

DOI:10.12158/j.2096-3203.2025.01.021

# 磷酸铁锂储能预制舱火灾烟气扩散及温度变化规律

张引<sup>1</sup>, 秦超群<sup>1</sup>, 田双双<sup>1</sup>, 葛志超<sup>2</sup>, 董君<sup>1</sup>, 张晓星<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430068;  
2. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325000)

**摘要:**随着电化学储能的大规模应用, 储能预制舱安全问题日益突出。对储能预制舱内不同热失控位置下的储能预制舱火灾差异进行研究, 可以帮助设计更有效的监测和灭火系统, 提升储能预制舱安全性能。因此, 模拟研究不同热失控位置下储能预制舱火灾烟气扩散及温度变化规律具有重要意义。文中基于直接数值模拟和大涡模拟方法, 依据实际储能预制舱尺寸构建磷酸铁锂储能预制舱的数值模型, 引入更符合火情发展的  $t^2$  模型, 通过模拟不同热失控位置的火灾情境, 研究储能预制舱内烟气扩散和温度变化规律。仿真结果表明, 热失控的位置不同, 烟气具有不同的动态行为, 热失控位置越靠近底层, 烟气运动越快, 充满储能预制舱时间越短。当热失控位置靠近舱顶, 在高度 1.85 m 以上的区域温度较高, 并伴随显著的温度波动时, 储能预制舱水平方向上的温度差显著增大。文中进一步分析额定容量为 1.2 MW·h 的标准储能预制舱的灭火系统设计方案, 发现全氟己酮灭火系统在喷淋强度为 20 L/(min·m<sup>2</sup>)、喷淋角度为 120°、全氟己酮灭火剂粒径大小为 50 μm 时, 能有效控制火灾, 减少火灾造成的损害。文中的研究成果可为储能预制舱内监测预警装置分布式布署策略及消防安全设计提供理论指导。

**关键词:**磷酸铁锂电池; 储能预制舱; 数值模拟; 热失控; 烟气流动; 温度变化

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)01-0207-11

## 0 引言

随着“双碳”目标的推进, 清洁能源如光伏、风电正日益壮大, 预计将逐步超越传统的煤电, 成为第一大电源。储能技术凭借其自身优势, 有望成为海量新能源消纳的主要支撑技术<sup>[1-5]</sup>。在众多储能技术中, 以锂离子电池为代表的电化学储能, 凭借其迅捷的响应速度、较短的建设周期和较高的商业化程度优势, 成为了适配电力系统的最佳选择<sup>[6-10]</sup>。然而由于电解液的可燃性, 使得锂离子电池在极端情况下发生化学反应, 释放大量热能和易燃烟气, 对储能系统的安全构成潜在威胁<sup>[11-12]</sup>。2023年4月, 甘肃省武威市某储能电站发生火灾, 造成1座储能电池舱烧损, 过火面积约30 m<sup>2</sup>, 直接经济损失约410万元。2022年9月, 美国加利福尼亚州巨型电池储能电站发生火灾, 集装箱内13 t 锂电池完全着火, 导致2个储能系统被烧毁。2021年4月, 北京市丰台区1座光储充电站的磷酸铁锂电池发生火灾并在现场抢险时爆炸, 造成了4名人员伤亡。储能电站火灾频繁发生, 导致巨大人力、物力和财力损失。为确保其安全运行, 亟须针对锂电池储能系统开发热失控预警及相应的消防安全技术。

目前, 国内外研究人员对电滥用、机械滥用、热

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277144); 湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB863, 2023AFB956)

滥用下的电池热失控特性做了诸多研究。文献[13]在过充热失控实验中, 研究发现磷酸铁锂电池反应过程中伴随着气体质量分数的变化。文献[14]通过对磷酸铁锂电池模组进行过充热失控实验, 发现随着充电倍率的增加, 热失控最高温度和峰值电压升高。文献[15]对单体三元锂电池进行实验, 发现热失控热量主要来自于电化学反应放热。文献[16]利用绝热量热仪对单体钴酸锂电池进行热滥用实验, 研究电化学反应机理和热力学参数。文献[17]在进行热诱导触发的热失控实验时, 发现气体探测预警技术能够提前发出告警的时间, 气体探测与其他技术手段(温度、电压)相比更具优势。文献[18]使用 FLACS 软件建立储能预制舱模型, 研究了不同热失控电池数量下可燃烟气的体积变化。文献[19]通过仿真软件 COMSOL 建立电池簇仿真模型, 研究电池簇在不同充电倍率下的热失控蔓延过程。文献[20]利用 Pyrosim 对磷酸铁锂电池储能预制舱进行仿真模拟, 对比了不同水喷淋参数下的灭火效果。文献[21]仿真分析了储能预制舱内部电池泄压阀打开后, 热失控特征气体的扩散特性。文献[22]使用火灾动力学软件 FDS 对不同荷电状态下的储能预制舱进行数值模拟, 研究表明荷电状态越高, 火灾蔓延和烟气扩散的风险越大。目前的研究大多集中在单体电池及其模组的热失控特性分析, 储能预制舱的相关研究较少。储能预制舱内电池数量众多, 研究不同热失控位置下的储

能预制舱火灾烟气扩散及温度变化规律,可以帮助设计更有效的监测和灭火系统,提升储能预制舱安全性能。

此外,现有储能预制舱火灾模拟中的火源均设定为单个固定火源,难以切实反映不同火源位置下烟气扩散及温度变化规律。因此,文中针对储能预制舱火灾,基于直接数值模拟和大涡模拟方法,研究不同热失控位置下储能预制舱火灾烟气扩散及温度变化规律,并设计储能预制舱全氟己酮灭火装置。文中研究成果可以为储能预制舱内监测预警装置分布式布署策略及消防安全设计提供理论指导。

## 1 模型建立

### 1.1 数值计算原理

预测火灾中的烟气扩散行为可由软件 Pyrosim 来实现,模拟时以大涡模拟为主,直接数值模拟为辅,还可以设置传感器对火灾特性进行监测<sup>[23]</sup>。在进行火灾模拟时,涉及到的火灾动力学方程<sup>[24]</sup>如下。

质量守恒方程:

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

式中: $\rho$  为密度; $t$  为时间; $\mathbf{u}$  为速度矢量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p - \nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot \sum_i h_i \rho_i D_i \nabla Y_i \quad (2)$$

式中: $h$  为比热焓; $p$  为压力; $\mathbf{q}$  为辐射热通量矢量; $k$  为导热系数; $T$  为温度; $h_i$  为第  $i$  组分的比热焓; $\rho_i$ 、 $D_i$  分别为第  $i$  组分的密度与扩散系数; $Y_i$  为第  $i$  组分的质量分数。

动量守恒方程:

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{g}$  为重力加速度矢量; $\mathbf{f}$  为体积力矢量; $\boldsymbol{\tau}$  为单位面积的粘性张力。

