

锂离子电池三维温度场分析

王晋鹏, 李阳艳
(西京学院, 陕西 西安 710123)

摘要: 锂离子电池凭借其性能优点在各方面都得到了大量应用, 但其在应用过程中的发热问题是一个必须注意的问题, 它不仅影响锂离子电池的性能, 也产生安全问题。基于此, 在二维分析的基础上用有限元软件 ANSYS 对 ICR65/400 型锂离子电池进行了温度场的三维分析, 并对两者的分析结果进行了比较, 结果表明三维分析要比二维分析准确。最后具体分析了不同对流换热系数对电池温度场的影响。

关键词: ANSYS; 锂离子电池; 温度场; 三维

中图分类号: TM 912.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1002-087X(2011)10-1205-03

Three-dimensional analysis of Li-ion batteries' temperature field

WANG Jin-peng, LI Yang-yan
(Xijing College, Xi'an Shanxi 710123, China)

Abstract: Li-ion batteries have wide applications in a lot of field because of its advantage, but its exothermic question is a problem that must be cared. It can not only influence the performance of Li-ion batteries, but also bring safety problems. So in this paper Li-ion Batteries' (ICR65/400) three-dimensional temperature field was analyzed using ANSYS based on the two-dimension analysis, and then both results were compared. The compared result proves that the three-dimensional analysis is more accurate than the two-dimension analysis. The different convection coefficients influence on the batteries' temperature field was analyzed at last.

Key words: ANSYS; Li-ion batteries; temperature field; three-dimensional

锂离子电池是继氢镍电池之后的新一代绿色高能可充电电池, 具有电压高、体积小、比能量高、循环性能好、自放电小、无记忆效应、无污染等突出优点, 近 10 年来得到了飞速的发展^[1]。但在锂离子电池的使用过程中仍然存在很多问题, 其中由于热量的产生而引起温度的升高就是一个很值得关注的问题。温度的升高将会引起电池内部的各种反应, 包括 SEI 膜分解反应、嵌锂碳(Li_xC₆)与电解液的反应、嵌锂碳与粘结剂的反应、电解液分解反应, 以及正极材料的分解反应^[2]。这些反应将会大大降低锂离子电池的寿命。因此对锂离子电池进行温度场分析是非常有必要的。本人曾利用有限元分析软件 ANSYS 对 Sony(US18650)型锂离子电池进行了二维温度场分析, 并讨论了不同放电速率和不同边界条件对电池温度场的影响。本文在二维分析的基础上对 ICR65/400 型锂离子电池进行了三维温度场分析, 并对两者的结果进行了分析比较。

1 建立锂离子电池的三维瞬态传热数学模型

在进行二维分析时, 为了建立锂离子电池的二维瞬态传热数学模型, 曾作出四点假设^[3]:

收稿日期: 2011-03-18

作者简介: 王晋鹏(1982—), 男, 山西省人, 讲师, 硕士生, 主要研究方向为机械设计及理论。

(1) 由于电池内部电解液的流动性很差, 因此电池内部的对流换热可以忽略不计;

(2) 电池内部辐射对散热的影响非常小, 因此可以忽略不计;

(3) 电池内部的各种材料是各向同性的, 因此电池内部温度只在径向上变化, 在其它方向上不变;

(4) 热量在电池内部是均匀产生的。

在上述四点假设中, 由于电池两端也有散热, 因此将第三条假设除去, 由此可以建立圆柱型锂离子电池的三维瞬态传热数学模型:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + Q \quad (1)$$

式中: t 为电池的温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为电池的密度, kg/m^3 ; c 为电池的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; τ 为时间, s ; λ 为电池的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; r 为电池的半径, m ; φ 为电池的圆周角, rad ; z 为电池的长度, m ; Q 为电池内部单位体积的热生成率, W/m^3 。

2 建立锂离子电池的三维有限元模型

由于圆柱型锂离子电池在轴向上是关于中间平面对称的, 因此在轴向上可取一半建立锂离子电池的有限元模型; 又由于在径向上锂离子电池是轴对称的, 因此在径向上可取四分之一建立锂离子电池的有限元模型。建立好的圆柱型锂离子电池的三维有限元模型如图 1 所示。

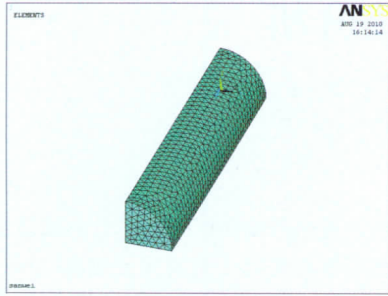


图1 圆柱型锂离子电池的三维有限元模型

3 内部生成热的确定

内部生成热的确定方法主要有两种：一是通过实验直接测量；二是通过公式计算，计算公式如(2)所示：

$$Q = \frac{I}{V} (E_{oc} - E - T \frac{dE_{oc}}{dT}) \quad (2)$$

式中： Q 为电池内部单位体积的热生成率， W/m^3 ； I 为电池的放电电流， A ； V 为电池的总体积， m^3 ； T 为电池的温度， $^{\circ}C$ ； E_{oc} 为电池的开路电压， V ； E 为电池的工作电压， V ； $E_{oc} - E = IR$ (R 为电池的内阻)， $\frac{dE_{oc}}{dT}$ 只在很小的范围内变化，取其值等于 $-0.5 mV/K$ 。由此我们可以计算出 ICR65/400 型锂离子电池在 1 C 放电时的热生成率，结果如表 1 所示。

