

文章编号: 2095-2163(2020)07-0210-07

中图分类号: U467.4⁺93

文献标志码: A

圆柱型锂离子电池详细热模型的数值仿真

朱泽华, 张恒运

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 锂离子电池以其高能量密度、低自放电率等优点, 广泛应用于新能源汽车。本文以圆柱 18650 锂离子电池为研究对象, 建立了锂离子电池的详细热模型, 内部包括正负极、隔膜等多层结构。通过 Bernardi 方程求解焦耳热与熵变产热率, 结合有限元分析(FEA), 对三元锂圆柱电池放电过程的热特性进行数值研究, 得到不同放电倍率下, 电池的温度分布以及温升曲线。结果表明, 焦耳热对电池的温升起主导作用, 熵变热的影响相对较小, 在 5C 放电情况下占比仅 8%。与自然对流相比, 强迫对流的, 电池的最高温度显著降低, 但是电池的内外温差也会加大。

关键词: 锂离子电池; 放电过程; 详细热模型; 有限元分析

Numerical simulation of detailed thermal model for cylindrical lithium-ion battery

ZHU Zehua, ZHANG Hengyun

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

[Abstract] Lithium-ion batteries, with its excellent characteristics such as high energy density and low self-discharge rate, are widely used in new energy vehicles. In this study, a detailed thermal model is established for 18650 cylindrical lithium-ion battery. The simplified model by adopting a cylindrical coordinate is employed. Theoretical thermo-electric model conjugated with finite element analysis to numerically study the thermal behavior (temperature distributions and profiles) of LiNiCoMnO₂/C cylindrical battery during different discharge rates. The results show that the contribution of heat source due to joule heating is significant during the discharge process, and the effect of entropy heating is relatively small. Compared to the results of natural convection, the maximum temperature of the battery is significantly reduced under forced convection, while the temperature difference between the inside and the outer surface increases.

[Key words] Lithium-ion Battery; Discharge process; Detailed thermal model; FEA

0 引言

在能源短缺和环境污染等全球性的大背景下, 电动汽车 (EVs) 和插电式混合动力汽车 (PHEVs) 由于具有环境友好性和能源可再生性等特点而快速发展^[1], 预计在未来的 5~10 年里其市场占有率将达到 30%~60%^[2]。锂离子电池以其高能量密度、低自放电率等优良特性, 常作为电动汽车的动力源。然而, 在电动汽车连续充放电过程中, 电池的温升会影响电池的容量和寿命^[3]。目前, 国内对锂离子电池的集总参数模型(将电芯简化为一个均质实体模型)研究较多。然而, 电池是由内部正负极材料、隔膜和外壳组成的非均质实体, 忽略电池内部细节会导致电池预测结果不准确。通过锂离子电池详细热模型来研究内部各个组件温度分布和温升特性, 对于电池热管理系统的设计而言, 具有一定的意义。

本文将理论(热电)模型和有限元分析(FEA)

相结合, 对圆柱形锂离子电池的热特性进行数值研究。通过模拟不同放电倍率下电池的温度分布及温升曲线, 对电池的温升特性与温差特性有一个更深入认识, 并且还研究了外部冷却条件对电池温度分布的影响, 为进一步提高电池热管理系统的工作性能和设计优化提供了参考。

1 模型的建立

1.1 几何模型的建立

本文以商用 LG 18650 锂离子电池为研究对象, 其相关参数见表 1。

表 1 锂离子电池的相关参数

Tab. 1 The parameters of the lithium-ion battery

直径/ mm	高度/ mm	最大 电压/V	最小 电压/V	标称 电压/V	容量/ (mA·h)
18	25	4.25	2.75	3.6	2500

图 1 为圆柱形锂离子电池的结构示意图。其中电芯由正极材料 (Cathode)、正极集流层 (Cathode

基金项目: 国家自然科学基金(51876113)。

作者简介: 朱泽华(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 动力电池热管理。

收稿日期: 2020-03-22

current collector)、隔膜 (Separator)、负极材料 (Anode) 和负极集流层 (Anode current collector) 螺旋卷绕而成,并置于电池壳体 (Can) 中。正负极极耳 (Electrode tab) 由电芯引出,分别穿过上下绝缘垫片 (Insulation layer) 与正极底端 (Terminal) 和电池底部壳体相连接。电池的正极顶端 (Positive terminal)、防爆阀 (Burst Disk)、正极底端 (Terminal) 通过特氟龙密封环 (Teflon Seal) 与电池外壳隔开。相关电池部件及其对应材料的热物性见表 2^[4]。

