

矿用锂离子电池热失控与防爆外壳响应的数值模拟研究

胡而已¹, 靳舒凯¹, 曾国伟², 李猛钢³

¹ 应急管理部信息研究院 北京

² 武汉科技大学冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室 湖北武汉

³ 中国矿业大学机电工程学院 江苏徐州

【摘要】 锂离子电池在煤矿高温、高压及冲击环境下易发生热失控, 存在严重安全隐患。为提升矿用机器人动力电池模组在极端工况下的防护性能, 评估外壳在爆炸压力与热应力作用下的结构稳定性与热响应性能, 利用COMSOL 软件设计构建一种矿用锂电池钢制防爆外壳, 开展多物理场耦合计算, 进一步在模型基础上添加锂离子电芯, 分析电芯个数与位置对于热失控扩展的影响规律。仿真结果表明, 爆炸冲击载荷下, 采用 690 级结构钢的防爆外壳具备优异的承载性能, 整体应力分布均匀, 变形量控制在安全范围内, 能够有效保障电池模组的结构完整性与运行安全性; 热失控状态下, 电芯位置对热传播速度与范围有显著影响, 中心电芯热失控更易触发连锁反应, 风险最高。该研究成果为矿用机器人锂离子电池模组在复杂工况下的安全防护提供了可靠的工程依据, 并为后续电池模组的系统化优化与安全设计奠定了基础。

【关键词】 锂离子电池; 防爆壳体; COMSOL 仿真; 热-结构耦合; 热失控

【基金项目】 国家自然科学基金项目 (52274159)

【收稿日期】 2026 年 6 月 12 日

【出刊日期】 2026 年 7 月 15 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20260043

Numerical simulation on thermal runaway and explosion-proof enclosure response of mine lithium-ion battery

Eryi Hu¹, Shukai Jin¹, Guowei Zeng², Menggang Li³

¹ Information Institute of the Ministry of Emergency Management of the PRC, Beijing

² Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

³ School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu

【Abstract】 Lithium-ion batteries are prone to thermal runaway under high-temperature, high-pressure, and impact conditions in coal mining environments, posing severe safety hazards. To enhance the protective performance of power battery modules for mining robots under extreme working conditions, and to evaluate the structural stability and thermal response of enclosures under explosion pressure and thermal stress, a steel explosion-proof enclosure for mining lithium-ion batteries was designed and constructed using COMSOL software. Multi-physics coupling calculations were conducted, and based on the model, lithium-ion battery cells were incorporated to analyze the influence of cell quantity and positioning on thermal runaway propagation. Simulation results demonstrate that under explosion impact loading, the explosion-proof enclosure constructed from Grade 690 structural steel exhibits excellent load-bearing capacity, with uniform overall stress distribution and deformation controlled within safe limits, effectively ensuring the structural integrity and operational safety of the battery module. Under thermal runaway conditions, cell position significantly affects thermal propagation speed and scope; central cells are more likely to trigger chain reactions during thermal runaway, presenting the highest risk. These research findings provide reliable engineering foundations for the safety protection of lithium-ion battery modules in mining robots under complex working conditions, and lay the groundwork for systematic optimization and safety design of subsequent battery modules.

【Keywords】 Lithium-ion battery; Explosion-proof shell; COMSOL simulation; Thermal-structural coupling; Thermal runaway

引言

随着煤矿智能化建设的不断推进, 矿用机器人已逐渐成为替代人工进入危险区域作业的重要装备。在井下复杂、高危的环境中执行巡检、采掘和运输等任务, 对机器人动力系统的安全性和可靠性提出了极高要求。其中, 锂离子电池因其能量密度高、体积小、循环寿命长, 被广泛应用于矿用机器人作为主要动力来源。然而, 在煤矿高温、高压、粉尘和冲击载荷等极端工况下, 锂离子电池极易出现热失控和爆炸风险, 严重威胁机器人自身及井下作业安全。

为解决这一工程痛点, 国内外学者已针对电池热失控机理、散热方式以及安全管理提出多种研究方案。Hu 等^[1]指出现有电池热失控预警手段仍存在灵敏度不足、响应滞后以及工程应用受限等问题, 不仅制约了电池安全管理技术的进一步发展, 也增加了电动汽车运行过程中的潜在风险。Bandhauer 等^[2]研究了电池内部热量的产生与传递过程, 揭示了锂离子电池热失控的关键安全挑战, 强调了热管理措施在预防热失控中的重要性。ABADA 等^[3]开展锂离子电池的安全建模研究, 表明多物理场模拟能够更好地体现热失控过程。Jin 等^[4]分析了关键热传递界面的能量流动, 发现加热功率对电池热失控蔓延的影响有限, 而电池热量的积累速度才是决定热失控发生的主要原因。Huang 等^[5]研究了大容量锂离子电池在菱形与平行布局下的热失控传播特性, 结果表明, 火焰冲击使电池温度骤升至 200–900℃, 这种剧烈的温升成为热失控蔓延的重要推动因素。

目前, 大多数研究^[6–14]仍停留在单电芯或电池模组的热行为分析, 对电池外壳的防爆性能和结构响应关注较少。实际应用中, 电池模组通常需要配置具备足够强度和热稳定性的外壳, 以抵御爆炸冲击、限制热量扩散, 从而保障整个动力系统的稳定运行。因此, 对防爆电池外壳在极端工况下的力学与热学响应进行系统评估, 具有重要的工程应用价值^[15–19]。

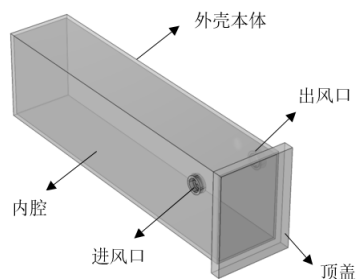


图1 防爆外壳模型几何结构的三维视图

进一步从防爆结构研究看, 现有工作^[20–29]主要集中在电池热失控产气、储能舱/电池箱内可燃气体的爆燃及泄爆设计, 或针对常规电池箱开展单一压力场、温度场的结构校核; 针对煤矿井下隔爆型电池外壳高温热载荷与瞬态爆炸冲击共同作用下的热–力耦合响应研究较少, 已有电池组过充爆炸试验表明, 热失控可形成显著瞬态超压, 而封闭空间、自由容积和泄压条件会进一步改变压力峰值^[30–32], 因此仅从电芯热传播角度评价矿用动力电池安全性是不充分的。

为了识别矿用防爆外壳的薄弱部位及模组内高风险热源位置, 本文首次提出了“材料-壳体-电芯位置-爆炸/热载荷”一体化的瞬态分析框架, 采用名义屈服强度约 690MPa 的高强结构钢作为矿用防爆外壳材料, 建立矿用机器人锂离子电池模组防爆外壳的三维有限元模型, 同时考虑爆炸冲击压力、500℃级高温热载荷及热膨胀诱导应力, 并进一步比较热失控电芯位于模组边缘与中心时的传播差异, 开展热–结构多物理场瞬态耦合研究。

