

储能测试与评价



锂离子电池储能集装箱爆炸危害数值模拟

陈 满¹, 程志翔², 赵春朋², 彭 鹏¹, 雷旗开¹, 金凯强², 王青松²

(¹南方电网调峰调频发电有限公司储能科研院, 广东 广州 510000; ²中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 随着电化学储能的规模化发展, 以锂离子电池为能量载体的电化学储能电站火灾燃爆事故时有发生, 成为制约其安全健康发展的主要瓶颈。储能集装箱本身的安全措施及摆放间距对于燃爆的发展及扩散有着重要的影响。本工作通过改变点火位置和泄压板强度来探究不同的冲击波压力和火焰传播速度变化对储能集装箱安全的影响, 发现当着火点位于近进风百叶窗一侧时, 冲击波压力升高, 火焰传播速度增大, 分别可达 41.28 kPa 和 557.0 m/s。泄压板对储能集装箱安全设计至关重要, 且仅在进风百叶窗处设置泄压板且将开启压力设置为 30 kPa 时, 计算区域内已发展为爆轰, 对周边安全造成较为严重的影响。此外, 研究结果表明, 单个储能舱发生燃爆后, 在短边间距达到 10 m 时将会对周边造成的影响最小。该研究可为储能电站锂离子电池火灾事故预警、集装箱结构和防爆设计提供参考。

关键词: 锂离子电池; 储能; 集装箱; 爆炸危害; 数值模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0265

中图分类号: TM 911

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 08-2594-12

Numerical simulation study on explosion hazards of lithium-ion battery energy storage containers

CHEN Man¹, CHENG Zhixiang², ZHAO Chunpeng², PENG Peng¹, LEI Qikai¹,
JIN Kaiqiang², WANG Qingsong²

(¹Energy Storage Research Institute, China Southern Power Grid Power Generation Co., Ltd, Guangzhou 510000, Guangdong, China; ²State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: With the continuous application scale expansion of electrochemical energy storage systems, fire and explosion accidents often occur in electrochemical energy storage power plants that use lithium-ion batteries. This has become the main bottleneck restricting their safe and healthy development. The safety measures and placement spacing of energy storage containers have an essential impact on combustion and explosion development and diffusion. Herein, the impact of changes in shock wave pressure and flame propagation speed on the safety of energy storage containers was revealed by changing the ignition position and pressure relief plate strength. It was found that when the ignition point was located on the side near the inlet louver, the shock wave pressure and flame propagation speed increased,

收稿日期: 2023-04-25; 修改稿日期: 2023-05-09。

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2021YFB2402004), 中科院青促会项目 (Y201768)。

第一作者: 陈满 (1973—), 男, 硕士, 研究方向为锂离子电池储能安全, E-mail: 13926159826@139.com; 通讯作者: 王青松, 研究员, 研究方向为锂离子电池火灾安全, E-mail: pinew@ustc.edu.cn。

引用本文: 陈满, 程志翔, 赵春朋, 等. 锂离子电池储能集装箱爆炸危害数值模拟[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2594-2605.

Citation: CHEN Man, CHENG Zhixiang, ZHAO Chunpeng, et al. Numerical simulation study on explosion hazards of lithium-ion battery energy storage containers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(8): 2594-2605.

reaching 41.28 kPa and 557.0 m/s, respectively. It was also found that the pressure relief plate was crucial for safety design. When the pressure relief plate was only set at the inlet louver and the opening pressure was set to 30 kPa, the calculation area developed into detonation, causing a severe impact on surrounding safety. In addition, the results indicated that after a single energy storage tank underwent combustion and explosion, when the distance between the short sides reached 10 m, the impact on the surrounding area would be minimal. This study can provide a reference for fire accident warnings, container structure, and explosion-proof design of lithium-ion batteries in energy storage power plants.

Keywords: lithium ion battery; energy storage; container; explosion hazards; numerical simulation

锂离子电池具有能量密度高、循环寿命长、无记忆效应等优势, 经过30年的发展, 已占据了全球二次电池市场的绝对领先地位。目前, 锂离子电池被广泛应用在消费电子产品、新能源汽车等交通运输领域、航天领域以及电化学储能领域^[1-2]。锂离子电池具有多种型号, 以18650、21700、26650等型号为主的圆柱形电池规格较为统一, 方形硬壳电池以及软包电池规格则较为灵活。小容量电池多为圆柱型电池, 大容量电池以软包和方形电池为主。锂离子电池可以单独使用, 也可以将电芯组合为模组、电池簇等电池阵列来满足不同的使用需求。伴随着锂离子电池产业的发展, 废旧锂离子电池的回收与二次利用, 也正在成为锂电池产业新的增长点^[3]。

锂离子电池储能产业则是一个新兴行业, 在电动汽车快速发展的浪潮带动下, 电化学储能特别是锂离子电池储能才进入了发展“快车道”。表1列出了一些国内外储能电站事故的不完全统计, 其中日本和比利时各1例, 美国2例, 中国4例, 其他均来自韩国自2017年8月至2021年4月间发生的储能电站事故。尽管事故量少, 但是储能电站事故往往会造成巨大的经济损失、严重的人员伤亡和恶劣的社会影响。

毋庸置疑, 安全是决定电化学储能产业能否良性有序发展的关键要素。牛志远等^[4]通过FLACS软件模拟计算了气化电解液被点燃后的燃烧率、高温和超压, 并探究了不同泄压措施下爆炸的特性参数变化。程志翔等^[5]在研究了280 Ah磷酸铁锂电池的产气基础上, 在液冷舱内进行了不同泄压措施对燃爆传播的影响模拟。崔潇丹等^[6]综合性地阐述了电池产气组分和产气来源反应, 并针对性地分析了气

体对应的爆炸超压等燃爆特性。郭超超等^[8]对气体组分中的爆炸极限的测定提供了思路。此外还有许多研究探究了电池热失控产气扩散的规律及产气的燃爆特性^[9-10], 但目前对于储能舱安全设计及摆放间距的研究和标准还较为匮乏, 对于燃爆发生后的抑制、泄放和传播等过程安全问题仍有待研究。

本工作对20吨(1吨=30.48 cm)ISO标准储能集装箱以1:1建立物理模型, 采用FLACS软件, 设置不同点火位置以及不同的泄压板参数条件, 构建储能电站模型, 探究爆炸对于周边环境的影响, 研究结果可为储能电站锂离子电池火灾事故的预警和安全设计提供指导。

1 FLACS模拟设置

1.1 储能集装箱模型建立

对20吨ISO标准储能集装箱以1:1建立物理模型, 如图1所示。该储能集装箱一侧为对开门, 一侧为单开逃生门, 对开门闭锁, 门上各有一个0.64 m×0.88 m的进风百叶窗。逃生门尺寸为1 m×2 m。网格方面采用了0.04 m网格作为最小网格长度^[11], 着火集装箱作为核心计算区域采用0.04 m的均匀网格, 其他计算区域进行拉伸处理, 详细尺寸见表2。

集装箱内两侧对称布置有电池架, 电池架中间通道宽1 m, 后壁距离集装箱内壁0.12 m, 两侧的电池架与集装箱内壁的距离为0.32 m, 每个电池架布置10个电池模组, 电池架尺寸为0.54 m×0.56 m×2.24 m(长×宽×高), 模组上下间隔0.04 m, 建立好的集装箱模型如图1(b)所示, 为了简化模型设置, 集装箱内没有考虑PCS(储能变流器)、EMS(能量管理系统)、空调和气体灭火系统等设备柜/舱。

