

船舶运输锂电池集装箱火灾场景模拟和预测方法

焦宇, 刘富群, 陈冉, 苗昊

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要:为预测锂离子电池集装箱在船舶上的火灾热灾害,设置着火集装箱位置、积载高度和风速等典型工况,采用 FLACS 10.9 构建甲板上锂电池集装箱火灾场景,利用 CatBoost 算法建立火灾温度和热流密度预测模型。结果表明:锂电池集装箱上下空间空气量与温度密切相关,着火层在第7层时火灾最高温度最高,着火层为7~8层时,高温和热流密度的损害范围最小;积载高度增加会造成空气流动减少,导致火灾最高温度上升,温度影响范围变大,热流密度在竖直方向扩散距离变长;风速在1~4 m/s 范围时,风有助于散热,降低最高温度,风速达到5 m/s 时,火焰卷吸氧气的增加,最高温度升高,风速达到6 m/s 时,风的散热作用又占主导,火灾最高温度再次降低,风速越高则高温和热流密度损害面积越小;将 CatBoost 算法预测的温度、热流密度值与样本对比,能看出模型数值准确性很高,通过模型能发现过热点。研究成果能为锂电池集装箱积载方式的确定和相应的消防监测提供参考。

关键词:船舶运输;温度;热流密度;积载方式;预测模型

中图分类号:U698.6;X932

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.003

Simulation and prediction method of fire scenario in marine transport lithium battery container

JIAO Yu, LIU Fuqun, CHEN Ran, MIAO Hao

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To accurately predict the thermal fire hazard of these containers under different stowage methods on a ship, this paper establishes typical working conditions, such as the position of the fire container, stowage height and wind speed. It then simulates the fire scene of lithium battery containers on the deck using FLACS 10.9 and establishes a prediction model for the temperature and heat flow density of the fire flow field using the CatBoost algorithm. The results demonstrate that the air volume within the upper and lower spaces of the lithium battery container is directly proportional to the change in fire temperature. The maximum temperature occurs when the fire layer is in the 7th layer, and the range of damage caused by high temperatures and heat flux is minimized when the fire layer is between the 7th and 8th layers. Increasing the stowage height decreases airflow, resulting in higher maximum fire temperatures, a larger temperature influence range and a longer vertical diffusion distance of heat flux. When the wind speed is in the range of 1-4 m/s, it helps to dissipate heat and reduce the maximum temperature. However, when the wind speed reaches 5 m/s, the oxygen uptake rate of the flame increases, resulting in a higher maximum temperature. When the wind speed reaches 6 m/s, the heat dissipation effect dominates and the maximum fire temperature decreases again. The higher the wind speed, the smaller the area of damage caused by high temperatures and heat flux. Comparing the temperature and heat flux density values predicted by the CatBoost algorithm with the measured samples shows that the model is highly accurate and can identify overheating spots. These research results can inform the determination of lithium battery container accumulation modes and the corresponding fire monitoring.

Key words: ship transportation; temperature; heat flux density; stowage mode; predictive modeling

收稿日期:2024-04-23

作者简介:焦宇(1981—),男,博士,副教授,研究方向为热安全事故风险防控。E-mail:yujiao@shmtu.edu.cn

引用格式:焦宇,刘富群,陈冉,等.船舶运输锂电池集装箱火灾场景模拟和预测方法[J].中国航海,2025,48(3):19-29.

JIAO Y, LIU F Q, CHEN R, et al. Simulation and prediction method of fire scenario in marine transport lithium battery container[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 19-29. (in Chinese)

锂电池集装箱作为新型的储能设备,受到广泛的关注和应用,预计2028年市场规模将增至37亿美元^[1]。锂电池集装箱的运输量随需求攀升,海上运输成为其主要方式之一,导致火灾爆炸事故的锂电池热失控现象,在集装箱船舶运输过程中难以侦测,使火灾的发现和扑灭变得更加困难^[2]。目前,关于船运锂电池集装箱火灾事故的研究较少,研究和预测不同积载方式下船运锂电池集装箱火灾场景特性,对于船舶运输安全具有重要价值。

对于锂电池热失控和火灾特性的研究,可分为试验研究和模拟研究,试验研究更多地偏重于锂电池单体和组件。

1) 在单体锂电池火灾特性研究方面,分别进行了不同尺寸、材料和荷电状态(State of Charge, SOC)的单体锂电池试验研究^[3-5],结果表明锂电池热失控的触发方式主要包括机械滥用、电滥用和热滥用,电池的正极材料以及荷电状态对热失控释放热量有重要影响。在锂电池组件方面,HE等^[6]研究电池数量对锂电池热失控的影响,发现当电池数量从1个增加到4个时,临界热失控温度从165.5℃下降到153℃。高明泽等^[7]对动力锂离子电池组进行封闭空间内外火加热试验,结果表明内部过充起火后电池组破坏程度远大于外部火源加热的情况。SUN等^[8]则研究线性排列的锂离子电池组的热失控传播特性,发现荷电状态和环境温度都会影响临界表面温度和传播速度。以上关于锂电池组件的研究表明锂电池排列方式、数量、容量和能量密度的增加都会提高其火灾危险性。

2) 试验研究锂电池火灾具有一定的危险性,而且当研究对象是大型锂电池设备时成本较高,采用计算机数值模拟来描述锂电池火灾特征是有明显技术价值的尝试,文献[9]~文献[12]等软件被用来研究锂电池在不同倍率过充、放电过程和环境中热失控时电池产生的热量、电池电压和温度的变化。然而锂电池火灾具有高温、剧烈反应等特殊性质,因此,火灾动力学模拟器(Fire Dynamics Simulator, FDS)被采用来模拟锂电池火灾。陈吉清等^[13]采用FDS建立锂电池单体起火燃烧数值模型,可准确地模拟单体燃烧时火情演变过程。王俊等^[14]基于FDS模拟电池模组内部发生热失控时释放H₂、CO、CH₄和CO₂的扩散规律。潘鸣宇等^[15]对电动汽车锂离子电池组火灾进行数值模拟研究,分析火灾过程中的热释放速率、烟气和能见度的变化规律。但以上采用FDS进行锂电池火灾模拟的研究运用较为简化的物理模型,造成难以研究较大场景中周

围物体的火灾受损情况。FLACS针对锂电池模拟具有的良好可视化功能,便于分析周围物体损坏情况。牛志远等^[16]、程志翔等^[17]和尹康涌等^[18]分别基于FLACS探索锂电池热失控引发单一储能舱爆炸对周围储能舱的影响、不同条件下电池产气发生燃爆的危害范围和双层预制舱式储能电站的热失控燃烧爆炸特性,解决了大规模储能电池应用场景的燃爆事故难以通过试验研究的问题,而且提出等效气体方程定义了FLACS中的锂电池燃料。

目前,有学者将FLACS模拟与机器学习相结合,如LIU等^[19]提出一种基于支持向量机(Support Vector Machines, SVM)的机器学习模型,以FLACS软件模拟不同空间参数和瓦斯当量巷道内的爆炸事故,完成对巷道内爆炸位置和爆炸当量的准确预测。于佳航^[20]利用FLACS软件对国内某双燃料动力船舶机舱进行1:1等尺度建模,模拟机舱内燃爆过程,并基于贝叶斯回归神经网络(Bayesian Regularized Artificial Neural Network, BRANN)预测模型对事故后果进行预测,但将机器学习用到锂电池火灾模拟的研究还较少。