1 三维模型构建

1.1 电池壳体与电池模组的三维几何结构

防爆壳体为矩形中空钢制结构, 由外壳本体、内腔以及连接端口(进/出风口、顶盖)组成。壳体壁厚为 6mm, 整体尺寸约为 180×871×247mm, 内腔约为 168×865×235mm, 用于容纳电池模组。顶盖尺寸约为 216×28×283mm, 可确保模块密封和牢固安装。壳体内部布有加强筋, 提高整体刚度。在壳体内部建立一个由 32 单体软包锂离子电池组成的电池模组, 排列方式为 16 串×2 并(16s2p)。为了形成完整电路, 模型中加入了母排及连接片, 截面尺寸 20×10mm, 长度覆盖整个串联组, 整体采用对称设计形成完整电流回路。整个几何模型通过 COMSOL 的 CAD(Computer-Aided Design)模块建立, 并利用布尔运算实现电池腔体的挖空及连接孔的构造, 大半径 24mm, 小半径 18mm。从而保证模型的密封性、对称性, 并便于后续热–力耦合分析。



图2 电池模组

1.2 壳体及部件材料参数

电池壳体采用高强度 690 级结构钢（名义屈服强度约 690MPa），该钢材因其优异的力学性能和加工性能，常用于高承载构件，690 级结构钢的主要物理力学性能参数见表 1。

该材料在研究温度范围内具有良好的耐热性能，适用于复杂载荷环境。此外，内部元件如电池单体、铝

制汇流排及铜连接板也分别赋予相应的材料参数，取值均依据相关国家标准文献及材料手册进行确定，如表 2 所示。需要指出的是，虽然锂离子电池由层状电极、隔膜和集流体构成，通常具有明显的导热各向异性，面内导热系数显著高于厚度方向^[36]。但本文主要关注模组安全趋势，因此表 2 中的 1.0 W/(m·K) 为等效各向同性参数。

表 1 壳体材料参数

参数	数值
密度 $\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$	7850
杨氏模量 $E(\text{Pa})$	2.1×10^{11}
泊松比 $\nu(-)$	0.30
热导率 $k(\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K}))$	50
比热容 $c(\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$	500

表 2 锂离子电池模组材料参数

部件	密度 $\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$	比热 $c_p(\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K}))$	导热系数 $k(\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K}))$	电导率 $\sigma(\text{S/m})$
电芯	1800	1000	1.0（等效）	—
母排（铝）	2700	900	237	3.8×10^7
连接片（铜）	8700	385	401	5.9×10^7
壳体（690 级结构钢）	7850	460	54	—

1.3 建模假设

在保证仿真精度与核心物理现象还原的前提下，合理降低计算复杂度、减少计算成本、提高计算效率，本研究在数值模拟过程中做出如下科学假设：

（1）电池单体材料视为均质且各向同性，忽略其内部的微观温度梯度。

（2）主体计算考虑导热与对流。考虑到 500℃高温条件下辐射换热可能显著增强，辐射敏感性估算如下：按灰体表面、环境温度 293K、表面温度 773K 计算，辐射热流密度 $q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4)$ 。当钢表面发射率 ε 取 0.7 时， q_{rad} 约为 $13.9 \text{ kW} / \text{m}^2$ ；若自然对流换热系数 h 取 $10 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，对应对流热流密度约 $4.8 \text{ kW} / \text{m}^2$ ，辐射项约为对流项的 2.9 倍。因此，500℃附近时辐射不可忽略，但是本文研究重点为统一瞬态模型的首次建立，后续研究阶段再进一步完善辐射影响分析。

（3）电池热失控释放热量采用平滑上升—指数衰减的等效体积热源函数表示，暂不考虑 SEI（Solid Electrolyte Interphase）分解、负极/电解液反应、正极分解等多步电化学副反应。已有研究^[33-36]利用 EV-ARC（Extended Volume Accelerating Rate Calorimetry）数据识别热失控动力学参数，预测温度曲线与独立试验具

有较好一致性，本文等效体积热源函数虽然预测精度有效，但结合对比发现也能开展热传播趋势分析。

（4）初始环境温度 20℃，外壳外表面自然对流散热，壳体内换热通过等效对流换热系数描述。

2 多物理场模拟设定

2.1 物理模块与耦合方式

本研究的数值模拟在 COMSOL Multiphysics 软件中完成，采用热-结构多场耦合分析方法，系统研究防爆外壳在热载荷与力学载荷协同作用下的动态响应规律。具体而言，选用固体力学模块计算防爆外壳在爆炸压力作用下的应力-应变场分布，考虑到 690 级结构钢在弹性变形阶段的力学行为符合线性弹性特征，因此假设材料服从线性胡克弹性定律。其基本本构关系表达式如下：

$$\sigma = C : \varepsilon \quad (1)$$

式中， σ 为应力张量， ε 为应变张量， C 为四阶弹性刚度张量，“:”表示双重张量积（双重缩并运算）。

对于各向同性线性弹性，采用胡克定律表达：

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中， σ_{ij} 表达应力张量， λ 和 μ 为材料的拉梅常数，

δ_{ij} 为克罗内克 δ 符号, ε_{ij} 表示应变张量的迹。可由杨氏模量 E 和泊松比 ν 计算 λ :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

同时, 固体中的热传导模块求解导热方程, 以获得壳体及电池模组中随时间演化的温度场。这两个模块通过热-结构耦合相互关联, 使温度变化能够通过材料的热膨胀效应影响应力场。由此, 模型能够再现实际现象: 当壳体升温时发生热膨胀, 并产生附加热应力。

在热传导方面, 采用傅里叶导热方程与热能量平衡方程来描述壳体内部的传热过程, 其中包含体积热源项 Q , 用于表征电池热失控反应所释放的热量。热传导分析采用傅里叶定律:

$$q = -k\nabla T \quad (4)$$

式中, q 为热通量密度, k 为材料的热导率, T 为温度, ∇T 为温度梯度。负号表示热量传递方向与温度梯度方向相反, 即热量由高温区流向低温区。热传导控制方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q \quad (5)$$

式中, ρ 为密度, c_p 为比热容, T 为温度, k 为热导率, Q 为单位体积的热源项。该方程表示热能在时间和空间上的分布规律, 是描述瞬态热传导问题的基础模型。

采用 von Mises 等效应力准则 (范氏等效应力准则) 来评估材料的受力状态, 并判断其是否超过材料的屈服极限, 从而确定外壳结构的安全性。von Mises 等效应力的定义表达式如下:

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (6)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力, σ_{vM} 表示等效应力。当 σ_{vM} 小于材料屈服强度 σ_{yield} 时, 材料处于弹性状态, 不会发生屈服或塑性破坏。

2.2 边界条件与载荷

为模拟爆炸冲击波对防爆外壳的冲击作用, 在外壳全部内表面 (即与电池腔体直接接触的表面) 施加瞬态等效爆炸压力, 压力峰值设定为 2 MPa。已有电池热失控/过充爆炸试验报道: 电池组在过充条件下、距爆源 45cm 处最大爆炸压力可达 0.915 MPa^[30]; 密闭罐内

