DOI: 10.3901/JME.2019.02.115

动力电池外部短路故障热-力影响与分析*

熊 瑞 马骥骁 杨瑞鑫 陈泽宇

(北京理工大学机械与车辆学院电动车辆国家工程实验室 北京 100081)

摘要: 动力电池安全性问题因电动汽车安全事故频发而备受关注, 短路故障则被认为是大部分动力电池安全事故发生的主要原因。针对外部短路故障, 以某圆柱形锂离子动力电池为研究对象, 根据能量守恒定律, 建立动力电池在外部短路情况下的三维热模型, 获取动力电池单体的内外温度场分布, 并在此基础上建立热-力模型, 仿真分析动力电池内部热应力分布, 计算结果表明: 在 25 °C 下动力电池两端内部活性材料与壳体的接触部位产生最大热应力, 热应力随时间变化趋势与表面温度变化一致, 且处于低段初始荷电状态(State of charge, SOC)动力电池的峰值热应力较高。该模型的应用可以为同类型动力电池节约测试成本、结构优化减少热应力以增加安全性提供一定的指导作用, 并提高对外部短路的动力电池响应规律的认识。

关键词: 电动汽车; 锂离子电池; 外部短路; 热-力模型

中图分类号: TM912

Thermo-mechanical Influence and Analysis of External Short Circuit Faults in Lithium-ion Battery

XIONG Rui MA Suxiao YANG Ruixin CHEN Zeyu

(National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, School of Mechanical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: The safety of batteries has attracted much attention due to the frequent occurrence of electric vehicle safety accidents. The short circuit faults of batteries are considered to be the principal issues of most safety accidents. For the external short circuit faults, a cylindrical lithium-ion battery is taken as the research object, and according to the law of conservation of energy, a three-dimensional thermal model of the battery under the external short circuit condition is established. This model can be used to obtain the temperature distribution of the internal and external temperature of the battery. After that, a thermo-mechanical model is established. The heat stress distribution inside the battery is simulated and the results show that the maximum heat stress occurs in the contact part of the active material and the shell at both ends of the battery at 25 °C, and its trend with time is consistent with the surface temperature, and the peak heat stress of the battery at the low-stage SOC(state of charge) is rather large. The application of this model can provide a guiding role for the same type of battery saving test cost, structural optimization and reduction of heat stress to increase safety, and improve the understanding of the response law of the battery after external short circuit.

Key words: Electric vehicles; Lithium-ion battery; External short circuit; Thermo-mechanical model

0 前言

面对环境与能源的双重压力, 以锂离子动力电池为主要能源的新能源汽车备受关注。随着新能源汽车的商业化推广, 锂离子动力电池的安全性问题成为制约其市场接受度和普及度的主要障碍, 能否有效地解决动力电池安全问题极其重要^[1-2]。新能源汽车因工作状态复杂而导致动力电池经常以大倍率

电流进行充、放电, 同时由于振动、通风环境、电池间连接松紧等因素容易对动力电池产生消极的影响, 将可能引起动力电池挤压变形后而导致内、外部短路故障, 短时间内发生一系列不可逆转的化学反应形成热积累, 从而造成新能源汽车发生冒烟、自燃甚至爆炸等危害人类生命的严重问题。如何同时兼顾动力电池续航能力和安全性能, 避免其内、外部短路造成的安全隐患, 设计优化更好的动力电池结构成为了当前车载锂离子电池技术的研究重点之一。

目前, 很多研究人员将重心放在了动力电池材料的研究方面, PENG 等^[3]通过炉箱加热试验对比

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0104100)。20180929 收到初稿, 20181126 收到修改稿