表1 自2011年9月至2021年4月储能电站事故不完全统计^[4]

Table 1 Incomplete statistics of accidents at energy storage power stations from September 2011 to April 2021

序号	地点	容量/MWh	用途	储能技术	建筑形态	时间	投运时间	事故类型
1	日本	—	需求管理	钠硫电池	组装式	2011.09	—	充电中
2	美国	20	风电	铅酸电池	集装箱	2012.08	6个月	充电中
3	美国亚利桑那	2	需求管理	三元	集装箱	2019.04	24个月	使用中
4	比利时	—	—	锂电池	集装箱	2017.11	—	—
5	中国山西	—	调频	三元	集装箱	2017.05	—	充电后等待中
6	中国江苏	—	用户侧	磷酸铁锂	集装箱	2018.08	建设中	过充电
7	中国北京	2	用户侧	锂电池	集装箱	2019.05	20个月	运行维护中
8	中国北京	20	光储充	磷酸铁锂	厂房式/混凝土	2021.04	—	安装调试
9	韩国全北高敞	1.46	风电	海岸/三元	集装箱	2017.08	—	安装中(保管)
10	韩国庆北景山	8.6	调频	山地/三元	组件式面板	2018.06	22个月	修理调查中
11	韩国全南英岩	14	风电	山地/三元	组件式面板	2018.06	29个月	修理调查中
12	韩国全南群山	18.96	太阳能	海岸/三元	组件式面板	2018.06	6个月	充电后等待中
13	韩国全南海南	2.99	太阳能	海岸/三元	组件式面板	2018.07	7个月	充电后等待中
14	韩国全南居昌	9.7	风电	山地/三元	组件式面板	2018.07	19个月	充电后等待中
15	韩国世宗	18	需求响应	工厂/三元	组件式面板	2018.07	—	安装中(施工)
16	韩国忠北荣洞	5.989	太阳能	山地/三元	组件式面板	2018.09	8个月	充电后等待中
17	韩国忠南泰安	6	太阳能	海岸/三元	组件式面板	2018.09	—	安装中(施工)
18	韩国济州	0.18	太阳能	商圈/三元	混凝土	2018.09	48个月	充电中
19	韩国京畿道	17.7	调频	工厂/三元	集装箱	2018.10	31个月	修理检查中
20	韩国庆北英州	3.66	太阳能	山地/三元	组件式面板	2018.11	9个月	充电后等待中
21	韩国忠南天安	1.22	太阳能	山地/三元	加式面板	2018.11	11个月	充电后等待中
22	韩国忠北门庆	4.16	太阳能	山地/三元	组件式面板	2018.11	11个月	充电后等待中
23	韩国庆南巨匠	1.331	太阳能	山地/三元	组件式面板	2018.11	7个月	充电后等待中
24	韩国忠北堤川	9.316	需求响应	山地/三元	组件式面板	2018.12	12个月	充电后等待中
25	韩国江源	2.662	太阳能	山地/三元	组件式面板	2018.12	12个月	充电后等待中
26	韩国庆南梁山	3.289	需求响应	工厂/三元	组件式面板	2019.01	10个月	充电后等待中
27	韩国全南莞岛	5.22	太阳能	山地/三元	组件式面板	2019.01	14个月	充电中
28	韩国全北长寿	2.496	太阳能	山地/三元	集装箱	2019.01	9个月	充电后等待中
29	韩国蔚山	46.757	需求响应	工厂/三元	混凝土	2019.01	7个月	充电后等待中
30	韩国庆北七谷	3.66	太阳能	山地/三元	组件式面板	2019.05	27个月	充电后等待中
31	韩国全北长寿	1.022	太阳能	山地/三元	组件式面板	2019.05	12个月	充电后等待中
32	韩国忠南	—	太阳能	三元	集装箱	2021.04	—	—

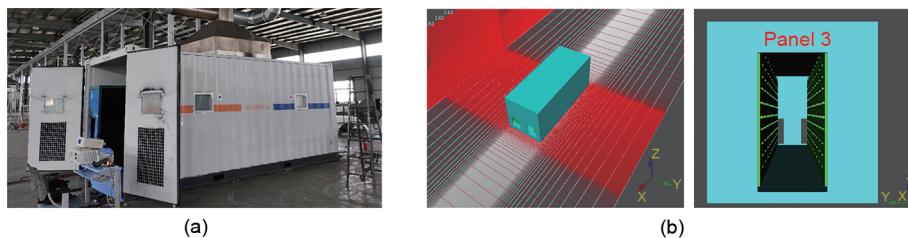


图1 模型建立参考图 (a) 实际储能舱图; (b) FLACS 中模型图

Fig. 1 Model establishment reference diagram (a) the actual energy storage silo diagram; (b) the model diagram in FLACS

Skjold 等^[11]在进行氢气泄漏与爆炸模拟中, 使用了同标准的 20 呎集装箱, 并在集装箱顶部设置 6 组 1 m^2 泄压板, 泄压板开启压力(10 ± 25) kPa,

密度 6.8 kg/m^2 。本工作中在进风口百叶窗处设置了泄压板, 类型为爆破式(popout), 开启压力 3 kPa , 逃生门处泄压板的开启压力设置为 3 kPa ,

类型为铰链式(hinged)。泄压板的密度均设定为10 kg/m²。图2中给出了模型中在进风百叶窗处设置的两个泄压板(Panel 1和Panel 2), 逃生门处泄压板编号为Panel 3, 见图1。泄压口的位置和大小见表3。

表2 储能集装箱建模尺寸

Table 2 Modeling dimensions of energy storage containers

项目	长/m	宽/m	高/m
外部尺寸	6.04	2.44	2.60
内部尺寸	5.96	2.36	2.40

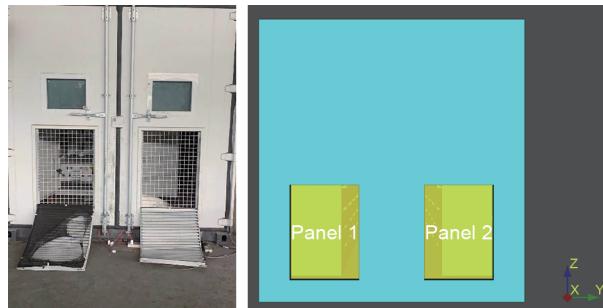
图2 被破坏的进风百叶窗和模型中的泄压板
(Panel 1和Panel 2)

Fig. 2 Damaged intake louvers and pressure relief plates in the model (Panel 1 and Panel 2)

表3 泄压口大小和位置

Table 3 Pressure relief port size and location

项目	尺寸(宽×高)/m	左下角坐标点/m
Panel 1	0.64×0.88	0.28×0.04
Panel 2	0.64×0.88	1.52×0.04
Panel 3	1×2	-0.16×0.72

为模拟最危险状态, 假设可燃混合气均匀分布且充满储能集装箱的整个空间, 混合气体当量比取1.05。FLACS软件中当量比的计算方法如式(1)所示。

$$ER = \theta = \frac{F/O}{(F/O)_{\text{stich}}} = \frac{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{oxygen}})_{\text{actual}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{oxygen}})_{\text{stoichiometric}}} = \frac{(V_{\text{fuel}}/V_{\text{oxygen}})_{\text{actual}}}{(V_{\text{fuel}}/V_{\text{oxygen}})_{\text{stoichiometric}}} \quad (1)$$

