

文章编号: 2095-2163(2023)03-0106-05

中图分类号: TM912

文献标志码: A

基于 ANSYS 的锂离子电池温度场仿真分析

周剑君

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 锂离子电池是目前使用最广泛的车用动力电池, 本文对 SONY-18650 圆柱形锂离子电池进行研究, 测量了正负极材料和隔膜的导热系数, 建立锂离子电池的三维模型, 采用 ANSYS-Workbench 有限元软件进行分析, 模拟在不同倍率下的电池温度场分布。结果表明, 锂离子电池在不同的放电倍率下, 电池温度分布规律基本相同, 放电倍率越大, 电池温升越高。在低放电倍率下温度对电池材料导热系数的影响可忽略, 但是在高放电倍率下, 影响较大, 不可忽略。

关键词: 锂离子电池; ANSYS-Workbench; 温度场分布

Simulation analysis of temperature field of lithium-ion battery based on ANSYS

ZHOU Jianjun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 Lithium-ion battery is the most widely used vehicle power battery at present. This paper studies SONY-18650 cylindrical lithium-ion battery, measures the thermal conductivity of anode and cathode materials and the diaphragm, establishes the three-dimensional model of lithium-ion battery, analyzes it with ANSYS-Workbench finite element software, and simulates the distribution of battery temperature field at different rates. The results show that under different discharge rates, the temperature distribution law of the battery is basically the same. The larger the discharge rate is, the higher the temperature rise of the battery is. The effect of temperature on the thermal conductivity of battery materials can be ignored at low discharge rate, but it cannot be ignored at high discharge rate.

【Key words】 lithium-ion battery; ANSYS-Workbench; temperature field distribution

0 引言

锂离子电池由于其能量密度高、循环寿命长、无污染、自放率低等优点已经成为了目前使用最广泛的车用动力电池^[1]。但由于其能量密度高, 在电池充放电过程中有明显的热效应, 容易引起热量的累积, 导致电池表面的温度不均匀或者电池局部的温度过高, 引起一系列与热相关的问题, 严重时还可能危及驾驶员的财产和生命安全。因此在汽车充放电过程中, 准确估计和预测电池的工作状态对保障财产安全和人身安全、汽车耐久性能以及汽车可靠性评测都非常重要。为了准确模拟电池的热行为, 保证电池工作的安全状态, 应当建立起安全有效的热管理系统^[2-4]。

要实现安全可靠的锂离子电池热管理, 关键在于准确估计电池内部温度变化。在实验条件下, 无法全部掌握电池在不同条件下的内部温度情况, 往

往需要借助基于电池热模型的数值仿真分析手段进行分析。目前, 锂离子电池单体传热模型有集中质量模型^[5]、一维模型^[6]、二维模型^[7]和三维模型^[8-9]等, 这些模型能够较为准确地模拟锂离子电池单体的热特性。其中, 集中质量模型用于研究电池的整体特性, 建模简单, 但不能计算出电池表面和内部的具体温度分布。一维和二维模型是研究电池某一方面或某一截面的温度分布规律, 与实际温度分布情况存在较大差异。三维模型相对复杂, 但是可以模拟出电池各个位置的温度分布规律, 解决了一维和二维模型的单一性问题, 模拟结果更加真实。

本文对 SONY-18650 圆柱形锂电池材料导热系数进行了实验测量, 为电池热仿真提供数据基础。建立了锂离子电池的三维模型, 应用 ANSYS-Workbench 有限元分析软件分析, 分别模拟在不同放电倍率下电池温度场分布。实验测量了单体电池在不同放电倍率下表面温度的变化, 将仿真结果与

作者简介: 周剑君(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电池热管理。

通讯作者: 周剑君 Email: 208192125@qq.com

收稿日期: 2022-05-13

实验数据相比较,验证仿真结果。

1 导热系数的实验测量

1.1 实验方法

采用激光作为加热源施加在样品表面,恒定功率的激光产生恒定热量并传递给固体样品。样品在激光的照射下,吸收光能后转化为热能,被照射的局部表面产生温升,并与周围介质产生热传递。这个热传递的过程与样品的导热系数有关。所以通过红外热像仪测量并记录样品温度随时间的变化关系,就可以计算得到样品的导热系数。

测试装置如图 1 所示,主要包括加热装置、固定装置、数据采集装置三个核心部分。其中,加热装置采用连续激光器,发射功率恒定的激光加热样品表面,函数发生器实现连续激光周期性等间隔自动施加;固定装置用来固定样品;采用红外热像仪,对样品表面温升数据进行实时测量和采集。