表 1 ICR65/400 型锂离子电池在 1 C 放电时的热生成率

T/K	300	310	320	330
热生成率/($W \cdot m^{-3}$)	20 346	20 723	21 100	21 477

4 结果分析

ICR65/400 型锂离子电池的性能参数如表 2 所示。

表 2 ICR65/400 型锂离子电池的性能表

容量/Ah	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	比热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)
100	1.08	1 159.3	1 959.3

假设开始放电时电池的温度为 300 K，周围流体的温度为 300 K。利用这些数据分别对 ICR65/400 型锂离子电池的温度场进行了二维分析和三维分析，并对两者的结果进行了分析比较，最后分析了不同对流换热系数对电池温度场的影响。

4.1 温度场的二维分析

图 2 表示了 1 C 放电，对流换热系数为 $10 W/(m^2 \cdot K)$ 时，电池温度场的二维分布云图。从图中可以看出放电结束时，电

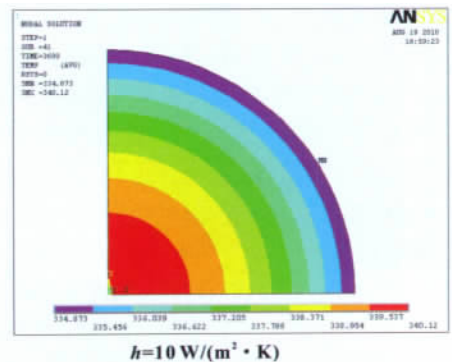
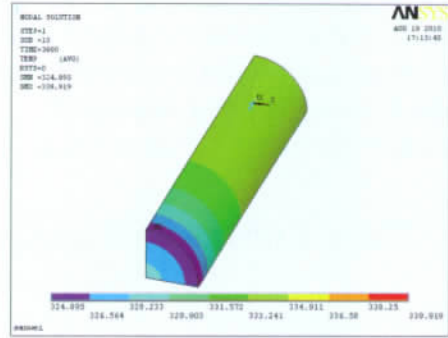


图 2 1 C 放电时电池温度场二维分布云图

池的最低温度为 334.873 K，最高温度为 340.12 K，温差为 5.247 K。

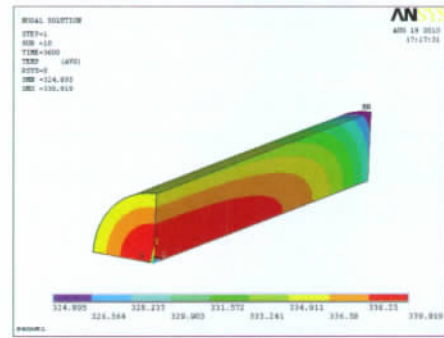
4.2 温度场的三维分析

图 3 和图 4 表示了 1 C 放电，对流换热系数为 $10 W/(m^2 \cdot K)$ 时，电池温度场的三维分布云图。图 5 表示了电池端面在放电结束时的分布云图，图 6 表示了电池中间对称截面在放电结束时的分布云图。



$h=10 W/(m^2 \cdot K)$

图 3 1 C 放电时电池温度场三维分布云图 1



$h=10 W/(m^2 \cdot K)$

图 4 1 C 放电时电池温度场三维分布云图 2

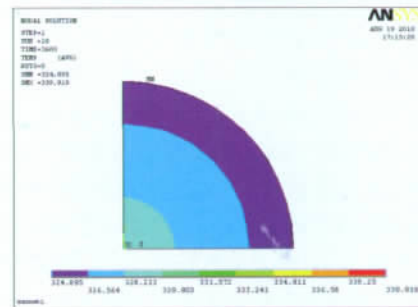


图 5 电池端面温度场分布云图

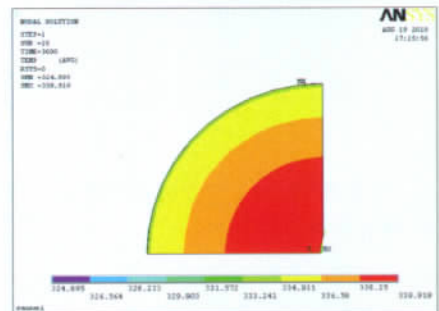


图 6 电池中间对称截面温度场分布云图

从图 3 和图 4 可以看出放电结束时, 电池的最高的温度为 339.919 K, 最低温度为 324.895 K, 温差为 15.029 K。从图 5 和图 6 可以看出, 放电结束时电池端面和中间对称截面的温度场是不一样的, 端面的温度要明显低于中间截面的温度。中间截面中心的温度最高, 而端面表层温度最低。