本文基于FLACS 10.9建立船运过程中锂电池集装箱火灾模型,研究船运集装箱火灾温度分布、热流密度分布等特性,减少火灾的危害、并采用CatBoost算法对火场的温度和热流密度进行预测。CatBoost算法的性能优越,所需参数较少,且具有高效率、高准确性等优点^[21]。这些研究对于改进锂电池船运安全,选择低风险集装箱堆垛方案和提高消防技术水平具有重要的实际意义。

1 思路方法

以积载在集装箱船甲板上的锂电池集装箱火灾为模拟场景建立模型,研究思路示意图1,集装箱尺寸为6.058 m×2.438 m×2.591 m,集装箱之间的纵向距离为0.80 m,横向以及上下间距为0.05 m,最高堆垛8层,纵向摆放5列,横向13行,锂电池集装箱位于纵向3列、横向7行。计算网格分为核心区 and 扩展区,以锂电池集装箱为中心,水平方向40 m、竖直方向30 m范围为核心区,水平方向60 m、竖直方向50 m范围为扩展域,核心区网格尺寸为0.25 m,核心区外拉伸系数为1.2,得到总数4 705 056个网格。结合《国内航行集装箱船载运包装危险货物消防和积载指南》^[22]针对不同着火位置、积载高度和风速这3种变量设计了21种工况,具体工况设置见表1。表1中:工况1~工况8为不同着火位置对热流场影响的对比,工况1、工况9~

工况 15 为积载高度的影响对比,工况 16 ~ 工况 21 为风速影响的对比。在锂电池集装箱开口处正横向通道设置监测点,监测点纵向水平间距为 2.48 m,高度间距为 2.64 m,覆盖在所有积载集装箱表层,

用于监测温度和热流密度,同时输出火灾 3D 数据。再通过高温和热通量对集装箱的伤害准则判断对集装箱的损伤情况,最后通过 CatBoost 机器学习建立温度和热流密度的预测模型。

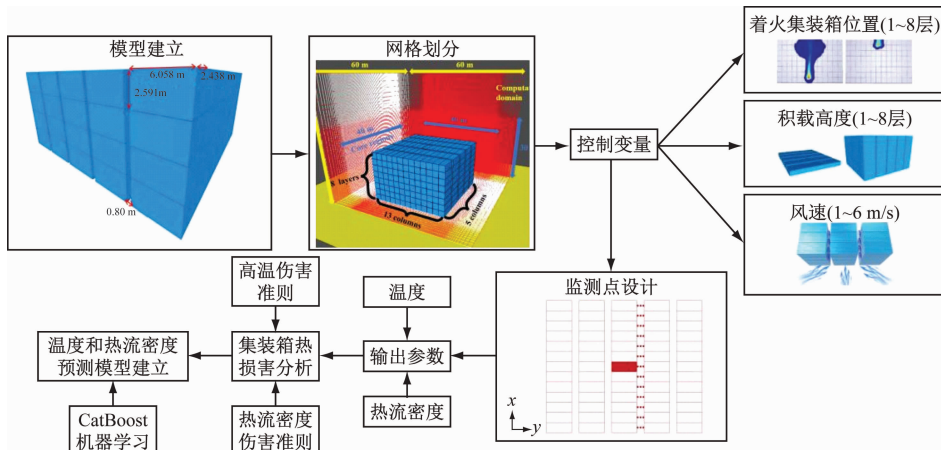


图 1 研究思路示意

Fig. 1 Framework of the method

表 1 工况设置

Tab. 1 Operation setting

工况	着火集装箱 层数/层	积载高度 /层	风速/ (m/s)
1	1	8	0
2	2	8	0
3	3	8	0
4	4	8	0
5	5	8	0
6	6	8	0
7	7	8	0
8	8	8	0
9	1	1	0
10	1	2	0
11	1	3	0
12	1	4	0
13	1	5	0
14	1	6	0
15	1	7	0
16	1	8	1
17	1	8	2
18	1	8	3
19	1	8	4
20	1	8	5
21	1	8	6

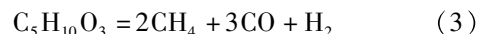
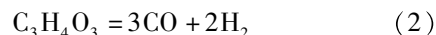
2 火源设置

2.1 锂电池集装箱参数

本文在典型的双岛型集装箱船甲板上发生锂电池集装箱火灾,用于储能的锂电池集装箱尺寸与 20 GP 集装箱大小一致 (6.058 m × 2.438 m × 2.591 m)。锂电池集装箱包含 320 个电池组,每个电池组容量 11 648 Wh。

2.2 燃料参数

引发锂离子电池发生燃烧爆炸事故的燃料主要为大量逸出的汽化电解液,而非电池热失控反应产生的气体^[23]。本文中锂电池集装箱电解液的主要成分为碳酸丙烯酯 (C₄H₆O₃)、碳酸乙烯酯 (C₃H₄O₃) 和碳酸二乙酯 (C₅H₁₀O₃) 等有机物溶剂按 1:1:1 的配比组成。在以下数值研究中将使用 CH₄ 19%、CO 56% 和 H₂ 25% 的混合气体来等效汽化电解液^[16], 气体等效方程为



2.3 火源模拟验证

将锂电池集装箱燃烧看作静态池火,在 FLACS 中通过匀速燃料泄漏模拟稳定池火燃烧过程,利用 AREA LEAK 设置一个面积为 5.858 m × 2.238 m 的泄漏区域,设置泄漏率和燃烧率相同。目前,已有大量锂电池燃烧的试验^[24-28],通过统计可得燃烧速率范围为 0.003 ~ 0.018 kg/(m² · s),故此区域泄漏率数值范围为 0.039 ~ 0.236 kg/s。设置 6 组泄漏率数

值进行对比,分别是0.05 kg/s、0.10 kg/s、0.15 kg/s、0.20 kg/s、0.25 kg/s。

锂电池集装箱火灾热释放速率(Heat Release Rate, HRR)对比图见图2。区域泄漏速率小于0.15 kg/s时,锂电池集装箱起初燃烧猛烈,随后燃烧平稳,热释放速率值降低,区域泄漏率0.05 kg/s、0.10 kg/s、0.15 kg/s的热释放速率最终分别维持在约1.0 MW、1.6 MW、1.9 MW。区域泄漏率高于0.15 kg/s时,锂电池集装箱在模拟的过程中都处于猛烈的状态,热释放速率的整体波动都较大,区域泄漏率0.20 kg/s、0.25 kg/s的热释放速率最高可达42.4 MW、73.3 MW。

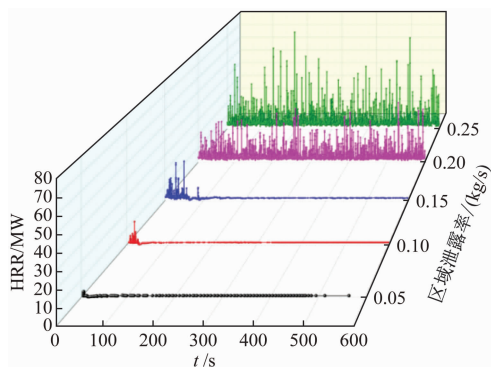


图2 锂电池集装箱火灾热释放速率对比图

Fig. 2 Comparison of fire heat release rate of lithium battery container

目前,缺乏锂电池集装箱热释放速率的试验数据,国内外学者通过经验法的数据对整体热释放速率进行估算。黎可等^[29]对比不同SOC锂离子电池与几种常见燃料的热释放速率,指出100% SOC电池的标准化热释放速率约为2.91 MW/m²。文献[8]收集了截至2020年前十年间的锂电池火灾的数据,总结了热释放速率与锂电池容量的经验关系,不同规模的锂电池燃烧热释放速率见图3。