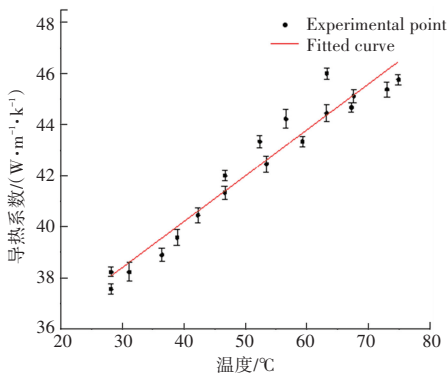


图 1 实验装置示意图

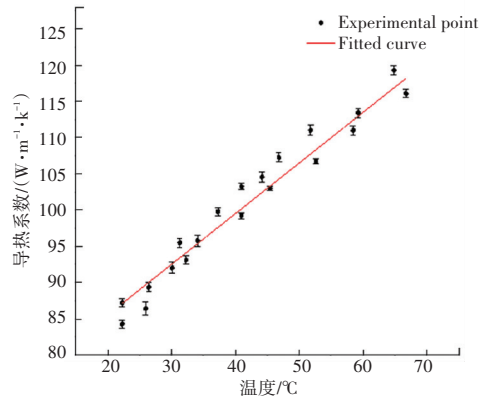
Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.2 实验结果

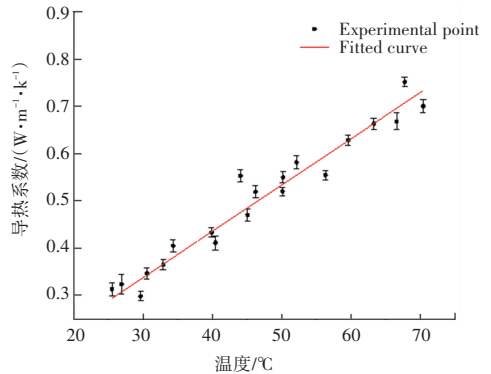
对 SONY-18650 圆柱形锂电池正负极材料和隔膜进行实验测量,为了研究导热系数随温度的变化规律,首先需要确定样品表面温度。实验中通过调节激光强度来改变材料的温度,但是在一定功率激光的照射下,样品表面的温度并不是均匀分布的,激光直射处,即样品中心位置温度最高,热量沿着样品向两边传递,温度逐渐降低。取最高温度与最低温度的平均值作为此功率激光照射下的样品平均温度。正负极材料和隔膜的实验结果如图 2 所示。



(a) 正极



(b) 负极



(c) 隔膜

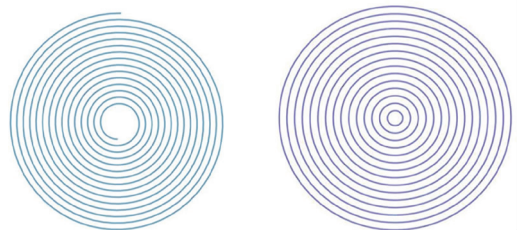
图 2 导热系数随温度变化图

Fig. 2 The change chart of thermal conductivity with temperature

2 锂离子电池有限元模型

2.1 几何模型

SONY-18650 圆柱形锂电池内部采用螺旋绕制结构。电池的横截面示意如图 3(a)所示,为了方便建模,将其简化为同心圆模型,如图 3(b)所示。



(a) 电池横截示意图 (b) 电池横截面模型简化图

图 3 圆柱形锂离子电池模型横截面示意图

Fig. 3 Cross section diagram of cylindrical lithium-ion battery model

2.2 电池参数

将电池放置在充放电仪上进行放电,恒压放电至截止电压时认为放电完成。使用多功能手锯、尖嘴钳、小刀、镊子等工具对电池进行拆解,分别得到正极、负极和隔膜。锂离子电池拆解实物图如图 4 所示。

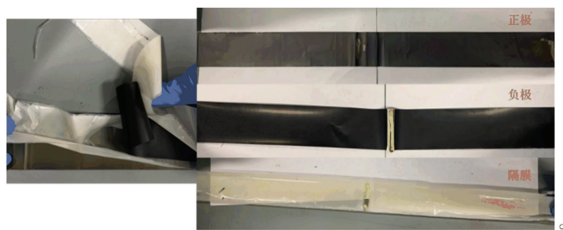


图4 锂离子电池拆解实物图

Fig. 4 Disassembly of lithium-ion battery

使用卷尺、游标卡尺、千分尺等测量仪器分别对电池各个材料进行测量,得到其厚度和高度。电池各个材料的结构与热物性参数见表1。

表1 电池几何尺寸和热物性

Tab. 1 Battery geometry and thermal properties

	厚度/ μm	高度/ mm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
LiCoO_2	92	53	2 500.0	1 269.0
LiC_6	87	53	5 031.0	1 437.0
Aluminum	10	55	2 710.0	971.5
Copper	10	57	8 975.6	381.0
Separator	22	59	910.0	1 883.0
Can	300	65	7 800.0	478.0