由于电芯为螺旋卷绕而成的结构,为了便于仿真计算,将电芯简化为轴对称的层叠式圆环结构。简化后的电池模型可以通过柱坐标来表示,由于电池内部的温度分布均匀且对称^[5],因此可选用“旋

转轴对称”这一几何条件,将三维传热问题转化为二维问题,以节省计算时间。

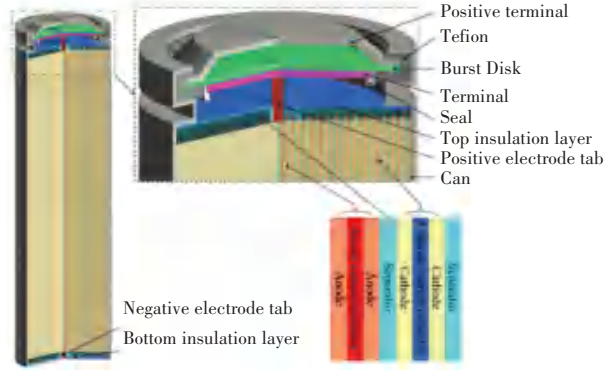


图1 圆柱形锂离子电池的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the configuration for cylindrical Li-ion battery

表2 18650 圆柱型锂离子电池中各组件及对应材料的热物性

Tab. 2 Thermo-physical properties of components in the 18650 cylindrical Li-ion battery

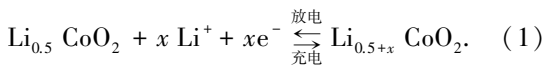
组成	材料	厚度/ μm	高度/mm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热导率/ $(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$	比热容/ $(\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K})$
正极材料	$\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1})\text{O}_2$	77	58	2500	1.58	1269
负极材料	LiC_6	72	58	5031.67	1.04	1437
正极集流层	Al	10	58	2710	202.4	871.5
负极集流层	Cu	10	59	8975.6	387.6	381
隔膜	PP/PE/PP	22	60	910	0.22	1883
正极大极耳	Al	100	63	2710	202.4	871.5
负极大极耳	Ni	100	63	8900	91.4	444
电解液	LiPF ₆ /EC/DMC/EMC	-	-	1280	0.45	134
防爆阀	Al	$r=6\text{mm}$	4	2710	202.4	871.5
正极顶端	SPCC/JIS G3141	$r=8\text{mm}$	4	7800	16.27	478
正极底端	Al	$r=8\text{mm}$	5	2710	202.4	871.5
绝缘体	-	-	-	1000	0.19	1200
外壳	SPCC/JIS G3141	300	65	7800	16.27	478

注: r 代表半径,绝缘体包括上下绝缘层、特氟龙密封环。

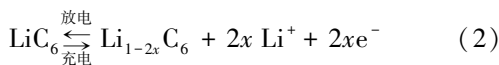
1.2 数学模型

以 LiCoO_2/C 作为正极/负极材料的锂离子电池,在充放电过程中的电化学反应方程式如式(1)~式(3)所示。

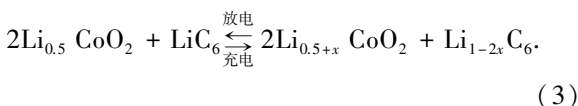
在正极:



在负极:



总体反应:



其中,在电池放电时,上述可逆反应从左向右进行,而在充电时,反应方向相反。

电池内部的产热机理较为复杂,假设电池内部

均匀产热,所建立的电池理论生热模型,已基本满足不同类型电池的生热计算,公式(4)如下^[6]:

$$q_{gen} = I(V_o - V - T \frac{\partial V}{\partial T}), \quad (4)$$

其中, I 为电流; V_o 为开路电压; V 为端电压; T 是系统温度。

其中,焦耳热部分 q_{joule} 的表达式(5)为:

$$q_{joule} = I(V_o - V) = I^2 R_d \quad (5)$$

其中, $(V_o - V)$ 为过电位, R_d 为电池的内阻(主要由欧姆内阻和极化内阻两部分组成)。

熵变热部分 $q_{entropy}$ 的表达式(6)为:

$$q_{entropy} = -IT \frac{\partial V_o}{\partial T} = -T \Delta S \frac{I}{nF} \quad (6)$$