式中, F/O为实际的燃料氧气比, (F/O)_{stich}为理论状态下燃烧氧气比。在模型中, 集装箱中的可燃混合气云体积约为21.73 m³, 而依据Koch等^[12]的研究, 选取气体成分及体积分数分别为CH₄ 1.96%, C₂H₂ 0.06%, C₂H₄ 0.98%, C₂H₆ 0.11%, C₃H₆ 0.05%, H₂ 6.28%, CO 10.97%, CO₂ 5.66%, O₂ 15.49%, N₂ 58.44%。

1.2 数学模型建立

受限空间中的气体爆炸本质上是一个快速、剧烈的燃烧反应过程, 气体爆炸的动力学参数可以利用一组即质量守恒、能量守恒、动量守恒和爆炸过程中可燃气体的质量分数或者化学组分平衡方程来进行求解^[13-15]。FLACS软件中对典型气体动力学计算的控制方程总结如下:

理想气体状态方程:

$$PW = \rho RT \quad (2)$$

式中, P 是流体压力, Pa; W 是气体的摩尔质量; ρ 是气体密度, kg/m³; R 是理想气体状态常数, 8.314 J/(mol·K); T 是温度。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3)$$

式中, t 是流动时间, s; u_j 是 j 方向上的空间张量, m/s; x_j 是 j 方向上的张量。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中, P 是流体压力, Pa; τ_{ij} 是黏性应力的张量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j E) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_E \frac{\partial E}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

式中, E 是能量, J; Γ_E 是有效扩散系数。

燃烧反应过程中, 燃料与氧化剂进行有限速率的单步不可逆反应, 通过求解可燃气体的质量分数和混合分数可以确定这一过程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_{\text{fu}}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j m_{\text{fu}}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (J_{\text{fu},j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + R_{\text{fu}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho f) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j f) = -\frac{\partial J_{f,j}}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中, m_{fu} 是可燃气体的质量分数; f 是混合分数; $J_{f,j}$ 和 $J_{\text{fu},j}$ 是 x_j 方向的扩散通量; R_{fu} 是可燃气体的平均燃烧速率, m³/s; ε 是湍流耗散率。

可燃气体的燃烧火焰在传播过程中, 会以湍流方式传播, 在气体爆炸过程中, 火焰的湍流传播可以通过 $k-\varepsilon$ 模型来描述, 其中 k 是湍流动能, ε 是湍流耗散率。

湍流动能方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon; \quad \Gamma_k = \frac{u_{\text{eff}}}{\sigma_k} \quad (8)$$

式中, k 是湍流动能, J; ε 是湍流耗散率; u_{eff}

是有效湍流黏度; σ_k 是动量通量。

湍流动能耗散率方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}; \quad \Gamma_\varepsilon = \frac{U_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \quad (9)$$

$$\tau_{ij} = u_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho k + u_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (10)$$

式中, u 是沿不同方向的速度矢量, m/s; u_t 是湍流黏度, m^2/s ; δ_{ij} 是克罗内克积; C_1 是第一气体常量, 取 1.44; C_2 是第二气体常量, 取 1.79。

在 FLACS 软件中还对上述方程使用 SIMPLE 算法(simple interface flame)进行了修正, 以正确计算反应过程中的冲击波压力和流量密度。在计算过程中, 得出的输出值是修正值和假设值的和, 可以用压力修正函数来表示, 下面以速度为例给出了计算方程^[1]:

$$P_c = P^* + P' \quad (11)$$

$$\rho_R = \rho_R^* + \rho_R' = \rho_R^* \left(1 + \frac{P'}{kP^*} \right) \quad (12)$$

$$u = u^* + u' = u^* + d_w(P') \quad (13)$$

式中, P_c 是输出压力值; P^* 是预测值; P' 是修正值; ρ_R 是输出密度; u 是输出速度; k 是常量; d_w 是压力偏差系数。

2 集装箱内不同点火位置对爆炸危害的影响

2.1 点火位置设置

储能集装箱内电池数量多, 结构紧凑, 而且由于该储能集装箱的泄压板位置并不是均匀布置的, 所以选取了 12 个位置作为着火点。其中 9 个位于电池架中模组的间隔空间中, 见图 3。1#电池架靠近逃生门, 10#电池架靠近进风百叶窗, 在每个电池

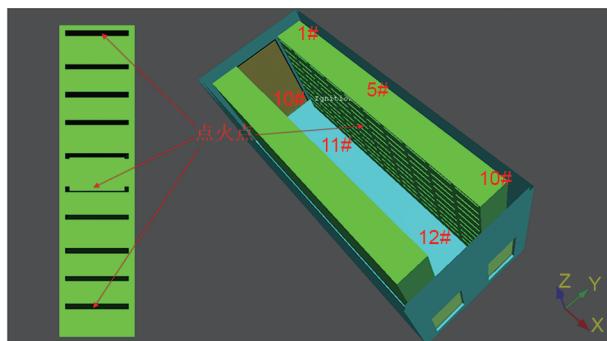


图 3 着火点设置

Fig. 3 Setting of ignition point

架由下向上的第 1、5、10 个模组上部空间中间位置设置着火点; 另在中间通道处设置 3 个着火点, 分别位于集装箱左侧中心、正中心和右侧中心(沿 x 轴正向排列)。

表 4 给出了着火点坐标, 除着火点位置不同外, 其他参数均为第 1 部分设定的默认参数。在每个泄压板的中心位置、集装箱内通道中间和集装箱外设置了监测点。

表 4 着火点位置

Table 4 Location of ignition points

序号	坐标(x, y, z)/m	序号	坐标(x, y, z)/m
Case 1	0.59, 1.99, 0.22	Case 7	5.45, 1.99, 0.22
Case 2	0.59, 1.99, 1.06	Case 8	5.45, 1.99, 1.06
Case 3	0.59, 1.99, 2.16	Case 9	5.45, 1.99, 2.16
Case 4	2.75, 1.99, 0.22	Case 10	1.51, 1.21, 1.10
Case 5	2.75, 1.99, 1.06	Case 11	3.02, 1.21, 1.10
Case 6	2.75, 1.99, 2.16	Case 12	4.53, 1.21, 1.10

2.2 结果分析

为了量化燃爆危险性结果, 我们重点分析了计算区域中冲击波压力、火焰传播速度和泄压板的平均压力。表 5 给出了上述 3 个参量的最大值, 其中冲击波压力、火焰传播速度为计算过程中不同时刻的最大值。

表 5 爆炸特征参数随着火点变化情况

Table 5 Variation of explosion characteristic parameters with fire point

序号	压力/kPa	速度/(m/s)	泄压板平均压力/kPa		
			Panel 1	Panel 2	Panel 3
Case 1	5.77	285.0	4.13	4.13	5.42
Case 2	7.62	318.8	4.37	4.37	5.52
Case 3	7.75	253.6	4.28	4.28	5.41
Case 4	7.30	254.3	4.21	4.21	5.03
Case 5	12.81	302.8	4.37	4.37	5.26
Case 6	8.99	290.3	4.23	4.23	5.01
Case 7	15.24	318.1	4.69	4.69	5.07
Case 8	41.28	557.0	4.62	4.76	5.21
Case 9	15.84	320.7	4.68	4.68	5.07
Case 10	7.98	182.5	4.90	4.90	6.21
Case 11	16.88	344.0	4.93	4.93	5.92
Case 12	32.79	413.7	5.12	5.12	5.82