分析了电池正极材料的热稳定性与热安全性,并得出 LiMn_2O_4 的热稳定性最好,而 LiFePO_4 的热安全性最高的结论。但为了寻找更加优异的材料,往往需要花费大量的成本和资源,同时材料的制造加工也需要复杂的流程。另一方面,近几年大量学者开始关注于动力电池热管理策略的相关研究。对于动力电池组而言,空气冷却、液体冷却以及相变材料的使用是常用的几类散热方式。SAW 等^[4]提出了一种新型的由超声雾生成器产生的蒸馏水雾来为电池提供冷却的雾冷却方法,结果表明此方法可以将整个电池组的表面温度维持在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。刘霏霏等^[5]建立时变内热源模型对动力电池单体与成组后进行温度场仿真,发现模块的温度场并非单体的简单叠加,同一放电倍率下模块的热一致性不如单体。对于动力电池单体而言,为了解决其瞬间大电流充、放电问题,研究人员内置了热敏电阻 (PTC)、电流中断器以及正负极间可关闭的隔膜孔,添加了通气阀防止气体压力过大而难以释放造成的爆炸^[6]。由于纯试验的方法对动力电池会产生不可逆的毁坏,同时受限于电池内部复杂的机理问题,因此在短路故障的研究方面,主要还停留在数据统计分析或者预测短路故障的层面,基于模型的故障诊断方法层出不穷,徐佳宁等^[7]基于 Simscape 搭建了动力电池组串联模型,模拟了电池螺栓松动故障,然后通过试验进行验证,对比电池内阻变化再结合电池端电压输出是否存在剧烈波动来判断电池故障。SPOTNITZ 等^[8]比较了多种滥用情况,模拟了锂离子电池的热行为,并认为锂离子在负极中的扩散是电流的限制阶段,正极中电解质分解反应产生的热量是导致热失控的主要原因。ZAVALLIS^[9]建立了电化学与热耦合的二维模型去验证电池是否短路,通过求解多孔电极行为的偏微分方程,得出电流的大小与分布决定了层内温度升高的速率、温升速率主要取决于电解质中锂离子的传质限制。FANG 等^[10]对动力电池短路故障进行了电化学-热耦合建模分析,通过仿真结果比较了两类典型的内部短路情况,并认为初始阶段的热积累是决定内部短路后果的关键因素。然而,在锂离子电池动力电池短路故障的研究方面,对其中的力学问题少有分析,热产生的力学效应规律总结也鲜有讨论,因此在分析动力电池因短路故障而产生的力学响应规律方面的研究具有重要意义。

本文首先开展了动力电池特性试验及外部短路试验,为模型的计算提供输入量;然后建立了在外部短路情况下的动力电池热模型,并验证其有效性,进一步建立了热-力模型,该模型能够获取动力电池

单体温度场、热应力场分布;最后对比不同初始 SOC 热应力仿真结果,分析总结短路故障后热应力规律,有助于探索发生外部短路的动力电池响应规律,试图在动力电池生产制造、增加安全性以及减少测试成本等方面提供一定的指导。

1 动力电池外部短路安全试验

如图 1 所示,本文的建模逻辑框架图主要分为 3 大模块:动力电池特性与外部短路试验、外部短路故障生热速率的求解和模型的验证与仿真。

图 1 建模逻辑框架图

以某圆柱形锂离子电池为研究对象,其基本参数如表 1 所示。

表 1 锂离子动力电池的基本参数

名称	数值
额定容量/(A·h)	2.5
充电电压/V	4.20 ± 0.05
电压范围/V	$3.00 \sim 4.20$
充电温度/ $^\circ\text{C}$	$0 \sim 45$
放电温度/ $^\circ\text{C}$	$-20 \sim 60$
电池尺寸/mm	直径 18.5, 高度 65.2

锂离子电池结构主要由正负极、电解液、隔膜等部分组成,同时还包含活性电极材料、粘结剂导电剂等物质。通用的锂离子电池各部分的化学反应原理式可以由以下公式表达。

正极反应

负极反应

总反应

式中, Li_xC_n 为碳锂化合物, LiMO_m 代表不同的动力电池正极材料。

1.1 锂离子动力电池的特性试验

为了更好的研究外部短路故障,搭建了如图 2

所示的动力电池测试平台, 包含 Arbin BT2000 充放电设备、可编程温度箱、用于数据存储和编程的上位机。为了避免试验存在偶然性, 试验方案为在不同环境温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)和不同初始 SOC(20%、40%、60%、80%、100%)下各进行 2 组试验, 即, 一共 $4 \times 5 \times 2 = 40$ 组。外部短路试验前需要进行动力电池单体初始 SOC 设置, 同时为实施生热速率的计算, 还需要测量动力电池单体在不同温度下的开路电压(Open circuit voltage, OCV)。

图 2 Arbin 电池测试系统实物图

该部分试验用于确定动力电池在不同温度下的最大可用容量以及将动力电池单体设置在不同初始 SOC 点以便分析外部短路试验特性与初始 SOC 和环境温度的关系, 具体试验操作步骤如下: ① 将动力电池在目标温度($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下分别静置 5 小时; ② 使用 Arbin 电池测试系统将动力电池单体以 0.72 A 恒流放电至下截止电压(3.0 V); ③ 静置半小时后再进行恒流恒压充电至满电, 恒流电流仍为 0.72 A ; 重复②③三次, 即可确定动力电池在该温度下的最大可用容量; ④ SOC 设置, 以 0.72 A 将动力电池单体恒流放电至需要的 SOC 值, 其中截止条件为放电容量值, 可以通过 $(1 - \text{需求 SOC}) \times \text{最大可用容量}$ 计算得到。