理想气体状态方程:

$$p_0 = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{M_i} = \frac{\rho TR}{M} \quad (4)$$

式中: $p_0$  为背景压力; $R$  为摩尔气体常数; $M$  为混合气体的相对分子质量; $M_i$  为第  $i$  组分的相对分子质量。

### 1.2 储能预制舱模型构建

基于参考文献[25-26]中的储能预制舱实物,为

尽可能还原储能预制舱工作环境,设计一款系统额定电压为 768 V、额定容量为 1.2 MW·h 标准储能预制舱(长 12 192 mm、宽 2 438 mm、高 2 896 mm)。储能预制舱内部中间过道宽 1 400 mm,过道两侧对称布置 4 组电池架,电池架设 7 层 8 列,由 4 组电池簇构成,每组电池簇由 14 个电池模组组成,单电池模组尺寸长 700 mm、宽 500 mm、高 250 mm,如图 1 和图 2 所示。

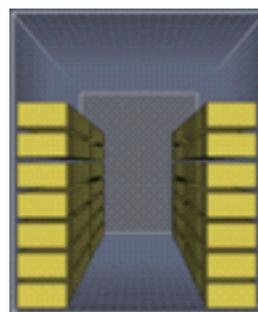


图 1 储能预制舱断面

Fig.1 Section of energy storage prefabricated cabin

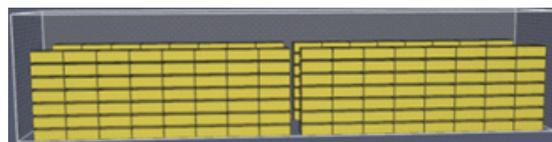


图 2 储能预制舱侧面

Fig.2 Side view of energy storage prefabricated cabin

为更好观察储能预制舱火灾中温度及烟气变化,在纵向中心距离为 1 219 mm 处设置传感器。文献[27]对典型储能预制舱环境下的磷酸铁锂电池进行热失控实验,研究表明  $H_2$  在电池热失控反应中具有明显的变化特征,其预警可靠性更高,更适合作为舱内电池热失控的预警气体,因此文中选择  $H_2$  作为热失控特征气体监测对象,通过软件 Pyrosim 内置的 3D 切片功能观察  $H_2$  在储能预制舱内的扩散情况。因为人眼特征高度为 1 850~1 950 mm,温度传感器布置如图 3 和图 4 所示,设置 4 组温度传感器,每组 3 个,传感器纵向间距 50 mm,传感器横向间距 4 000 mm。

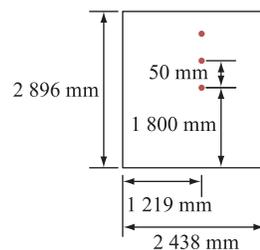


图 3 温度传感器布置纵向截面

Fig.3 Longitudinal cross-sectional of temperature sensor placement

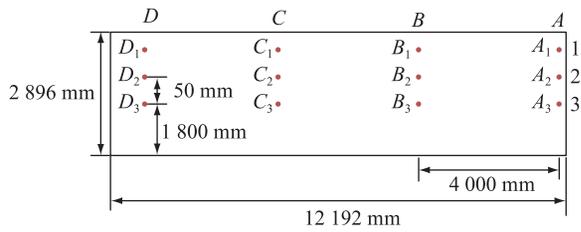


图4 温度传感器布置横向截面  
Fig.4 Transverse cross-sectional of temperature sensor placement

1.3 边界条件设置

1.3.1 环境参数设置

文中设置储能预制舱初始温度为 20 ℃,初始压力为 101.325 kPa,相对湿度为 40%,模型最小单元网格尺寸为 38 mm×38 mm×38 mm,以开始热失控时刻  $t=0$  s 为起始时间,进行仿真分析。

1.3.2 磷酸铁锂电池参数设置

磷酸铁锂电池主要由电解液、正极、负极和隔膜组成,由于电池内部分层复杂,难以建立与实际电池完全结构一致的仿真模型,因此用分层表面定义磷酸铁锂电池,分层表面由电解液表面、正极表面、负极表面、隔膜表面构成,其相应参数如表 1<sup>[28]</sup> 所示。

表 1 磷酸铁锂电池材料热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of lithium iron phosphate battery materials

| 参数  | 电解液表面<br>数值 | 正极表面<br>数值 | 负极表面<br>数值 | 隔膜表面<br>数值 |
|---|-------------|------------|------------|------------|
| 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )                    | 1 290       | 4 202      | 2 660      | 492        |
| 比热容/( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 133.9       | 672        | 1 437      | 1 978      |
| 导热率/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )  | 0.45        | 6.20       | 1.04       | 0.33       |
| 热吸收系数   | 0.90        | 0.80       | 0.80       | 0.80       |

1.3.3 火源设置

为更加符合火灾发展的真实情况,数值模拟计算中采用非稳定  $t^2$  模型<sup>[29]</sup> 来定义火源,即:

$$Q = at^2 \quad (5)$$

式中: $Q$  为热释放速率; $a$  为火灾增长系数,不同火灾分级下火灾增长系数取值<sup>[30]</sup> 见表 2; $t_r$  为燃烧时间。

表 2 火灾增长系数

Table 2 Fire growth factor

| 火灾蔓延等级 | 火灾增长系数/( $\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$ ) |
|--------|--|
| 慢速     | 0.002 90                                 |
| 中速     | 0.011 27                                 |
| 快速     | 0.046 89                                 |
| 超快速    | 0.187 60                                 |

磷酸铁锂电池的热滥用测试表明<sup>[31]</sup>,磷酸铁锂电池的热释放速率峰值为 98.99 kJ/s,火灾蔓延等级为快速, $a$  为 0.046 89,可计算得到  $t_r$  为 45.95 s。在模拟中,设置单一磷酸铁锂电池模组作为热源。

2 热失控燃烧模拟分析

为了解不同热失控位置下的储能预制舱气体扩散规律及温度变化,研究设计了 9 种工况,分析不同火源位置对储能预制舱火灾影响。不同火源位置工况如表 3 和图 5 所示。

表 3 不同火源位置工况

Table 3 Working conditions at different fire source locations

| 工况序号 | 火源位置   | 工况序号 | 火源位置   |
|------|--------|------|--------|
| 1    | 电池架底层右 | 6    | 电池架中层中 |
| 2    | 电池架底层左 | 7    | 电池架顶层右 |
| 3    | 电池架底层中 | 8    | 电池架顶层左 |
| 4    | 电池架中层右 | 9    | 电池架顶层中 |
| 5    | 电池架中层左 |      |        |