其中, ΔG 为吉布斯自由能,式(7); ΔS 为熵变,式(8); F 为法拉第常数(96485C/mole); n 为每次反应转移的电荷数。

$$\Delta G = -nFV_o, \quad (7)$$

$$\Delta S = -\frac{\partial \Delta G}{\partial T} = -nF \frac{\partial V_o}{\partial T}. \quad (8)$$

能量守恒方程(9)如下:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \tilde{N} \cdot (k \tilde{N} T) + q_{gen}. \quad (9)$$

q_{gen} 计算,式(10):

$$q_{gen} = q_{joule} + q_{entropy} = I^2 R_i - T \Delta S \frac{I}{nF}. \quad (10)$$

其中, ρ 为密度; c 为比热容; k 为导热系数。本模型中考虑的正负极材料 LiNiCoMnO_2 和 LiC_6 的熵变分别如图 2 和图 3 所示, 这些实验数据来自 Williford^[7] 和 Reynier^[8] 等人, 并对数据进行 6 次多项式拟合, 表达式如(11)、(12)所示:

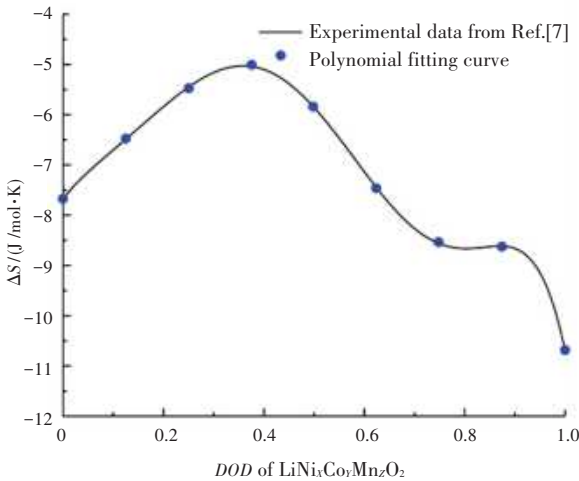


图 2 正极材料 LiNiCoMnO_2 的熵变

Fig. 2 Entropy changes for LiNiCoMnO_2

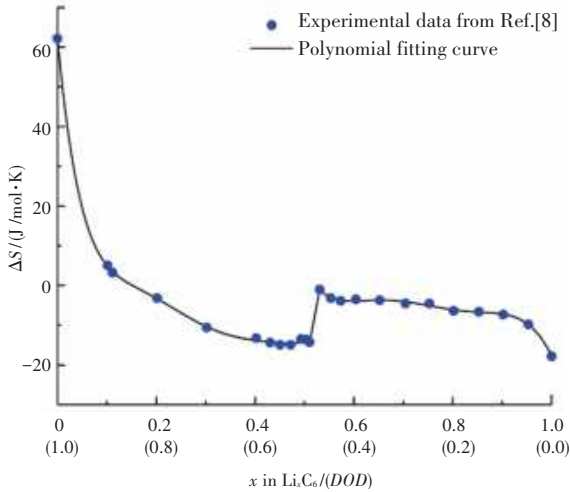


图 3 负极材料 LiC_6 的熵变

Fig. 3 Entropy changes for LiC_6

$$\Delta S_{\text{Li}_x\text{C}_6} = a_1(DOD)^6 + a_2(DOD)^5 + a_3(DOD)^4 + a_4(DOD)^3 + a_5(DOD)^2 + a_6(DOD) + a_7. \quad (11)$$

$$\Delta S_{\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2} = b_1(DOD)^6 + b_2(DOD)^5 + b_3(DOD)^4 + b_4(DOD)^3 + b_5(DOD)^2 + b_6(DOD) + b_7. \quad (12)$$