OCV(Open circuit voltage)开路电压用于计算动力电池单体生热速率, 因此在外部短路试验开始前应获取 OCV 数据。OCV 与动力电池的温度和充放电历史有关, 即需要单独测试不同温度下的充电 OCV 和放电 OCV, 将充电和放电的 OCV 加权取平均值^[1], 即可获取 OCV 曲线。

1.2 外部短路试验设备

搭建的外部短路测试平台如图 3 所示, 由控制短路开启的大电流短路试验机、数据储存记录仪以及防爆防冲击恒温箱组成。

短路试验机的背部如图 4a 所示, 上下两端的吸附造成外部短路。动力电池表面放置了 4 个热电偶防止其脱落造成温度数据的缺失。

图 3 外部短路试验设备实物图

图 4 外部短路试验设备细节图

1.3 外部短路试验数据结果

在同一初始环境温度情况下, 外部短路开始瞬间动力电池电流从 0 A 突变至一个高于正常放电倍率上限(7.2 A)的电流值。对比相同环境温度下的测试结果发现, 初始 SOC 较高的动力电池单体具有更高的瞬时电流值, 同时随着初始环境温度的升高同一初始 SOC 的短路峰值电流也会增大。到达峰值后立刻下降, 在较低温度情况下如图 5a 所示, 电流下降后反而有继续增加的趋势, 其他初始温度下的动力电池电流则会进入一个平台期, 峰值电流较高的动力电池平台期的电流值也较高, 但是相应的平台期的持续时间反而会较短, 该平台的持续时间与环境温度呈负相关, 即: 初始环境温度越低, 同一初始 SOC 下的动力电池的短路电流平台期越持久。平台期结束以后, 较高初始 SOC 的动力电池电流会立马降为 0 , 而低初始 SOC 的动力电池电流会缓慢降为 0 。整个过程短路电流的响应呈现“几”字形。

动力电池电压在短路开始瞬间立刻降到一个接近于 0 V 的平台值, 在同一环境温度下, 平台值未展现出和初始 SOC 的相关性, 但是平台持续时间与初始 SOC 负相关性很强, 即初始 SOC 越高平台期持续时间则越短, 且对于同一初始 SOC 的电池, 随着环境温度的升高, 电压的持续时间也越短, 动力电池电压之后会突变至 0 V 。整个过程短路电压的响应呈现出“L”形。对比分析同一个动力电池的短路电压与电流, 可以发现电流与电压尽管都存在一个平台期, 但是并非同时降为 0 。

图5 相同环境温度不同初始 SOC 动力电池短路电流响应

图6 相同环境温度不同初始 SOC 动力电池短路电压响应

外部短路试验启动后,动力电池表面温度瞬间急剧升高,比较四个环境温度下动力电池表面温度数据,发现初始 SOC 较高的动力电池表面温度上升速率相对较大,短路持续大约一分钟后表面温度达到峰值。在较高的温度环境下如图 7b~7d 所示,不同初始 SOC 的动力电池峰值电流会有明显差别,总体上呈现出初始 SOC 值越大,外部短路峰值温度反而越小的规律,但是到达峰值温度的时间越早。分析可知,初始 SOC 较高的动力电池温升速率大的原因是其短路电流幅值大,瞬间发生更剧烈的化学反

应,同时释放大量能量让温度提升更快速。峰值温度较小则是因为初始 SOC 较高的动力电池短路电流持续时间比较短,焦耳热的计算不仅与电流大小有关,持续时间的长短也对其有很大的影响,因此初始 SOC 较高的动力电池峰值温度反而小很多。如图 7a 所示,在低温环境下不同初始 SOC 的动力电池峰值温度差距不大,但是温升速率的差别相对于其他环境温度更加明显,原因可能是由于在低温环境下动力电池无法完全释放全部电量,较高初始 SOC 的动力电池放电更多,在相同时间内放热量更

多, 温升速率因此更加明显, 同时峰值温度得到一定的弥补, 因此不同初始 SOC 的动力电池峰值温度

此时差别不大。整个外部短路的表面温度呈现出先快速增长再缓慢下降的趋势。

图 7 相同环境温度不同初始 SOC 动力电池短路表面温度响应

2 动力电池外部短路热-力影响建模

根据动力电池的运作原理, 其产热量主要来自于内部的电化学反应。为了忽略复杂的电化模型, 在合理的假设下本文将圆柱形锂离子动力电池看作一个整体产热源: 认为其内部不仅分布均匀, 同时密度保持一致, 各方向对应的导热导率在自身方向恒定不变, 同时比热始终不变, 因此根据能量守恒定律^[12], 即可建立动力电池三维瞬态传热模型