图 5 火源位置分布

Fig.5 Fire source location

2.1 气体扩散规律

图 6 给出了热失控位置在工况 1 下火灾的烟气蔓延情况。

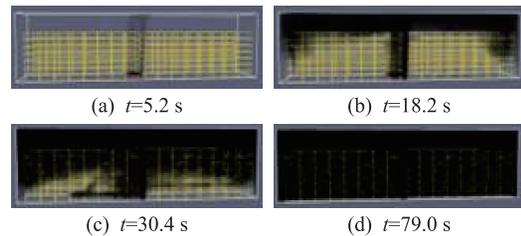


图 6 工况 1 烟气扩散情况

Fig.6 Condition 1 smoke dispersion

由图 6 可知,当工况 1 的电池发生热失控并开始燃烧时,少量烟气被释放出来。受到热羽流作用的影响, $t=5.2$  s 时,这些烟气已上升至储能预制舱顶部。随后,更多的热失控气体产生,导致储能预制舱顶部形成顶棚射流,并向两端扩散。 $t=18.2$  s 时,烟气扩散至两侧端口,此后顶部烟气层缓缓变厚。 $t=30.4$  s 时,烟气扩散至储能预制舱底部,此时,两侧烟气厚度大于中间。 $t=79.0$  s 时,烟气充满整个储能预制舱。

表 4 列出了 9 种不同热失控位置下的储能预制

舱烟气扩散时间,通过对比发现,热失控位置在高位时,距离储能预制舱顶部更近,产生的烟气更快到达顶层的位置。热失控位置在电池架两端时,火源四周只有两侧有电池模组,烟气蔓延较慢,充满整个储能预制舱所需时间更长。而热失控位置在电池架中间位置时,四周皆有电池模组,可燃物更多,因而热失控位置在电池架中层时火势更广,燃烧更迅速,释放更多烟气。当热失控位置靠近底层中间时,热量会迅速传导到底部,导致底部温度升高。底部温度升高会导致底部空气密度降低,从而形成温度梯度,引起空气对流,即底部热空气上升,冷空气下沉,形成对流循环。当对流循环发生时,流动速度增加,流动状态变得复杂,气体雷诺数增大,较高的雷诺数促使流动变得不稳定,产生剧烈的紊流现象,使得底层热失控电池产生的烟气更多,运动最快, $t = 70.7 \text{ s}$ 时,烟气充满整个储能预制舱。

表 4 不同工况下烟气弥漫时间对比

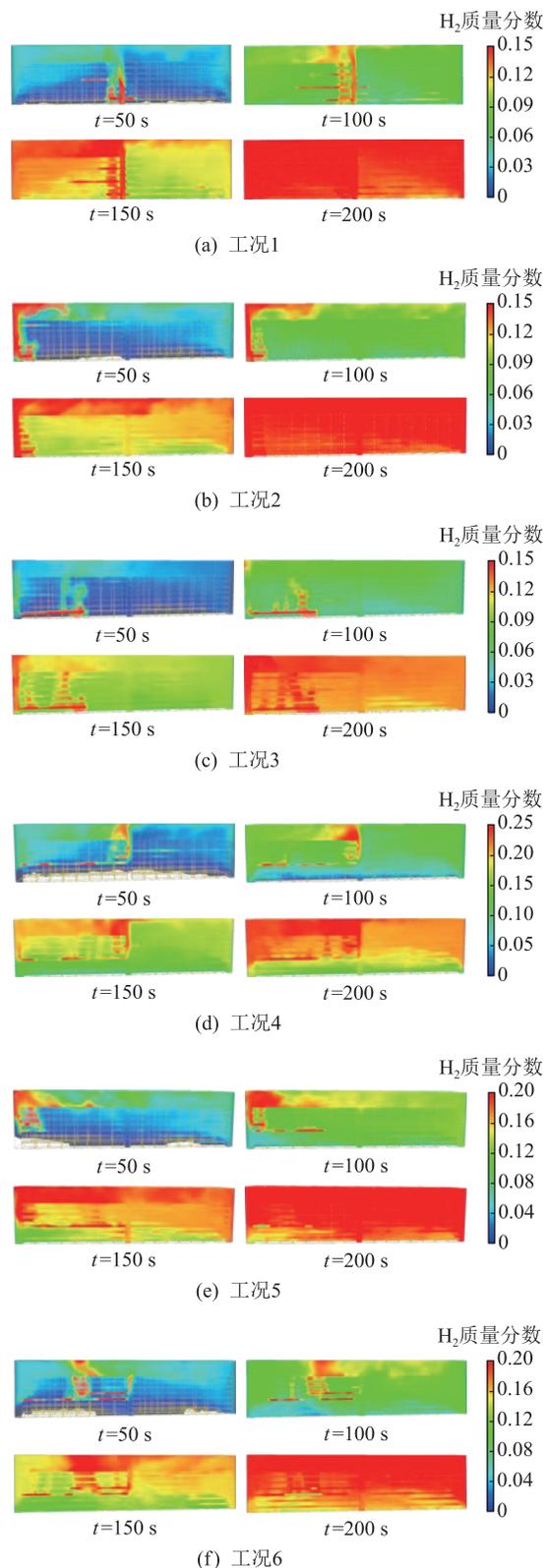
Table 4 Comparison of flue gas diffusion time under different operating condition 单位:s

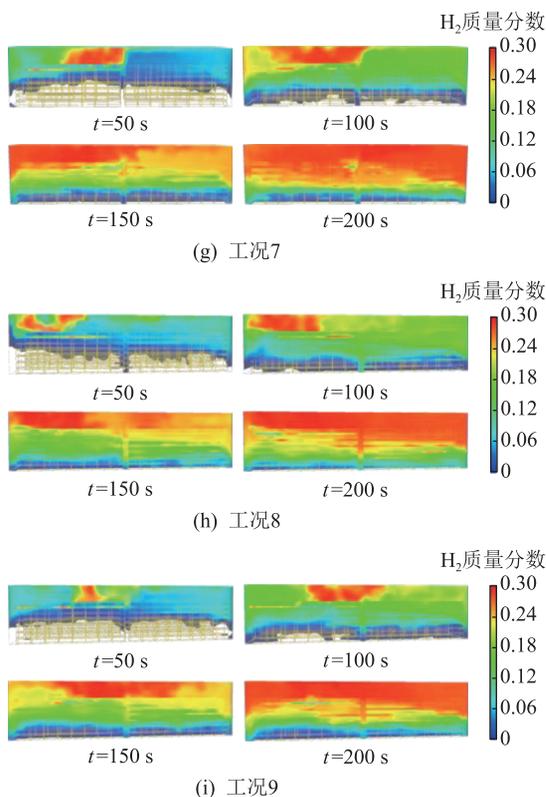
| 工况序号 | 烟气上升至顶部时间 | 烟气扩散至两端时间 | 烟气充满时间 |
|------|-----------|-----------|--------|
| 1    | 5.2       | 18.2      | 79.0   |
| 2    | 5.4       | 18.8      | 83.0   |
| 3    | 5.0       | 13.9      | 70.7   |
| 4    | 4.2       | 18.3      | 95.0   |
| 5    | 4.3       | 17.7      | 96.1   |
| 6    | 4.2       | 14.5      | 91.0   |
| 7    | 3.6       | 19.2      | 120.8  |
| 8    | 3.7       | 18.7      | 117.8  |
| 9    | 3.6       | 16.2      | 110.2  |