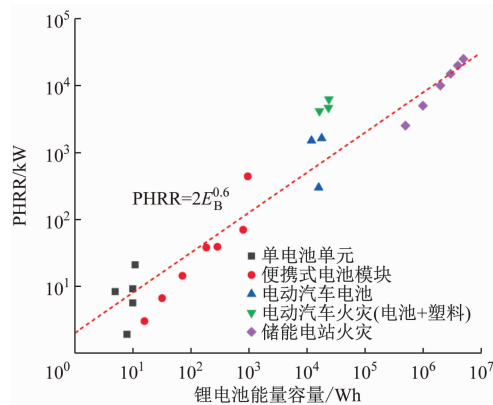


图3 不同规模的锂电池燃烧热释放速率

Fig. 3 Heat release rate of lithium batteries of different sizes

本文选取的锂电池集装箱包含320个电池组,

每个电池组容量11 648 Wh,因此锂电池集装箱容量为3 727 360 Wh,结合热释放速率与锂电池容量关系式,计算得到锂电池集装箱热释放速率为17.53 MW。根据文献[29]提出的100% SOC电池的2.91 MW/m²标准化热释放速率可得锂电池集装箱热释放速率为38.15 MW。考虑锂电池集装箱内可燃物,包括不同类型的塑料(ABS塑料、PVC塑料)等,以最不利情况估算可燃物的热释放速率为0.5 MW/m²^[30]。最后估算锂电池集装箱的热释放速率最小为24.09 MW,最大为44.71 MW。当区域泄漏率为0.15 kg/s和0.20 kg/s时,其热释放速率值符合估算范围,锂电池集装箱燃料充足,燃烧时间长,对比泄漏率为0.15 kg/s和0.20 kg/s的锂电池集装箱的热释放速率,泄漏率为0.20 kg/s符合锂电池集装箱的火灾燃烧特征,本文按照热释放速率最高可达42.4 MW来开展研究。

3 结果讨论

3.1 锂电池集装箱着火位置层数对火灾热流场的影响

3.1.1 锂电池集装箱火灾温度影响分析

通过FLACS软件能输出火场内的最高温度,最高温度能一定程度反映出火场内物体的受损情况。工况1~工况8不同着火集装箱层数下最高温度随时间变化曲线见图4,当着火层从1层增至3层时,火灾最高温度下降,从3层增至7层时,最高温度上升,着火层在6~7层时,最高温度超过1 900 K,而着火层在8层时,最高温度继续下降到较低水平。这种变化与锂电池集装箱上下层空间空气量相关,着火集装箱在1~3层时,随着下方空间增加,下方补入空气增加,烟气量也增加,降低燃烧温度,当着火集装箱超过3层时,火焰越发接近集装箱积载上层开阔空间,火焰卷吸新鲜空气,加剧燃烧,火灾温度由此上升。锂电池集装箱着火层在8层时,下方

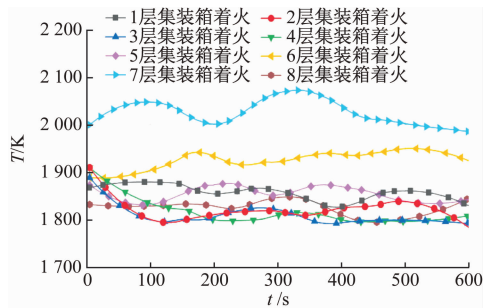


图4 不同着火层下的火灾最高温度随时间变化曲线

Fig. 4 The change curve of the maximum fire temperature under different fire layers with time

空间达到最大,开口部分补充空气相对充足,虽燃烧充分,但集装箱直接接触上方开阔空间,热量不易聚集,温度下降。

截取为 $X = 6.858$ m (正横向通道右侧) 和 $X = 6.058$ m (正横向通道左侧) 的温度切片来观察锂电池集装箱开口处正横向通道两侧不同位置集装箱表面温度情况分别见图 5 和图 6。由图 5 和图 6 可知:

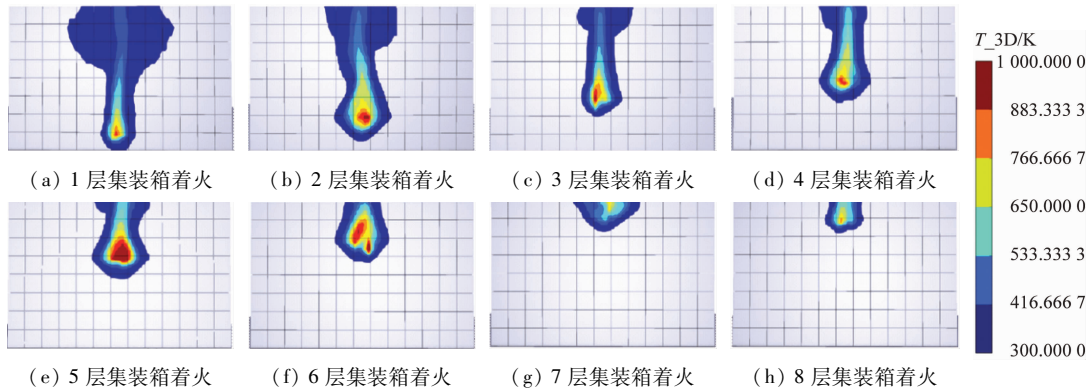


图 5 $X = 6.858$ m 截面不同着火层下温度映射分布

Fig. 5 Temperature mapping distribution at $X = 6.858$ m cross-section under different combustion layers

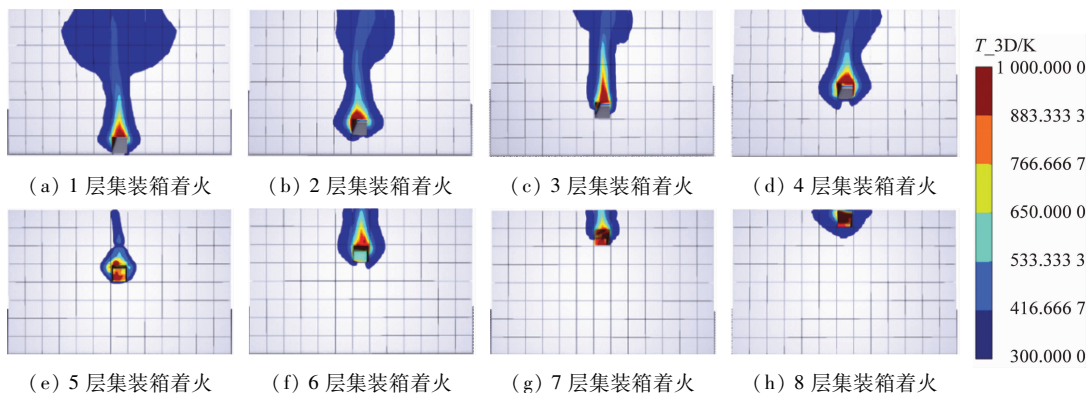


图 6 $X = 6.058$ m 截面不同着火层下温度映射分布

Fig. 6 Temperature mapping distribution at $X = 6.058$ m cross-section under different combustion layers

