锂离子电池过充热失控建模及热特性研究

董浩然, 王青松,梅文昕*

中国科学技术大学，火灾安全全国重点实验室，安徽，合肥

作者联系：董浩然（dhran@mail.ustc.edu.cn）

COMSOL CONFERENCE 2026 SHENZHEN

1.简介

过充是诱发锂离子电池热失控的重要因素，可导致电池内部产热增加、副反应加剧，严重时引发燃烧或爆炸。为揭示过充热失控的演化规律，本文以5Ah三元锂离子电池为研究对象，基于COMSOL Multiphysics建立**电化学–热–副反应耦合**模型。通过该模型分析电池温度及副反应放热的变化特征，研究充电倍率和对流换热系数对热失控行为的影响，为锂离子电池过充安全防护与热管理设计提供参考。

2.模型建立及验证

模型为P2D电化学模型、三维热模型与副反应动力学模型的耦合模型，模型耦合关系如图1所示。

◆模型构建

建立P2D电化学模型、三维热模型及副反应动力学模型，考虑SEI膜分解、负极与电解液反应、正极与电解液反应及电解液分解产生的热量。

◆分阶段热源与耦合

正常充电阶段采用**P2D模型**计算产热；过充阶段结合**实验电压拟合**估算热源，并与副反应产热共同输入三维热模型。通过阿伦尼乌斯公式将温度反馈对电化学参数及副反应速率产生影响。