4.3 结果分析

对比二维分析和三维分析的结果, 可以看出:

(1) 在放电速率、对流换热系数都相同的情况下, 二维分析和三维分析的最高温度相差不多, 二维要比三维的高 0.954 K; 而两者的最低温度则相差甚远, 二维要比三维的高 9.978 K。造成这种现象的主要原因是: 在二维分析中, 电池端面并没有参与散热, 而在三维分析中电池端面参与了散热, 所以二维分析的温度要高于三维分析的温度; 由于电池比较长, 所以端面散热对中心温度的影响并不大, 因此二维分析和三维分析的最高温度相差并不多。

(2) 在二维分析中, 电池每个径向截面上的温度都是相同的; 而在三维分析中并不同, 中间截面的温度要明显高于端面的温度。这种现象也是由于在三维分析中端面参与了散热, 而在二维分析中并没有参与造成的。

综上所述, 二维分析和三维分析结果的差异主要是由于电池端面在三维分析中参与了散热, 而在二维分析中并没有参与造成的。在实际中, 电池端面对散热是有影响的, 因此三维分析的结果是要比二维分析的结果准确。

4.4 对流换热系数对电池温度场的影响

在其它条件相同的情况下, 对流换热系数越大, 电池的温度就越低^[3], 但并不是说对流换热系数越大越好。如图 7 所示, 当 1 C 放电、对流换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度为 322.669 K; 如图 8 所示, 当对流换热系数为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度为 316.876 K; 经计算当对流换热系数为 $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度为 313.973 K。从以上数据可以看出当对流换热系数从 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 变成 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度降低了 17.25 K; 从 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 变成 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度降低了 5.793 K; 从 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 变成 $40 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时, 电池的最高温度降低了 2.903 K。从以上分析可以看出, 随着对流换热系数的增加, 其对电池最高温度的影响越小, 而相应的成本则越大, 因此并不是说对流换热系数越大越好。

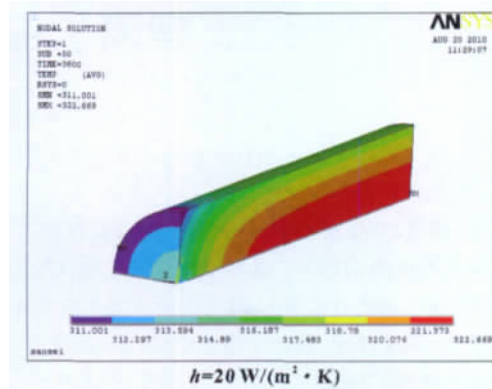


图 7 1 C 放电时电池温度场三维分布云图

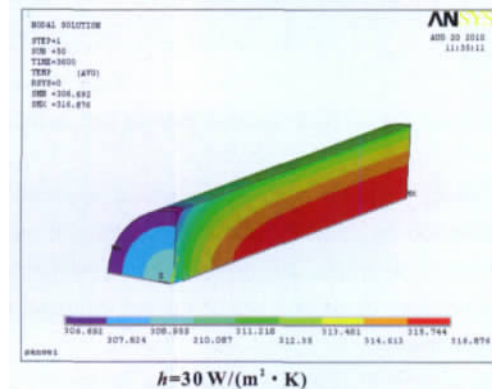


图 8 1 C 放电时电池温度场三维分布云图

5 结论

本文首先在二维分析的基础上, 利用有限元分析软件 ANSYS 对 ICR65/400 型锂离子电池的温度场进行了三维分析。经分析比较, 三维分析要比二维分析准确。接着分析了不同对流换热系数对电池温度场的影响, 结果表明随着对流换热系数的增加, 其对电池最高温度的影响越小, 因此对流换热系数并不是越大越好。

参考文献:

- [1] 王新喜, 宫志刚. 锂离子电池的研究进展[J]. 舰船防化, 2005, 31(1): 15-19.
- [2] 庞静, 卢世刚. 锂离子电池高温反应及其影响因素[J]. 电池工业, 2004, 9(3): 136-139.
- [3] 王晋鹏, 胡欲立. 锂离子蓄电池温度场分析[J]. 电源技术, 2008, 32(2): 120-121.

(上接第 1200 页)

果表明准确度得到了保证。

另一方面, 本算法的大量计算是在等效电路参数表确定过程中, 在 BMS 运行时, 大部分以查表方式得到数据, 简单电路计算就可以得到结果, 在实用性方面也可以得到保证。综上所述, 开路电压和等效电路结合的算法是一种能保证电池 SOC 估算准确度和实用性的算法。

参考文献:

- [1] 李克强. 汽车技术的发展动向及我国的对策[J]. 汽车工程, 2009,

1(11): 1005-1016.

- [2] WANG Xiao-peng. A modular battery management system for HEVs [D]. Future Car Congress: The University of Toledo, 2002.
- [3] ABU-SHARKH S, DOERFFEL D. Rapid test and non-linear model characterization of solid-state lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2004, 130: 266.
- [4] 林成涛, 仇斌, 陈全世. 电动汽车电池非线性等效电路模型的研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 38-47.