100% SOC (State of Charge) 电芯在泄压前记录到约 2.566 MPa 峰值压力^[31]; 不同初始压力下 18650 电池组实验测得最大爆炸压力约 0.169-0.228 MPa^[32]。基于上述文献^[30-32], 考虑到测试尺度、自由容积、SOC、测点位置和是否泄压均会显著影响峰值, 本文取 2 MPa 作为偏保守的等效设计冲击载荷, 用于外壳结构安全裕度评估。

2.3 网格划分与求解器设置

螺孔边缘、几何棱角、顶盖连接处及部件接触区域属于应力梯度较大的敏感区域, 应采用局部尺寸控制进行加密。模型采用 COMSOL 自动网格划分并以粗、中、细三组网格为基准网格, 如表 3 所示。

表 3 网格无关性分析结果

网格等级	单元数	最大应力 MPa	最大位移 mm	最高温度 K
粗网格	5215	517.0	0.326	773.15
中网格	22290	489.6	0.309	773.15
细网格	57911	481.8	0.304	773.15

可以发现, 随着网格数量由 5215 增加至 57911, 模型计算得到的最大应力和最大位移逐渐趋于稳定。当网格由中网格加密至细网格时, 最大应力和最大位移的相对变化率分别为 1.62% 和 1.64%, 均小于 5%, 表明继续加密网格对主要响应参数的影响较小, 因此本文选用 57911 个单元的细网格进行后续计算。

在求解方法上, 采用瞬态分析, 模拟爆炸后 $t=0-0.05s$ 内的响应过程, 启用几何非线性计算, 最小时间步长 $1 \times 10^{-6}s$, 确保捕捉快速响应过程。

3 爆炸载荷与热载荷耦合模拟

3.1 温度场分布

如图 3 所示, 在爆炸发生后的极短时间内 ($t=0.005s$), 防爆外壳温度场迅速响应, 热量由爆源邻近区域向壳体周围扩散, 整体呈现出由中心高温区向外围低温区逐渐递减的分布特征。其中, 最高温度主要集中于靠近爆源的内壁及中心区域, 表明爆炸热载荷作用下该区域存在一定程度的局部热集中现象。

为进一步定量评价外壳温度场的均匀性, 采用最大温差 ΔT 和温度非均匀系数 U_T 作为评价指标, 其中 $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$, $U_T = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\text{avg}} \times 100\%$ 。在 $t=0.005s$ 时, 外壳区域最高温度 $T_{\max}$ 为 773.15K, 最低温度 $T_{\min}$ 为 741.20K, 平均温度 T_{avg} 为 756.80K, 由此计算得到最大温差 ΔT 为 31.95K, 温度非均匀系数 U_T 为 4.22%。结果

表明, 爆源附近虽然形成了较为明显的局部高温区, 但高温主要集中在有限范围内, 外壳其他区域温度相对较低, 温度场表现出一定的空间非均匀性。随着热量沿壳体壁面进一步传递, 高温区域逐渐向周围扩展, 690 级结构钢较高的导热能力有利于削弱局部温度梯度并降低热量持续集中。因此, 温差及温度非均匀系数能够反映爆炸瞬态条件下防爆外壳温度场的空间分布特征。

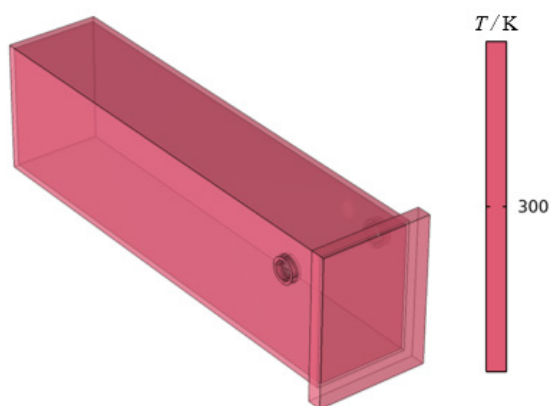


图3 爆炸初始时刻 ($t = 0.005 \text{ s}$) 温度场分布

3.2 应力场分布

随着时间推进, 防爆外壳的整体应力水平逐渐升高, 并呈现出明显的瞬态波动特征。如图 4 所示, 在爆炸压力与热载荷共同作用下, von Mises 等效应力主要集中于侧壁中部、上部边缘以及端盖连接处等几何不连续区域。这是由于上述区域一方面直接承受内部爆炸压力作用, 另一方面受到结构约束和截面突变的影响, 使局部变形受到限制, 从而产生较为明显的应力集中现象。相比之下, 远离爆源且结构连续性较好的区域应力水平相对较低。

在 $t = 0.005 \text{ s}$ 时, 对外壳区域的 von Mises 等效应力进行最大值提取, 得到最大等效应力 $\sigma_{\max} = 481 \text{ MPa}$, 位于侧壁中部靠近上边缘的局部区域, 对应坐标为 $(x, y, z) = (0.0887 \text{ m}, 0.3778 \text{ m}, 0.0060 \text{ m})$ 。690 级结构钢的名义屈服强度为 690 MPa, 因此计算得到的最大等效应力低于材料屈服强度, 结构安全, 但安全系数为 1.43, 说明最大应力点及其邻近区域仍具有进一步进行结构优化的必要性。

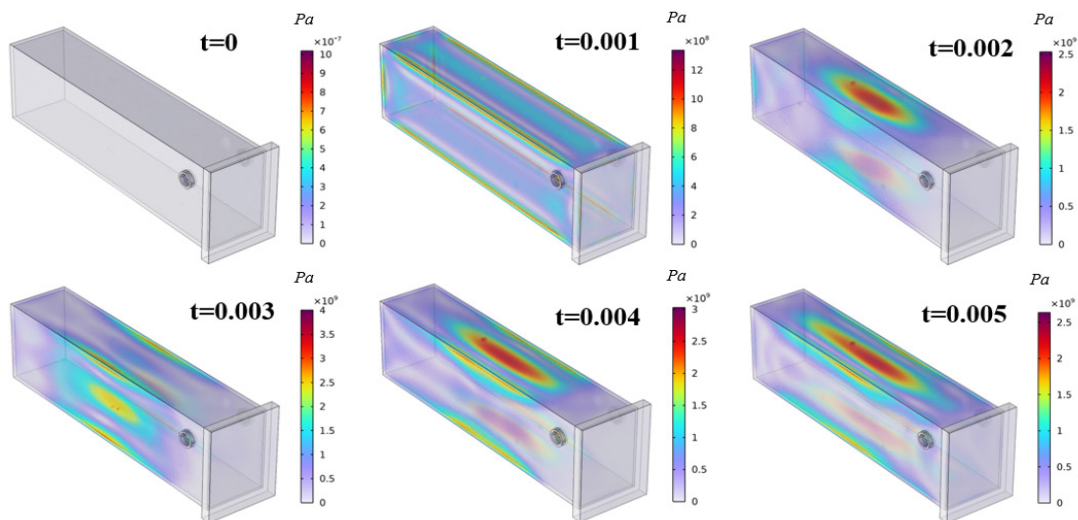


图4 等效应力分布云图

3.3 变形与位移

图 5 给出了监测点的位移曲线, 可以看出, 在爆炸载荷作用下, 电池外壳经历了瞬态弹性变形。外壳的最大位移约为 0.0045m, 发生在爆炸冲击最强烈的瞬间, 表现为局部轻微鼓胀 (如侧壁区域), 随后部分恢复。在初始冲击之后, 外壳出现逐渐衰减的振动。在达到峰值后, 位移振荡幅度随时间逐渐减小。这说明外壳具有一定的冲击能量吸收与减振能力, 能够回归稳定状态, 而不会产生显著的残余变形。