由于 $\Delta S_{\text{Li}_x\text{C}_6}$ 的变化比较复杂, 将该曲线分为 3 段拟合, 相应的系数见表 3。

表 3 正负极熵变的多项式系数

Tab. 3 Polynomial fit to entropy data

DOD	$\Delta S_{\text{Li}_x\text{C}_6}$			$\Delta S_{\text{LiNiCoMnO}_2}$	
	0-0.469	0.469-0.490	0.490-1	DOD	0-1
a1	11 316.261 8	-	111 396.985 9	b1	-496.636 9
a2	5 120.701 9	-	-457 667.411 0	b2	1 249.482 4
a3	-18 058.356 7	-	776 445.885 9	b3	-1 078.638 1
a4	10 285.028 2	-	-696 337.467 5	b4	367.452 3
a5	-2 409.864 7	-	348 390.916 9	b5	-57.409 5
a6	261.810 0	-654.931 4	-92 261.567 9	b6	12.732 5
a7	-17.808 1	306.372 2	10 094.793 6	b7	-7.673 4

电池表面对流换热边界条件的定义, 式(13):

$$q_{convection} = h(T_w - T_a), \quad (13)$$

其中, h 为对流换热系数; T_w 为电池的表面温度; T_a 为环境温度。外部的冷却条件, 对流换热系数不同, 对电池温度分布会有一些的影响。

1.3 网格模型与边界条件

图 4 为 18650 锂离子的数值模型及相应的计算网格和边界条件, 沿着径向一共有 24 层正负极单元, 每个单元包含二层正极材料、二层负极材料, 一层铜箔、一层铝箔以及二层隔膜。该模型划分网格时的难点为铜箔与铝箔的厚度, 仅有 $10 \mu\text{m}$ 。为了保证计算的精度, 铜箔与铝箔厚度方向至少放上二层网格, 所以局部的网格尺寸将会在 $5 \mu\text{m}$ 以下, 若用三角形网格划分, 将会大大增加整体网格的数量, 因此选择 Ansys Meshing 17.0 中的映射面网格划分法将所有的网格划分成均匀规则的四边形网格。

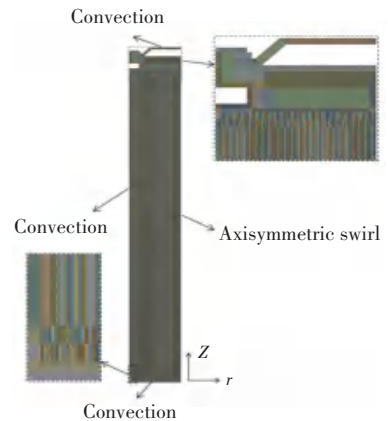


图 4 数值模型, 包括计算网格和边界条件

Fig. 4 Numerical model, including computational meshes and boundary conditions

在 Fluent 17.0 中,对数值模型进行瞬态计算,设置“Axisymmetric swirl(旋转轴对称)”选项。电池的侧面和顶部设为对流换热,自然对流换热系数为 $5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,环境温度 T_a 为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在电池放电过程中,假设热源的生热率是分布均匀的。当时间步长从 0.2 s 增大到 0.5 s 时,电池的温度差异小于 0.02% ,因此选用 0.5 s 作为时间步长。同时,对热源(正极材料、正极集流层、负极材料和负极集流层)上的网格进行细化,直到计算的温度场结果不再改变,最终的网格数量为 571587 。

2 电池内阻的测量

采用 HPPC 测试方法对锂离子电池的内阻进行测量。在电池上部、中部、下部 3 个不同的位置分别放置了 K 型热电偶来监测电池的平均温度,如图 5 所示。将电池放置在环境温度 T_a 为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱中(苏盈 GDJ-250C),使用电池测试系统(新威 CT-4008-5V60A-NFA)对电池进行充放电。采用日置 LR8410-30 记录温度数据。对于整个放电过程,测量的电池总内阻 R_d ,如图 6 所示,并将 R_d 随放电深度(DOD)的变化拟合成一个六阶多项式。