从表 5 可以看出, 当着火点布置在电池架中时, 随着着火位置向百叶窗迁移, 2 个进风百叶窗处的泄压板的平均压力升高而逃生门处降低; 逃生门处泄压板的压力相对进风百叶窗处压力较大, 但

是差距很小。

当着火点设置在中部时, 模拟结果中压力、速度都是该电池架中3个着火点中最高的, Case 2中最大压力有些偏低, 可能是数据输出频率的原因。3个电池架中, 着火点在1#和10#时由于火焰有更长的传播距离, 压力较高, 其中10#电池架临近进风百叶窗, 两个百叶窗的泄压表面积为 1.1264 m^2 (0.5632×2), 小于逃生门的 2 m^2 , 且位置更低, 导致火焰在传播过程中受的约束更大, 所以压力和速

度更高。

当着火点设置在中间过道中时, 依然是布置在近逃生门一侧区域的中间位置时(Case 12)压力和速度较高。另外, 由于逃生门直接面对压力波的冲击, 所以Panel 3的平均压力较大。12种工况里火焰速度都没有超过 1000 m/s , 即都没有发生爆轰, 除了Case 8、Case 10和Case 12中峰值速度超过了声速, 其余也都在声速以下, 只是发生了爆燃。

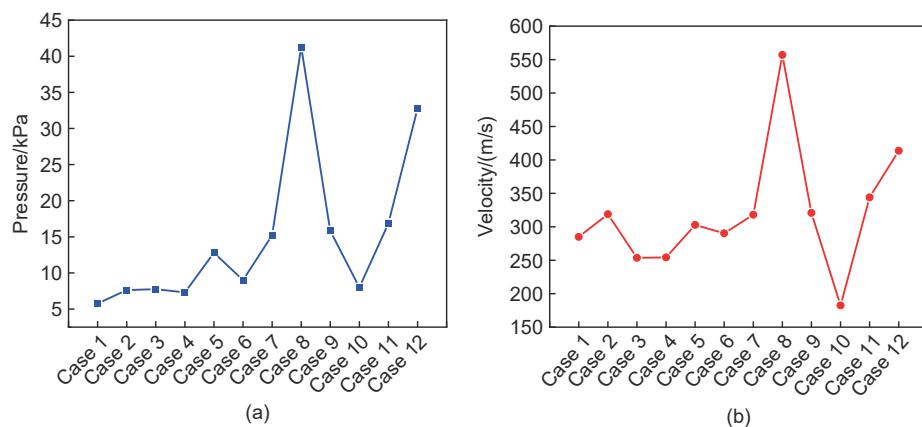


图4 不同着火点设置时 (a) 冲击波压力; (b) 火焰传播速度

Fig. 4 (a) Shock wave pressure and (b) flame propagation velocity at different ignition point settings

图5和图6(a)~(b)分别给出了高度为 0.86 m 和 1.12 m 截面上的2D温度分布情况, 可以看出, 开始起火后, 火焰沿着通道向两侧传播, 当火焰传播到两侧壁面时, 由于逃生门较高, 压力波冲破泄压板后火焰直接喷出; 在进风百叶窗一侧, 火焰需要沿着集装箱壁面向下传播, 而后才能喷出, 所以喷出时刻较为滞后。如图6(c)所示, Panel 3处的压力先出现突变。火焰释放到外部空间后, 逃生门处火焰呈球状向外传播; 进风百叶窗处则是两个小的半球各向约 45° 方向传播。在逃生门一侧, 火焰最远传播到 5 m 以外。在集装箱外, 最大冲击波压力集中在逃生门外约 2.5 m 侧, 且靠近地面。

模拟结束后, 燃烧产物基本可以充满整个集装箱, 只是在进风百叶窗一侧上部仍然有部分气体未燃烧。此外, 还分析了各泄压板外侧 5 m 和 10 m 处的冲击波压力随时间变化情况, 如图6(d)所示。发现 10 m 处基本不受气体爆炸影响, 冲击波压力最大值出现在逃生门一侧, 约为 3.67 kPa , 不会对人体和构筑物造成影响; 距离 5 m 处的压力发生很大改变, 冲击波压力在逃生门一侧达到了

17.40 kPa , 不会对人体造成影响, 但是已经能对建筑物的构件造成危害, 进风口百叶窗一侧则仍旧低于造成玻璃破裂的最低值 5 kPa 。

综上, 当着火点出现在电池架的中间位置时是最危险的; 另外, 火焰受约束的时间越长, 爆炸危害越高。当着火点出现在通道中时, 由于火焰不用从电池架中的空隙中蔓延出, 可以直接向四周传播, 能量损失较少, 表现出较高的冲击波压力。

3 集装箱内不同泄压板开启压力对爆炸危害的影响

3.1 泄压板设置

针对储能集装箱实际设计, 就不同泄压口设置情况对热失控产气爆炸危害的影响做如表6设置。除泄压板外, 其他初始条件为: 初始温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 环境压力 100 kPa , 着火点设置在集装箱几何中心(走道中心位置)。