进一步分析图 4 与图 5, 可以发现, 变形分布与应力分布呈现出高度的对应关系。应力集中的区域 (如螺孔附近、侧壁中部) 也发生了相对较大的局部膨胀变形, 而外壳的其他部位 (如底部固定区域、结构刚度较大的加强筋区域) 变形量极小。总体而言, 外壳的绝对变形相对于其几何尺寸非常有限 (4.5mm 相对于约 0.8m 长度, 仅占约 0.5%), 完全处于工程允许范围内。这验证了 690 级结构钢外壳具备较高的刚度和稳定性, 能够在承受爆炸冲击与瞬态热载荷时保持结构完整性。

在极短时间内, 外壳结构已重新恢复稳定, 展现出良好

的抗冲击与变形恢复能力。

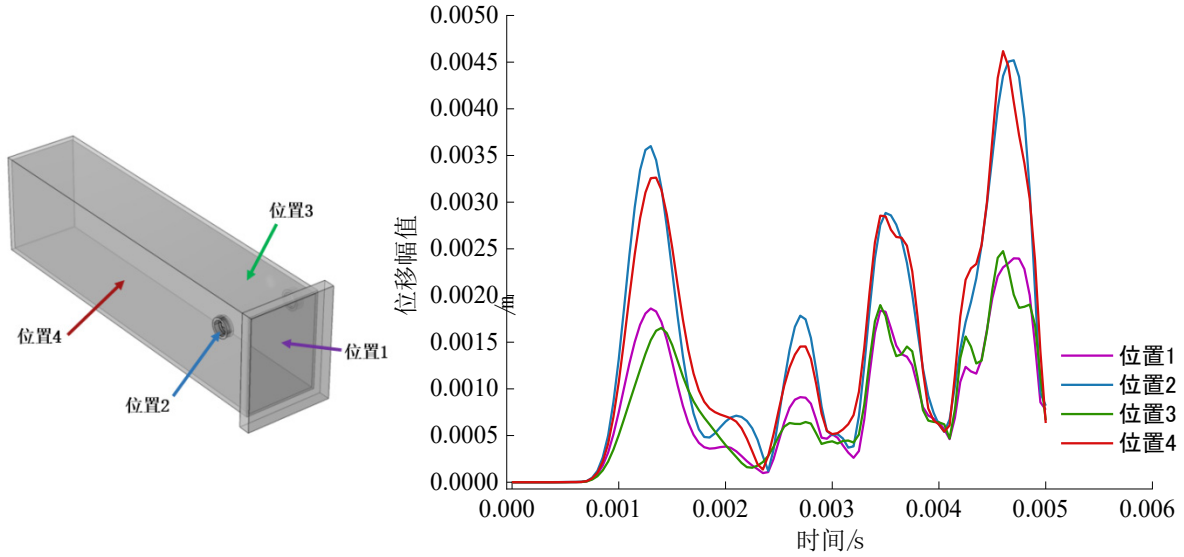


图5 监测点位移随时间变化曲线

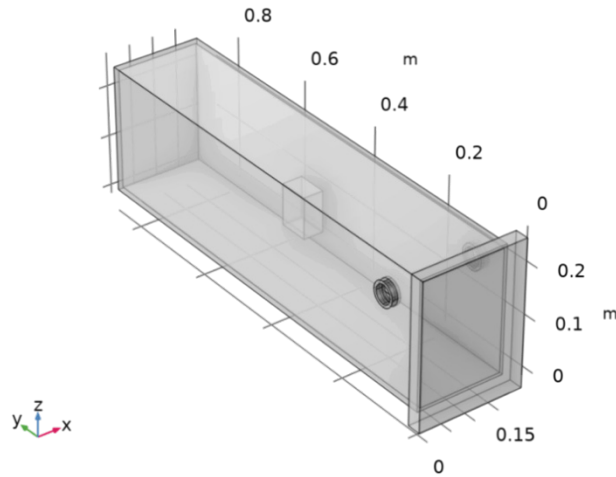


图6 含锂离子电池的模型几何结构视图

4 锂离子电芯热失控扩展模拟

4.1 单个电芯热失控

为进一步评估外壳设计的安全裕度, 结合真实工况, 在第3节的模型基础上进行改进, 如图6所示, 在外壳中央位置添加一个单体锂离子电池(尺寸约 $40 \times 60 \times 80 \text{mm}$), 将模拟局限至单个电芯发生热失控的情景(而非整个模组同时爆炸), 即单个电芯故障会在外壳内部形成局部热源, 分析其对其他部件的影响。

锂离子电池在热失控过程中会释放大量热量, 其来源主要包括可逆熵变热、欧姆热、反应极化热以及化学副反应热等。已有研究^[9]表明, 这些热量在时间上具

有明显的阶段性特征: 首先在触发时刻附近迅速上升, 随后在可燃物逐步消耗、反应驱动力下降及散热增强的作用下逐渐衰减。因此, 本文采用经验公式(Tran 等学者^[10]; Wang 等学者^[11])来描述电芯体积热源, 构建体积热源函数 $q_{TR}(t)$:

$$q_{TR}(t) = q_0 \cdot \frac{1 + \tanh\left(\frac{t - t_0}{\Delta t_{ramp}}\right)}{2} \cdot \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \quad (7)$$

式中, $q_0 = 2 \times 10^6 \text{W/m}^3$ 为热源峰值强度, t_0 为触发时刻, Δt_{ramp} 为上升沿平滑时间尺度, $\tau = 60 \text{s}$ 为指数衰减

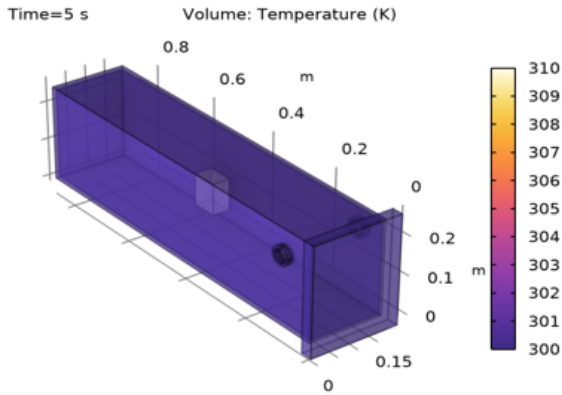
时间常数。

本文式(7)采用指数衰减形式描述热失控过程中的等效体积热源, 属于面向工程分析的低阶简化模型。该方法通过峰值热源强度 q_0 、上升沿时间尺度 ΔT_{ramp} 和衰减时间常数 τ 表征热失控过程中热释放的快速增长及后续衰减特征, 具有参数数量少、计算成本较低以及便于开展不同电芯位置和模组热传播规律对比分析等优点。然而, 该模型对复杂电化学反应及不同反应阶段进行了等效处理, 因此主要用于描述热失控热释放的整体演化趋势, 难以精确再现各温度区间内真实电芯瞬时产热率的变化。

