

锂离子电池温度场仿真探析

胡品德

贵州梅岭电源有限公司, 贵州 遵义 563000

[摘要] 针对锂离子电池在各种工况下的温升以及电池成组后温度场分布问题, 应用有限元软件 Ansys, 对电池 0.3C、1C 放电至截止电压时的温升进行热仿真分析; 对成组电池 0.3C 放电至截止电压进行了温度场仿真; 对电池单体, 分析了在电池上添加散热肋片时电池的温升。结果显示: 模拟不同倍率下电池温度场的分布情况及规律, 得出电池放电倍率越高, 电池温升越高; 散热肋片能使电池最高温度下降 2°C 左右, 但由于电池包中电池间隙太小使其增加散热效果不明显。

[关键词] ANSYS; 锂离子电池; 温度场; 仿真

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19567

中图分类号: TM912

文献标识码: A

Analysis of Temperature Field Simulation of Lithium ion Batteries

HU Pinde

Guizhou Meiling Power Supply Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563000, China

Abstract: In response to the temperature rise of lithium-ion batteries under various operating conditions and the distribution of temperature field after battery grouping, finite element software ANSYS was applied to conduct thermal simulation analysis of the temperature rise of batteries discharged at 0.3 C and 1C to the cut-off voltage; Temperature field simulation was conducted on the discharge of grouped batteries from 0.3 C to cut-off voltage; Analyzed the temperature rise of the battery when adding heat dissipation fins to the battery cell. The results showed that simulating the distribution and pattern of battery temperature field at different rates, it was found that the higher the battery discharge rate, the higher the battery temperature rise; The heat dissipation fins can reduce the maximum temperature of the battery by about 2°C, but due to the small gap between the batteries in the battery pack, their increased heat dissipation effect is not significant.

Keywords: ANSYS; lithium ion battery; temperature field; simulation

引言

锂离子电池凭借其工作电压高、释放能量强、使用寿命长等特点, 目前被选为电动汽车的供能首选, 可借助锂离子电池的性能, 为电动汽车提供良好的续航效果。但由于车体空间的限制, 锂离子电池在实际应用中的安全隐患逐渐凸显, 电池在长时间应用中存在着严重的温升现象, 易导致电池出现鼓包变形或爆炸。加强对锂离子电池温度场仿真模拟研究, 能够模拟锂离子电池的使用过程, 分析其运行时的特性及温度场分布情况, 便于采取科学有效的温度变化控制措施, 提升锂离子电池的使用安全, 提升锂离子电池的使用效能。

1 锂离子电池工作原理

1.1 电池基本构成

锂离子电池作为现代能源存储载体, 可借助正极、负极、隔膜、电解质等形成循环充电使用。其中, 正极为嵌入化合物, 隔膜、电解质等位于正负极之间, 形成较强的

隔离作用, 避免电池出现短路或自动放电现象。市面上销售的锂离子电池有圆柱、方形等外形特征。

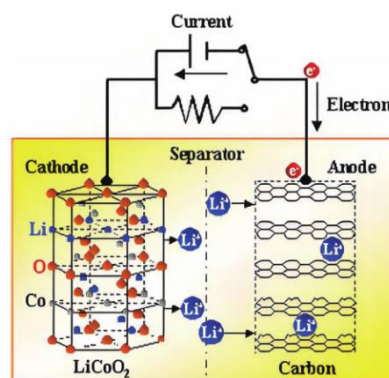


图 1 锂离子电池工作原理示意图

1.2 电池工作原理

对锂离子电池的工作原理进行分析, 主要是借助化学

反应形成所需的电动势，进而实现充电和放电的过程。在充电过程中正极发生氧化反应，锂离子从正极材料中脱离，嵌入电解质中，并在穿越隔膜后，与石墨材料形成化学反应，生成 LiC 化合物。此时伴随化学反应，会形成等量的电荷的传输。而放电过程则是与充电形成完全相反的化学反应，并让电流从外部向正极流去。如上图 1。