使用 Geometry 建立锂离子电池的三维模型,如图5所示。

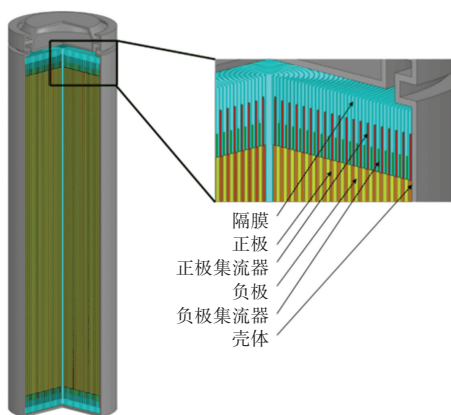


图5 锂离子电池的三维模型

Fig. 5 Three dimensional model of lithium-ion battery

3 锂离子电池网格模型

3.1 网格划分

有限元分析是目前热分析中的主导分析方法, ANSYS 是一种大型、有效的有限元分析软件^[10]。使用有限元分析软件 ANSYS 的 Workbench 模块划分电池网格,网格的质量影响着计算过程的复杂性和计算结果的准确性。锂离子电池的网格模型如图

6所示,划分网格数量为 544 489,平均单元质量为 0.938 7。

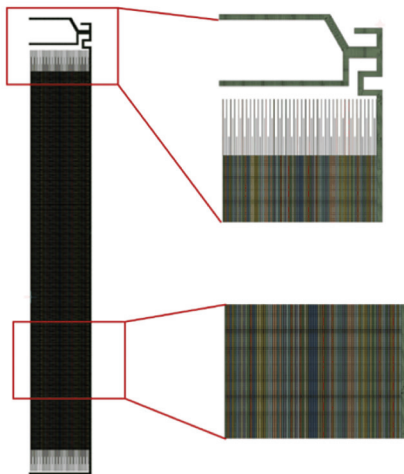


图6 锂离子电池的网格划分

Fig. 6 The meshing of lithium-ion battery

3.2 分析流程

锂离子电池单体的有限元模型建立后,在网格质量达到计算要求的前提下,将模型导入 ANSYS 软件中,对电池单体进行常温、不同放电倍率下的热仿真分析。图7为仿真的一般流程图。

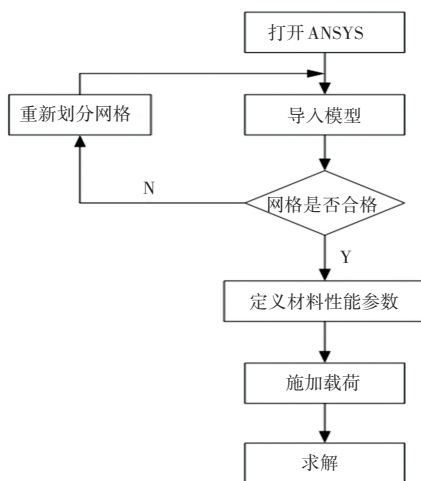


图7 ANSYS 仿真流程图

Fig. 7 Flow chart of ANSYS simulation

3.3 热模型定解条件的确定

(1)初始条件的确定。初始条件影响着仿真计算的结果。锂离子电池在放电前的内部温度是均匀分布的,这里假设电池的初始温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2)边界条件的确定。不同的边界条件是影响电池温度场分布的因素之一。结合研究的实际情况,本文选用第三类边界条件。电池周围流体内部各部分因为温度不同,就会引起各部分密度有所差

别,从而引起流体发生相对的流动,称为自然对流。可由如下公式进行描述:

$$q_{convection} = h(T - T_0) \quad (1)$$

其中, h 为对流换热系数。采用不同的对流换热系数可以在热处理中模拟不同冷却速率的影响。

(3) 载荷步数的确定。载荷步数的多少决定着计算分析的时间和精度。载荷步数越多,计算结果的准确性越高,计算时间越长。为了保证计算精度与提高计算速度,本次研究设置载荷步数为 100 步。