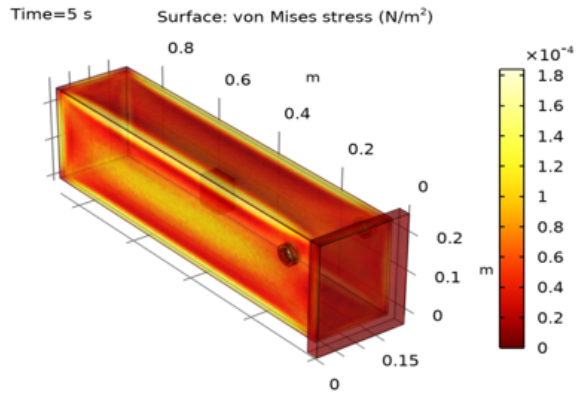
已有 ARC (Accelerating Rate Calorimetry) /EV-ARC 研究通常基于实验获得的温升速率 dT/dt 反演电芯热生成率, 或采用分段函数及反应动力学模型对热失控过程中的温度-时间响应进行拟合。Shelke 等^[33]基于 EV-ARC 实验数据对热失控反应动力学参数进行标定, 并结合 HWS (Heat-Wait-Seek) 及等温实验对模型进行了验

证; Chen 等^[34]针对商业 21700 电芯建立简化热失控模型, 并利用 ARC 实验结果验证其温度响应特征; Hoelle 等^[35]则利用 ARC 热释放数据构建温度相关热源, 对不同热失控建模方法进行了比较。上述研究表明, 基于量热实验数据进行热源参数标定能够较为准确地描述特定电芯的瞬态产热行为。因为, 本文后续研究将开展模型电芯相匹配的 ARC/EV-ARC 实验, 在实验基础上对于 q_0 , ΔT_{ramp} 和 τ 等关键参数进行进一步标定和验证, 以提高本文模型的定量预测能力。

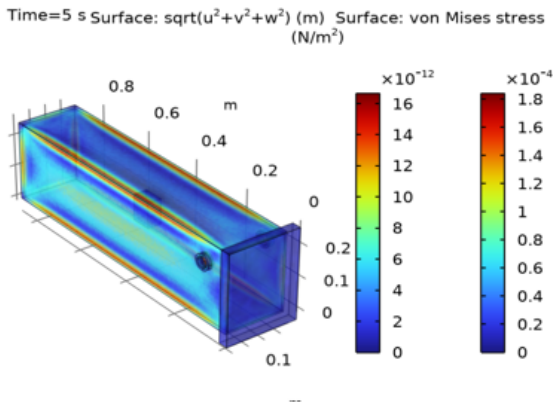
将该电芯设为恒定体积热源, 并赋予初始温度 773.15K (500°C) 以触发故障。单电芯材料选用陶瓷壳体类型, 参数设定为: 密度约 $2500\text{kg}/\text{m}^3$, 杨氏模量约 $5 \times 10^9\text{Pa}$, 泊松比约 0.20, 导热系数约 $5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容约 $1000\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。该电芯作为局部热源, 将热量传递至外壳及相邻电芯, 以检验外壳的局部耐热能力及模组内热量的传播程度, 图 7 给出了 $t=5\text{s}$ 时单电芯热失控仿真结果。



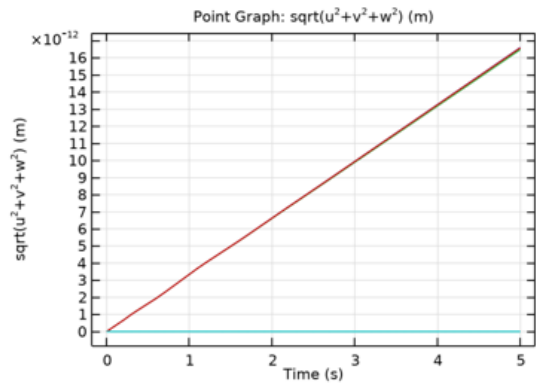
(a) 温度分布图



(b) von Mises 应力云图



(c) 瞬态变形叠加图



(d) 随时间变化曲线

图7 (a-d) 单电芯热失控仿真结果 ($t = 5\text{ s}$)

温度分布方面, 在单电芯进入热失控状态后, 热量迅速在外壳腔体内扩散。局部温度骤升至 $500\text{--}540^\circ\text{C}$, 随后向周围传导。数秒后, 温度场逐渐稳定: 靠近故障电芯的区域最高(约 540°C), 其余区域温度显著较低。热量被外壳钢材吸收, 最高温度被限制在 540°C 左右, 未继续无限上升。

应力方面, 局部热源导致外壳产生热应力, 主要集中在靠近故障电芯的壁面区域。然而, 最大应力值仍低于 690MPa , 说明外壳未发生屈服或开裂, 始终保持弹性安全状态。整个过程中未出现结构性破坏。

变形方面, 相较于爆炸工况, 局部热源引起的外壳变形极小。靠近高温电芯的壁面仅出现轻微鼓胀, 最大位移仅约 $2.2 \times 10^{-4}\text{ mm}$ ($0.22\mu\text{m}$), 几乎可以忽略。整体外

壳几何形状几乎未发生改变。监测点的位移曲线显示, 在电芯升温初期出现微小瞬态响应, 随后趋于平稳, 说明外壳轻松吸收了热应力, 未受显著动态影响。

总的来说, 在模拟时刻 $t=5\text{ s}$ 时, 各响应量均已接近稳定状态。最高温度约 540°C , 最大应力未超过材料允许值, 最大位移极小, 无任何结构破坏迹象。因电芯加热导致的气体膨胀所产生的等效气压始终低于 2MPa , 远小于外壳的极限承压能力(约 4.07MPa)。这证明设计的外壳足以在单电芯故障时提供有效保护。