图 7 展示了不同工况下  $\text{H}_2$  质量分数随时间变化情况,可以看出,在反应初期,热失控位置下方,  $\text{H}_2$  质量分数几乎为 0,随着燃烧快速发展,  $\text{H}_2$  逐渐向上扩散,上升撞击储能预制舱顶后形成顶棚射流向储能预制舱两端扩散,  $\text{H}_2$  卷吸冷空气后厚度增大,开始向下扩散,  $\text{H}_2$  质量分数不断增大,此时  $\text{H}_2$  质量分数分层明显,150 s 后分层逐渐减弱,  $\text{H}_2$  充满整个储能预制舱,最终趋于稳定。通过对比不同工况下的  $\text{H}_2$  质量分数变化,发现热失控位置处于电池架底层时,气体雷诺数大,紊流现象剧烈,  $\text{H}_2$  扩散速度更快,热失控位置越靠近顶层,  $\text{H}_2$  扩散速度越慢,在  $t = 200 \text{ s}$  时,热失控位置在电池架顶层(工况 7、工况 8、工况 9)时,  $\text{H}_2$  仍未充满。

对比不同工况下烟气和  $\text{H}_2$  扩散的情况,发现烟气在 120 s 左右可以充满整个储能预制舱,而  $\text{H}_2$

在特殊工况下,200 s 时仍未能充满整个储能预制舱,这主要是因为烟气为磷酸铁锂电池热失控中产生的一系列燃烧烟气产物( $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、炭黑、多环芳烃和其他有机物等),其与  $\text{H}_2$  具有不同的物理性质,密度往往比  $\text{H}_2$  更大,分子量更重。根据弗里德里希·费克定律,在相同的条件下,烟气密度较大气体分子之间碰撞和扩散速度更快,因此更



图7 不同时间 H<sub>2</sub> 质量分数变化Fig.7 Variations of H<sub>2</sub> mass fraction at different times

容易受到气流的影响,迅速扩散到较远的区域。相比之下,H<sub>2</sub>由于其较轻的分子量和较低的密度,可能在空气中形成较大的气团,并较慢地向周围扩散。烟气的扩散不仅涉及气体分子之间的碰撞传递,还包括烟气中微粒的悬浮和漂浮,这些微粒更容易通过对流和扩散机制在空气中迅速传播,从而使烟气的扩散速度更快。

## 2.2 温度变化规律

图8为工况1(测点高度  $y=1.90、1.85、1.80$  m)垂直方向上测点温度变化情况,由图8可知,温度在20 s后急剧上升,70 s后温度逐渐平稳,在  $y=1.90$  m处由于热羽流作用温度出现波动。

图9为工况2测点温度变化情况,此时,热失控位置在电池架底层左侧,由图9可知, $D_1$ 点由于在热失控电池正上方,高温烟气在火焰浮力的作用下,上升到储能预制舱顶部,受到顶部以及左侧阻挡,向右侧形成顶棚射流,温度远高于其他测点,并且温度变化波动较大。

图10为工况3测点温度变化情况,在热失控发展阶段,温度急速上升, $D_2$ 最后稳定在400℃。

图11—图13分别为工况4—工况6测点温度变化情况,与工况1—工况3对比可知,各测点温度均有上升,并且  $y=1.85$  m处测点  $C_2$  与  $A_2$  温差更

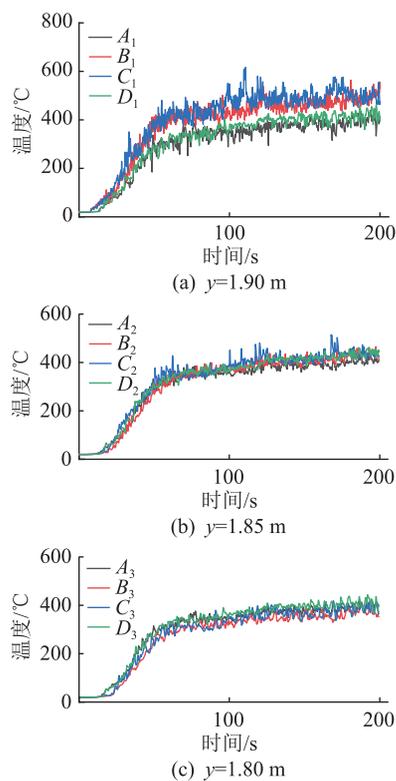


图8 工况1下纵向断面温度

Fig.8 Longitudinal section temperature in condition 1

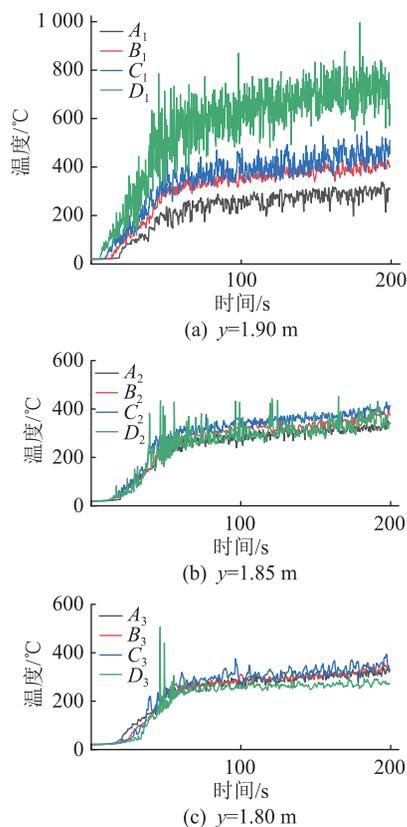


图9 工况2下纵向断面温度

Fig.9 Longitudinal section temperature in condition 2  
大,这是由于热失控位置在电池架中层,四周皆有电池模组,可燃物更多,因而燃烧更快,温度更高。