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (4)$$

式中 ρ ——动力电池密度;
 C ——动力电池比热;
 T ——动力电池温度;
 λ ——热导率, 下标 x, y, z 代表坐标;
 $\dot{q}$ ——动力电池的生热速率。

针对于圆柱形动力电池, 在柱坐标系下上式可表达为

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_\phi}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (5)$$

式中, r, ϕ, z 代表柱坐标。

热导率 $\lambda_r, \lambda_\phi, \lambda_z$ 的确定可以使用计算电路中等效电阻的方法^[13], 在柱坐标系下, 热量沿电池径向进行类似于正负极板串联方式的传导, 热量沿电池方位角和高度方向进行类似于正负极板并联方式的传导, 具体计算表达式为

$$\lambda_r = \frac{l_r}{\sum_i \frac{l_{r_i}}{\lambda_{r_i}}} = \frac{l_r}{\frac{l_{r_p}}{\lambda_p} + \frac{l_{r_s}}{\lambda_s} + \frac{l_{r_n}}{\lambda_n}} \quad (6)$$

$$\lambda_\phi = \frac{\sum_i l_{\phi_i} \lambda_{\phi_i}}{l_\phi} = \frac{l_{\phi_p} \lambda_p + l_{\phi_n} \lambda_n + l_{\phi_s} \lambda_s}{l_\phi} \quad (7)$$

$$\lambda_z = \frac{\sum_i l_{z_i} \lambda_{z_i}}{l_z} = \frac{l_{z_p} \lambda_p + l_{z_n} \lambda_n + l_{z_s} \lambda_s}{l_z} \quad (8)$$

式中, l 为长度, 下标 r, ϕ, z 代表柱坐标, 次下标 p, n, s 分别代表正极, 负极和隔膜。

同时热模型的边界条件可由牛顿冷却定律确定

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_\infty) \quad (9)$$

式中 λ ——动力电池表面材料的热导率;

T_∞ ——环境温度;

n ——垂直于动力电池表面的矢量方向;

T ——动力电池表面温度;

h ——对流换热系数。

本文进行外部短路试验时使用的温箱采用风冷冷却方式,属于强制对流换热情况,综合考虑该情况下对流换热系数的取值范围及本文仿真需求,取 $h=30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2.1 动力电池短路故障生热速率

根据式(5)得出动力电池热模型的输入量为生热速率 $\dot{q}$, 计算生热速率目前普遍使用的是 BERNARDI^[14]生热速率公式,表达式如式(10)所示

$$\dot{q} = \frac{I}{V}(E_o - U) - \frac{I}{V} \left(T \frac{dE_o}{dT} \right) \quad (10)$$

式中 I ——动力电池在某一工作条件下的电流值;

$\dot{q}$ ——动力电池单位体积的生热速率;

V ——动力电池的体积;

U ——动力电池在某一工况下的电压值;

T ——动力电池温度;

$\frac{dE_o}{dT}$ ——熵热系数;

E_o ——动力电池的平衡电动势即开路电压。

在外部短路故障情况下,熵热系数项相对于 $\frac{I}{V}(E_o - U)$ 数值较小^[15],因此本文在计算动力电池外部短路生热速率时忽略了熵热系数项。选取环境温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 初始 SOC60%的动力电池外部短路试验的电流、端电压、OCV 及表面温度数据,根据式(10)计算出该动力电池在外部短路情况下的 BERNARDI 生热速率如图所示。

图 8 动力电池 BERNARDI 生热速率

2.2 动力电池外部短路故障副反应生热速率

外部短路故障作为一种动力电池热滥用情况,往往伴随着副反应的发生,副反应的种类主要有:固体电解质界面(SEI)膜的分解反应、负极碳锂材料与电解质的反应、电解质的分解反应、正极三元锂材料与电解质的反应,但是很难判断副反应产热是否对动力电池短路故障总产热有影响,因此需要定量计算动力电池外部短路故障的副反应生热速率。美国 National Renewable Energy Laboratory 的研究者 KIM 等^[16]对锂离子电池的三维热滥用模型进行

了系统细致的理论研究,并根据 SPOTNITZ^[8]及 HATCHARD 等^[17]研究基础,同时假设在热滥用过程中与副反应相关的基本参数恒定不变,具体数值如表 2 所示,建立了变系数微分方程计算出不同触发温度的副反应生热速率。