4.2 电池模组热失控

在单个电芯基础上增加电芯数量, 进一步分析了电芯发生热失控时, 位于模组边缘或中心的差异, 模拟结果如图 8-11 所示。

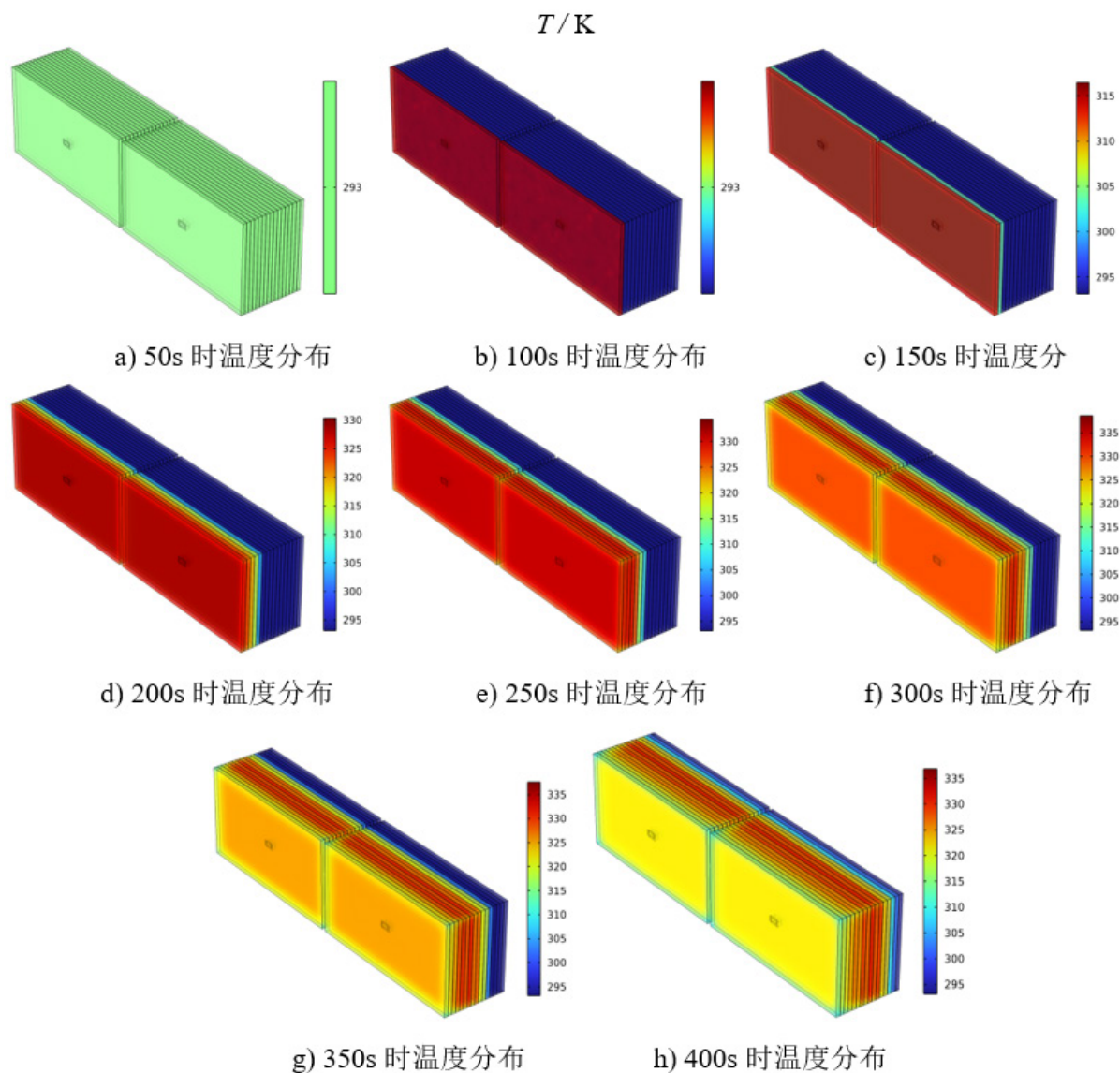


图 8 (a-h) $t=0-400\text{s}$ 边缘位置温度场分布演变

4.2.1 边缘电芯热失控

由图 8 可见, 当边缘电芯发生热失控后, 100–200s 内仅有最邻近电芯出现明显温升, 由 293K 升至约 315–

325K。远端电芯温度几乎保持在 293–300K。在 400s 时, 模组内温度尚未均衡, 对侧区域仍相对低温。

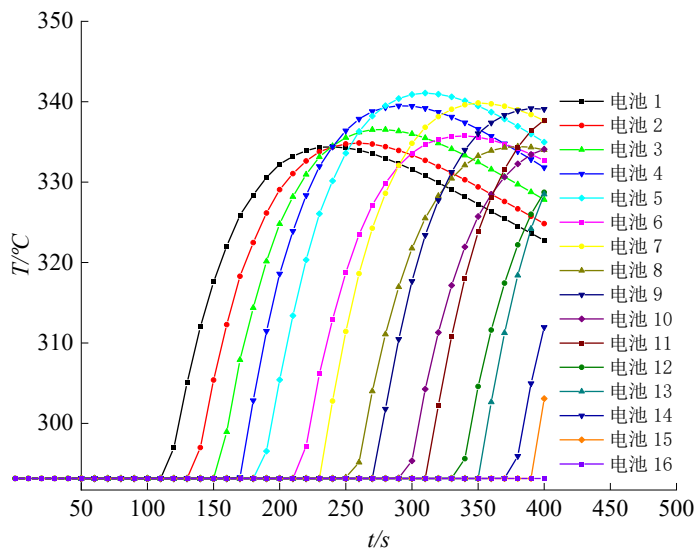


图 9 边缘位置电池单体热失控扩散对模组温度的影响

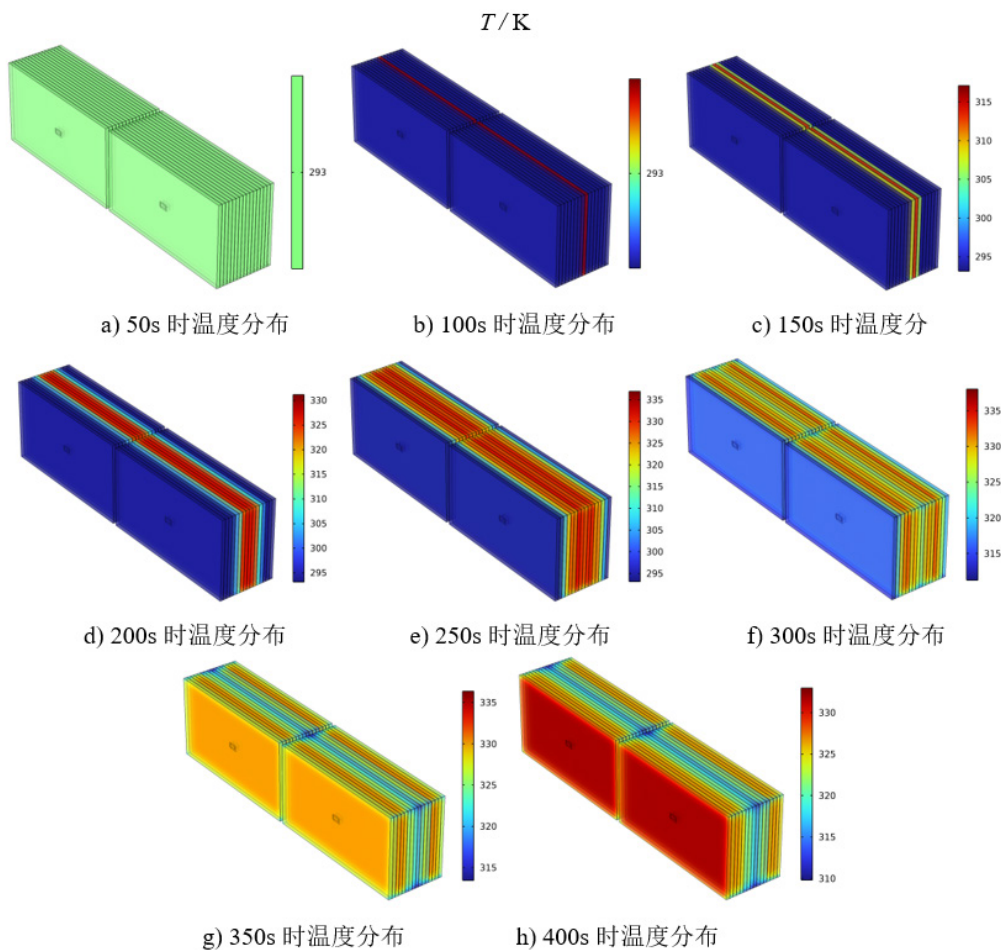


图 10 (a-h) $t=0-400s$ 中间位置温度场分布演变

根据图 9 中温度等值线, 边缘热失控的扩散半径约为 $R_{\text{边缘电芯}} \approx 1\text{cell thickness} \approx 8\text{mm}$, 扩散速度估算为:

$$v_{\text{边缘电芯}} = \frac{8\text{mm}}{200\text{s}} = 0.04\text{mm/s}, \text{热扩散极其缓慢。由图 9 可}$$

见, 热失控主要影响 1-2 个相邻电芯, 模组无明显整体温升, 未观察到连锁式温度暴涨。说明热失控的蔓延有限, 整体模组未受到全面威胁。此种情况下, 风险相对较低, 但仍需局部冷却措施。

4.2.2 中间电芯热失控

由图 10 可见, 在热失控发生约 100s 时核心电芯温度快速升至 310-320K, 在 200-300s 内, 大多数相邻电芯相继升温, 到 400s 时几乎整个模组温度均匀升高

至危险水平。

根据图 10 计算热扩散范围 $R_{\text{中间电芯}} \approx 3-4\text{cells thickness} \approx 24-32\text{mm}$, 扩散速度估算

$$\text{为 } v_{\text{中间电芯}} = \frac{32\text{mm}}{200\text{s}} = 0.16\text{mm/s}, \text{扩散速度是边缘热失控的}$$