1.3 产热机制分析

对锂离子电池充放电过程中的产热机制进行分析，可将电池产热的过程分为：(1) 焦耳热。该产热主要为电流经过产生的热量，与电池的内阻材料有着直接关系，若电池使用时间较长，或电极材料老化、电解质分解等，均会导致内阻增大，产热增加。(2) 反应热。由于锂离子电池充放电过程中较为复杂的电化学反应，涉及大量能量的转化，因此，会伴随反应效果产热和吸热。如，充电中，锂离子从正极脱出移动时会产生热量的变化等。一般认为反应热强度变化与锂离子电池的化学反应速率等有着较强关联性。快速充放电一般会产生大幅的热量波动。(3) 极化热。锂离子电池充放电过程中，还会产生极化现象，主要是因电池电极反应速度的迟缓性，导致离子在扩散中存在着电极电位的偏离，影响电位的平衡性。由于极化使的电池能量损失，会通过热量释放的形式出现，对电池的使用寿命和综合性能产生不利影响。

2. 锂离子电池温度场仿真

2.1 生热率计算

现选择某电动汽车锂电池组为研究对象，仿真实验的锂离子电池尺寸与材料见表 1 和表 2。

表 1 锂离子电池尺寸参数

项目	描述	尺寸/mm
L	长度	142±1
W	宽度	67±1
H	高度	215.5±1

表 2 电池材料及其材料特性

	平均密度 /kg m ⁻³	平均比热容 /J (kg K) ⁻¹	导热系数/W (m K) ⁻¹
内部	1660	891.2	长方向: 0.35
			宽方向: 0.52
			高方向: 0.56
外壳	1.2	1711	0.214
正极柱	2700	903	203
负极柱	8900	385	386

可利用公式计算锂电池的生热率，具体公式如下：

$$q = \frac{1}{V} \left[U_{oc} - U - T \frac{dU_{oc}}{dT} \right] = \frac{1}{V} \left[IR_f - T \frac{dU_{oc}}{dT} \right] \quad (1)$$

式中， I 为电流（放电取正，充电取负）； V 为电池体积； R_f 为电池内阻； $\frac{dU_{oc}}{dT}$ 为电池的电压随温度变化的温度系数，一般取 -0.5mV/K。

电池焦耳热生热率的计算公式为：

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{I^2 R}{V} \quad (2)$$

式中， Q 为极柱的发热量； V 为极柱体积； I_R 为极柱内阻电流。

2.2 锂离子电池模型建立

根据电池尺寸，在 ANSYS 中建立三维模型，如图 2 所示。

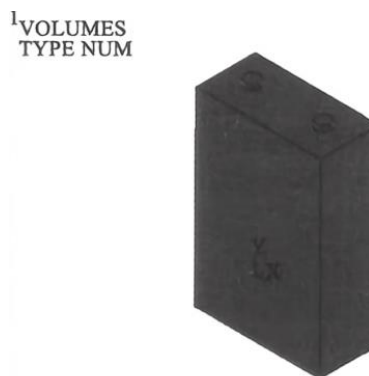


图 2 锂离子电池三维模型

其中，基于电动汽车对于能源的需求，可由多组单体锂电池形成电池包，在电池包箱体中形成竖直或横卧放置。本文采用 Pro/E 建立电池包模型，如图 3 所示。

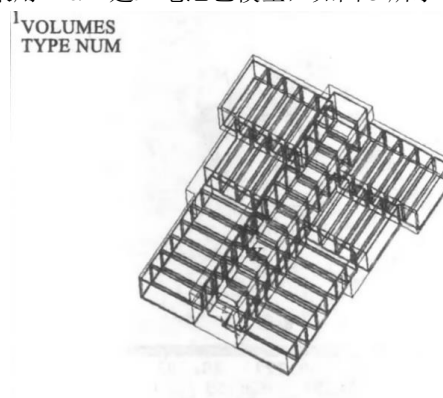


图 3 电池包三维模型

2.3 锂电池散热肋片设计

锂电池为解决内部温度升高问题，可设计相关散热肋

片,形成对电池内部热量的疏散。其中,设计参数主要包括肋片厚度、肋片高度、肋片间距及表面对流换热系数等,间距设置与肋片的厚度有着直接关系。在设计中,可利用雷诺数决定肋片的边界层厚度,具体计算公式为:

$$Re = \frac{vL}{u} \quad (3)$$

式中, v 代表肋片表面流体流速 (m/s), L 表示肋片几何尺寸 (m), U 代表流体运动黏度 (m²/s)。一般将 5×10^5 作为界定数值,雷诺数 $> 5 \times 10^5$ 为湍流,雷诺数 $< 5 \times 10^5$ 为层流。结合不同状态,可分别计算肋片边界层厚度,公式为:

湍流:
$$\delta = 0.381x Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (4)$$

层流:
$$\delta = 5x Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (5)$$

而肋片设计中,厚度和高度还与肋片的总散热效率与总散热量有关,总散热效率会随着高度的增大而减小,随着厚度的增大而增大;总散热量会随着肋高的增大而增大,随着肋厚的增大而减小。当高度达到一定阈值时,散热量不再发生变化,此时的散热效率会急速下降,因此不宜选择过高的肋片。

2.4 热特性仿真

对该研究对象进行温度场仿真模拟试验,根据 0.3C、1C 倍率放电时的温升情况,进行温度场的分布情况分析。其中,0.3C、1C 倍率放电温升情况分析见表 3。

表 3 0.3C、1C 倍率放电温升情况分析

放电倍率	电池表面最低温度 (K)	电池表面最高温度 (K)	电池内部最高温度 (K)	内外温差 (K)
0.3C	302.895	306.081	307.2	4
1C	306.422	311.585	313.4	7

在仿真模拟中,添加相关散热肋片,再次对电池在 0.3C、1C 放电后的温升进行分析。

根据仿真试验结果显示(表 4),电池在添加散热肋片后,0.3C 放电过程中电池内外的最高温度均有所下降,最大升降幅度为 2°C 左右。1C 放电过程中,添加散热肋片后的内外温差变化幅度较大。主要与添加散热肋片后电池的散热能力得到提升有直接关系。但对于电池内部的温升影响可忽略不计,主要是由于电池放电为持续过程,释放大电流大小会动态造成热量的升降,难以让热量及时地排出。电池单体在电池包的箱体内受到空间的限制,即使添加散热肋片,也难以获得较为明显的散热效果。

表 4 添加肋片后 0.3C、1C 倍率放电温升情况分析

放电倍率	电池表面最低温度 (K)	电池表面最高温度 (K)	电池内部最高温度 (K)	内外温差 (K)
0.3C	301.005	303.813	305.02	4
1C	302.708	309.656	311.83	9

从电池包放电仿真试验进行分析,其温度场分布情况与电池包内单体电池的热传导有关,单体电池在密集排放过程中,往往间隔较小,可形成良好的热传导。

在 0.3C 放电倍率条件下,电池包内的最高温度和最低温度可达 311K 和 301K,箱体内电池最低温度约为 303K,与电池单体最高温度相差 4K。进而验证了前文中提到的电池包温度场与电池单体的排列有关的结论,电池组中电池单体的紧密排列会导致电池包在使用中产生较强的热量聚集现象。

3 实验分析

实验选择某公司软包装锂离子电池为研究对象,该电池主要用于电动汽车供能,研究对象的规格参数如下:正极材料为 Li[Ni_{0.8}Co_{0.15}Mn_{0.05}]O₂,负极材料为石墨,正极极耳材料为 Al,负极极耳材料为 Cu,极板尺寸为 206mm×153mm×8mm,质量 575g,标称电压 3.7V,额定容量 26Ah。该电池单元包括多部分组成,其中最大的部分为电池主体结构,它的厚度为 8mm,最大的极薄部分为电池极耳,电池正极和负极连接的两个极耳厚度均为 0.5mm、0.3mm。工作中采用了动力电池分析测试设备、高温低温安全实验室、多个温度传感器等试验设备。

3.1 实验测试

3.1.1 内阻测试

很多方法用于监测电池内阻,其中混合功率脉冲特性测试法被认为是一种简单有效的方法。运用该方法进行不同环境条件下锂离子电池放电内阻值变化分析,测试温度范围为 -10°C 到 50°C,以 1s/次测量频率进行实时数据采集。试验数据记录了每次数据测量点的放电深度 (DischargeDepthofDischarge,DOD) 及相应的放电内阻数据。

基于内阻测量数据,采用二元有理函数模型对温度与放电深度影响下的内阻变化规律进行曲面拟合,获得如图 4 所示的数学关系曲面及公式(1)所示的解析表达式,拟合优度指标达到 0.99。

$$R = (6.67511 - 0.08387 \times T + 1.81951 \times DOD - 10.19198 \times DOD^2 + 11.4049 \times DOD^3) / (1 + 0.04027 \times T + 7.76235 \times 10^{-4} \times T^2 - 2.43016 \times 10^{-5} \times T^3 + 0.16896 \times DOD - 0.18195 \times DOD^2) \quad (6)$$

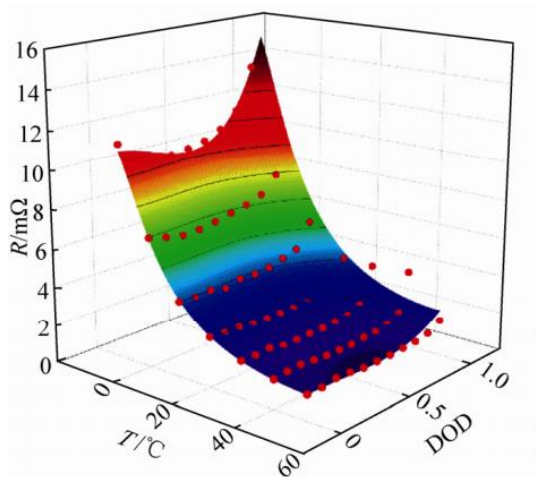


图4 内阻、温度和放电深度的拟合曲面

3.1.2 温升测试

为了能够观测到电池释放出的能量所产生的热量,在电池表面布置 T 形测温元件,同时观测电池的温度变化。电池的外部两层覆盖隔热材料(绝热气凝胶),同时放入恒温恒湿的防爆型环境试验箱中,环境试验箱的温度设置在 30°C 左右;用 4.2V 先充电至额定容量,停止电流设为 0.1A;静置电池 2h 后,再将其放入上述所述环境试验箱中,环境试验箱温度保持在 30°C;然后以 0.5A 恒流大放电直至放电至终止电压 2.75V。

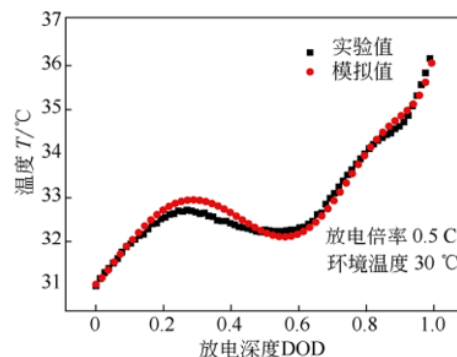
3.1.3 温降测试

虽然电池在上升放电温度测试中进行双重保护,在放电测试时仍有部分热量以对流和辐射的方式扩散至环境,转化为折合对流换热系数简化运算。计算折合换热系数需在相同环境下进行温度下降测试。当电池温度由 T_{max} 降温至 T_{∞} 的过程中,经过计算得出 $h=2.895W/(m^2 \cdot K)$ 。

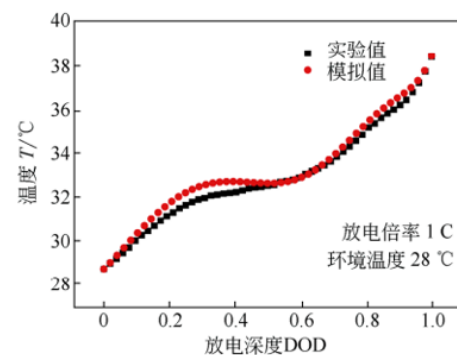
3.2 结果对比

经过试验研究内部阻抗在充放电加深及温度作用下的变化,仿真不同充电倍率作用下的电池热效应,对比测量值的热效应,为了兼顾电池不能因升压过高而损坏,故对不同充电倍率时设置的温度进行调整,如图 5 所示。

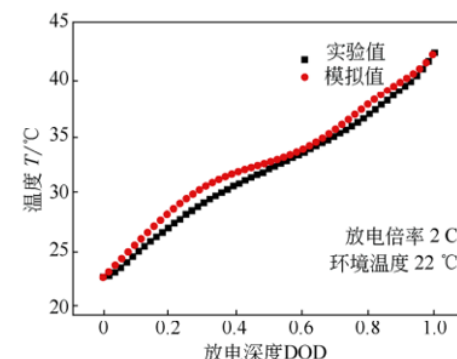
图 5 为不同放电倍率下电池的热传递模型仿真结果,由图可以看出,在不同放电情况下,本文建立的模型可以预测出实际测量的温升值,且电池的起始、终止温度相同。对于较慢的放电过程,我们可以较好地描述电池在整个充放电过程中表现出非线性行为进行描述。但是随着电池放电速率的加快,电池内部产热逐渐趋于稳定,在 3C 放电时已近似为直线。



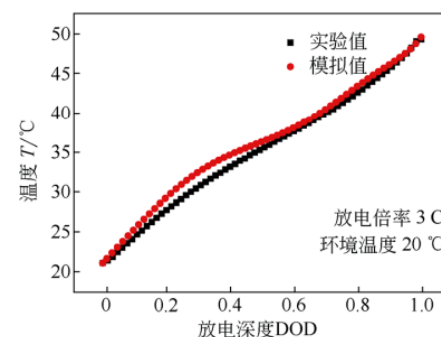
(a) 0.5C



(b) 1C



(c) 2C



(d) 3C

图5 不同放电倍率下温升曲线对比

在实验中设定不同放电倍率,计算电池的产热量情况,将计算结果与仿真结果实施对比。可根据对比分析验证模型预测电池产热量的可行性,尤其在放电倍率为 0.5C 和 1C 时,产热量仿真值与实测值相差不大,表明模型能够很好地描述电池在不同工况下的温变规律,从而为其热性能及控制方法的研究提供了支撑。

对比充电速率不同下电池产生热量速率模拟均值与理论值模拟均值,可以看出,电池产生热量速率模拟均值略有大于理论均值,且在充电速率 1C 时两种数值差异最大,为 5.4%。因此,所得到的模拟结果较为准确,且具有一致性,可以较好地预测不同充电速率对锂离子电池的产热量。

4 结束语

本文利用电池放电产热基础理论模型,拟合 0.5C 放电速率电池产热升温的试验数据,得出电池热力学熵变热容比,建立以放电深浅度参数表征的产热生成的电池热学模型,进而应用热学模型对各类不同放电速率情况进行温度模拟计算,并将模拟结果与测试结果比较,得出以下结论:(1)该模型仿真设计中,能够生动展示锂离子电池的供能表征,分析其在不同放电速率中单体出现的温度变化及产热速率变化,此种变化能够说明锂离子电池在低倍率放电中温度变化的特殊性,呈现非线性的变化分布。(2)电池放电过程产热降温:电池放电过程中由于熵热效应使得电池发生升温降温现象,其中在低倍率放电的中间阶段,熵热放出能量,导致电池在该过程的温度下降,电池的熵热系数变化区间在 $-0.85\sim 0.05\text{mV/K}$ 。

锂离子电池在仿真模拟应用中,可发现其温升情况变化会随着放电效率的提升而增大,并逐渐形成电池内外较

大的温差情况。因此,可尝试在电池单体上进行散热肋片的添加,以实现降温散热的效果。但对电池包的温度场进行仿真试验,可发现对其添加散热肋片的效果不大,主要与电池包紧密排列的电池单体有关,紧密的箱体空间,难以形成有效的散热,还会由于紧密相连电池组的相互作用,产生热量的聚集,因此要对电池包进行特殊的冷却系统设计,避免过大温升造成电池包的损坏或爆炸。

未来,在锂离子电池开发过程中,要着重加强温度场的调控设计,进一步提升锂离子电池的安全性和工作性能,延长电池的使用寿命。为避免影响锂离子电池的功能效果,应当让电池处于 $0\sim 40^\circ\text{C}$ 较安全环境中使用,结合电池的最佳工作温度,进行针对性的改良设计。

[参考文献]

- [1]赵宇衡,宁滔.基于 PCM 的锂离子电池热管理技术的研究进展[J].消防科学与技术,2025,44(6):756-763.
- [2]董晨晖,杨斌,乔志军,等.功率型锂离子电池的热特性分析与优化[J].电工电能新技术,2025,44(4):60-69.
- [3]黄晓璜,盛健,邹艳芳.方形锂离子电池热性能的实验与模拟研究[J].大学物理实验,2025,38(1):1-7.
- [4]刘素贞,陈永博,张闯,等.锂离子电池电化学-热-应力三维耦合建模及应力分布研究[J].电工技术学报,2025,40(4):1307-1322.
- [5]申江卫,于帅,李希进,等.车载锂离子电池组冷却结构设计与仿真分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(2):118-126.

作者简介:胡品德(1988—),男,汉族,贵州遵义人,本科,研究方向为机械制造及其自动化、电池模组结构设计。