立常用储能柜电池箱模型,利用 FDS 软件进行不同细水雾参数灭火仿真. 仿真结果表明:当雾滴直径分别为 $200, 300, 400, 500 \text{ }\mu\text{m}$ 时,细水雾流量为 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的灭火效果提升较为明显;当细水雾流量为 $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,雾滴直径

减小到 200 μm , 灭火能力提升最佳; 在细水雾流量为 $2.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、雾滴直径为 200 μm 工况下, 进行不同起火位置及喷头布置位置的灭火仿真, 单个喷头顶部分布更适合任意火源位置的火灾扑灭。由于细水雾流量、雾滴直径及喷头布置位置等关键参数对细水雾系统扑灭火灾能力有至关重要的影响, 仿真结果对储能场景磷酸铁锂电池组灭火系统设计具有极为重要的指导意义。

参考文献:

[1] 李首顶, 李艳, 田杰, 等. 锂离子电池电力储能系统消防安全现状分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1505-1516. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0111.

[2] 汪伟伟, 丁楚雄, 高玉仙, 等. 磷酸铁锂及三元电池在不同领域的应用[J]. 电源技术, 2020, 44(9): 1383-1386. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2020.09.036.

[3] 饶慧, 罗肖锋, 刘安, 等. 电动船三元锂电池舱与磷酸铁锂电池舱灭火对比试验研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(3): 433-437. DOI:10.3969/j.issn.1009-0029.2021.03.034.

[4] 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. DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.01.028.

[5] ZHU Mingxing, ZHU Shunbing, GONG Junhui, *et al.* Experimental study on fire and explosion characteristics of power lithium batteries with surfactant water mist[J]. Procedia Engineering, 2018, 211: 1083-1090. DOI:10.1016/j.proeng.2017.12.113.

[6] 王文和, 贺森, 王学辉, 等. 细水雾特性参数对锂离子电池组灭火效果的影响[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2505-2512. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0730.

[7] 刘得星. 车载电池包集成灭火系统关键参数仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. DOI:10.27151/d.cnki.ghn-lu.2019.003077.

[8] 陆佳政, 周天念, 吴传平. 锂离子电池储能灭火防复燃技术研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(6): 3-6, 14. DOI:10.3969/j.issn.1008-0198.2022.06.001.

[9] 陈吉清, 冼君琳, 兰凤崇, 等. 锂电池单体起火燃烧过程仿真模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(9): 25-34. DOI:10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.09.004.

[10] 禹进, 郭川钰, 张伟阔, 等. 磷酸铁锂电池在储能预制舱中的火灾模拟及其消防应急技术仿真研究[J/OL]. 高电压技术, 2022; 1-9. (2022-11-01) [2023-02-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1239.TM.20221031.1538.021.html>. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20221220.

[11] 蔡兴初, 朱一鸣, 姜可尚, 等. 全氟己酮气体灭火系统在磷酸铁锂电池储能预制舱的应用[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2497-2504. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0252.

[12] 刘军, 刘敏, 智会强, 等. FDS 火灾模拟基本理论探析与应用技巧[J]. 安全, 2006, 27(1): 6-9, 13. DOI:10.3969/j.issn.1002-3631.2006.01.004.

[13] 陈伟, 崔浩浩, 秦龙, 等. 基于 FDS 的火灾仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(12): 227-231. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2011.12.056.

[14] 钟茂华. 火灾过程动力学特性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[15] 王俊, 贾壮壮, 秦鹏, 等. 磷酸铁锂离子电池模组热失控气体扩散仿真[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 185-192. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0193.

[16] 余琦. NCM 三元动力电池电化学-热耦合仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.001587.

[17] 张雯霞. 锂离子电池电解液的锥形量热研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

[18] 刘阳. 基于 FDS 的建筑火灾数值模拟及安全疏散研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.

[19] 福建省住房和城乡建设厅. 细水雾灭火系统技术规范: GB 50898—2013[S]. 福州: 福建科学技术出版社, 2012.

[20] 李勇. 细水雾灭火机理及应用探讨[J]. 化工安全与环境, 2022(18): 13-16, 20.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)