四倍以上。由图 11 可见, 中间热失控引起的温升几乎遍及模组所有电芯, 模组平均温度从 293K 升至约 330K, 温度增长幅度为 $\Delta T = 37\text{K} (\approx 12.6\%)$ 这表明中心电芯热失控更易触发连锁反应, 风险最高。因此, 在模组设计中应加强中心区域电芯的散热与隔热措施, 并在该处布设早期温度传感器, 以便及时发现和处理过热迹象。这些措施有助于防止单电芯故障演变为整个系统的灾难性事故。

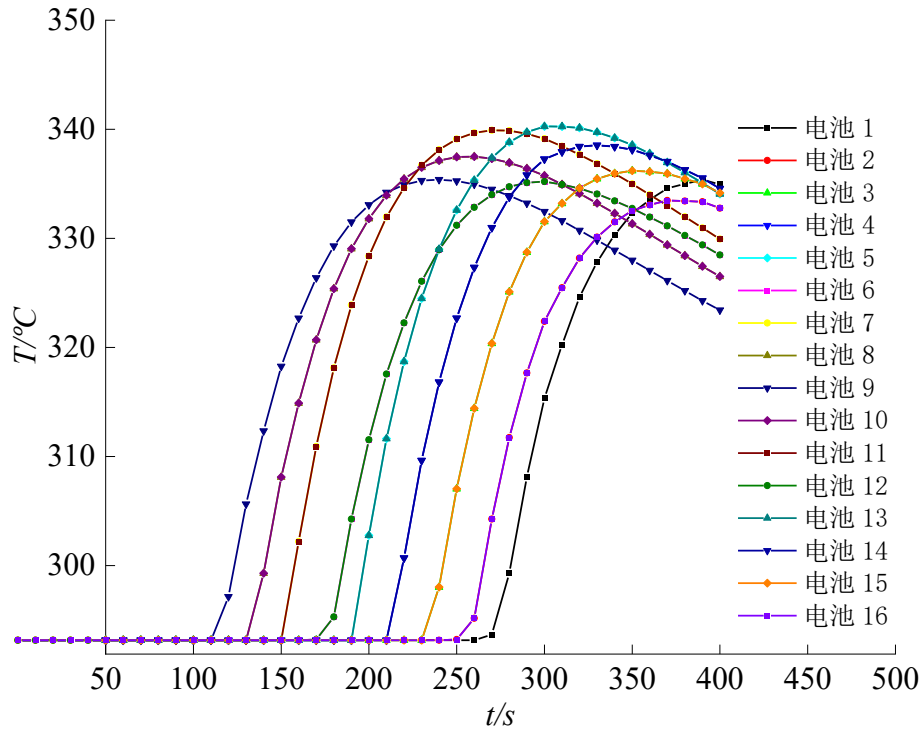


图 11 中间位置电池单体热失控扩散对模组温度的影响

4.3 模型有效性与交叉验证

文献^[31,32]表明, 电池组热失控爆炸的外场压力峰值可达到 0.915 MPa, 在密闭条件下, 单体电芯泄压前内部压力峰值可达到 2.566 MPa^[31], 18650 型 NCM 电芯开展的多电芯密闭试验则获得了约 0.169-0.228 MPa 的爆炸压力峰值^[32]。因此, 本文将 2 MPa 作为考虑高风险密闭工况的保守等效压力载荷, 评价防爆外壳在较严重冲击条件下的结构响应与安全裕度是合理的。

已有基于 ARC/EV-ARC 试验的研究表明, 采用能量守恒方程、反应动力学模型以及合理的热物性参数能够较好地描述锂离子电池热失控过程中的温度演化规律^[33-35]。本文所建立的热模型采用相同的瞬态热传导基本控制方程, 并结合电芯及外壳材料的热物性参数描述热量在电池—外壳系统中的传递过程。本文采用的等效热源函数对复杂电化学反应及多阶段产热过程进行了适当简化, 适用于分析不同热源位置下的

热传播特征以及外壳热-结构响应。

综合来看, 本文模型能够满足矿用防爆外壳结构安全裕度及不同热失控位置影响规律的对比分析需求, 但其计算结果主要反映给定等效工况下系统响应的相对变化规律。

5 结论

(1) 690 级结构钢外壳在 2MPa 爆炸压力与 500°C 热载荷下, 应力峰值低于屈服强度, 变形量小于 0.5%, 结构完整性良好, 满足极端工况承载要求。螺孔边缘、盖板连接处等几何不连续区域为应力集中薄弱环节, 建议采用圆角过渡、增设加强筋、局部加厚等优化措施。这些措施可降低应力峰值, 提高外壳在爆炸-热失控耦合工况下的整体可靠性。