3.2 模拟结果分析

表7给出了泄压板设置为不同状态时, 模拟结

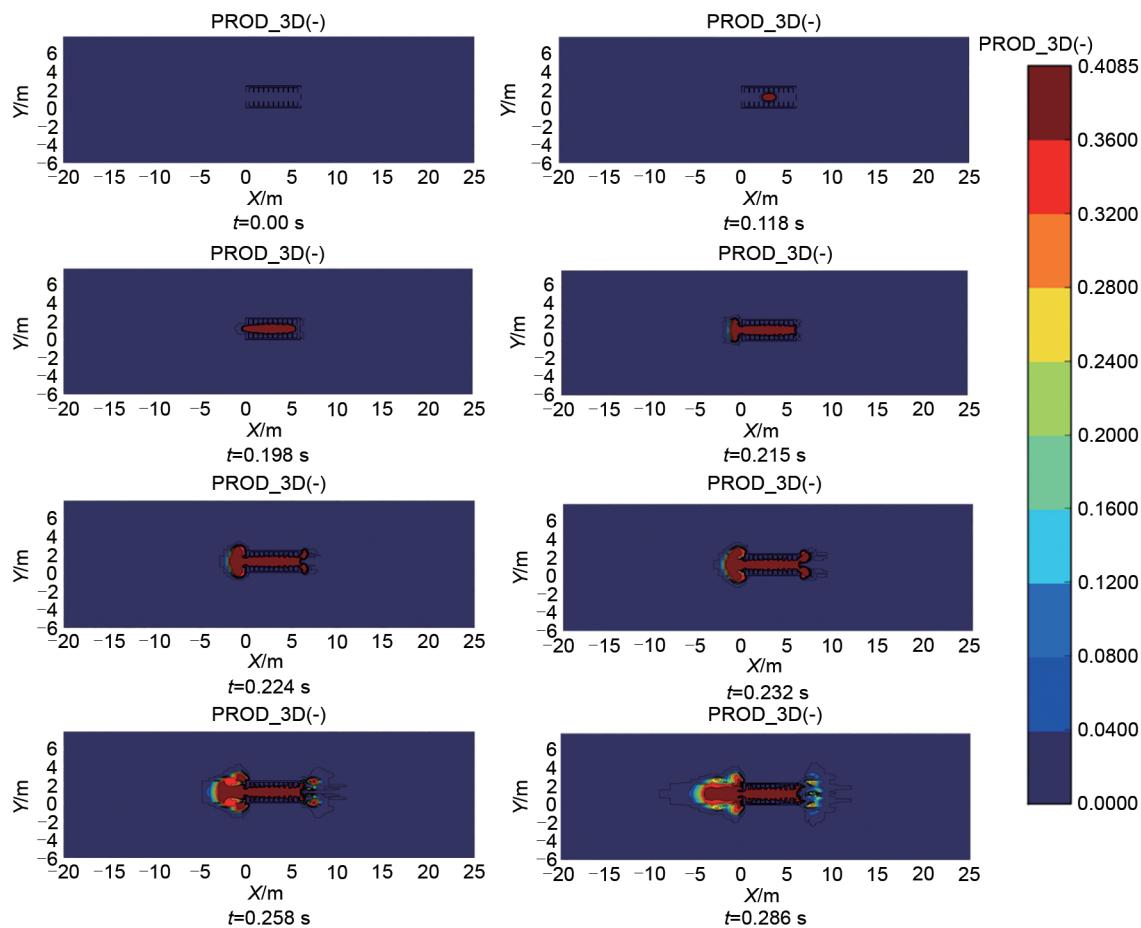


图5 着火点设置在通道中间时, Case 11 中 $Z = 0.86$ m 处截面 2D 燃烧产物比例分布图

Fig. 5 2D combustion product distribution diagram at $Z=0.86$ m section in Case 11 when the ignition point is set in the middle of the channel

果中的一些关键参数。Case 1 中, 假设集装箱是一个密封空间, 并且可以承受住气体爆炸后产生的压力和高温。模拟后发现, 最终集装箱内的压力可以达到 666.80 kPa, 约为 6.6 个大气压。当然这种极端条件基本不会出现, 不过如果储能集装箱内发生了气体爆炸而又不能将高温高压的火焰和燃烧产物及时释放出去的话, 势必会造成非常严峻的后果。

对比 Case 2 和 Case 6, 当泄压板只设置在进风口百叶窗处时, 由于泄压面积小, 且位置较为靠近地面, 不能及时释放冲击波和火焰, 所以尽管泄压口处的平均压力相差不大, 但是 Case 2 中火焰速度远高于 Case 6, 达到了 2 倍以上。

对比 Case 2~5, 发现随着泄压板开启压力的升高, 计算区域内冲击波压力首先升高, 这是因为火焰被限制在集装箱内的时间更长, 当泄压板开启后, 喷出的火焰速度也更快, 在 Case 4 和 Case 5

中, 火焰传播速度分别达到了 1137 m/s 和 1229 m/s, 发生了爆轰。此外, Case 5 中峰值压力达到了 143.10 kPa, 其威力足以造成“防震钢筋混凝土破坏, 小房屋倒塌”或者“大部分人员死亡”, 破坏性极强。泄压板处压力约 33 kPa, 也可以造成人员轻伤并对建筑物造成一定破坏。

对比 Case 6~9, 发现尽管提高了泄压板的工作压力会造成冲击波压力和传播速度的升高, 但是增加了泄压口数量后, 可以有效降低火焰传播速度。在泄压板开启压力相同的情况下, 相较于仅在进风口百叶窗处设置泄压板, 速度值的减少量分别为 412.9 m/s、482.8 m/s、519.5 m/s 和 257.4 m/s, 降低的比例在逐步减小, 由 55% 逐步降低到了 21%。

对比 Case 6 和 Case 10, 发现当有一个较大的泄压板的开启压力较低时, 尽管该处喷出的冲击波压力有小幅度升高, 但是计算区域内的平均压力和火焰速度都与泄压板爆炸值较低时接近。Case 10

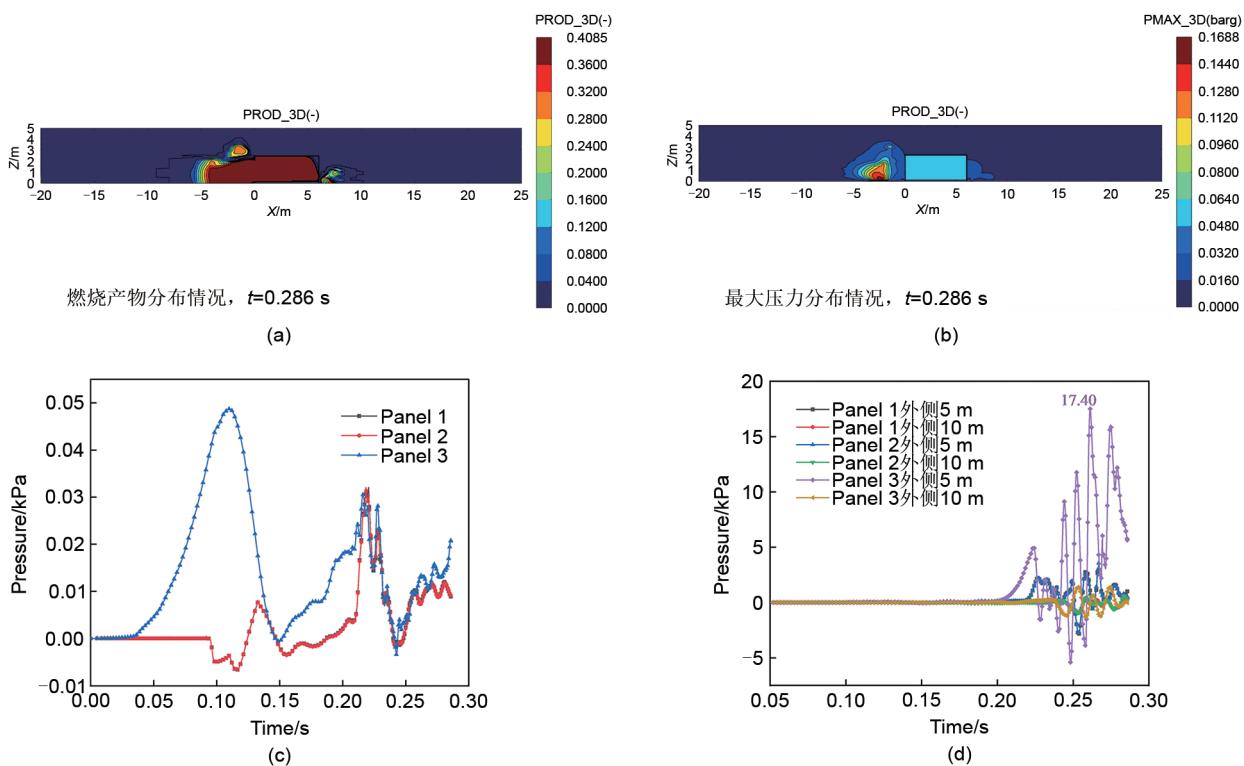


图6 (a) 和 (b) 着火点设置在通道中间时, Case 11 中 $Y=1.22$ m 处截面 2D 燃烧产物比例和最大压力分布; (c) Case 11 泄压板中心处压力随时间变化情况; (d) Case 11 泄压口外侧冲击波压力随时间变化情况

Fig. 6 (a) and (b): When the ignition point is set in the middle of the channel, the 2D combustion product and maximum pressure distribution at the cross section of $Y=1.22$ m in Case 11; (c) Change of pressure at the center of Case 11 pressure relief plate with time; (d) Time dependent variation of shock wave pressure outside the pressure relief port of Case 11