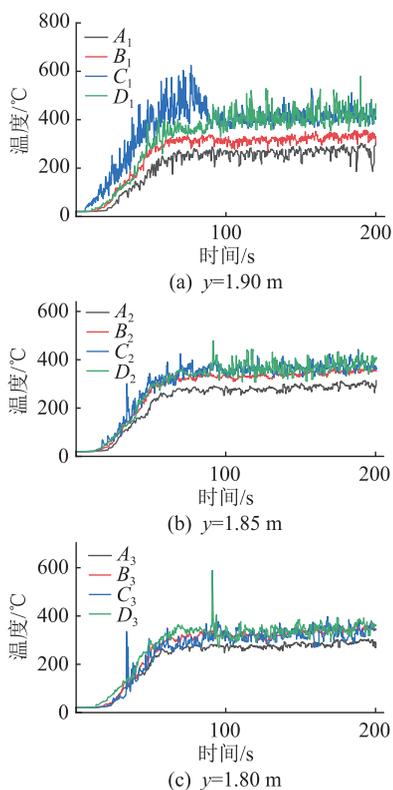


图 10 工况 3 下纵向断面温度

Fig.10 Longitudinal section temperature in condition 3

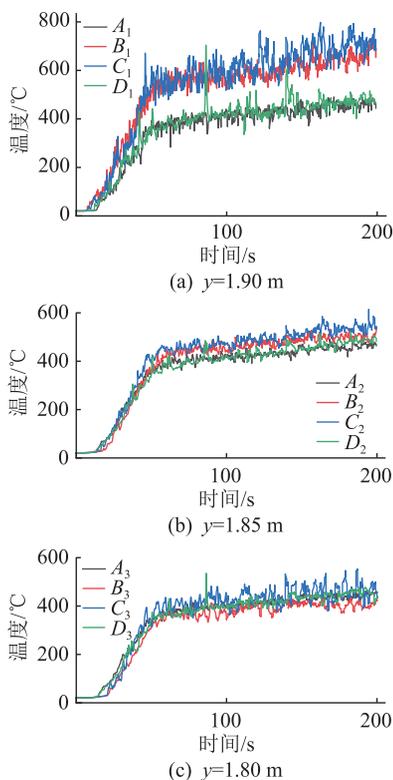


图 11 工况 4 下纵向断面温度

Fig.11 Longitudinal section temperature in condition 4

图 14—图 16 分别为工况 7—工况 9 测点温度变化情况,此时  $y=1.90\text{ m}$ 、 $y=1.85\text{ m}$  处测点温度差距更大,这是由于热失控位置位于电池架顶层,测

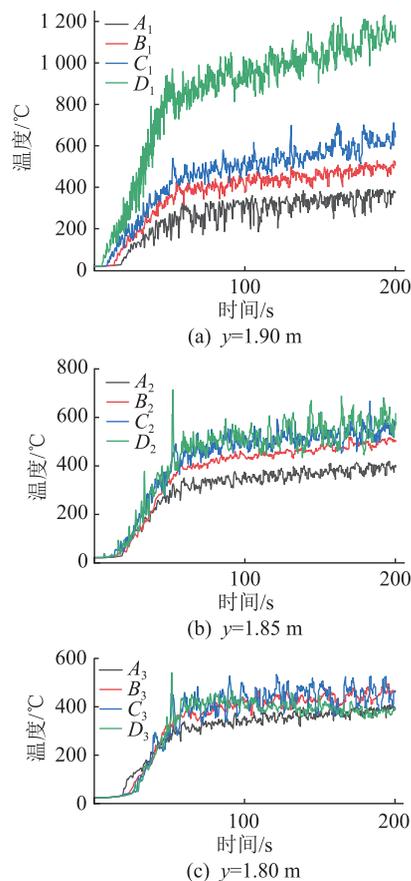
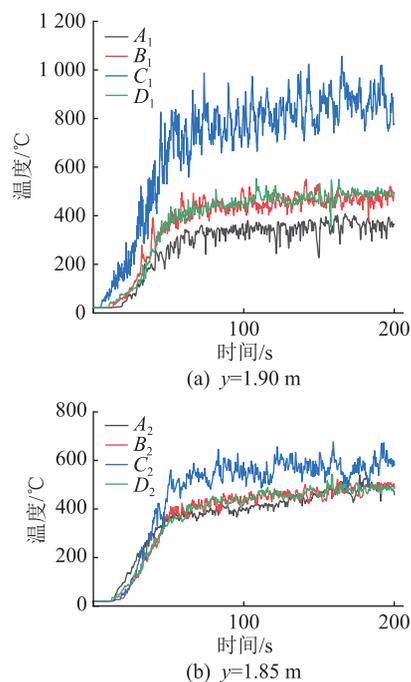


图 12 工况 5 下纵向断面温度

Fig.12 Longitudinal section temperature in condition 5

点距离热源最近,受热源影响较大,以及高温烟气因火焰浮力作用上升到储能预制舱顶部,受到储能预制舱顶阻挡后形成顶棚射流,持续向两侧蔓延并卷吸周围冷空气,使得温度分布在水平方向上温差较大,温度从热失控位置向两侧衰减。通过对比发



(b)  $y=1.85\text{ m}$

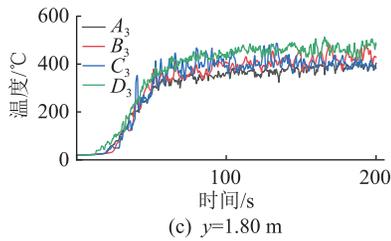


图 13 工况 6 下纵向断面温度

Fig.13 Longitudinal section temperature in condition 6

现,电池发生热失控后,储能预制舱高度 1.85 m 以上的区域温度更高,且温度变化波动大,热失控位置越接近储能预制舱顶部,水平方向上温差越大。

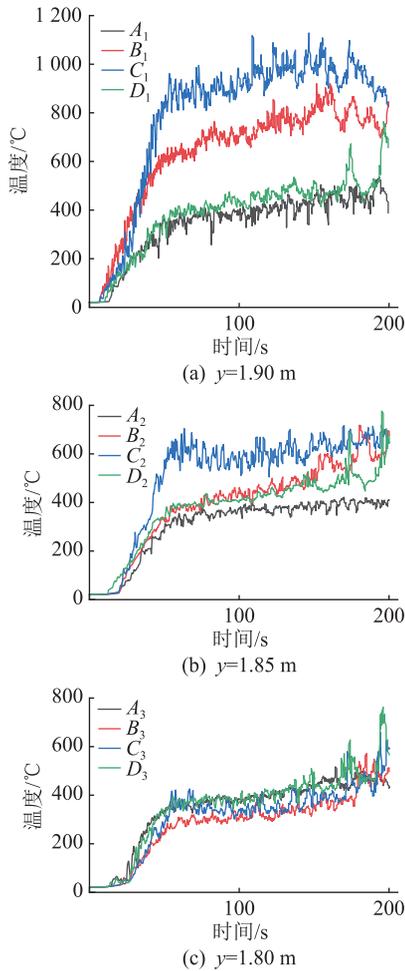


图 14 工况 7 下纵向断面温度

Fig.14 Longitudinal section temperature in condition 7

### 3 储能预制舱火灾消防

#### 3.1 灭火剂选择

储能预制舱由于集成了高能量密度的电池组,在发生火灾时,电池热失控特征表现为迅速蔓延、高温燃烧并可能伴随有毒烟雾。面对这类火灾,灭火剂的选择至关重要。传统灭火剂可能存在损坏设备、对生物或环境产生危害的问题。目前,储能