4 不同放电倍率对电池单体温度场的影响

电动汽车在实际的行驶过程中,受到路况、交通等条件的影 响,电池的放电倍率会在短时间内有很大的改变,此时电池温度变化更复杂。假设电池初始温度为 20 °C,环境温度为 20 °C,常规自然对流换热系数为 5~10 W/(m²·K),这里选取对流换热系数为 5 W/(m²·K)。选取 1C、2C、3C 三个放电倍率,分别对锂离子电池进行热仿真。仿真结果如图 8 所示。

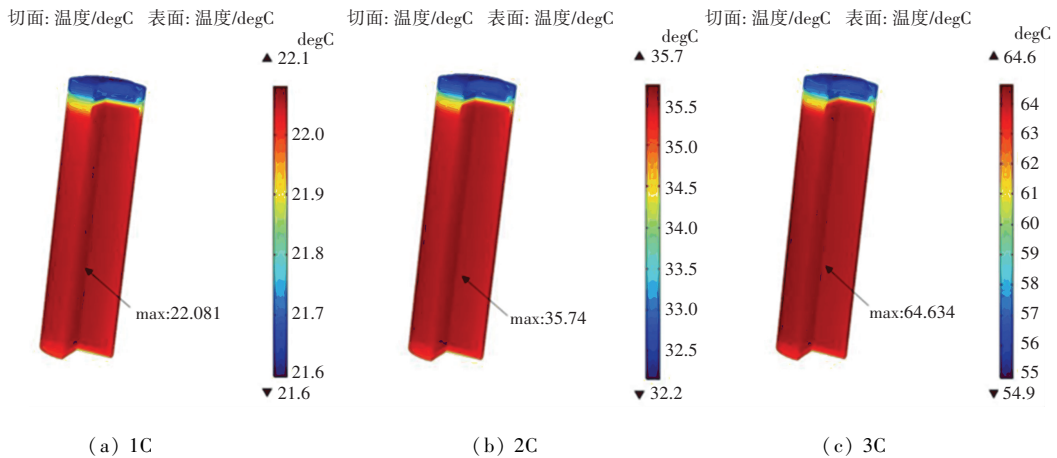


图 8 不同放电倍率下电池表面温度场

Fig. 8 Temperature field of battery surface under different discharge rate

图 8 中可以看出在不同放电倍率下,电池温度分布规律基本相同。电池高温区域主要集中在电池中下部,而且温度从内到外逐渐降低,最低温度在电池顶盖位置。

1C 放电倍率下电池最高温度 22.081 °C,最低温度 21.591 °C,温差为 0.49 °C;2C 放电倍率下电池最高温度 35.7 °C,最低温度 32.2 °C,温差为 3.5 °C;3C 放电倍率下电池最高温度 64.6 °C,最低温度 54.9 °C,温差为 9.7 °C,此时已经超出电池最佳工作范围,需要进行合理的热管理。可以看出,相同的工作环境下,放电倍率越高,电池最高温度越高,温差也越大,也就是说温度越不均匀。

5 不同放电倍率下的温升实验测试

为了验证仿真的准确性,测量锂离子电池 20 °C 下 1C、2C、3C 放电倍率下的温升情况。实验主要使用电池充放电仪器、恒温箱、K 型热电偶等设备搭建锂离子电池测试平台。实验开始时,将 SONY-18650 锂离子电池单体完全放电后,选用 3 个 K 型热电偶分别贴合在电池上、中和下表面,具体位置如

图 9 所示。



图 9 热电偶布置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of thermocouple arrangement

布置好热电偶后,将电池放入恒温箱中,设置温度为 20 °C,静置 2 h,使电池温度与恒温箱温度保持一致。然后以 1C 恒定电流给电池充电,充电完成后,静置 2 h,保持电池温度与恒温箱温度一致。以 1C 恒定电流放电,放电过程中,记录电池表面温度变化。放电完成后,将电池静置 2 h,使电池温度降低至初始温度后,重复充电、静置、放电的步骤,测量 2C、3C 放电倍率下的温度。实验结束后,每个放电

倍率下可得3组温度数据,取3组数据的平均值作为电池表面温度值。实验结果如图10所示。

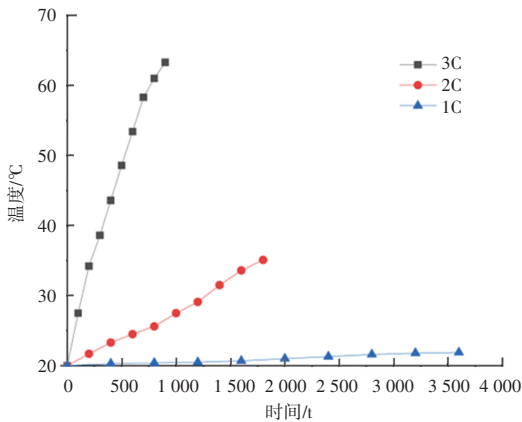


图10 20℃时不同放电倍率下电池表面温升

Fig. 10 Temperature rise of battery surface under different discharge rate at 20℃

由图10可知,电池放电倍率越高,放电时间越短,放电温度越高。主要是因为电池生热率与电流的平方有关,电流的提高增大了电池的生热率,所以电池温升越大。

对比不同放电倍率下电池最高温度仿真结果与表面温度测试结果的温差,1C放电结束后,温度差为0.2℃;2C放电结束后,温度差为0.6℃;3C放电结束后,温度差为1.3℃。温度差均小于2℃,充分证明了本次仿真结果的准确性。

6 结束语

本文通过实验测得SONY-18650锂离子电池正负极材料和隔膜的导热系数,使用Geometry模块

建立了锂离子电池三维模型,模拟了1C、2C、3C放电倍率下的电池温度分布,通过实验测量了放电过程中电池表面温度,对仿真结果进行验证。最后分析和探讨了放电倍率与导热系数对电池温度场分布的影响,为锂离子电池热管理提供理论指导。

参考文献

- [1] 戴海峰,周艳新,顾伟军,等. 电动汽车用动力锂离子电池寿命问题研究综述[J]. 电源技术,2014,38(10):1952-1954,1982.
- [2] 金露,谢鹏,赵彦琦,等. 基于相变材料的电动汽车电池热管理研究进展[J]. 材料导报,2021,35(21):21113-21126.
- [3] 杨小兵,耿大伟,孙伟. 纯电动汽车电池热管理关键技术集成开发[C]//第十七届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集. 郑州:河南省汽车工程学会,2020:355-357.
- [4] 陈雪莲,张存善,安然. 电池热管理及电池安全技术[J]. 电源技术,2020,44(08):1177-1181.
- [5] BOTTEG G, JOHNSON B A, WHITE R E. White. Influence of some design variables on the thermal behavior of a lithium-ion cell [J]. Journal of The Electrochemical Society, 1999, 146(3): 914-923.
- [6] AL-HALLAJ S, SELMAN J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 341-348.
- [7] WU M S, LIU K H, WANG Y Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 160-166.
- [8] 殷宝华,艾亮,贾明,等. 锂离子动力电池的三维热模型[J]. 电源技术,2018,42(02):199-201,307.
- [9] CHEN S C, WAN C C, WANG Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 1996, 140(1): 111-124.
- [10] 宁连旺. ANSYS有限元分析理论与发展[J]. 山西科技, 2008(04): 65-66.

(上接第105页)

- [8] 程漫颖,姚敏茹,曹凯,等. 基于二次匹配策略的RANSAC算法研究[J]. 电光与控制,2021,28(06):38-41.
- [9] 王亮亮,胡海峰. 无人机遥感影像匹配中的优化SIFT-OCT算法[J]. 测绘科学,2021,46(06):102-108.
- [10] 邹建成,国栋. 快速ACE算法及其在图像拼接中的应用[J]. 北方工业大学学报,2018,30(05):1-10.
- [11] 李牧,闫继红,李戈,等. 自适应Canny算子边缘检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007,28(09):1002-1007.
- [12] ALCANTARILLA P F, NUEVO J, BARTOLI A. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale apaces[C]// Proceedings of the 24th British Machine Vision Conference. Durham; BMVA Press, 2013: 1-11.

- [13] MUR-ARTAL R, TARDÓS JUAN D. ORB-SLAM2: An Open-source sLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.
- [14] YUAN Cong, CHEN Xiaorong, LI Yiting. Research on the SIFT Algorithm in Image Matching [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121-126(121-126): 4656-4660.
- [15] BROX T. Diffusion filtering[M]. USA: Springer, 2014.
- [16] GREWENIG S, WEICKERT J, BRUHN A. From box filtering to fast explicit diffusion [M]//GOESELE M, ROTH S, KUIJPER A, et al. Pattern recognition. DAGM 2010. Lecture Notes in Computer Science. Berlin/Heidelberg; Springer, 2010, 6376: 533-542.