表6 泄压板设置情况

Table 6 Setting of pressure relief plate

序号	进风百叶窗	泄压板开启压力 /kPa		泄压板开启压力 /kPa
		逃生门	泄压板	
Case 1	密闭	—	密闭	—
Case 2	泄压板	3	密闭	—
Case 3	泄压板	10	密闭	—
Case 4	泄压板	20	密闭	—
Case 5	泄压板	30	密闭	—
Case 6	泄压板	3	泄压板	3
Case 7	泄压板	10	泄压板	10
Case 8	泄压板	20	泄压板	20
Case 9	泄压板	30	泄压板	30
Case 10	泄压板	30	泄压板	3

中冲击波压力较 Case 6 略高, 火焰速度则基本相同。以上规律在图 7 中表现得较为明显。

在所有带有泄压板的工况中, 当泄压板开启压力为 10 kPa、20 kPa 和 30 kPa 时, 泄压板的平均压力峰值基本上是和开启压力接近的, 即在泄压板开启后, 压力并不会大幅度升高; 当泄压板设置为 3 kPa 时, 总体的压力值很低, 但是峰值压力明显

表7 爆炸特征参数随泄压板设置变化情况

Table 7 Changes of explosion characteristic parameters with relief plate settings

序号	压力/kPa	速度/(m/s)	泄压板平均压力/kPa		
			Panel 1	Panel 2	Panel 3
Case 1	666.80	47.28	—	—	—
Case 2	25.16	756.9	5.02	5.02	—
Case 3	35.96	884.3	12.06	12.06	—
Case 4	71.22	1137	23.21	23.21	—
Case 5	143.10	1229	33.73	33.73	—
Case 6	16.88	344.0	4.93	4.93	5.92
Case 7	22.59	401.5	12.06	12.06	13.69
Case 8	45.68	617.5	23.21	23.21	24.93
Case 9	102.9	971.6	33.73	33.73	35.28
Case 10	13.68	344.2	8.21	8.21	7.54

要高于泄压板工作压力, 表明泄压板开启后, 集装箱内的反应持续时间相对更长。

图 8 给出了 Case 5 和 Case 9 中泄压板中心高度处的压力随时间变化情况, 可以发现冲击波压力可以传播到集装箱外 10 m 处, 但不会超过 15 m。Case 9 中逃生门中心点外压力更高, 可以达到 110 kPa 以上, 非常危险。

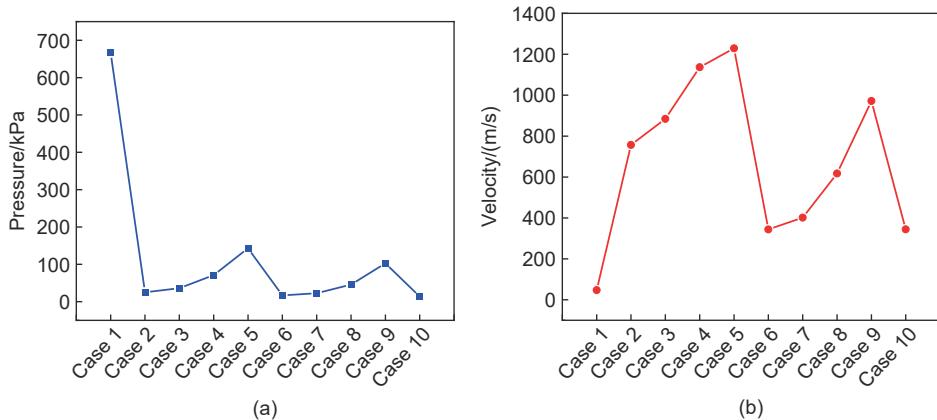


图7 不同着火点设置时 (a) 冲击波压力和 (b) 火焰传播速度

Fig. 7 (a) Shock wave pressure and (b) flame propagation velocity at different ignition point settings

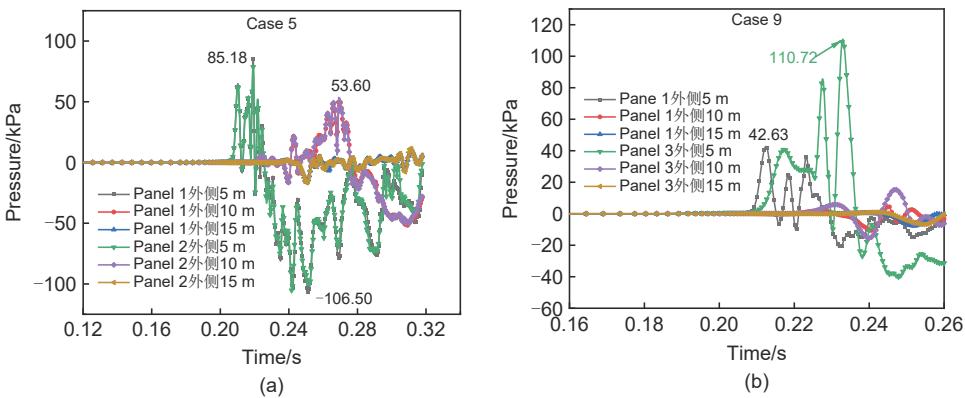


图8 Case 5和Case 9中，泄压板外侧点压力随时间变化情况 (测点高度与各泄压板中心高度相同)

Fig. 8 Case 5 and Case 9, the pressure variation at the external measuring point of the pressure relief plate with time (the height of the measuring point is the same as the center height of each pressure relief plate)

因此,尽可能地将泄压板的开启压力设小,同时增加泄压口的数量,并确保发生爆炸时,冲击波和火焰传播路径上没有障碍物或者障碍物较少,火焰和冲击波可以少受约束直接释放到外部空间中,这样可以减少爆炸危害。

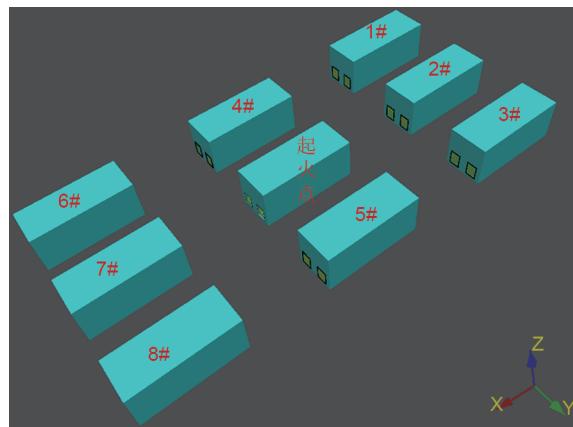
4 集装箱布置方式对爆炸危害的影响

4.1 模型设置

根据《电化学储能电站设计标准(征求意见稿)》中 7.5.5, 设置集装箱短边侧距离为 5 m, 长边侧距离为 3 m。实际应用中, 储能集装箱宜根据实际地形, 因地制宜呈竖向布置, 所以将 9 个集装箱布置成 3 排, 如图 9 所示。令逃生门侧为 A 侧, 进风口百叶窗侧为 B 侧, 工况设置情况见表 8。

4.2 模拟结果分析

图 10 给出了计算结束后 5 种工况下燃烧产物的

图9 多集装箱模型设置情况
Fig. 9 Multi-container model settings

3D 分布图(火焰云图)。Case 1 和 Case 2 是为了判定冲击波压力对泄压板的影响, 燃烧产物分布情况相同, 对比发现, 从逃生门处释放的火焰体积更大, 传播距离更远。Case 3 较 Case 2 提高初始温