3.1.2 锂电池集装箱火灾热流密度损害分析

截取 $X = 6.858$ m 和 $X = 6.058$ m 的热流密度切片来观察锂电池集装箱开口处正横向通道两侧集装箱表面的热流密度情况分别见图 7 和图 8。根据设备破坏的热通量准则,当热流密度值大于 25 kW/m^2 时,设备钢结构发生变形,而当热流密度高于 37.5 kW/m^2 时,设备器材将会严重损坏^[31]。对于正横向通道右侧(即 $X = 6.858$ m)的集装箱,当着火层不超过 7 层时,锂电池集装箱上方 1 个箱位的集装箱会严重损坏,当着火层为 8 层时,锂电池集装箱周围的集装箱没有受到损害。对于正横向通道左侧(即 $X = 6.058$ m)的集装箱,当着火层不超过 6 层时,锂电池集装箱上方 1 个箱位的集装箱也会出现变形和严重损害的情况,当着火层为 7 层和 8 层时,锂电池集装箱周围的集装箱没有受到损害。整体上看,

温度映射范围主要在锂电池集装箱上层,而下层可映射 1 个集装箱。由于热浮力的作用,高温烟气向上扩散,与上层集装箱接触而导致箱体温度上升,下层集装箱的温度来自锂电池集装箱的热辐射作用。同时还可发现锂电池集装箱着火层越高,其温度映射范围越小。

当着火层为 7~8 层时,热流密度损害的范围最小。

3.1.3 不同锂电池集装箱着火层高度下正横向通道内温度和热流密度的 CatBoost 回归预测

读取锂电池集装箱开口处正横向通道内监测点监测到的温度和热流密度最大值,利用 CatBoost 算法建立通道内某个空间位置温度 T 、热流密度 Q 的回归预测模型。特征参数设置示意图 9。图 9 中:以着火锂电池集装箱侧面开口中心为原点建立坐标系, Z_{SH} 为着积载的高度, Z_{FH} 为着火锂电池集装箱底层与甲板之间的高度。除此之外,还设置关于风速的特征值 W ,用于预测不同风速下通道内的温度和热流密度。

使用 X 、 Y 、 Z 、 Z_{FH} 作为特征值,输出锂电池集装箱不同着火层高度下通道内某个位置的温度、热流密度预测模型。将模型输出的预测温度、热流密度

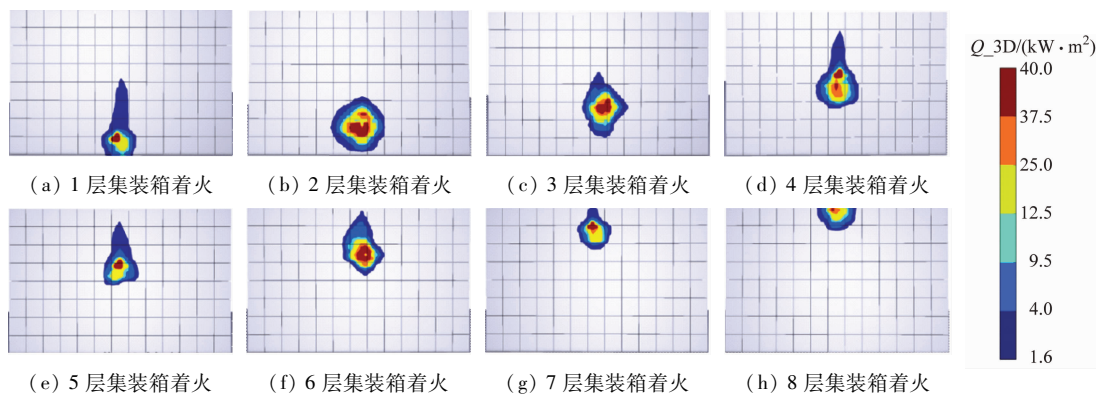
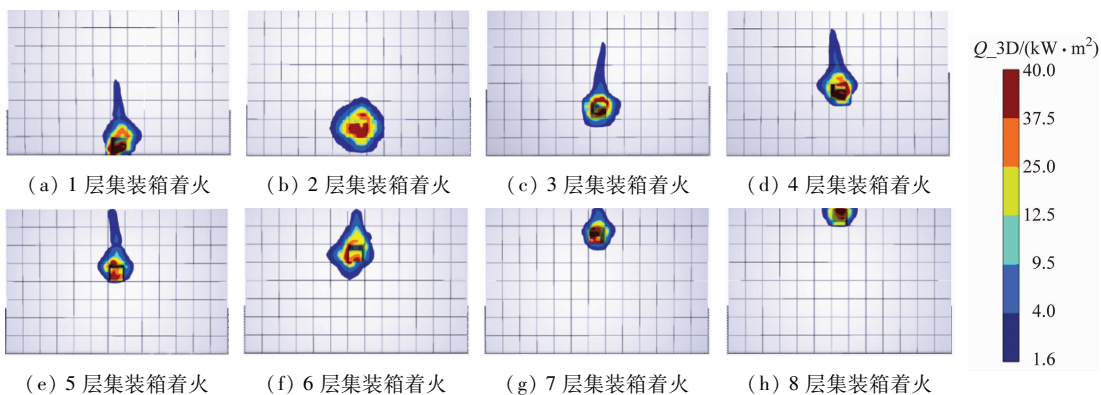
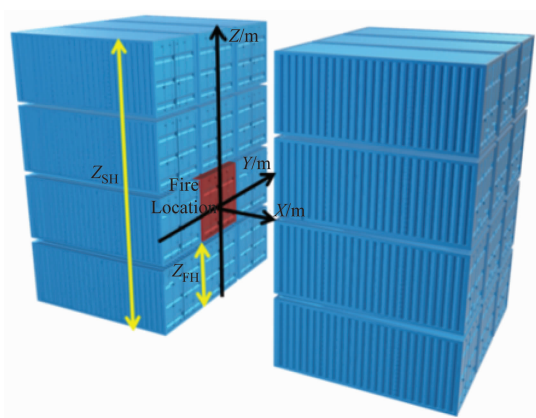
图7 $X=6.858$ m 截面不同着火层下热流密度映射分布Fig. 7 Heat flux mapping distribution at $X=6.858$ m cross-section under different combustion layers图8 $X=6.058$ m 截面不同着火层下热流密度映射分布Fig. 8 Heat flux mapping distribution at $X=6.058$ m cross-section under different combustion layers

图9 特征参数设置示意

Fig. 9 Feature parameter setting diagram

值的与样本进行对比见图10。由图10可知:模型数值与样本数值保持高度的一致性,且温度和热流密度的预测模型 R^2 值分别为0.973和0.979, R^2 值结果越靠近1,模型准确度越高,说明预测模型具有良好的预测性能。

3.2 集装箱积载高度对火灾热流场的影响

3.2.1 锂电池集装箱火灾温度影响分析

火灾最高温度随积载高度的增加先增加后降低。工况1、工况9~工况15不同积载高度下火灾

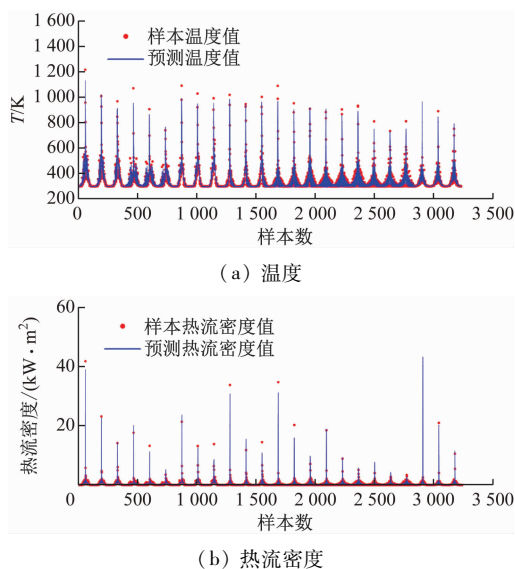


图10 CatBoost 回归预测数据与测点样本数据对比
Fig. 10 Comparison of CatBoost regression prediction data with sample data of test points