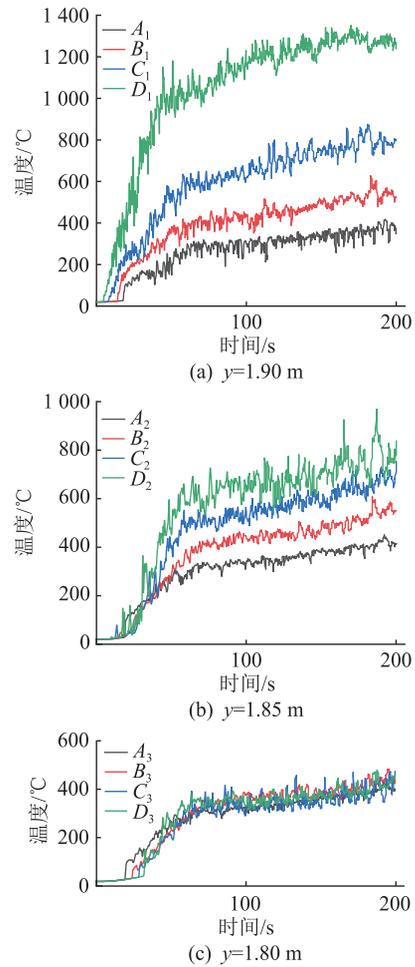


图 15 工况 8 下纵向断面温度

Fig.15 Longitudinal section temperature in condition 8

预制舱多选用细水喷雾进行灭火,施加水雾喷淋确实可以在短期内有效地冷却电池,降低温度,但是停止喷淋后,电池可能因为没有彻底降温而复燃,此外,在水雾与电池的化学物质相互作用下,可能会产生危险的气体,对储能预制舱造成二次损坏<sup>[32]</sup>。全氟己酮灭火剂能有效抑制火灾,对设备安全性影响较小<sup>[33]</sup>,因此选用全氟己酮作为灭火剂进行仿真模拟。

#### 3.2 喷头相关参数设置

文中设计了以全氟己酮为灭火剂的储能预制舱模型系统。以工况 6 为基础,研究该系统对减小火灾危害的有效性,全氟己酮灭火剂主要参数<sup>[34]</sup>如表 5 所示。

文中使用淋洒式喷头<sup>[35]</sup>,以雾化的方式将全氟己酮均匀分布在区域内,依据 GB 55036—2022《消防设施通用规范》,设置全氟己酮灭火系统喷淋强度为 20 L/(min·m<sup>2</sup>)、喷淋角度为 120°、全氟己酮灭火剂粒径大小为 50 μm,在电池架顶层中心位置处设置喷头,喷头活化温度为 60 °C。

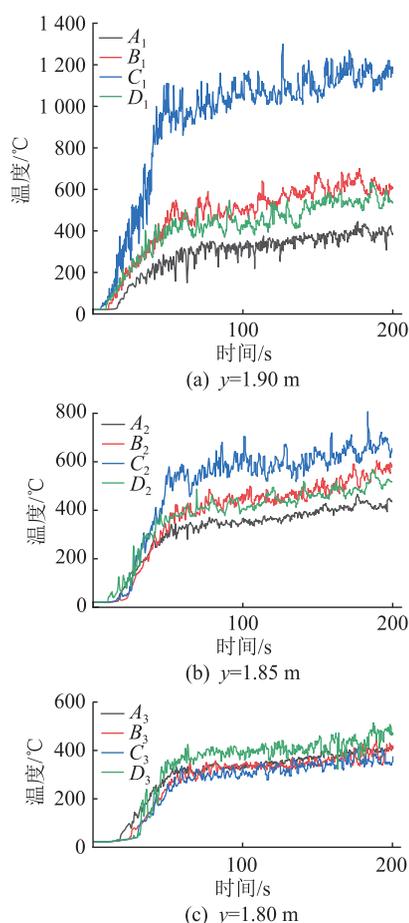


图 16 工况 9 下纵向断面温度

Fig.16 Longitudinal section temperature in condition 9

表 5 全氟己酮灭火剂主要参数

Table 5 Main parameters of perfluorohexanone fire extinguishing agent

| 参数   | 数值      |
|--|---------|
| 分子量  | 316.04  |
| 沸点/°C  | 49.2    |
| 凝固点/°C                                       | -108    |
| 饱和液体密度/(g·ml <sup>-1</sup> )                 | 1.60    |
| 气体比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ) | 0.073 3 |

### 3.3 全氟己酮灭火系统对火灾的影响

由 2.2 节可知,储能预制舱在高度 1.85 m 以上时温度波动大,因此选择在高度 1.85、1.90 m 处进行全氟己酮灭火系统灭火效果对比,如图 17 和图 18 所示,全氟己酮灭火系统在约 25 s 时达到喷头活化温度,并开始喷淋。在火情发展初期,系统能够快速反应,储能预制舱内的温度在约 10 s 内迅速下降至 20 °C 左右。随后,温度可能会出现轻微波动。这是因为灭火系统的开启能够迅速抑制火焰的燃烧,从而使舱内温度降低。然而,由于电池内部的持续反应,热量可能会继续传播,导致温度短暂回升,但随后温度会在约 100 s 内趋于稳定,这表明全

氟己酮灭火系统能够及时地控制火势。从图 17 和图 18 可以直接观察到有无全氟己酮灭火系统对火情的扼制作用。在有灭火系统的工况下,储能预制舱内温度显著降低,尤其是 C<sub>1</sub> 测点,其靠近热失控电池,温度远高于其他测点,但在全氟己酮灭火系统启动后,温度仍能迅速降低。结果表明,针对额定容量为 1.2 MW·h 标准储能预制舱,全氟己酮灭火系统能够有效控制热失控发展阶段的储能预制舱火灾。

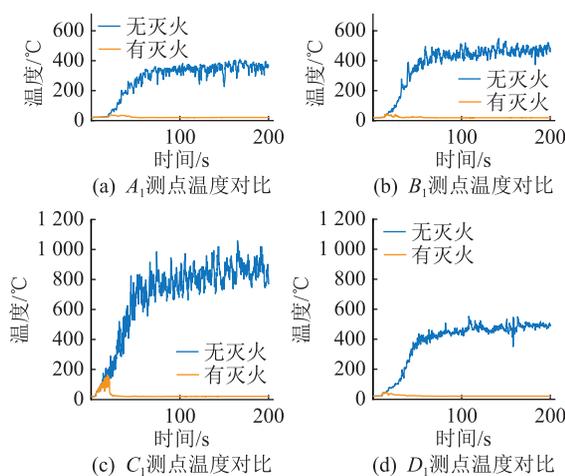


图 17 y=1.90 m 测点温度对比

Fig.17 Comparison of temperature at y=1.90 m measurement point

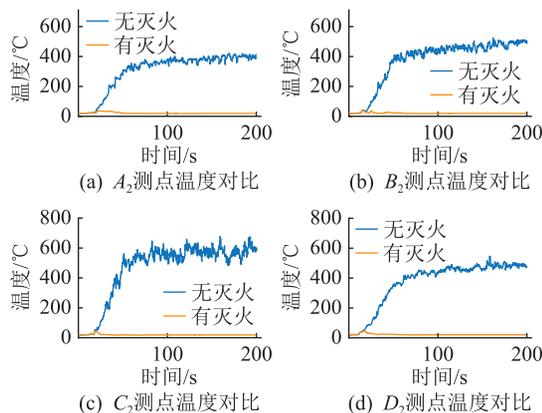


图 18 y=1.85 m 测点温度对比

Fig.18 Comparison of temperature at y=1.85 m measurement point

## 4 结论

文中基于火灾模拟软件 Pyrosim,设计了磷酸铁锂储能预制舱模型。引入了 t<sup>2</sup>模型,通过改变热失控位置,进行储能预制舱火灾数值模拟研究,分析了热失控位置对储能预制舱火灾的烟气和氢气扩散以及温度变化规律影响,并研究了全氟己酮灭火系统对储能预制舱火灾影响,得到如下结论:

(1) 储能预制舱底层中位置发生火灾时,  $t = 5.0$  s时烟气上升至储能预制舱顶部, 形成顶棚射流, 向两端扩散,  $t = 13.9$  s时烟气扩散至储能预制舱两端, 随后持续向下蔓延,  $t = 70.7$  s时烟气充满整个储能预制舱。

(2) 热失控位置越靠近底层, 烟气流动的雷诺数大, 紊流现象剧烈, 运动最快, 充满储能预制舱时间最短。热失控位置越靠近顶层,  $H_2$  扩散速率低, 在  $t = 200$  s时,  $H_2$  尚未完全充满储能预制舱。在储能预制舱的安全防护设计中, 特别需要关注位于储能预制舱底部的锂电池健康状态。

(3) 储能预制舱内高度在 1.85 m 以上的区域温度较高, 并伴随显著的温度波动时, 热失控位置越靠近舱顶, 储能预制舱水平方向上温差显著增大。因此, 在实施监测系统部署策略时, 重点关注储能预制舱内高度在 1.85 m 以上的区域。

(4) 额定容量为 1.2 MW·h 标准储能预制舱, 全氟己酮灭火系统在喷淋强度为 20 L/(min·m<sup>2</sup>)、喷淋角度为 120°、全氟己酮灭火剂粒径大小为 50 μm时, 能够有效控制热失控发展阶段的储能预制舱火灾, 减小火灾危害。

#### 参考文献:

- [1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-580.  
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-580.
- [2] 闫群民, 穆佳豪, 马永翔, 等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 67-74.  
YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 67-74.
- [3] 马会萌, 李相俊, 吴荣宇, 等. 兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 111-119.  
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 111-119.
- [4] 江桂芬, 徐加银, 刘浩, 等. 考虑风机惯量支撑及有功备用的新能源电力系统优化调度模型[J]. 浙江电力, 2024, 43(5): 53-62.  
JIANG Guifen, XU Jiayin, LIU Hao, et al. An optimal scheduling model for new energy power systems considering wind turbine inertia support and active power reserve [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 53-62.
- [5] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.  
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [6] 张平, 康利斌, 王明菊, 等. 钠离子电池储能技术及经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(6): 1892-1901.  
ZHANG Ping, KANG Libin, WANG Mingju, et al. Technology feasibility and economic analysis of Na-ion battery energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(6): 1892-1901.
- [7] 杜生鑫, 金阳. 锂离子电池储能预制舱风冷散热数值模拟与优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 58-64.  
DU Shengxin, JIN Yang. Numerical simulation and optimization of air cooling heat dissipation of lithium-ion battery storage cabin [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 58-64.
- [8] 张志一, 窦震海, 于润泽, 等. 考虑电-热等效虚拟储能的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力建设, 2024, 45(3): 16-26.  
ZHANG Zhiyi, DOU Zhenhai, YU Runze, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering electric-thermal equivalent virtual energy storage [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 16-26.
- [9] 郑圣, 谭书平, 张清周, 等. 基于负荷场景多层聚类的储能精细化规划研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 79-87.  
ZHENG Sheng, TAN Shuping, ZHANG Qingzhou, et al. Research on refined energy storage planning based on multi-layer clustering of load scenarios [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 79-87.
- [10] 刘蓉晖, 王乐凯, 孙改平, 等. 考虑不确定性的风-光-储合作联盟参与含需求响应的主辅联合市场的竞价交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 96-107.  
LIU Ronghui, WANG Lekai, SUN Gaiping, et al. Bidding transaction model of wind-solar-storage cooperative alliance participating in the main and auxiliary joint market with demand response considering uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 96-107.
- [11] 贾超, 赵霞, 张妍. 锂电池储能电站火灾风险分析与对策探讨[J]. 电力安全技术, 2022, 24(6): 23-26.  
JIA Chao, ZHAO Xia, ZHANG Yan. On the fire risk analysis and strategies for lithium battery energy storage power stations [J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(6): 23-26.
- [12] 王怀镒. 磷酸铁锂储能电池过充热失控特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.  
WANG Huairu. Research on overcharging thermal runaway characteristic of lithium iron phosphate energy storage battery [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [13] 王铭民, 孙磊, 郭鹏宇, 等. 基于气体在线监测的磷酸铁锂

- 储能电池模组过充热失控特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 279-286.
- WANG Mingmin, SUN Lei, GUO Pengyu, et al. Overcharge and thermal runaway characteristics of lithium iron phosphate energy storage battery modules based on gas online monitoring [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 279-286.
- [14] 牛志远, 王怀铷, 金阳, 等. 不同倍率下磷酸铁锂电池模组过充热失控特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 167-174.
- NIU Zhiyuan, WANG Huairu, JIN Yang, et al. Overcharging and runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules at different rates [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 167-174.
- [15] 张明轩, 冯旭宁, 欧阳明高, 等. 三元锂离子动力电池针刺热失控实验与建模[J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 743-750, 756.
- ZHANG Mingxuan, FENG Xuning, OUYANG Minggao, et al. Experiments and modeling of nail penetration thermal runaway in a NCM li-ion power battery [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(7): 743-750, 756.
- [16] JHU C Y, WANG Y W, SHU C M, et al. Thermal explosion hazards on 18650 lithium ion batteries with a VSP2 adiabatic calorimeter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(1): 99-107.
- [17] CUMMING S. Off-gas monitoring for lithium ion battery health and safety [R]. Wright Patterson AFB; Power Sources Committee Meeting, 2017.
- [18] 徐成善, 鲁博瑞, 张梦启, 等. 储能锂离子电池预制舱热失控烟气流动研究[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2418-2431.
- XU Chengshan, LU Borui, ZHANG Mengqi, et al. Study on thermal runaway gas evolution in the lithium-ion battery energy storage cabin [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2418-2431.
- [19] 王怀铷, 孙宜听, 金阳. 磷酸铁锂储能电池簇过充热失控蔓延特性仿真研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 32-39.
- WANG Huairu, SUN Yiting, JIN Yang. Simulation study on overcharge thermal runaway propagation of lithium-iron-phosphate energy storage battery clusters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 32-39.
- [20] 叶祥虎, 杜建华, 谭必蓉, 等. 储能电站磷酸铁锂电池模组灭火参数的仿真优化[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 435-441.
- YE Xianghu, DU Jianhua, TAN Birong, et al. Simulation and optimization of fire extinguishing parameters for lithium phosphate battery modules in energy storage power plants [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2023, 44(4): 435-441.
- [21] 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.
- WANG Jun, JIA Zhuangzhuang, QIN Peng, et al. Simulation of thermal runaway gas diffusion in LiFePO<sub>4</sub> battery module [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 185-192.
- [22] XIE J, LI J P, WANG J H, et al. Fire protection design of a lithium-ion battery warehouse based on numerical simulation results [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 80: 104885.
- [23] 朱金鹏. 城市综合管廊长距离通风与消防特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- ZHU Jinpeng. Research on characteristic of long-distance ventilation and fire fighting of urban utility tunnel [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [24] LIU X S, HOU D, JI J, et al. Experiment and numerical simulation of cable trench fire detection [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: 101338.
- [25] 田刚领, 张柳丽, 牛哲荟, 等. 集装箱式储能系统热管理设计[J]. 电源技术, 2021, 45(3): 317-319.
- TIAN Gangling, ZHANG Liuli, NIU Zhehui, et al. Design of thermal management for container-type energy storage system [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2021, 45(3): 317-319.
- [26] 尹康涌, 陶风波, 梁伟, 等. 双层结构预制舱式磷酸铁锂储能电站热失控气体爆炸模拟[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2488-2496.
- YIN Kangyong, TAO Fengbo, LIANG Wei, et al. Simulation of thermal runaway gas explosion in double-layer prefabricated cabin lithium iron phosphate energy storage power station [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2488-2496.
- [27] 石爽, 吕娜伟, 马敬轩, 等. 不同类型气体探测对磷酸铁锂电池储能预制舱过充安全预警有效性对比[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2452-2462.
- SHI Shuang, LU Nawei, MA Jingxuan, et al. Comparative study on the effectiveness of different types of gas detection on the overcharge safety early warning of a lithium iron phosphate battery energy storage compartment [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8): 2452-2462.
- [28] 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.
- LIU Dexing. Simulation research on key parameters of integrated battery fire extinguishing system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [29] 陈立清. 某综合管廊火灾烟气数值模拟研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- CHEN Liqing. Simulation study of the fire smoke value on a underground pipe gallery [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.
- [30] AN W G, TANG Y H, LIANG K, et al. Study on temperature distribution and CO diffusion induced by cable fire in L-shaped utility tunnel [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62: 102407.
- [31] 黎可, 穆居易, 金翼, 等. 磷酸铁锂电池火灾危险性[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1177-1186.

- LI Ke, MU Juyi, JIN Yi, et al. Fire risk of lithium iron phosphate battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3):1177-1186.
- [32] 蔡晶菁. 锂离子电池储能电站火灾防控技术研究综述[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(4):472-477.
- CAI Jingjing. Review on the fire prevention and control technology for lithium-ion battery energy storage power station[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(4):472-477.
- [33] 刘一帆, 常崇焯, 李舒泓, 等. 全氟己酮微乳液抑制锂离子电池热失控研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(9):27-32.
- LIU Yifan, CHANG Chongye, LI Shuhong, et al. Research on inhibition of lithium-ion battery thermal runaway by dodecafluoro-2-methylpentan-3-one microemulsion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(9):27-32.
- [34] 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.
- CAI Xingchu, ZHU Yiming, JIANG Keshang, et al. Application on perfluoro-2-methyl-3-pentanone in lithium battery premade energy storage cabin[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(8):2497-2504.
- [35] 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]. 高电压技术, 2023, 49(12):5187-5195.
- YU Jin, GUO Chuanyu, ZHANG Weikuo, et al. Fire simulation of lithium iron phosphate battery in energy storage prefabricated cabin and its fire emergency technology simulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12):5187-5195.

#### 作者简介:



张引

张引(1989),男,博士,讲师,研究方向为SF<sub>6</sub>分解产物的光学检测、电气设备和SF<sub>6</sub>替代气体的在线监测与故障诊断(E-mail:yinzhangyz@outlook.com);

秦超群(2000),男,硕士在读,研究方向为磷酸铁锂电池热失控特性;

田双双(1989),博士,副教授,通信作者,研究方向为电工装备在线监测与环保绝缘技术。

## The change rule of smoke dispersion and temperature evolution in fires within lithium iron phosphate energy storage prefabricated cabin

ZHANG Yin<sup>1</sup>, QIN Chaoqun<sup>1</sup>, TIAN Shuangshuang<sup>1</sup>, GE Zhichao<sup>2</sup>, DONG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoxing<sup>1</sup>

(1. Hubei Engineering Research Center of Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** With the large-scale application of electrochemical energy storage, the safety of energy storage prefabricated cabin has become increasingly prominent. The study of the differences in energy storage prefabricated cabin fires under different thermal runaway positions in the energy storage prefabricated cabin can help to design more effective monitoring and fire extinguishing systems, and to improve the safety performance of the energy storage prefabricated cabin. Therefore, it is of great significance to simulate and study the change rule of smoke dispersion and temperature evolution in energy storage prefabricated cabin under different thermal runaway positions. Based on direct numerical simulation and vortex simulation, a numerical model of lithium iron phosphate energy storage prefabricated cabin based on the size of the actual energy storage prefabricated cabin is studied, and the  $t^2$  model which is more in line with the development of the fire situation compared with the stable fire model, and investigated the change rule of the smoke dispersion and temperature inside the prefabricated cabin by simulating the fire situation with different thermal runaway positions. The simulation results demonstrate that smoke displays distinct dynamic behaviors depending on the thermal runaway positions within the energy storage prefabricated cabin. When thermal runaway positions occur closer to the bottom, smoke exhibits swifter movement and the cabin fills up in a shorter time. Additionally, as the thermal runaway positions above 1.85 meters approach the top, accompanied by significant temperature fluctuations. Notably, there is a noticeable amplification in the temperature disparity along the horizontal axis of the energy storage prefabricated cabin. Moreover, the design scheme of the fire extinguishing system for a standard energy storage prefabricated cabin with a rated capacity of 1.2 MW·h is analyzed. This perfluorohexane fire extinguishing system, with a sprinkler intensity of 20 L/(min·m<sup>2</sup>), a sprinkler angle of 120° and a particle size of 50 μm, can successfully controls fires and mitigates fire damage. The research results in the article can provide theoretical guidance for the distributed deployment strategy in energy storage prefabricated cabin and fire safety design of monitoring and warning devices.

**Keywords:** lithium iron phosphate battery; energy storage prefabricated cabin; numerical simulation; thermal runaway; gas evolution; temperature variation

(编辑 吴昊)