表8 集装箱布置情况
Table 8 Container layout

序号	布置情况
Case 1	A、B侧相对布置, 间隔5 m, 初始温度25 °C
Case 2	A、A侧, B、B侧相对布置, 间隔5 m, 初始温度25 °C
Case 3	A、A侧, B、B侧相对布置, 间隔5 m, 初始温度50 °C
Case 4	A、A侧, B、B侧相对布置, 间隔10 m, 初始温度25 °C
Case 5	A、A侧, B、B侧相对布置, 间隔5 m, 50% CO ₂ , 初始温度25 °C

度为50 °C, 模拟结果变化不大; Case 4增加了布置间距后, 发现火焰前锋距离另一个集装箱还有5 m左右的安全距离, 并不会直接接触其他集装箱。Case 5在Case 2的基础上, 在气云中混入了体积分数为50%的CO₂气体, 以模拟惰性气体对爆炸的影响, 发现反应时间延长到了2.102 s, 并

且燃烧产物很少。另外, 由于储能集装箱的侧边并没有模拟任何开孔, 所以中间发生爆炸的集装箱并不会对同一排沿长边布置的集装箱产生影响, 因此3 m的距离是足够安全的。在现实生产中, 当一侧集装箱门开启时, 其展开宽度应在1.22~1.5 m, 为了能够在集装箱门开启时仍可以保证人员通过, 不建议间距少于2.5 m; 若设置为3 m, 当在集装箱周围0.5~1 m处增设防爆墙时, 两集装箱侧面间距1~2 m, 依然可以满足工人日常检修及通行, 但是较难满足消防救援的空间需求。针对这一问题, 可以将2个集装箱侧向间距缩小, 把多个集装箱划分为一个防护单元/防火分区, 在满足消防需求的同时还可以提高土地利用率。

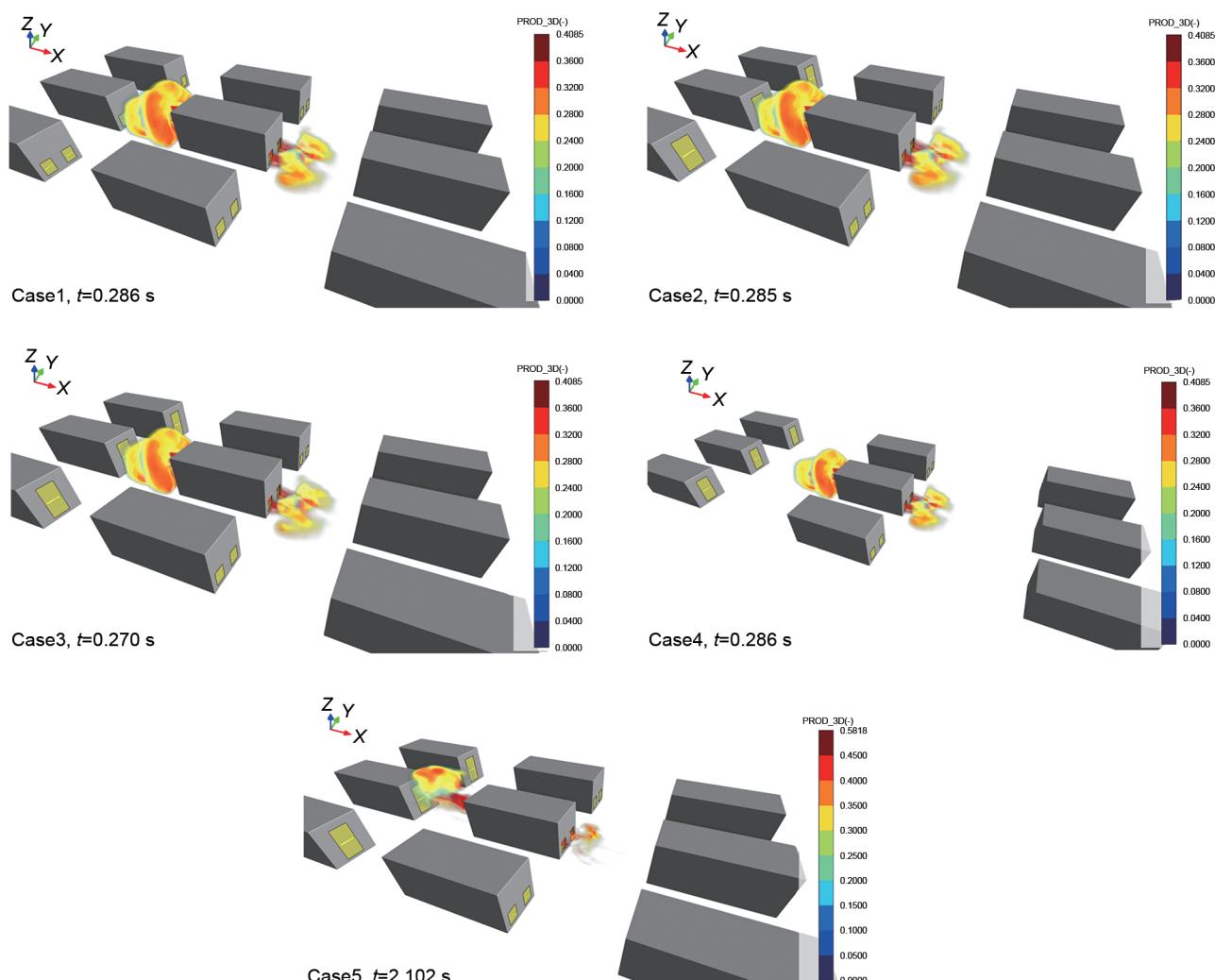


图10 不同布置方式下计算结束后燃烧产物3D分布图

Fig. 10 3D distribution diagram of combustion products after calculation under different arrangements

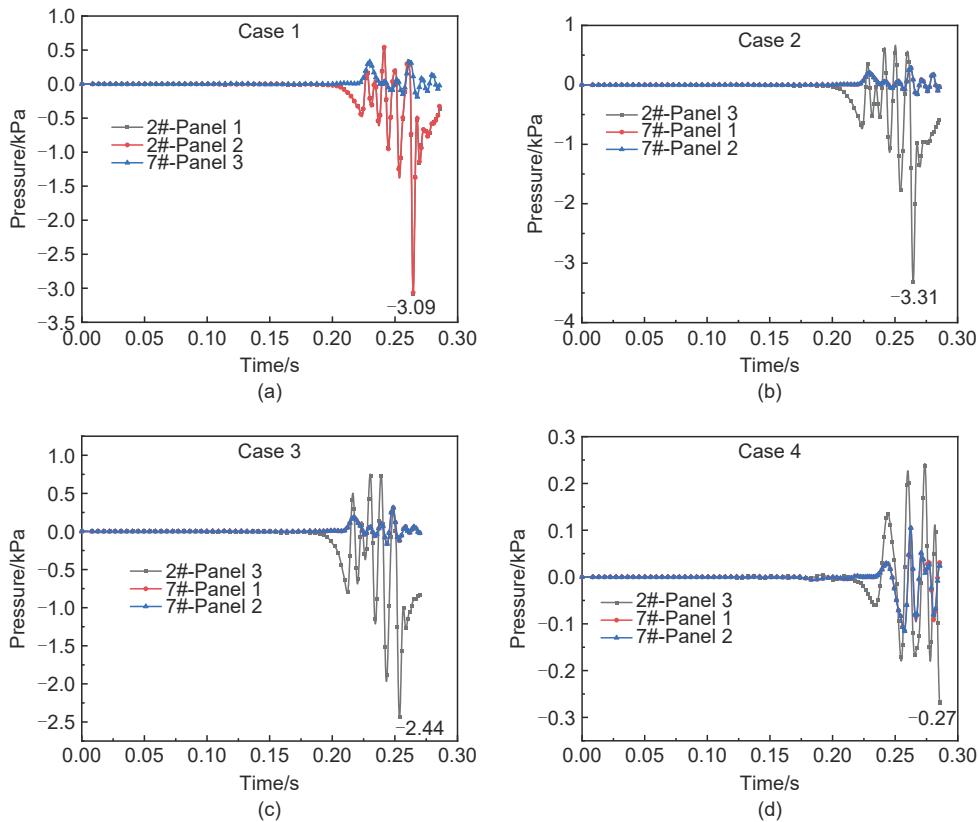


图 11 2#和7#集装箱面向着火点一侧泄压板压力随时间变化情况

Fig. 11 Pressure variation of pressure relief plate on the side of 2 # and 7 # containers facing the ignition point over time

图 11 给出了起火集装箱泄压板两侧集装箱的泄压板平均压力随时间变化情况。Case 4 中泄压板平均压力的绝对值在 0.3 kPa 以下，不能对 2# 和 7# 集装箱造成影响；Case 3 中，泄压板平均压力的绝对值在 3 kPa 以下，基本不会造成泄压板的破裂。Case 1 和 Case 2 中泄压板平均压力的绝对值超过了 3 kPa，泄压板有破裂的危险；但是初始温度提高只会导致冲击波压力小幅度升高，因此当间距在 5 m 以上时，更重要的是保证储能系统在瞬时高温下能够确保集装箱内部的电池架、PCS 等不受损伤，避免集装箱级别的电池火灾蔓延。

5 结 论

本工作使用 FLACS 软件，对储能集装箱内的热失控气体燃爆危害进行了模拟研究，研究了起火位置、环境温度、泄压板设置情况对爆炸危害的影响，同时初步探究了多集装箱成组布置方式。主要结论如下：

(1) 着火点位置会影响爆炸过程的冲击波压力

和火焰传播速度，当着火点位于电池架中间位置时，上述 2 个参数都较底部和顶部着火时要高；当着火点位于近进风百叶窗一侧时，由于百叶窗位置较低且面积较小，不能迅速地释放火焰，火焰和压力波受约束更强，时间也更久，导致其传播速度加快，冲击波压力升高，分别可以达到 557.0 m/s 和 41.28 kPa。此外，着重分析了当着火点在通道中心处的场景，发现爆炸可以对泄压板外侧 5 m 处压力造成很大改变。冲击波压力在逃生门一侧达到了 17.40 kPa，不会对人体造成影响，但是已经能对建筑物的构件造成危害；进风口百叶窗一侧的冲击波压力则低于可对建筑物造成破坏的最低值，即在 5 kPa 以下。

(2) 泄压板的设置情况对爆炸危险性的影响较为显著。当仅在进风百叶窗处设置泄压板且将开启压力设置为 30 kPa 时，整个模拟过程中计算区域中的冲击波压力和火焰传播速度峰值分别达到 143.10 kPa 和 1229 m/s，已经发展成为爆轰，可以对集装箱造成严重破坏。因此，应尽可能地将泄

压板的开启压力设小, 同时增加泄压口的数量, 并确保发生爆炸时, 冲击波和火焰传播路径上没有障碍物或者障碍物较少, 确保火焰和冲击波可以少受约束直接释放到外部空间中, 以减缓爆炸危害。

(3) 研究了储能集装箱的布置方式对爆炸后果的影响。基于锂离子电池的火灾危险性, 建、构筑物的防火间距, 以及物料的运输和消防布置等方面的考虑, 对长边间距3 m, 短边间距分别为5 m和10 m, 泄压板开启压力3 kPa, 着火点在通道中心处的几组工况做了对比。模拟结果表明, 当短边间距为10 m时, 冲击波压力对周围集装箱的影响微少; 短边间距为5 m时, 对集装箱的冲击波压力接近于3 kPa, 造成泄压板破裂的可能较小, 这时应重点考量热辐射、碎片飞溅等对集装箱的影响。另外, 及时注入CO₂等惰性气体, 是可以有效减缓爆炸反应, 降低反应危险程度的有效措施。

参 考 文 献

- [1] HENRIKSEN M, VAAGSAETHER K, LUNDBERG J, et al. Explosion characteristics for Li-ion battery electrolytes at elevated temperatures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 371: 1-7.
- [2] CHEN S C, WANG Z R, WANG J H, et al. Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 63: doi: 10.1016/j.jlp.2019.103992.
- [3] ZHONG X H, LIU W, HAN J W, et al. Pyrolysis and physical separation for the recovery of spent LiFePO₄ batteries[J]. Waste Management, 2019, 89: 83-93.
- [4] 曹文昊, 雷博, 史尤杰, 等. 韩国锂离子电池储能电站安全事故的分析及思考[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(5): 1539-1547.
CAO W J, LEI B, SHI Y J, et al. Ponderation over the recent safety accidents of lithium-ion battery energy storage stations in South Korea[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(5): 1539-1547.
- [5] 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]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1924-1933.
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 Engineering, 2022, 48(5): 1924-1933.
- [6] 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[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): 923-933.
- [7] 崔潇丹, 丛晓民, 赵林双. 锂离子电池热失控气体及燃爆危险性研究进展[J]. 电池, 2021, 51(4): 407-411.
CUI X D, CONG X M, ZHAO L S. Research progress in thermal runaway gases and explosion hazards of Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2021, 51(4): 407-411.
- [8] 郭超超, 张青松. 锂离子电池热解气体爆炸极限测定及其危险性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(9): 46-49.
GUO C C, ZHANG Q S. Determination on explosion limit of pyrolysis gas released by lithium-ion battery and its risk analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(9): 46-49.
- [9] 郑昆, 侯卫国, 马军, 等. 基于环境试验设备的锂离子电池燃爆特性分析[J]. 环境技术, 2021, 39(3): 186-188, 197.
ZHENG K, HOU W G, MA J, et al. Analysis of burning explosion characteristics of lithium ion batteries based on environmental test equipment[J]. Environmental Technology, 2021, 39(3): 186-188, 197.
- [10] 张国维, 贾伯岩. 液氮对高温锂离子电池防火抑爆效果试验研究[C]// 2020中国消防协会科学技术年会论文集. 2020: 945-951.
- [11] SKJOLD T, HISKEN H, LAKSHMIPATHY S, et al. Blind-prediction: Estimating the consequences of vented hydrogen deflagrations for homogeneous mixtures in 20-foot ISO containers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(17): 8997-9008.
- [12] KOCH S, FILL A, BIRKE K P. Comprehensive gas analysis on large scale automotive lithium-ion cells in thermal runaway[J]. Journal of Power Sources, 2018, 398: 106-112.
- [13] WANG K, SHI T T, HE Y R, et al. Case analysis and CFD numerical study on gas explosion and damage processing caused by aging urban subsurface pipeline failures[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 201-219.
- [14] LI J D, HERNANDEZ F, HAO H, et al. Vented methane-air explosion overpressure calculation-a simplified approach based on CFD[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 109: 489-508.
- [15] HJERTAGER B H. Computer simulation of turbulent reactive gas dynamics[J]. Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin, 1984, 5(4): 211-236.