最高温度随时间变化曲线见图11。图11中:当集装箱积载高度为1~3层时,底层集装箱发生火灾时温度趋势基本相同;而当集装箱积载高度为4~5层时,火灾温度会增大;在5层集装箱积载时,最高温度超过2100 K;当集装箱积载高度为6~8层时,

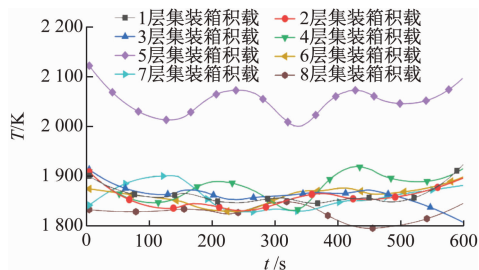


图 11 不同集装箱积载高度下火灾最高温度随时间变化曲线
Fig. 11 Change curve of maximum fire temperature with time under different container loading height

温度下降且维持在 $1\ 800 \sim 1\ 900\ \text{K}$ 内,这是空气流动和火灾热辐射共同造成的。从空气流动性分析,集装箱积载高度较低时,空气流动性较好,热空气和烟气容易散热,底层锂电池集装箱发生火灾时温度不会升高太多。当集装箱积载高度增加时,空气流通性较差,热空气和烟气难以散热,底层锂电池集装箱发生火灾时温度上升较快。从热辐射的角度分析,当集装箱积载高度较低时,火焰和热辐射容易散热,底层集装箱受到的热辐射不会太大。但当集装

箱积载高度增加时,火焰和热辐射难以散热,底层集装箱受到的热辐射会增加,温度也会随之升高。当集装箱积载高度过高时,烟囱效应的压差也越大,气体流通速度加快,火场的温度也会降低。

集装箱表面的温度分布受积载高度的影响。不同集装箱积载高度下温度映射分布分别见图 12 和图 13。由图 12 和图 13 可知:积载高度越高,靠下部分的集装箱火灾温度映射范围越小,上部分的集装箱火灾温度映射范围越大,最后至 8 层集装箱积载时,温度在集装箱上的映射更是显现出类似球拍的形状。这是因为集装箱内部的空气流动原因,当集装箱积载高度较低时,能直接与上层开阔空间接触,气流流动促使温度扩散;而当集装箱积载高度过高时,内部通风不畅,底层集装箱的空气无法有效循环,使底层的氧气含量较高,易于着火燃烧,而高层的集装箱受到气流的影响,空气能更好地流动,使空气均匀分布,火灾温度映射范围更大。

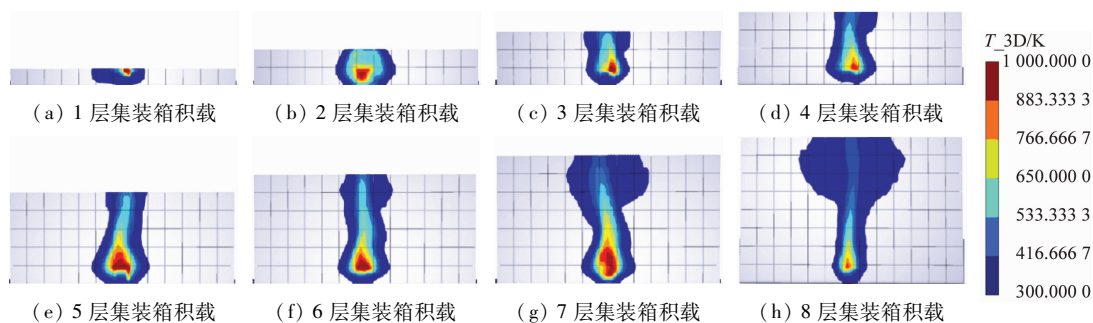


图 12 $X = 6.858\ \text{m}$ 截面不同积载高度下温度映射分布

Fig. 12 Temperature mapping distribution at $X = 6.858\ \text{m}$ cross-section under different container stowage heights

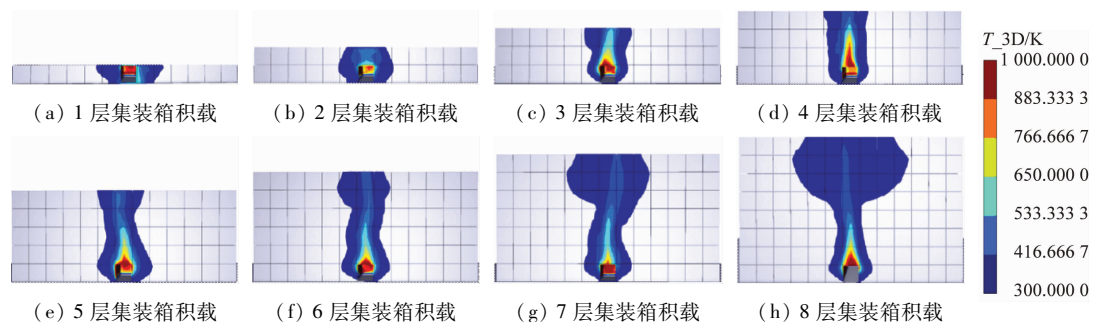


图 13 $X = 6.058\ \text{m}$ 不同集装箱积载高度下温度映射分布

Fig. 13 Temperature mapping distribution at $X = 6.058\ \text{m}$ cross-section under different container stowage heights

3.2.2 锂电池集装箱火灾热流密度损害分析

根据热流密度对集装箱钢结构伤害的判定,不同积载高度下正横向通道两侧锂电池集装箱上层的 1 个箱位的集装箱以及左右两侧的 1 个箱位的集装箱会因为热流密度过高,发生钢结构变形,甚至严重损坏。不同集装箱积载高度下热流密度映射分布分

别见图 14 和图 15。同等条件下,正横向通道右侧(即 $X = 6.858\ \text{m}$)的集装箱热流密度损害程度往往比正横向通道左侧(即 $X = 6.058\ \text{m}$)相对位置要大。然而,当集装箱积载为 4 层时,情况却相反,这种现象可能是因为 4 层集装箱积载时火灾温度较高,火焰直接从开口溢出,且由于气流的作用,贴近

正横向通道左侧的集装箱,热流密度因此较高,而正横向通道右侧集装箱的热流密度更多的是来自热辐

射的作用,因此热流密度较低。

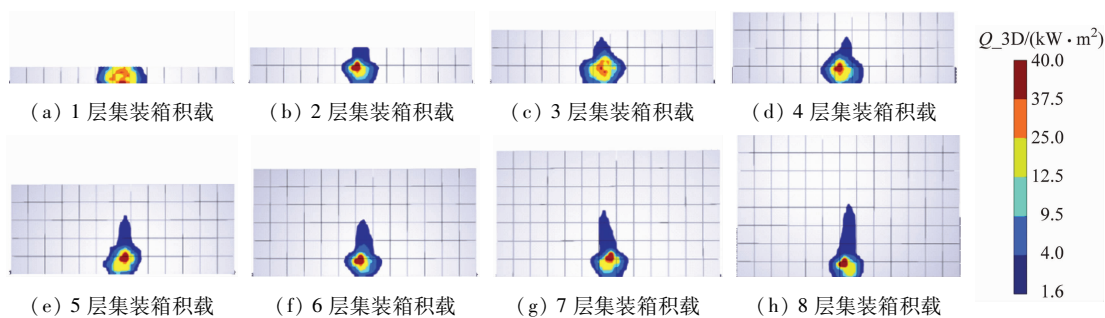


图 14 $X = 6.858$ m 截面不同积载高度下热流密度映射分布

Fig. 14 Heat flux mapping distribution at $X = 6.858$ m cross-section under different container stowed heights