(2) 电芯热失控工况下各指标处于安全范围, 热响应可控, 安全裕度较高。电池模组状态下, 热失控电芯位置对热传播速度与范围有显著影响。边缘电芯热失控时, 由于靠近外壳, 部分热量迅速向外散逸, 因此热量向其他电芯的传递减缓。中间电芯热失控时, 由于被其他电芯包围, 热量难以快速散出, 导致向四周加速扩散。

(3) 本文所建立的建模与仿真方法具有普适性和可扩展性。所采用的“单体热源+电池模组模型”方法, 可推广至更大容量或不同拓扑的电池系统(如更大规模的 16s2p、24s1p 等模组)。

(4) 本文模型预测精度受到电芯各向异性传热、辐射换热、热源参数标定与爆炸压力时程等因素的影响, 后续研究将结合相同类型电芯的 ARC/EV-ARC 试验以及防爆外壳内部压力试验, 对热源参数、瞬态压力载荷及温度响应进行进一步标定和验证, 以提高模型对实际矿用电池系统热失控与爆炸响应的定量预测能力。

参考文献

- [1] HU D N, HUANG S, WEN Z, et al. A review on thermal runaway warning technology for lithium-ion batteries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 206: 114882.
- [2] BANDHAUER T M, GARIMELLA S, FULLER T F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(3): R1-R25.
- [3] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: a review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [4] JIN C, SUN Y, WANG H, et al. Heating power and heating energy effect on the thermal runaway propagation characteristics of lithium-ion battery module: Experiments and modeling [J]. APPLIED ENERGY, 2022, 312.
- [5] HUANG P, PING P, LI K, et al. Experimental and modeling analysis of thermal runaway propagation over the large format energy storage battery module with Li4Ti5O12 anode [J]. APPLIED ENERGY, 2016, 183: 659-673.
- [6] 袁帅, 台枫, 钱新明, 等. 磷酸铁锂离子电池热失控产物爆炸下限预测方法[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(2): 021434.
- [7] 吕敏, 黄燕. 软包锂离子电池热失控多维特征参数演变研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(3): 193-202.
- [8] 张世超, 沈泽宇, 陆盈盈. 金属锂电池的热失控与安全性研究进展. 物理化学学报[J], 2021, 37(1): 2008065.
- [9] HU D, HUANG S, WEN Z, et al. A review on thermal runaway warning technology for lithium-ion batteries [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2024, 206: 114882.
- [10] TRAN M K, MEVAWALLA A, AZIZ A, et al. A review of lithium-ion battery thermal runaway modeling and diagnosis approaches [J]. Processes, 2022, 10(6): 1192.
- [11] WANG G, LIU J, ZHAO Y, et al. Advances and challenges in thermal runaway modeling [J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 91: 1-15.
- [12] 杨梦华, 岳丽宏. 基于 COMSOL 的锂离子电池热失控仿真与防控[J]. 新能源进展, 2022, 10(4): 375-382.
- [13] 郭艾雯, 邢志祥, 施雅琴, 等. 基于 Comsol 锂离子电池模组热失控及散热模型仿真[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 111-116.
- [14] 詹世东, 李康伟, 蔡友彬, 等. 基于 Fluent 的单体锂离子电池热仿真分析[J]. 时代汽车, 2021(22): 128-130.
- [15] 李富伟, 曹凤金, 李高升, 等. 锂离子蓄电池动力电源在非煤地下矿山的安全应用研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(8): 208-216.
- [16] 杨凯, 杨晓光, 王文伟, 等. 锂离子电池电化学-热-力多物理场耦合建模综述[J]. 电源技术 2025 (05).
- [17] 王润东, 黎静华, 韦善阳. 基于多物理场耦合模型的碱性水电解槽工作特性[J]. 高电压技术. 2024, 50 (07).
- [18] 周妮, 韩轩沫依, 黄月华, 等. 锂离子电池模块热失控仿真研究[J]. 电池工业.

- [19] 齐创, 邝男男, 张亚军, 等. 高比能锂离子电池模组热扩散行为仿真研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2633-2643.
- [20] 芮新宇, 冯旭宁, 韩雪冰, 等. 锂离子电池热失控蔓延问题研究综述[J]. 电池工业, 2020, 24(4): 193-201, 205.
- [21] 曹洪祥, 邱子健. 锂离子电池热失控安全预警方法研究进展[J]. 广东化工, 2025, 52(09).
- [22] KONG, D., H. LV and P. PING et al., A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 2023, 64: 107073.
- [23] KIM, S.W., E. KWAK and J. KIM et al., Modeling and prediction of lithium-ion battery thermal runaway via multiphysics-informed neural network. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60: 106654.
- [24] O'KANE S E, AI W, MADABATTULA G, et al. Lithiumion battery degradation:how to model it [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2022, 24(13):7909-7922.
- [25] 尹啸笛,张涛,张新春,等.机械滥用下锂离子电池的力学响应及安全性预测研究进展[J].材料导报,2024,38(2):14-22.
- [26] ÖZDEMİR T, EKICI Ö, KÖKSAL M. Numerical and experimental investigation of the electrical and thermal behaviors of the Li-ion batteries under normal and abuse operating conditions [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 77:109880.
- [27] 何骁龙,石晓龙,王子阳,等. 过充、过热及其共同作用下车用三元锂离子电池热失控特性[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1):218-226.
- [28] 朱晓庆,王震坡, WANG H. 锂离子动力电池热失控与安全管理研究综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14):91-118.
- [29] 李星辰,姚雯. COMSOL 多物理场仿真入门指南[M]. 第二版. 北京:机械工业出版社, 2024.
- [30] 卓萍, 朱艳丽, 齐创, 等. 锂离子电池组过充燃烧爆炸特性[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(8): 2471-2479.
- [31] MAO, B., C. FEAR and H. CHEN et al., Experimental and modeling investigation on the gas generation dynamics of lithium-ion batteries during thermal runaway. *eTransportation*, 2023, 15: 100212.
- [32] LIU Q, ZHU Q, ZHU W, et al. Thermal Runaway Characteristics of 18650 NCM Lithium-ion Batteries under the Different Initial Pressures[J]. *Electrochemistry*, 2022, 90(8).
- [33] SHELKE A V, BUSTON J E H, GILL J, et al. Combined numerical and experimental studies of 21700 lithium-ion battery thermal runaway induced by different thermal abuse[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 194:123099.
- [34] CHEN H, BUSTON J E H, GILL J, et al. A Simplified Mathematical Model for Heating-Induced Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2021, 168:010502.
- [35] HOELLE S, DENGLER F, ZIMMERMANN S, HINRICHSSEN O. 3D Thermal Simulation of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway in Autoclave Calorimetry: Development and Comparison of Modeling Approaches[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2023, 170:010509.
- [36] CAILLIEZ S, CHALET D, MANNESSIEZ P. Simultaneous identification of the heat capacity and the anisotropic thermal conductivities of a Li-ion pouch cell by a non-destructive analytical approach[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 542:231751.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS