



锂离子电池热安全及防控措施研究

严佳佳，陈昊东，王青松*

中国科学技术大学

火灾科学国家重点实验室

2016.11.03



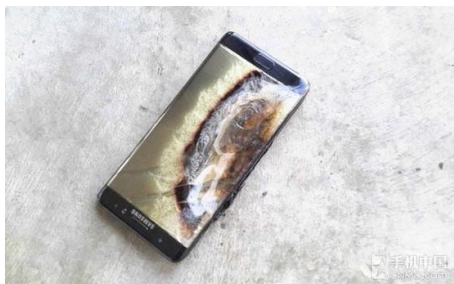
目录

- **锂离子电池热安全问题的提出**
- **主要研究进展**
 - **锂离子电池产热规律**
 - **锂离子电池热失控**
 - **锂离子电池热管理系统**
- **面临的主要挑战**



锂离子电池热安全问题

● 安全问题：锂离子电池火灾和爆炸事故频发

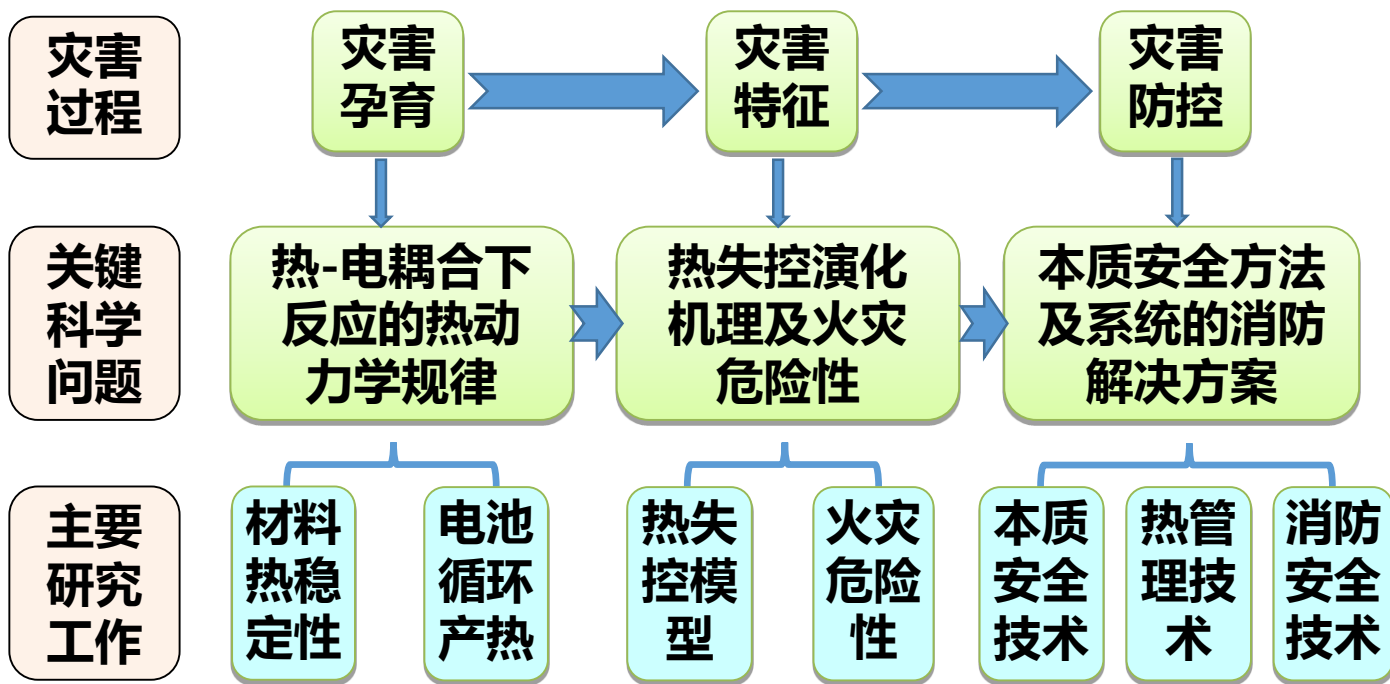


- 亟需解决日益增长的锂电需求与安全性之间的矛盾
- 锂离子电池火灾特点及难点：
 - ✓ 主要形式：热失控导致火灾爆炸
 - ✓ 灾害孕育：锂离子的赋存状态主导锂离子电池的热安全性
 - ✓ 灾害发生：热失控发展迅速、火灾危险性大
 - ✓ 灾害防控：缺少有效的防控手段



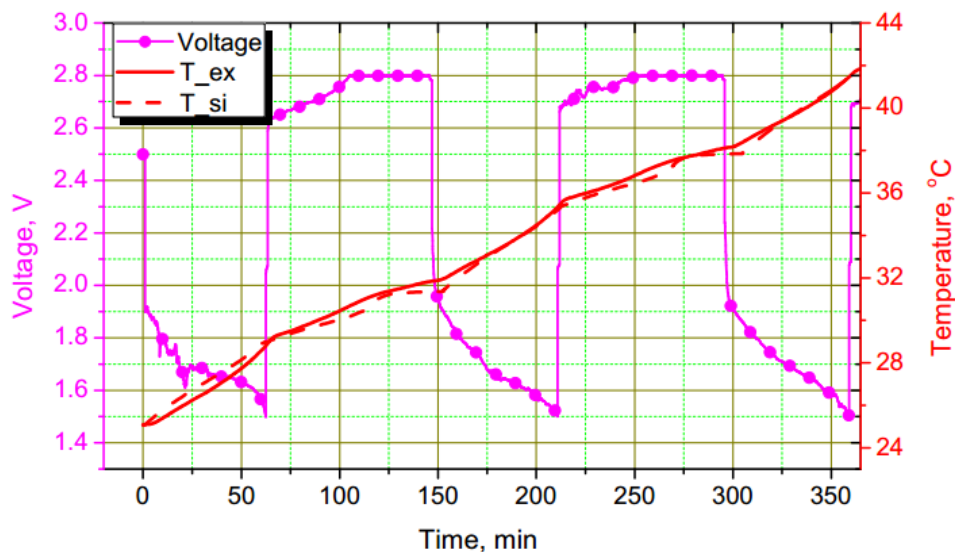
总体研究概况

● 聚焦：锂离子电池火灾危险性及其防控技术

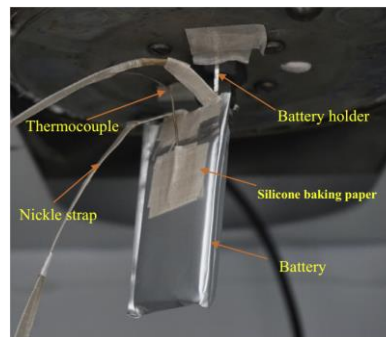


1. 电池产热规律

● 揭示了锂离子电池循环产热规律



绝热 1.0C 充放电循环条件下电池温升的实验值与模拟值对比图



商用三元-钛酸锂
软包电池 (1 Ah)

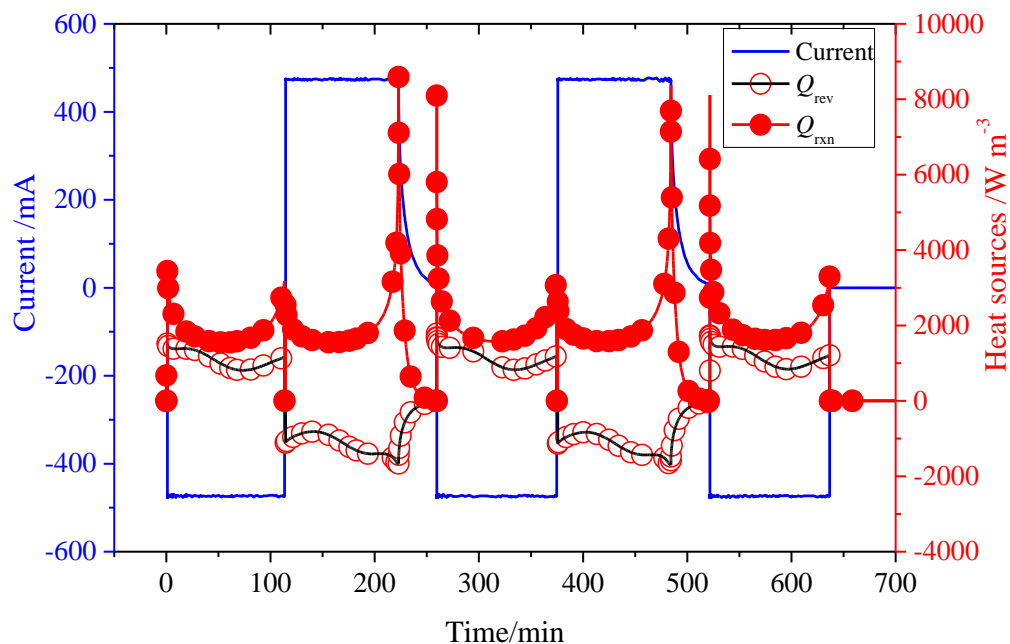
- 电化学-热耦合模型：有限元法、瞬态计算
- 充放电实验在绝热加速量热仪 (ARC) 中进行，联用充放电循环仪
- 模拟结果与实验数据吻合较好

Sun, **Wang*** et al. International Journal of Heat and Mass Transfer 93 (2016) 896–905
Sun, **Wang*** et al. Energy Conversion and Management 92 (2015) 184–193



1. 电池产热规律

◆ 可逆热与不可逆热

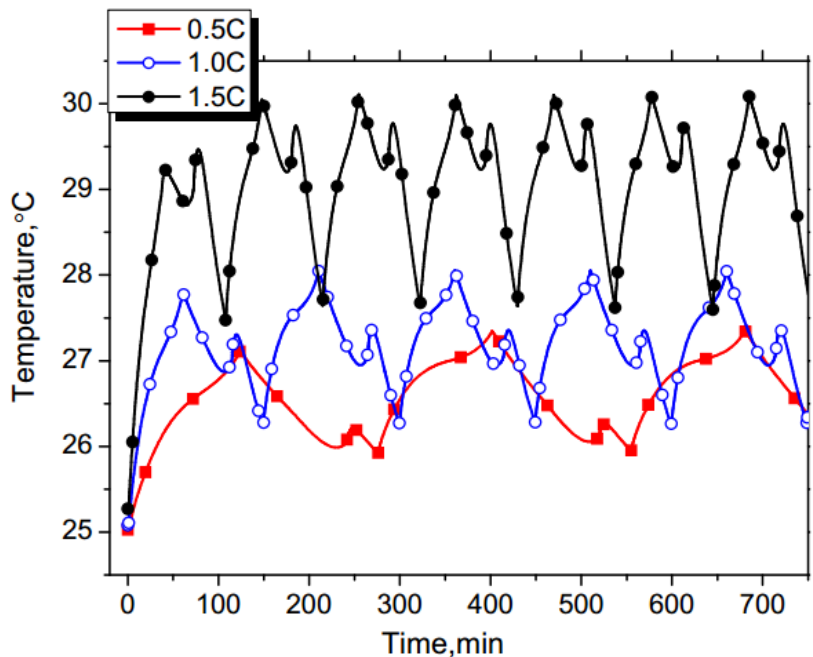


0.5C 充放电循环下电池热源分析

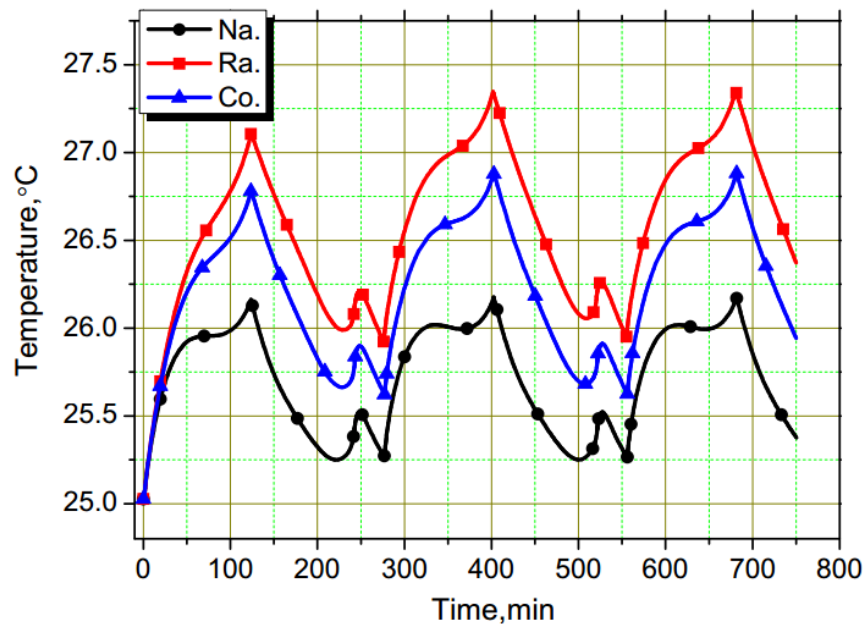
- 可逆热在放电过程为正值，在充电过程为负值
- 充电过程中，不可逆热值略高于可逆热，故总热源在充电过程中是大于零的
- 不可逆热在充电末期和放电初期出现急剧增大变化



1. 电池产热规律



自然对流条件下不同充放电倍率时
电池温升的对比



0.5C 充放电循环下不同散热条件下
电池温度的变化

Sun, Wang* et al. International Journal of Heat and Mass Transfer 93 (2016) 896–905

- 充放电循环 + 不同倍率 → 电池产热 温度双峰
- 不同散热条件：辐射散热占总散热量 42%



2. 电池热失控

锂离子电池热失控模型研究

● 电化学模型

- Newman 电化学模型和 White 电化学模型；
- 国内外学者等人对这两种模型进行了比较，认为 Newman 模型计算灵敏度更高。

● 电化学-热耦合模型

- 一维电化学与三维热模型相耦合，模拟电池在正常充放电工况下的温度变化。
- Chen 等开展了锂离子电池的三维模拟。

● 未考虑化学反应产热



2. 电池热失控

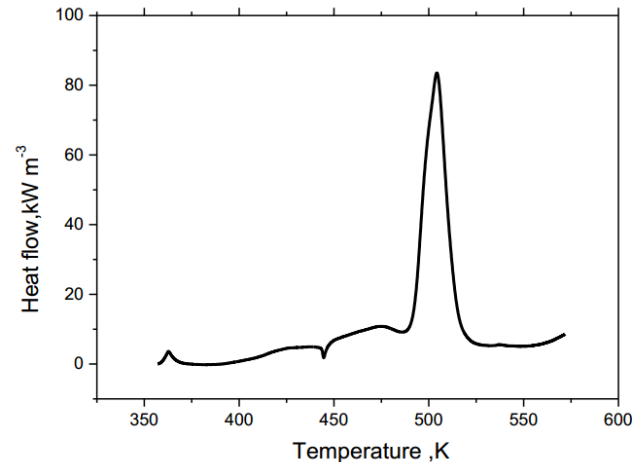
● 建立了耦合化学反应热的热失控模型



$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K_{T,j} \nabla T) + \boxed{Q_g} + Q_{ex}$$

$$\boxed{Q_g} = Q_{rxn} + Q_{rev} + Q_h$$

$$\rho V c \frac{dT}{dt} = I(E_q + Tz) + \Delta H' M' A' \exp\left(-\frac{E_a'}{RT}\right) - \pi DLh(T - T_{sur}) - \varepsilon \sigma \pi DL(T^4 - T_{sur}^4)$$



由自制 CR2032 纽扣电池的 C80 热流曲线计算得到 50Ah 电池的热流曲线

Sun, **Wang*** et al. Energy Conversion and Management 92 (2015) 184

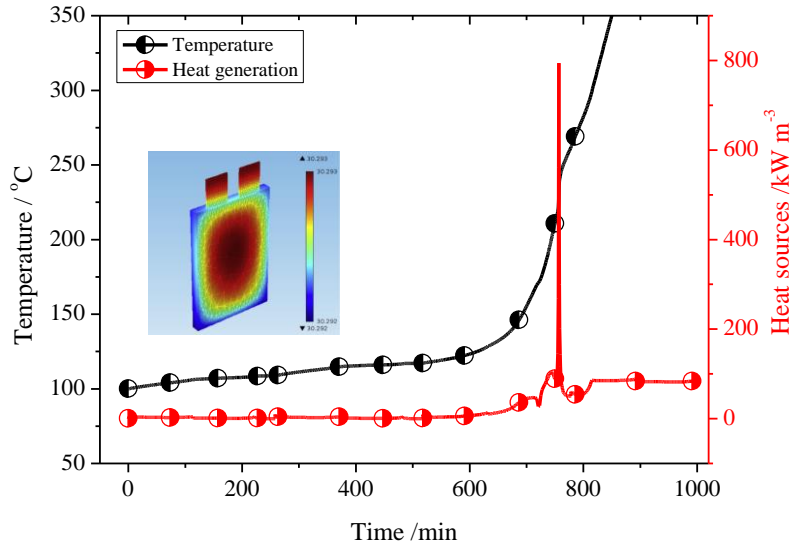
Chen, et al. **Wang***. Energies 8 (2015) 490

● 荷电状态 ~ 产热 → 各反应的热贡献 → 建立热失控模型

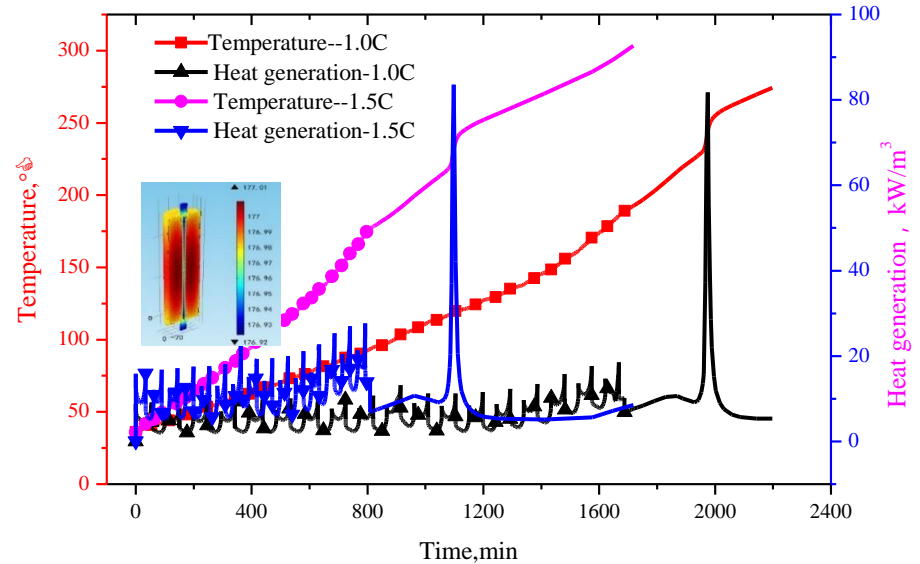


2. 电池热失控

● 热失控模拟结果:



1Ah 钛酸锂软包电池热失控过程



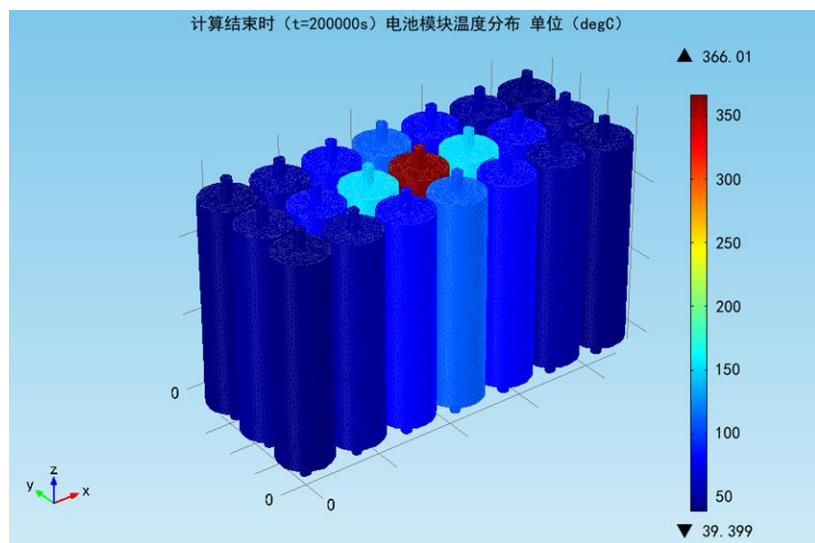
50Ah 钛酸锂电池不同充放电倍率下热失控过程

Sun, **Wang*** et al. Energy Conversion and Management 92 (2015) 184
Chen, **Wang*** et al. Energies 8 (2015) 490

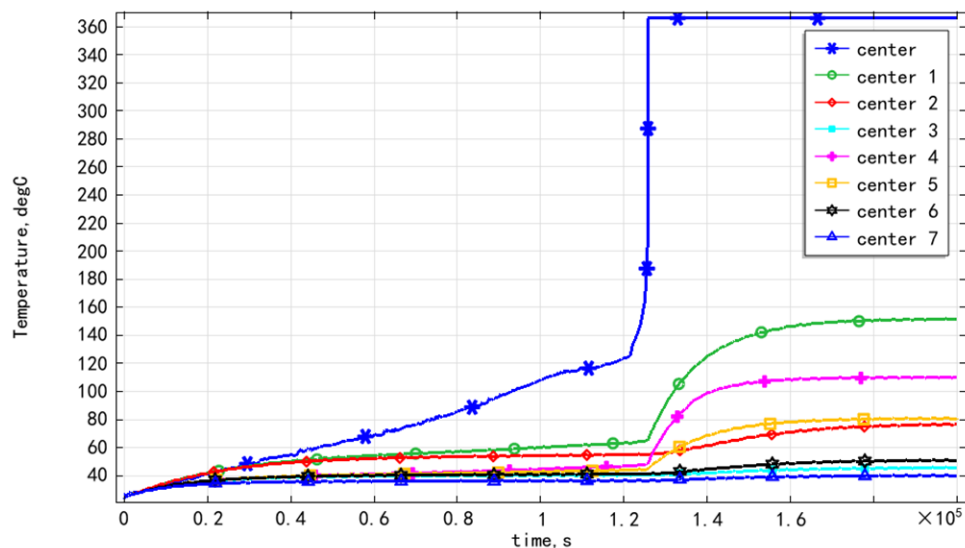


2. 电池热失控

● 电池模组热效应:



3×7电池模组温度分布图



电池模组内各电池温度变化曲线

- 随着与受热单体距离的增加和散热工况的改进，电池模块内各个单体因过热单体电池热辐射影响而造成的温度变化变小。
- 过热电池周边的 1 和 4 电池温度可超过 177°C，可引发该电池的热失控，从而引发电池模块的连锁反应，导致模块中所有电池发生热失控。



3. 电池热管理系统

- 电池热管理系统(BTMS) :

目的：为了保证电池组的最高温度及最大温差在正常工作范围内。

$$T_{\max} \leq 50^{\circ}\text{C}, \Delta T_{\max} \leq 5^{\circ}\text{C}$$

常用的电池热管理系统分类：空气冷却、液体冷却、相变材料系统

最常见的问题：

散热能力

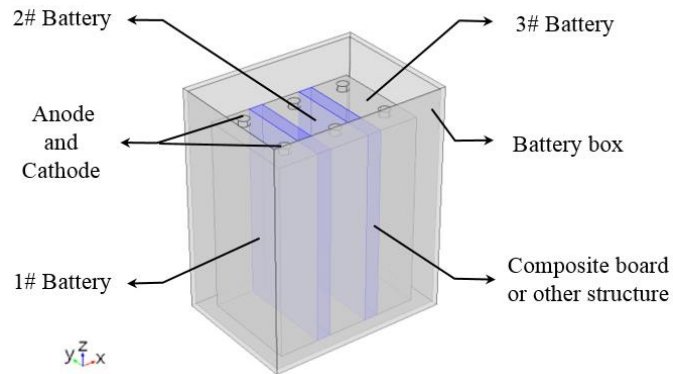
矛盾?

热失控
阻隔能力

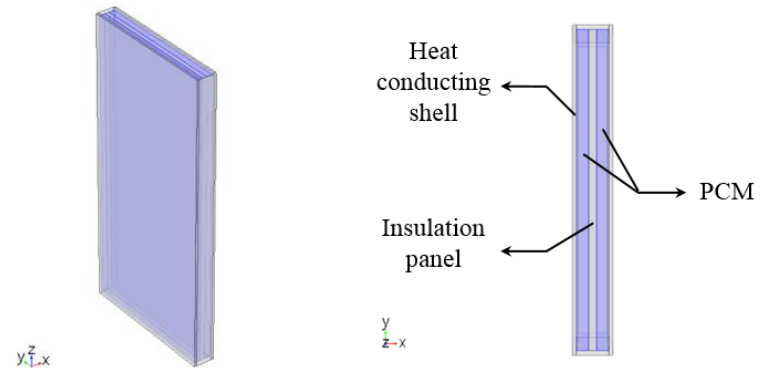


3. 电池热管理系统

- 电池热管理系统(BTMS) :
- ✓ 提出一种基于复合板结构的电池热管理系统
- ✓ 复合板：三明治结构，由导热壳、隔热板、相变材料组成



锂离子电池组结构图



复合板结构的立体图及俯视图

Yan, **Wang*** et al. Applied Thermal Engineering 106 (2016) 131–140

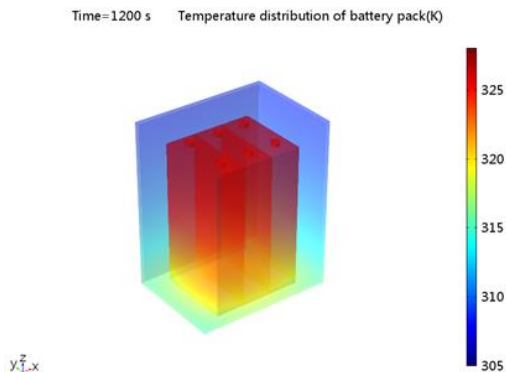


3. 电池热管理系统

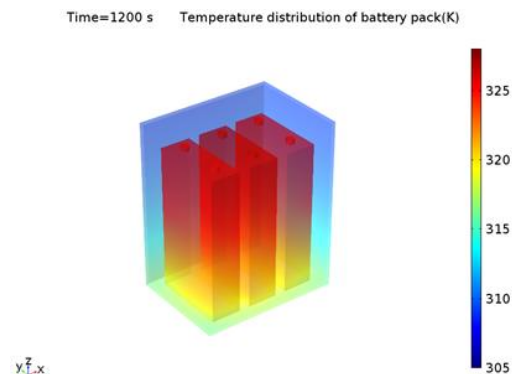
● 电池热管理系统(BTMS)模拟结果：散热能力

3 C 放电完成后电池组的温度分布图

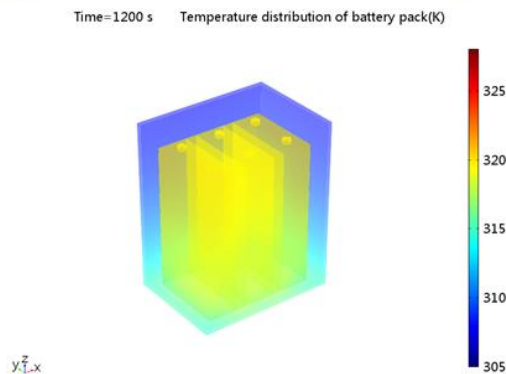
Mod1
：电池间紧密贴合



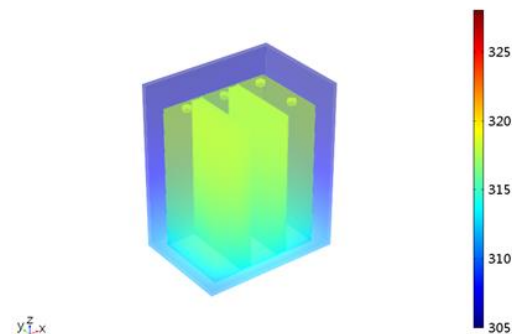
Mod2
：电池间空气间隔



Mod3
：电池间安装导热板



Mod4
：电池间安装复合板

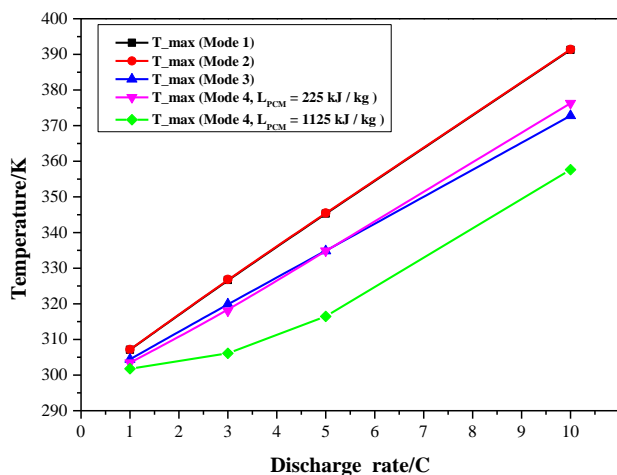


3. 电池热管理系统

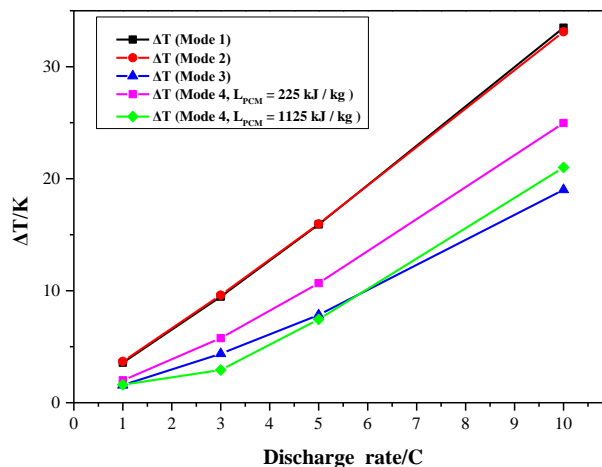
● 电池热管理系统(BTMS)模拟结果：散热能力

四种结构散热性能的对比：

- **散热能力**：Mod 4(高潜热) > Mod 4(低潜热) \approx Mod 3 > Mod 1 \approx Mod 2 ；
- **温度均一性**：Mod 4(高潜热) > Mod 3 > Mod 4(低潜热) > Mod 1 \approx Mod 2



不同电池组结构的**最高温度**随放电倍率的变化关系图



不同电池组结构的**最大温差**随放电倍率的变化关系图

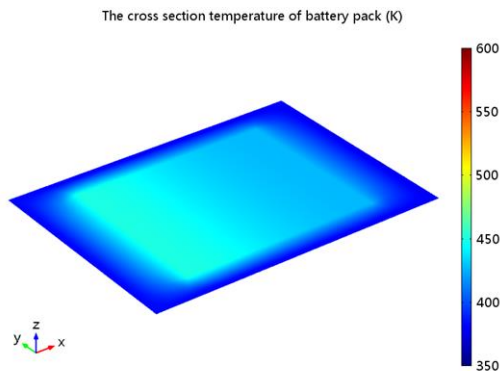


3. 电池热管理系统

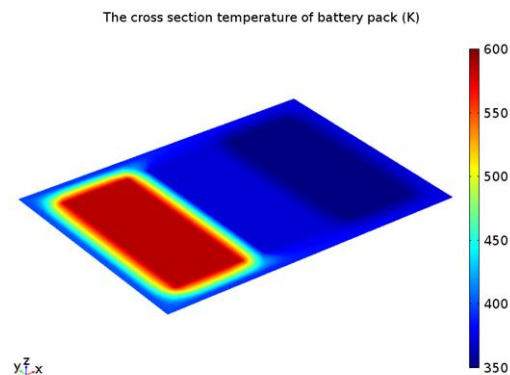
● 电池热管理系统(BTMS)模拟结果：热失控阻隔能力

热失控条件下电池组的横截面温度分布图

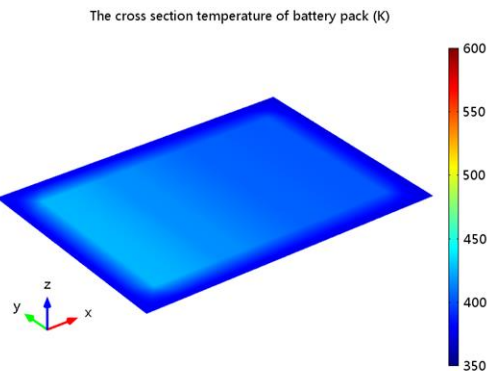
Mod1
：电池间紧密贴合



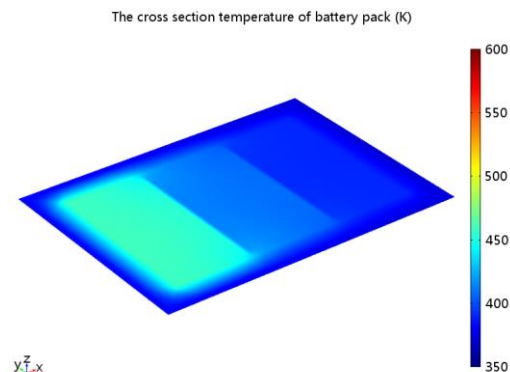
Mod2
：电池间空气间隔



Mod3
：电池间安装导热板



Mod4
：电池间安装复合板



3. 电池热管理系统

● 电池热管理系统(BTMS)模拟结果：**热失控阻隔能力**

- 不同结构电池发生热失控时间：

不同结构	第一个电池热失控时间 t_1/s	第二个电池热失控时间 t_2/s	时间间隔 Δt
Mod 1	777	883	106
Mod 2	307	1145	838
Mod 3	989	1157	168
Mod 4	881	1555	674

热失控阻隔能力：Mod 2 > Mod 4 > Mod 3 > Mod 1

但是 Mod2 的散热效果很差，电池 1 热失控的时间明显早于其他的结构，电池 1 的最高温度也是最高的，易造成更大的电池火灾风险，所以不推荐使用。因此，**隔热效果较好的是 Mod4**。



面临的主要挑战

- **本质安全型锂离子电池体系研发**
- **锂离子电池火灾动力学模型**
- **大型锂离子电池及系统热失控精准预测**
- **清洁高效的锂离子电池灭火技术**





谢谢!

敬请批评指正

联系人：王青松

pinew@ustc.edu.cn

13514983704