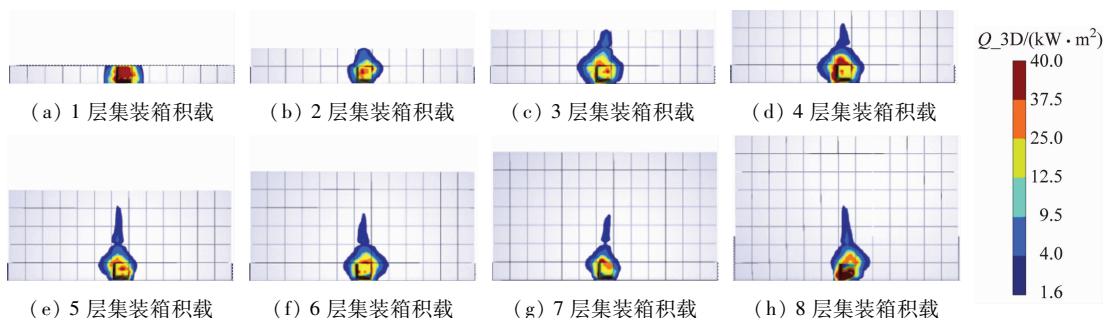


图 15 $X = 6.058$ m 不同集装箱积载高度下热流密度映射分布

Fig. 15 Heat flux mapping distribution at $X = 6.058$ m cross-section under different container stowed heights

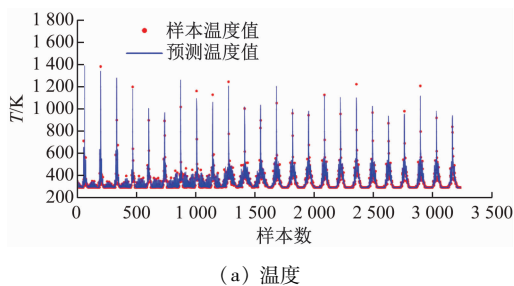
3.2.3 不同集装箱积载高度下通道内温度和热流密度的 CatBoost 回归预测

使用 X 、 Y 、 Z 、 Z_{SH} 作为特征值,输出关于不同集装箱积载高度下的通道内某个位置的温度、热流密度预测模型。将模型输出的预测温度、热流密度值与测点样本数据对比见图 16,模型数值与样本数值相契合,而且温度和热流密度的预测模型 R^2 值分别为 0.993 和 0.992,模型准确度较高。

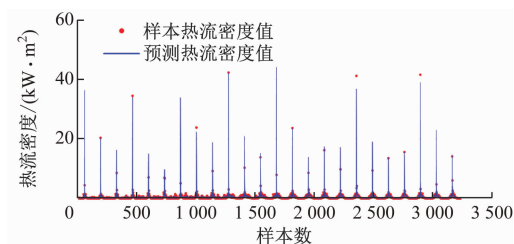
3.3 风速对火灾热流场的影响

3.3.1 锂电池集装箱火灾温度影响分析

火灾最高温度的大小以及波动情况会受风速大小的影响。工况 16 ~ 工况 21 不同风速下最高温度变化情况见图 17。图 17 中:当风速为 1 ~ 4 m/s 时,随着风速增加,火灾最高温度随之降低;当风速为 5 m/s 时,火灾最高温度升高;在风速 6 m/s 时,火灾温度又再次降低。风速对锂电池集装箱火灾最高温度的影响是复杂的。当风速在 1 ~ 4 m/s 范围增加时,风能有助于散热和扩散燃料,从而降低火灾最高温度,但当风速达到 5 m/s 时,火焰卷吸氧气的速率增加,导致火灾最高温度升高,当风速达到 6 m/s 时, O_2 供应过剩并且风能强大,火焰可更快地移动并散热,火灾最高温度再次降低。风速为 1 ~ 4 m/s,锂电池集装箱火灾稳定燃烧时,火灾最高温度随时



(a) 温度



(b) 热流密度

图 16 CatBoost 回归预测数据与测点样本数据对比

Fig. 16 Comparison of CatBoost regression prediction data with sample data of test points

间变化曲线有较强的波动,而当风速为 5 m/s、6 m/s,火灾稳定燃烧时最高温度一直趋于平稳,分别保持在 1 740 K 和约 1 640 K。

风会影响高温的蔓延方向和分布范围。不同风速下温度映射分布分别见图 18 和图 19。由图 18 和图 19 可知:随着风速的增大,温度影响面积也随

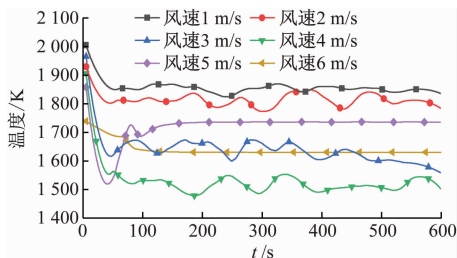
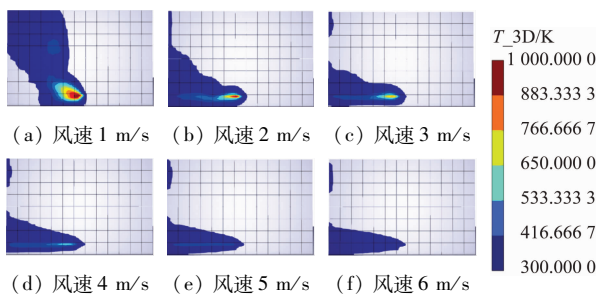
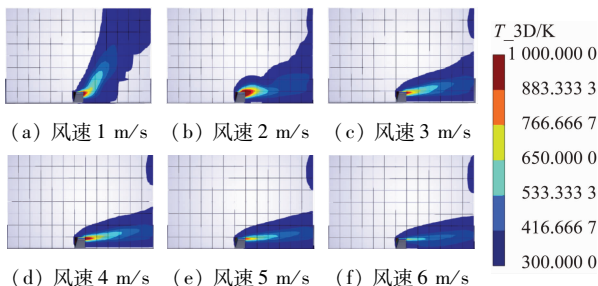


图 17 不同风速下火灾最高温度随时间变化曲线

Fig. 17 Change curve of maximum fire temperature with time under different wind speed

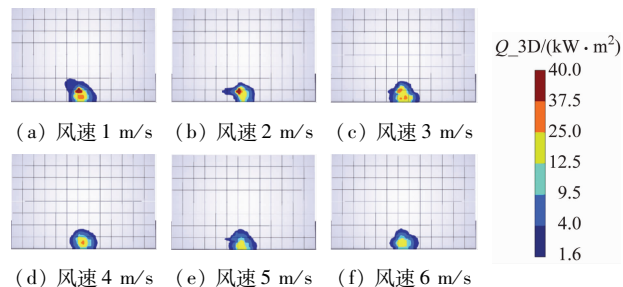
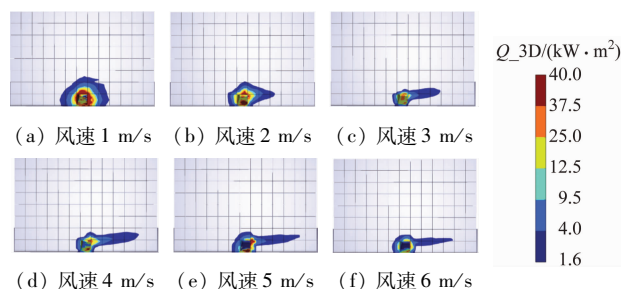
图 18 $X=6.858$ m 截面不同风速下温度映射分布Fig. 18 Temperature mapping distribution at $X=6.858$ m cross-section under different wind speed图 19 $X=6.058$ m 不同风速下温度映射分布Fig. 19 Temperature mapping distribution at $X=6.058$ m cross-section under different wind speeds

