

# 储能用大容量磷酸铁锂电池系统热失控安全风险评价研究

安全2102班：卜莎莎 指导教师：武丹 论文类型：毕业论文

**摘要：**本文应用仿真分析与风险评价的研究方法，探讨了单体电池热失控以及热蔓延特性，并对其进行安全风险评价。首先对磷酸铁锂电池的热失控及热蔓延机理进行论述；其次，基于 COMSOL 仿真软件建立单体电池的电化学-热耦合模型，并基于磷酸铁锂单体电池的仿真模拟，建立了电池组的热失控蔓延模型，分别探究单体与电池组的热行为；最后，通过以上仿真模拟数据，对单体以及电池组进行安全评价。得出一定结论，并提出相关对策建议。

**关键词：**磷酸铁锂电池；单体；热失控；电池组热蔓延；风险评价

## 1 发展现状

国内外学者对锂电池热失控开展了大量研究。国内研究聚焦热失控触发方式、影响因素、仿真技术及风险评估模型构建等，如冯旭宁等将热失控事故分为三个阶段，汪红辉等探究磷酸铁锂电池热安全性演化规律，陈吉清等通过仿真研究锂电池起火燃烧特性。国外研究则侧重于热失控及蔓延模型构建、不同滥用条件下的影响评估等，如 Jia Y K 等构建三维热失控传播模型，Hoelle S 等开发方形 LBM 热扩散模型，Coman 团队提出电池组热传播数值模型。但现有模型在复杂工况下预测精度有待提升，面向实际应用场景的定量风险评估模型仍存在挑战。

## 2 锂电池热失控理论分析

电池由正负极、隔膜及电解液组成，工作时锂离子在正负极嵌入脱出，伴随氧化还原反应。热失控是内部热量积累超散热能力引发的连锁反应，诱因包括机械、电、热滥用，且三者相互关联。热失控演化伴随 SEI 膜分解、负极与电解液反应等副反应，热蔓延通过热传导、对流、辐射在电池组中传播。

## 3 仿真分析

### 3.1 模型建立

基于 COMSOL 软件建立一维电化学-三维热耦合模型，考虑能量守恒、电荷守恒、电极动力学及副反应方程。能量守恒方程描述电池热失控过程中内能增量与传热、产热的关系；电荷守恒包括固相和电解质电荷守恒；电极动力学通过 Butler-Volmer 方程描述电极界面电化学反应；副反应方程考虑 SEI 膜分解、负极与电解液反应等产热。以单体电池热失控模型为基础，建立 4 串联磷酸铁锂电池模组模型，

考虑热传导、对流及辐射传热机制。热传导通过傅里叶定律描述，热对流用牛顿冷却公式表示，热辐射遵循斯蒂芬-玻尔兹曼定律。所建立的几何模型如图 3.1 所示。

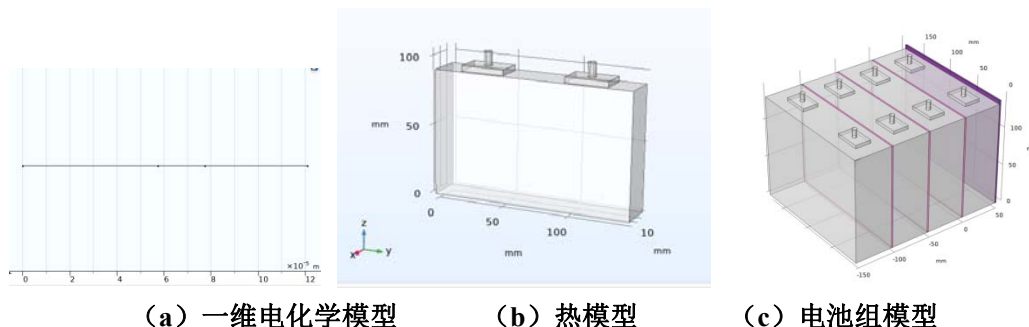


图 3.1 单体电池模型图

### 3.2 结果与分析

仿真结果表明，对单体电池在 180℃、190℃、200℃、230℃和 260℃环境温度下进行仿真，发现当环境温度大于 200℃时，单体电池开始发生热失控，随着外界环境的温度不断升高，热失控发生的时间就越早，峰值温度也越高。

200℃时约 37min 触发热失控，内部副反应启动，温度急剧攀升，57.5min 时达到 221℃；环境温度越高，热失控发生时间越早，峰值温度越高，如 260℃时电池最高温度达 331℃。电池温度从中心向四周扩散，内部热源及副反应参数随环境温度变化，正极与电解液反应是导致电池温度升高和热失控的关键因素。

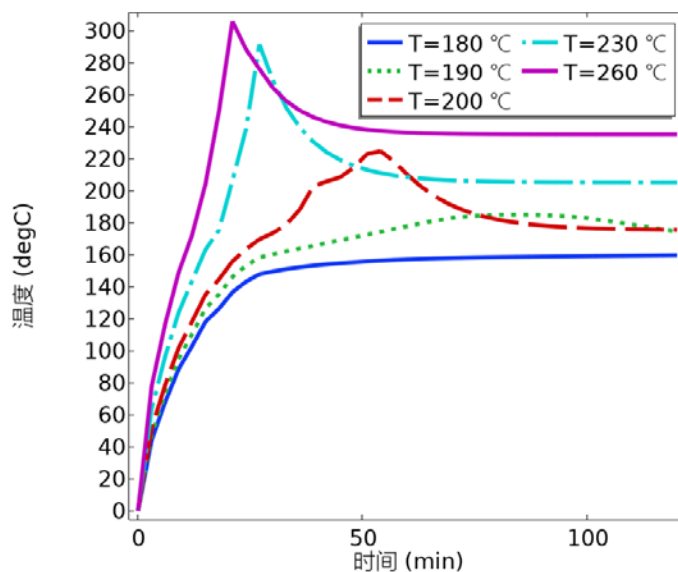


图 3.2 不同环境温度电池变化

在 180℃、200℃、230℃外界环境温度下，180℃时电池组未发生热失控，仅温度升高；200℃和 230℃时电池组发生热失控，200℃时电池最高温度分别为 270℃、285℃、290℃、315℃，230℃时为 309℃、312℃、315℃、349℃，通过这些分析，可以看出在不同的外界环境温度之下，电池组之间会存在热量互相传导的过程；同

时也发现当外界的环境温度越高，电池组发生热失控的时间会提前，更容易达到热失控蔓延的情况。

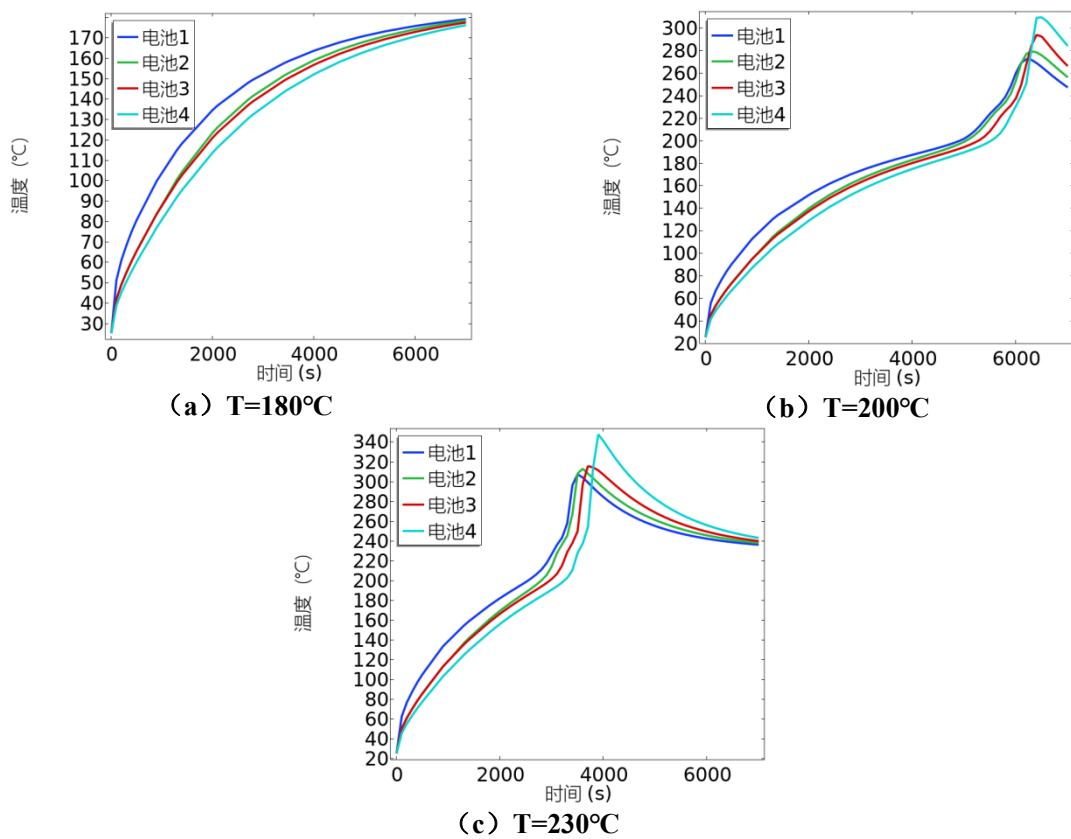


图 3.3 不同环境温度下电池组的温度变化

## 4 锂电池热失控安全风险评价

### 4.1 评价指标体系

模组电池采用基于热失控风险指数的评价方法，风险指数定义如下：

$$R=FD=a \cdot \frac{1}{TI} \cdot THRI \cdot FGI \quad (\text{式3.1})$$

其中 TI 为点燃参数，THRI 为热释放参数，FGI 为火势增长参数，a 为环境因子。该指数综合考虑热失控发生可能性及后果严重度，值越低安全性越高。TI，THRI，FGI，a 这几个值分别由热失控发展过程中的一些关键特征参数进行描述，如自产热温度、热失控温度、热失控最高温度、热释放速率峰值等，这些参数主要是通过前文的仿真模拟所获得。

### 4.2 风险评价结果分析

模组电池的仿真构建是以前文中所研究的单体电池为基础展开的。在对电池组进行安全评价时，需要选取其中最具危险性的单体电池的关键系数，以此来对整个模组电池的热失控风险等情况进行评估。为了全面且准确地获取相关数据，这个最具代表性的单体电池被分别置于三种不同的外界环境条件下进行观测与分析。通过

这些可获得的数据以及前文中所介绍的基于热失控风险指数的安全评价方法来对模组电池进行评价。

根据热失控风险指数的计算过程，其中的一些具体参数如下表 3.1。根据以下参数来计算出在不同环境温度之下的热失控风险指数，并对其进行相应的分析。

表3.1 评价所需数据值

外界温度（℃）	a	t <sub>1</sub> （s）	T <sub>TR</sub> （℃）	T <sub>max</sub> （℃）	差值	dT/dt <sub>max</sub>	t <sub>2</sub> （s）
200	1	960	153	246	93	15	1100
230	1	300	127	311	184	18	1550
260	1	240	120	327	207	19	2700

所计算得到的热失控风险指数如表 3.2 所示。

表3.2 热失控风险指数结果

环境温度（℃）	S	P		V
	TI	THRI	FGI	
200	5.11	5.39	0.011818182	0.012465753
230	4.51	5.69	0.011612903	0.014651312
260	4.38	5.74	0.012962963	0.016987993

通过以上所计算得到的热失控风险指数及其他参数可以得出，电池在不同环境温度下发生危险的可能性相比，虽然相差比较小，但都是逐渐变大，这是由于随着环境温度升高，触发热失控的温度会降低，且时间会提前。对于热失控所造成的损失同时是随着环境温度升高而不断变大。因此该电池的热失控风险指数整体呈现不断上升的趋势。

4.3 风险控制措施

提出多方面风险控制措施：优化热管理系统，如改进散热设计、采用主动冷却技术、加入相变材料等；加强温度监测与预警，布置高精度温度传感器、设定多级预警阈值；控制环境温度，配备空调、优化通风；升级电池管理系统，精准监测参数、联动热管理系统；制定应急处理预案，规范响应机制、定期演练。

5 研究结论及对策建议

本研究阐述了磷酸铁锂电池热失控及热蔓延机理，构建了单体电池热失控及电池组热蔓延模型，通过仿真分析了热失控特性，建立了安全风险评价体系并进行评估，提出了风险控制措施。结论如下：

1）当环境温度大于 200℃时，单体电池开始发生热失控，且外界环境的温度越高，热失控发生的时间就越早，峰值温度也越高。

2) 对于电池组热蔓延模型，在三种不同环境温度下加热整个电池组，可以发现电池组中的单体电池到达热失控的时间以及最大温度具有一致性。

3) 基于热失控发展过程中的关键参数，对锂电池单体以及模组进行安全风险评价，得到随着外界环境的温度越高，单体电池以及电池组的风险就越大。