表 2 副反应基本参数名称与数值

参数	数值
SEI 膜分解反应的频率系数 $A_s/(1/s)$	1.667×10^{15}
SEI 膜分解反应的活化能 $E_{a,s}/(\text{J/mol})$	1.3508×10^5
SEI 膜分解反应单位质量放热量 $H_s/(\text{J/g})$	257
碳在 SEI 膜中单位体积含量 $W_c/(\text{g/m}^3)$	7.77×10^5
c_s 初值 $c_{s,0}$	0.15
电解液分解反应的频率系数 $A_e/(1/s)$	5.14×10^{25}
电解液分解反应的活化能 $E_{a,e}/(\text{J/mol})$	2.74×10^5
电解液分解反应单位质量放热量 $H_e/(\text{J/g})$	155
电解质单位体积含量 $W_e/(\text{g/m}^3)$	4.13×10^5
c_e 初值 $c_{e,0}$	1
负极与电解液反应的频率系数 $A_N/(1/s)$	2.5×10^{13}
负极与电解液反应的活化能 $E_{a,N}/(\text{J/mol})$	1.3508×10^5
负极与电解液反应单位质量放热量 $H_N/(\text{J/g})$	1714
碳在负极材料中单位体积的含量 $W_c/(\text{g/m}^3)$	7.77×10^5
c_N 初值 $c_{N,0}$	0.75
正极与电解液反应的频率系数 $A_P/(1/s)$	6.667×10^{13}
正极与电解液反应的活化能 $E_{a,P}/(\text{J/mol})$	1.396×10^5
正极与电解液反应单位质量放热量 $H_P/(\text{J/g})$	314
正极材料单位体积含量 $W_P/(\text{g/m}^3)$	9.25×10^5
α 初值 α_0	0.04
动力电池表面温度 T/K	

(1) 固体电解质界面(SEI)膜的分解反应

$$R_s = A_s \times \exp\left(-\frac{E_{a,s}}{RT}\right) \times c_s \quad (11)$$

$$\dot{q}_s = H_s \times W_c \times R_s \quad (12)$$

$$R_s = -\frac{dc_s}{dt} \quad (13)$$

(2) 负极碳锂材料与电解质的反应

$$R_N = A_N \times \exp\left(-\frac{E_{a,N}}{RT}\right) \times c_N \quad (14)$$

$$\dot{q}_N = H_N \times W_c \times R_N \quad (15)$$

$$R_N = -\frac{dc_N}{dt} \quad (16)$$

(3) 电解质的分解反应

$$R_e = A_e \times \exp\left(-\frac{E_{a,e}}{RT}\right) \times c_e \quad (17)$$

$$\dot{q}_e = H_e \times W_e \times R_e \quad (18)$$

$$R_e = -\frac{dc_e}{dt} \quad (19)$$

(4) 正极三元锂材料与电解液的反应

$$R_p = A_p \times \exp\left(-\frac{E_{a,p}}{RT}\right) \times \alpha \times (1 - \alpha) \quad (20)$$

$$\dot{q}_p = H_p \times W_p \times R_p \quad (21)$$

$$R_p = \frac{d\alpha}{dt} \quad (22)$$

式中, $R_{S,N,P,e}$ 代表副反应分解速率, $\dot{q}_{S,N,P,e}$ 代表副反应生热速率, 下标 S、N、P、e 分别代表 SEI 膜, 负极, 正极和电解质。

根据环境温度 25 °C 下初始 SOC60% 动力电池单体外部短路试验的表面温度数据及表 2 的副反应相关参数, 代入式(11)~(22)可计算出外部短路故障的副反应生热速率, 从图 9 可以看出动力电池在外部短路故障情况下主要发生了 SEI 膜的分解反应和负极与电解液的反应, 电解质分解反应和正极与电解液的反应在整个过程中的生热速率几乎为 0。结合 BERNARDI 生热速率与副反应生热速率即可计算动力电池在外部短路故障情况下的生热速率。

图 9 动力电池副反应生热速率

2.3 动力电池外部短路热-力建模

动力电池在应用过程中难免会产生小变形, 而物体产生的变形不仅仅由外力导致, 热也可以导致变形。物体在受到约束的情况下由于热导致变形会产生热应力。动力电池外部短路热-力模型可以描述电池在短路情况下热应力的分布及变化规律。在进行热-力建模时, 本文进行了以下假设: 温度仅是半径 r 的函数, 与轴向坐标 z 无关; 剪应力 τ_{rz} 远小于正应力并忽略不计。基于以上假设, 在柱坐标系下建立动力电池热-力模型, 动力电池内部任意一点热

应力的表达式为

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \left[-\frac{1}{r^2} \int_0^{\eta} \Delta T r dr + \frac{1}{r_1^2} \int_0^{\eta} \Delta T r dr \right] \quad (23)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \left[\frac{1}{r^2} \int_0^{\eta} \Delta T r dr + \frac{1}{r_1^2} \int_0^{\eta} \Delta T r dr - \Delta T \right] \quad (24)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1 - \mu} \left[\frac{2}{r_1^2} \int_0^{\eta} \Delta T r dr - \Delta T \right] \quad (25)$$

式中 σ_r ——沿半径方向的热应力;
 σ_θ ——沿环向坐标 θ 方向的热应力;
 σ_z ——沿轴向坐标 z 方向的热应力;
 α ——热膨胀系数;
 E ——弹性模量;
 μ ——泊松比;
 ΔT ——动力电池温度场;
 r ——动力电池半径;
 r_1 ——动力电池内部任意点的径向坐标。

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}{2}} \quad (26)$$

借助动力电池热模型求解出电池内部温度场 ΔT , 再代入动力电池热-力模型的式(23)~(25)中求解, 即可获取动力电池内部热应力分布。利用 von-Mises 初始屈服准则, 如式(26)所示, 求得的等效应力可以更好地总结动力电池热应力规律, 为动力电池设计与优化提供一定的理论支撑。

3 动力电池外部短路热-力影响仿真

3.1 研究对象的网格剖分与材料参数

根据动力电池实际尺寸建立了单体三维几何模型并进行了计算网格剖分如图 10 所示, 为了避免剖分网格数对仿真结果的影响, 因此采用不同的剖分网格分别进行模型仿真, 仿真得出的结果间误差相对较小, 最终本文仿真使用的网格数量为 45 515。同时通过热工手册给出了动力电池材料的热物性参数如表 3 所示。

图 10 电池单体的网格剖分

表 3 电池材料参数

几何部位	材料	恒压热容/[J/(kg·k)]	热导率/[W/(m·k)]	密度/(kg/m ³)
电池正极连接头	Steel AISI 4340	475	44.5	7 850
正极活性材料	NMC Electrode	700	1.48	5 010
负极活性材料	Graphite Electrode	1 437.4	1.04	2 270
电池罐	Steel AISI 4340	475	44.5	7 850

3.2 动力电池外部短路故障温度场仿真分析

基于仿真软件平台中固体传热模块建立收敛的热模型,通过迭代计算得到动力电池温度场分布,为了验证本文建立的热模型准确性,将环境温度 25℃下 5 个不同初始 SOC 的动力电池外部短路试验表面温度数据与对应的仿真表面温度进行对比分析,如图 11 所示:仿真计算得到的动力电池表面温度与实测表面温度的变化趋势基本一

致,但是仿真温升速率会略大于试验温升速率,同时仿真峰值温度较试验峰值温度会有置前性,主要是由于热电偶在测量温度时存在滞后性^[18]。从表 4 中温升误差得出最大误差为 3.539 2℃,具有可靠的精度。因此本文建立的热模型比较接近动力电池在外部短路后实际的温度变化规律,验证了模型的有效性,可以用于动力电池外部短路的温度场仿真分析。

图 11 试验与仿真表面温度对比

表 4 试验与仿真峰值温度对比

	SOC20%	SOC40%	SOC60%	SOC80%	SOC100%
试验峰值温度/℃	101	94.7	95.4	89.75	78
仿真峰值温度/℃	98.259	95.190 8	91.860 8	92.705 6	79.112 2
温度误差/℃	2.741	0.490 8	3.539 2	2.955 6	1.112 2

图 12 是环境温度 25℃下初始 SOC60%的动力电池在外部短路故障下温度场仿真结果。在外部短路开启后,动力电池内部温度开始迅速升高,切面温度呈现非均匀态,最高温度出现在靠近心轴附近区域,但是心轴内部温度相对较低。温度偏高的区

域逐渐向负极靠近,同时电池内部温度在轴向的差异越来越大,心轴的温度也逐渐升高。25 s 左右后电池径向的内外部温度差异逐渐减小,温度变得均匀。最后温度最高点出现在心轴处,动力电池内部活性材料逐渐消耗殆尽,开始慢慢散热。

图 12 动力电池单体外部短路故障切面温度场分布(℃)

3.3 动力电池外部短路故障热应力场仿真分析

在固体传热模块基础上进一步添加固体力学模块，仿真软件平台会将两大模块耦合形成热膨胀模块，伴随着动力电池外部短路后产生的温度变化，会导致热应力及应变的出现，同时由于热应力会导致电池结构发生热膨胀，改变了温度场的求解区域，从而反过来影响温度的计算，因此本文中温度与热应力和应变是双向耦合的，即本文建立的热-力模

型，如式(23)~(25)，模型需要新增一个热物性参数——热膨胀系数 α 。设置边界约束条件的同时定义动力电池材料相应的力学参数，如表 5 所示，即可开始仿真计算。

针对环境温度 25 ℃下初始 SOC60%的动力电池进行外部短路故障热-力模型仿真，该动力电池在外部短路过程中的热应力变化分布如图 13 所示。

图 13 动力电池单体外部短路故障热应力场分布(10^8 Pa)

表 5 电池材料的力学参数

几何部位	材料	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
电池正极接头	Steel AISI 4340	205	0.28	12.3×10^{-6}
正极活性材料	NMC Electrode	1.5	0.15	8.62×10^{-6}
负极活性材料	Graphite Electrode	10	0.03	4.06×10^{-6}
电池罐	Steel AISI 4340	205	0.28	12.3×10^{-6}

外部短路开始后的 5 s 内，由于温度还未到达峰值，动力电池内部的热应力分布相对均匀，其数值相对较小；10 s 时热应力分布开始不均匀，动力电池的壳体与内部活性电池材料接触处热应力相对较高，同时内部活性材料之间的热应力沿径向变现出不一致性，电池负极附近热应力此时最大，对比

图 12b 动力电池的温度场分布发现负极附近的温度此时也相对较高，热应力分布表现出与温度场一致的趋势。20 s 以后正极接头附近相对于其他结构热应力变化很快，其热应力分布差异开始明显。同时由于动力电池内部产热堆积导致壳体周边热应力逐渐增大，与负极以及正极接头的热应力保持一

致。由仿真结果可以得出, 电池外壳体热应力最大, 因此在设计动力电池时, 应当调整优化壳体材料的力学性能, 避免由于过大的热应力造成动力电池的疲劳破坏从而导致爆炸等危害。

同一初始环境温度 25 °C 下 5 个不同初始 SOC 的动力电池在外部短路故障情况下的热应力对比如图 14 所示, 5 个动力电池中最大热应力随时间呈现先增大后慢慢减小的趋势, 与表面温度变化趋势一致。且初始 SOC 值越高, 最大热应力的增长速率越大, 峰值最大热应力出现越早。图 15 是不同初始 SOC 动力电池生热速率对比, 可以发现初始 SOC 较高的动力电池在外部短路瞬间具有更大的生热速率, 造成热应力产生的动力越充足, 因此热应力增长越快。同时由于对应的生热速率降至 0 的时间越短, 导致热应力的峰值出现越早。通过比较 25 °C 下动力电池外部短路试验的温度数据, 如表 6 所示, 可以看出在低初始 SOC 段的峰值热应力与动力电池初始 SOC 呈负相关, 即初始 SOC 越小, 最大热应力反而越大, 考虑到电动汽车实际运行中难免处于低电量运行, 因此需采取更加严格的保护措施以防止外部短路故障带来的高热应力。

图 14 不同初始 SOC 动力电池热应力对比

图 15 不同初始 SOC 动力电池生热速率对比

表 6 25 °C 下动力电池不同初始 SOC 的峰值

	热应力与最高温度				
	SOC20%	SOC40%	SOC60%	SOC80%	SOC100%
峰值热应力 /MPa	1 101.78	1 050.73	1 003.01	1 008.27	817.07
最高温度/°C	101	94.7	95.4	89.75	74.7

4 结论

本文针对某圆柱形锂离子动力电池开展了特性试验及外部短路试验, 并建立了动力电池在外部短路情况下的三维热-力模型, 试验与仿真结果对比表明该模型能够对外部短路情况下动力电池的温度场进行有效计算, 同时, 利用热-力模型可以有效分析动力电池的热应力场动态变化规律。

(1) 基于外部短路过程中副反应生热速率公式中基本参数恒定不变的假设, 定量计算了副反应生热速率, 发现其生热速率远小于 BERNARDI 生热速率, 但是由于外部短路引发的副反应有可能伴随温度升高而持续恶化, 准确地描述副反应产生的影响至关重要, 这也为今后更详尽地研究动力电池外部短路故障提供了一个方向。

(2) 外部短路故障后动力电池表面温升是一个随时间先增大后减小的过程, 且初始 SOC 越高, 温升速率越大。在 25 °C 的环境温度下, 生热速率峰值与初始 SOC 呈正相关关系, 即初始 SOC 越高, 生热速率峰值越大。

(3) 在外部短路故障情况下, 动力电池两端内置活性电极材料与外壳接触处的热应力较高, 设计制造电池时应该加强这些地方的力学性能, 避免由于单体的短路使得材料发生缺陷导致燃烧和爆炸引起周围动力电池的热失控等严重后果。

(4) 在环境温度 25 °C 下, 不同初始 SOC 的动力电池外部短路后内部峰值热应力趋势与对应的表面温度具有一致性。低初始 SOC 段的峰值热应力与动力电池初始 SOC 呈负相关, 即初始 SOC 越小, 最大热应力反而越大。

动力电池外部短路故障是一个复杂的化学变化过程, 本文对其进行了适当简化研究与分析。为了模拟更加真实的外部短路变化过程, 未来将从电化学机理角度出发, 通过建立其电化学-热耦合模型进行动力电池外部短路故障的研究。

参 考 文 献

- [1] KAEDEN E, PLOUMEN S, FRICKE B, et al. Energy storage devices for future hybrid electric vehicles[J].

- Journal of Power Sources, 2007, 168(1): 2-11.
- [2] 王浩, 杨聚平, 王莉, 等. 锂离子电池的安全性问题[J]. 新材料产业, 2012(9): 88-94.
- WANG Hao, YANG Juping, WANG Li, et al. Safety issues of lithium ion batteries[J]. Advanced Materials Industry, 2012(9): 88-94.
- [3] PENG P, JIANG F. Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103: 1008-1016.
- [4] SAW L H, POON H M, HUI S T, et al. Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs[J]. Applied Energy, 2018, 223: 146-158.
- [5] 刘霏霏, 兰凤崇, 陈吉清. 基于动态内热源特性的车用锂离子动力电池温度场仿真及试验[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 141-151.
- LIU Feifei, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. Simulation and experiment on temperature field of lithium-ion power battery for vehicle based on characteristic of dynamic heat source[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(8): 141-151.
- [6] 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.
- [7] 徐佳宁, 梁栋滨, 魏国, 等. 串联电池组接触电阻故障诊断分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 106-112.
- XU Jianing, LIANG Dongbin, WEI Guo, et al. Series battery pack's contact resistance fault diagnosis analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 106-112
- [8] SPOTNITZ R, FRANKLIN J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2003, 113(1): 81-100.
- [9] ZAVALIS T G, BEHM M, LINDBERGH G. Investigation of short-circuit scenarios in a lithium-ion battery cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(6): A848-A859.
- [10] FANG W, RAMADASS P, ZHANG Z. Study of internal short in a Li-ion cell-II. Numerical investigation using a 3D electrochemical-thermal model[J]. Journal of Power Sources, 2014, 248(4): 1090-1098.
- [11] XIONG R, ZHANG Y, HE H, et al. A double-scale, particle-filtering, energy state prediction algorithm for lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1526-1538.
- [12] 李仲兴, 李颖, 周孔亢, 等. 纯电动汽车不同行驶工况下电池组的温升研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 180-185.
- LI Zhongxing, LI Ying, ZHOU Kongkang, et al. Temperature study of pure electric vehicles battery pack at different driving conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 180-185.
- [13] 杨凯, 李大贺, 陈实, 等. 电动汽车动力电池的热效应模型[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 782-785.
- YANG Kai, LI Dahe, CHEN Shi, et al. Thermal model of batteries for electrical vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(9): 782-785.
- [14] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. General energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1984, 132(1): 5-12.
- [15] 云凤玲. 高比能量锂离子动力电池热性能及电化学-热耦合行为的研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2016.
- YUN Fengling. Study on thermal performance and electrochemical-thermal couple behavior of high specific energy lithium ion power battery[D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2016.
- [16] KIM G H, PESARAN A, SPOTNITZ R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 476-489.
- [17] HATCHARD T D, MACNEIL D D, BASU A, et al. Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(7): A755-A761.
- [18] 林海军, 滕召胜, 杨圣洁, 等. 数字温度传感器自适应动态补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1): 138-142.
- LIN Haijun, TENG Zhaosheng, YANG Shengjie, et al. Adaptive dynamic compensation method for digital temperature sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 138-142.

作者简介: 熊瑞(通信作者), 男, 1985 年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车动力电池系统管理与综合控制。

E-mail: rxiong@bit.edu.cn

马骥骥, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为动力电池系统安全管理。

E-mail: masuxiao@qq.com

杨瑞鑫, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为新能源汽车动力电池系统管理。

E-mail: yangruixin@bit.edu.cn

陈泽宇, 男, 1982 年出生, 国内访问学者。主要研究方向为电动汽车电池安全与故障诊断技术。

E-mail: chenzy@mail.neu.edu.cn