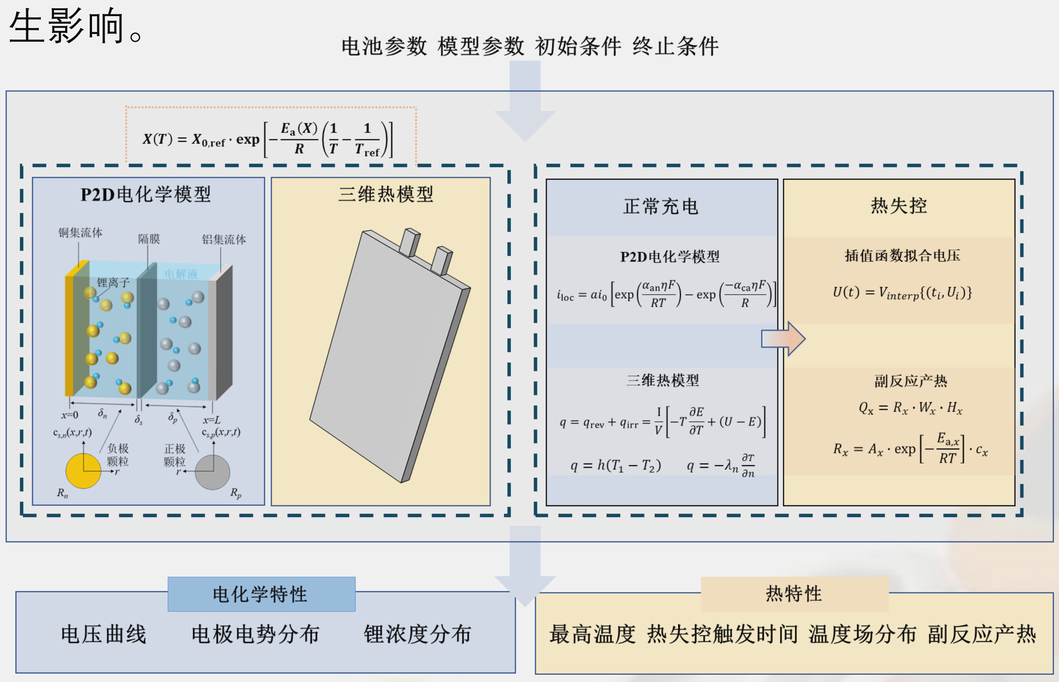


图 1. 模型耦合原理示意图

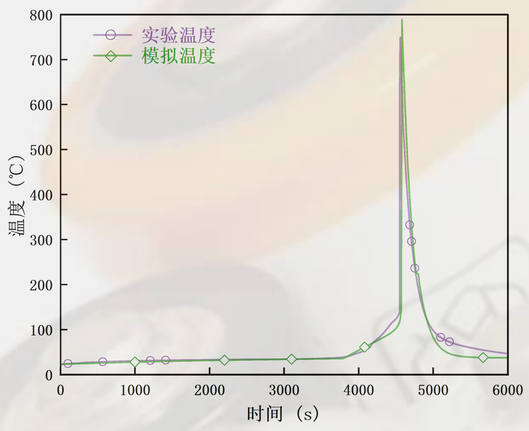


图 2. 模型试验温度对比图

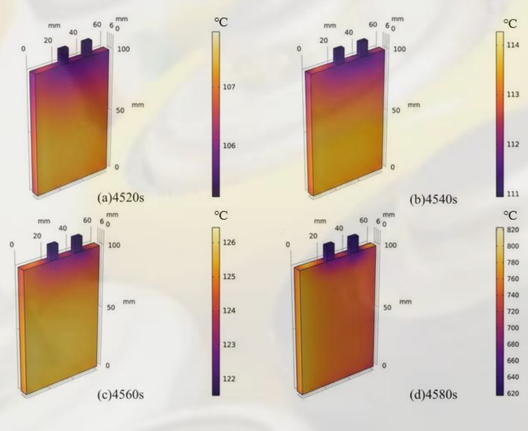


图 3. 温度分布云图

3.过充热失控演化规律

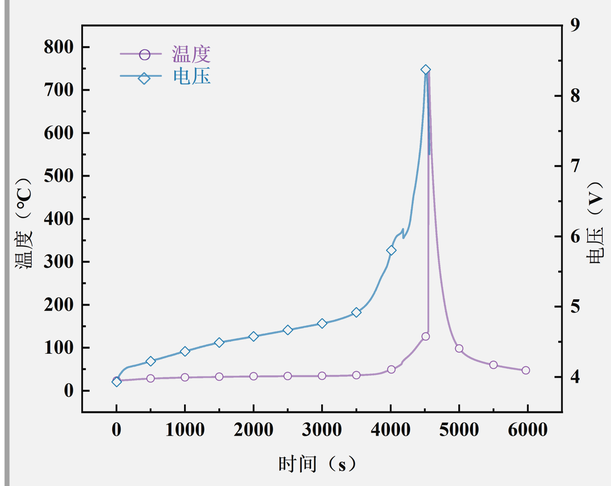


图 4. 过充热失控电压、温度曲线

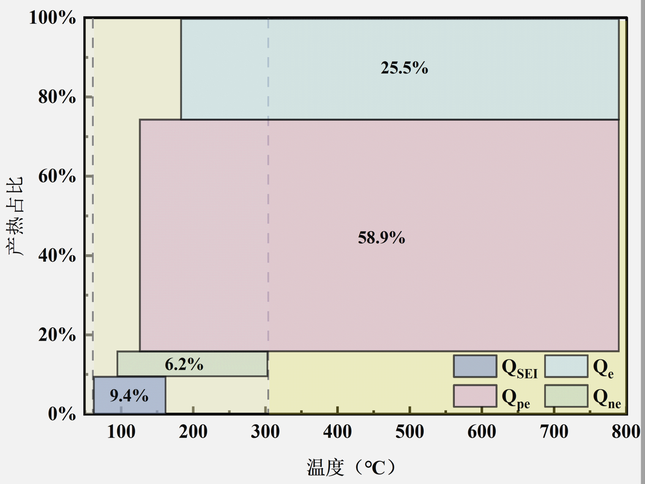


图 5. 副反应产热占比

- 正常充电阶段：温度缓慢升高，产热主要来自欧姆热和电化学反应热
- 过充阶段：极化增强，析锂及副反应逐渐加剧，内部热量不断积累。
- 热失控阶段：副反应放热速率迅速增加，温度在短时间内快速升高。
- 如图5所示，SEI膜分解较早发生，是产热的**早期热源**；正极分解放热占比最高，是剧烈升温阶段的**重要热源**。

4.不同工况的影响

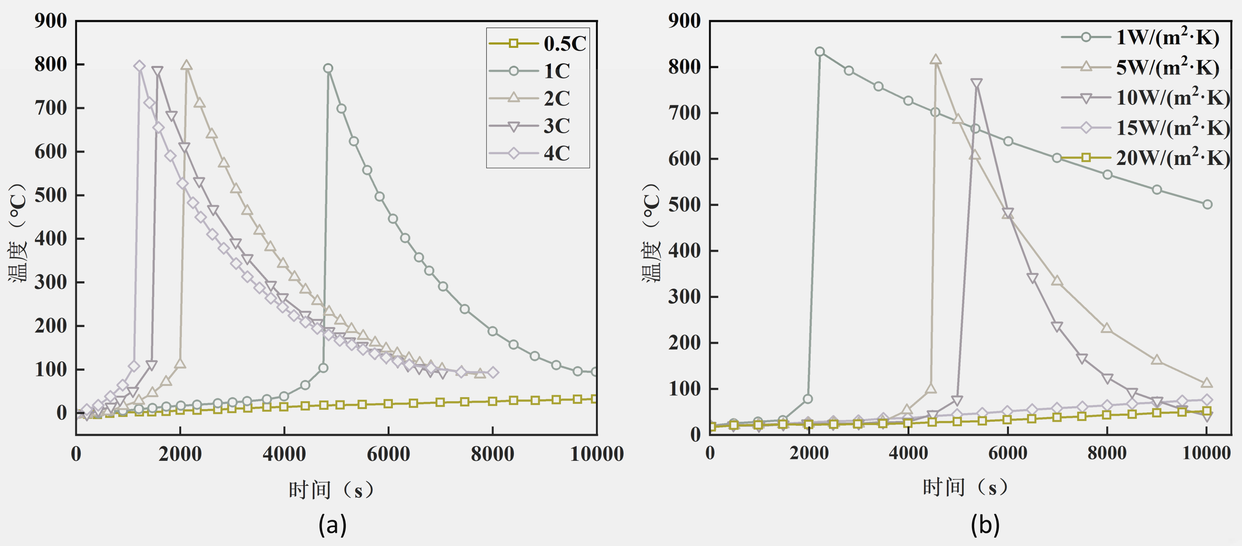


图 6. 不同工况影响下温度曲线变化图 （a）充电倍率； （b）对流换热系数

倍率(C)	T_{TR}(℃)	触发时间(s)	对流换热系数 $(W/(m^2 \cdot K))$	T_{max}(℃)	触发时间(s)
0.5	--	--	1	833	2194
1	137.84	4584	5	789	4584
2	138.98	2235	10	769	5310
3	138	1614	15	73	--
4	139.61	1320	20	44	--

5.结论

- 建立了电化学–热–副反应**耦合模型**，较好地再现了电池过充热失控过程的温度演化特征。
- 过充热失控是多种副反应共同作用的结果。**SEI膜分解较早发生**，正极分解在剧烈升温阶段作为**主要放热贡献**。
- 提高充电倍率会显著提前热失控时间；增强外部散热能够延缓热失控，并在一定条件下抑制温度快速升高