之减小。当风速较小时,温度映射范围会向上发展,风速不断增加,高温区域角度倾斜会越来越来大,直至形成近似水平蔓延的温度映射。随着风速的增大,空气会更快地流动,从而将热量带走,使温度影响范围减小。当风速较小时,温度受到的干扰较少,可向上扩散。但当风速继续增加时,空气流动的方向和速度会对温度的传播产生影响,使温度影响的范围开始倾斜并逐渐向水平蔓延,这是因为风速越大,空气流动的剪切力也越大,使温度分布沿着流线方向被拉长,形成近似水平的温度映射。

3.3.2 锂电池集装箱火灾热流密度损害分析

不同风速下热流密度映射分布分别见图 20 和图 21。根据热流密度对集装箱钢结构伤害的判定,在正横向通道右侧(即 $X=6.858$ m),当风速为 1 m/s、2 m/s 时,通道内锂电池集装箱正对位置的集装箱左

侧、上侧 1 个集装箱被严重损坏,当风速为 3 m/s 时,上述位置的集装箱钢结构发生变形。在正横向通道左侧(即 $X=6.058$ m),当风速为 1 m/s 时,锂电池集装箱左右两侧、上侧和右上侧各 1 个箱位集装箱的钢结构严重损坏。风速为 2 m/s 时,锂电池集装箱上侧和右侧的 1 个箱位的集装箱钢结构发生严重损坏。当风速为 3 m/s、4 m/s 时,没有出现损伤的情况。风速为 5 m/s 时,火灾温度上升,锂电池集装箱的右侧和右上侧 1 个箱位集装箱严重损坏。

图 20 $X=6.858$ m 截面不同风速下热流密度映射分布Fig. 20 Heat flux mapping distribution at $X=6.858$ m cross-section under different wind speeds图 21 $X=6.058$ m 不同风速下热流密度映射分布Fig. 21 Heat flux mapping distribution at $X=6.058$ m cross-section under different wind speeds

3.3.3 不同风速下通道内温度和热流密度的 Cat-Boost 回归预测

使用 X, Y, Z, W 作为特征值,其中 W 为风速值,输出关于不同风速下的通道内某个位置的温度、热流密度预测模型。将模型输出数值与样本对比见图 22,温度和热流密度的预测模型 R^2 值分别为 0.992 和 0.999,模型具有较高准确度。

4 结束语

1) 锂电池集装箱的上下空间补充的空气量与火势温度变化密切相关。下方空间补入的空气增多,温度会降低,上层空间补充的空气增加时,火焰能吸收更多 O_2 ,加剧燃烧,温度上升;当着火层为 7~8 层时,高温和热流密度的损害范围最小,因此将锂电池集装箱放置到 7 层或 8 层有利于降低损害。

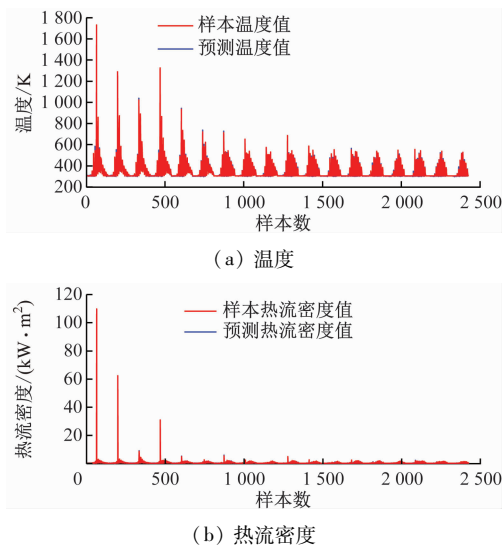


图22 CatBoost 回归预测数据与测点数据样本对比

Fig. 22 Comparison of CatBoost regression prediction data with test point data samples

2) 当集装箱积载高度在1~3层时,空气流动性较好,散热容易,火灾最高温度较低,积载高度为4~5层时,空气流通性变差,火灾温度较高,高温和热流密度的损害范围较大。集装箱积载高度为6~8层,烟囱效应更加明显,空气流通改善,又降低了火灾温度;集装箱积载高度为1~2层时,除锂电池集装箱外,其他集装箱不会受到高温损坏,建议避免4层和5层的积载。

3) 当风速在1~4 m/s 范围增加时,风有助于散热,从而降低火灾最高温度,而且火灾最高温度随时间变化曲线有较强的波动,但当风速达5 m/s 时,火焰卷吸 O₂ 的速率增加,导致火灾最高温度升高,当风速达到6 m/s 时,O₂ 供应过剩并且风能强大,火焰可更快地移动并散热,火灾最高温度再次降低;随着风速的增大,高温和热流密度损害面积也随之减小。

4) 使用 CatBoost 算法建立通道内某个位置的温度、热流密度预测模型,模型具有较高准确度,预测数据与样本数据之间没有显著性差异;模型可用于预测通道内某个位置的温度和热流密度,通过该模型能发现存在过热点,进而采取措施加以控制。

参 考 文 献

[1] QYRESAERCH. 中国集装箱式 ESS(储能系统)市场规模及上下游分析(简报)[R]. 北京:北京恒州博智国际信息咨询有限公司,2022.
QYRESAERCH. Market size and upstream and downstream analysis of containerized ESS (Energy storage System) in China (Presentation) [R]. Beijing: Q Research, 2022(in Chinese)

[2] 窦占祥,徐兴芳,郭玉梅,等. 港口集装箱火灾危险性分析[J]. 水上消防,2008(5): 24-26.
DOU Z X, XU X F, GUO Y M, et al. Port container fire risk analysis [J]. Water Fire Protection, 2008(5): 24-26. (in Chinese)

[3] MAO B, LIU C, YANG K, et al. Thermal runaway and fire behaviors of a 300 Ah lithium-ion battery with LiFePO₄ as cathode [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 1-14.

[4] WANG Z, OUYANG D, CHEN M, et al. Fire behavior of lithium-ion battery with different states of charge induced by high incident heat fluxes [J]. Journal of Thermal Analysis Calorimetry, 2018, 136: 2239-2247.

[5] XIE S, SUN J, CHEN X, et al. Thermal runaway behavior of lithium on batteries in different charging states under low pressure [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 45(4): 5795-5805.

[6] HE X, RESTUCCIA F, ZHANG Y, et al. Experimental study of self-heating ignition of lithium-ion batteries during storage: effect of the number of cells [J]. Fire Technology, 2020, 56(6): 2649-2669.

[7] 高明泽,张良,张得胜,等. 三元动力锂离子电池组热失控火灾危险性[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(12): 1786-1789.
GAO M Z, ZHANG L, ZHANG D S, et al. Thermal runaway fire risk of ternary power lithium-ion battery pack [J]. Fire Control Science and Technology, 2019, 38(12):1786-1789. (in Chinese)

[8] SUN P, BISSCHOP R, NIU H, et al. A review of battery fires in electric vehicles[J]. Fire Technology, 2020, 56(4): 1361-410.

[9] PRYOR R W. Multiphysics modeling using comsol: a first principles approach [J]. Jones Bartlett Publishers, 2012, 52(2): 136-142.

[10] ZHAO R, LIU J, GU J. Simulation and experimental study on lithium ion battery short circuit [J]. Applied Energy, 2016, 173: 29-39.

[11] 张青松,曹文杰,罗星娜,等. 基于多米诺效应的锂离子电池热释放速率分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5): 6.
ZHANG Q S, CAO W J, LUO X N, et al. Analysis method of heat release rate of lithium-ion battery based on domino effect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(5): 902-907. (in Chinese)

[12] 徐伊宁. 纯电动汽车方形磷酸铁锂电池组热管理系统研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
XU Y N. Research on thermal management system of square lithium iron phosphate battery pack for pure

- electric vehicle[D]. Xi'an: Changan University, 2019.
- [13] 陈吉清, 洗君琳, 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, 2021, 35(9): 25-34.
CHEN J Q, XIAN J L, LAN F C, et al. Simulation of combustion process of lithium battery [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2021, 35(9): 25-34. (in Chinese)
- [14] 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 J, JIA Z Z, QIN P, et al. Simulation of thermal runaway gas diffusion in LiFePO₄ battery module [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 185-192. (in Chinese)
- [15] 潘鸣宇, 及洪泉, 邱明泉, 等. 电动汽车锂离子电池组火灾数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(6): 104-109.
PAN Y M, JI H Q, QIU M Q, et al. Numerical simulation of fire in lithium-ion battery packs of electric vehicles [J]. China Safety Science and Technology, 2019, 16(6): 104-109. (in Chinese)
- [16] 牛志远, 金阳, 孙磊, 等. 预制舱式磷酸铁锂电池储能电站燃爆事故模拟及安全防护仿真研究[J]. 高压技术, 2022, 11(1): 185-192.
NIU Z Y, JIN Y, SUN L, et al. Safety protection simulation research and fire explosion accident simulation of prefabricated compartment lithium iron phosphate energy storage power station [J]. High Voltage Technology, 2022, 11(1): 185-192. (in Chinese)
- [17] 程志翔, 曹伟, 户波, 等. 储能用大容量磷酸铁锂电池热失控行为及燃爆传播特性研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 923-933.
CHENG Z X, CAO W, HU B, et al. Thermal runaway and explosion propagation characteristics of large lithium iron phosphate battery for energy storage station [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(3): 1923-933. (in Chinese)
- [18] 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 K Y, TAO Y Y, LIANG W, 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. (in Chinese)
- [19] LIU L, LIU J, ZHOU Q, et al. An SVR-based machine learning model depicting the propagation of gas explosion disaster hazards[J]. Science and Engineering, 2021, 46: 10205-10216.
- [20] 于佳航. 基于机器学习的双燃料动力船舶机舱燃爆事故后果预测方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
YU J H. Prediction method of engine room explosion accident for dual-fuel powered ship based on machine learning [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [21] 高秀芝. 基于 CatBoost 的电力物联网运行风险预测方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
GAO X Z. Research on operational risk prediction method of power internet of things based on CatBoost Northeast [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2022. (in Chinese)
- [22] 中国船级社. 国内航行集装箱船载运包装危险货物消防和积载指南: GD21—2022 [S]. 北京: 中国船级社 2022. 10.
China Classification Society. Guidelines for the fire safety and stowage of dangerous goods on domestic container ships; GD21—2022 [S]. Beijing: China Classification Society, 2022; 10. (in Chinese)
- [23] 孙宜听, 宗梦然, 黄强, 等. 软包和硬壳磷酸铁锂单体电池过充热传播研究[J]. 江苏电机工程, 2020, 39(6): 191-198.
SUN Y T, ZONG M R, HUANG Q, et al. Study on overcharge heat propagation of soft-pack and hard-shell lithium iron phosphate monocyte batteries [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 3(6): 191-198. (in Chinese)
- [24] 郑开汇, 汪箭, 陈钦佩, 等. 压力及 EC/PC/EMC 质量比对电解液燃烧特性的影响研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(6): 793-797.
ZHENG K H, WANG J, CHEN Q P, et al. Study on the impact of pressure and EC/PC/EMC mass ratio on the electrolyte combustion characteristics [J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(6): 793-797. (in Chinese)
- [25] 汪东东. 基于锥形量热计的锂离子电池电解液的火灾危险性研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019.
WANG D D. Study on fire risk of lithium ion battery electrolyte based on cone calorimeter [D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] HUANG Q, CHEN H, ZHENG K, et al. Comparison of oxygen consumption calorimetry and thermochemistry theory on quantitative analysis of electrolyte combustion characteristics[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26: 1-14.

- on eccentric expansion [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(3): 1-9.
- [12] SZLAPCZYNSKI R. Evolutionary planning of safe ship tracks in restricted visibility [J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(1): 39-51.
- [13] 郝增辉. 北极航线航行经济性分析与运输分担率预测[D]. 大连:大连海事大学, 2017.
HAO Z H. Economic analysis and transportation sharing rate prediction of Arctic route navigation[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [14] 柳成志, 冀国盛, 许延浪. 地球科学概论[M]. 第二版. 北京:石油工业出版社, 2010.
LIU C Z, JI G S, XU Y L. An outline of earth sciences [M]. Second Edition. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 吴金龙, 代广树, 黄路华. 航海学[M]. 大连:大连海事大学出版社, 2017.
WU J L, DAI G S, HUANG L H. Navigation [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2017. (in Chinese)
- [16] GOODWIN E M. A statistical study of ship domains [J]. *The Journal of Navigation*, 1975, 28(3): 328-344.
- [17] 朱天鹏, 姚玉南, 但家梭, 等. 基于安全会遇距离模型的智能船舶航行行为可靠性评估[J]. *中国修船*, 2021, 34(5): 25-29.
- ZHU T P, YAO Y N, DAN J S, et al. Reliability assessment of intelligent ship navigation behavior based on safe encounter distance mode[J]. *China Shiprepair*, 2021, 34(5): 25-29. (in Chinese)
- [18] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [19] 段建民, 陈强龙. 基于改进人工势场-遗传算法的路径规划算法研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(3): 19-24.
DUAN J L, CHEN Q L. Research on path planning algorithm based on improved artificial potential field-genetic algorithm [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(3): 19-24. (in Chinese)
- [20] 宁君, 马昊冉, 李铁山. 基于改进人工势场法的船舶路径规划与跟踪控制 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(10): 1414-23.
NING J, MA H R, LI T S. Underactuated surface vessel path planning and following control based on an improved artificial potential field method [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(10): 1414-23. (in Chinese)
- [21] MICHALEWICZ Z, SCHOENAUER M. Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems [J]. *Evolutionary computation*, 1996, 4(1): 1-32.
- Technology, 2021, 10(3): 1177-1186. (in Chinese)
- [30] 夏继豪. 纯电动汽车的火灾特性及热释放速率探讨 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1028-1032.
XIA J H. Discussion on fire characteristics and heat release rate of blade electric vehicles [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 1028-1032. (in Chinese)
- [31] 石军花, 朱梅, 李进, 等. 化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(增刊1): 79-83.
SHI J H, ZHU M, LI J, et al. Simulation study on thermal radiation model of storage tank fire in chemical industry [J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32 (Suppl. 1): 79-83. (in Chinese)

(上接第 29 页)

- [27] FU Y, LU S, SHI L. Combustion characteristics of electrolyte pool fires for lithium ion batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, 163(9): A2022-A2028.
- [28] CHEN M, MEI J, LIU H. Comparative experimental study on combustion characteristics of typical combustible components for lithium-ion battery [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(1): 218-228.
- [29] 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 K, MU J Y, JIN Y, et al. Fire risk of lithium iron phosphate battery [J]. *Energy Storage Science and*