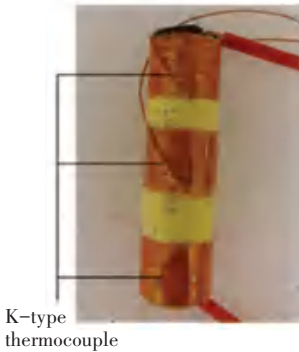


图 5 热电偶在电池表面摆放的位置

Fig. 5 The location of thermocouples on the surface of the battery

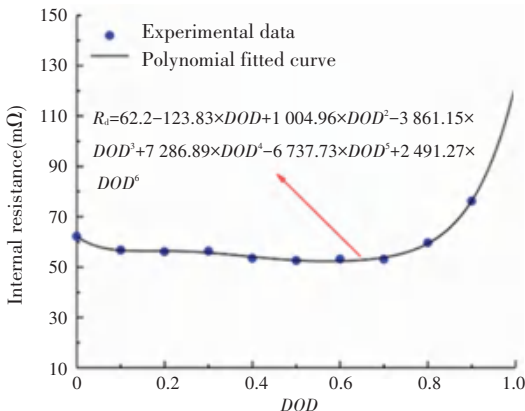


图 6 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境温度下测得的总内阻和拟合曲线

Fig. 6 Measured total internal resistance and fitted curve at ambient temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$

3 结果与讨论

3.1 模型的验证

将数值模型的仿真结果与实验结果进行对比。为了与实验一致,同样在数值模型中电池表面等间距取 3 个点(分别距离电池底部 10 mm 、 32.5 mm 和 55 mm)来检测电池表面的平均温度。图 7 为 4C 放电时,电池表面平均温度与实验结果的对比。总体来看,仿真结果与实验数据比较吻合,其中最大偏差出现在 400s 左右,为 $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$,相当于电池最大温升 $42 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 6% ,从而验证了模型的准确性。

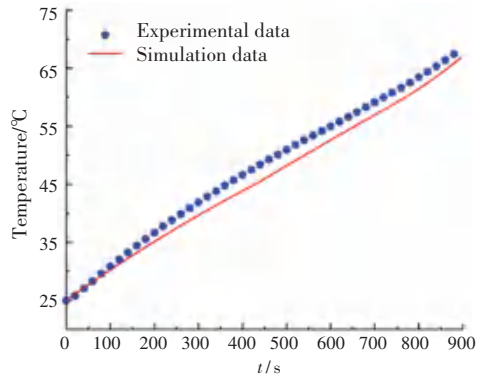


图 7 实验结果与仿真结果的对比

Fig. 7 Comparison between experimental and simulation results

3.2 锂离子电池的热特性

针对电池在不同放电倍率的热特性进行了数值仿真,结果示于图 8~图 12。圆柱形锂离子电池在 $DOD = 1$ 时的温度分布云图如图 8 所示。由于电池在放电结束时 ($DOD = 1$) 的温度最高(参见图 7),故主要展示此时温度分布云图。可以观察到, 2C 放电结束时,电池的最高温度出现在电池的中心偏下部位,与初始温度相比高了 $21.24 \text{ }^\circ\text{C}$ 。最低温度出现在电池的顶盖处。而电池内部与电池表面间的温差较小,为 $0.82 \text{ }^\circ\text{C}$ 。电池整体的温度分布与 Inui 等人的研究结果相似^[9]。

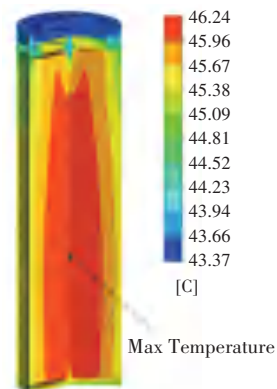


图 8 2C 放电结束时,电池的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of the battery at the end of 2C discharge

图9为2C放电时,电池内部最高温度和表面平均温度随时间的变化,随着放电的进行,电池的温度不断上升。在900 s左右时,温度梯度发生了明显的变化,这是因为图3中负极材料 LiC_6 的熵变在 $DOD = 0.5$ 时,变化十分显著。电池内部最高温度高于表面平均温度,是因为电池内部的温升速率大于电池表面的温升速率。见表4可知,随着放电倍率的增加,电池最高温度与表面平均温度之间的温差逐渐增大,当放电倍率大于4C时,温差将大于 2°C 。放电倍率为2C、3C、4C和5C时,电池最高温度随时间的变化如图10所示。当放电倍率较小时(2C),最高温度上升较小,在放电结束时为 46.24°C 。随着放电倍率的增加,温升速率逐渐增大,最高温度明显上升。在4C和5C放电末期,最高温度上升显著,这是由于高倍率放电时电流较大以及当 DOD 在 $0.8\sim 1.0$ 时,电池内阻显著升高导致的。此外,当放电倍率大于3C,电池放电结束时的最高温度将大于 50°C (自然对流情况下)。

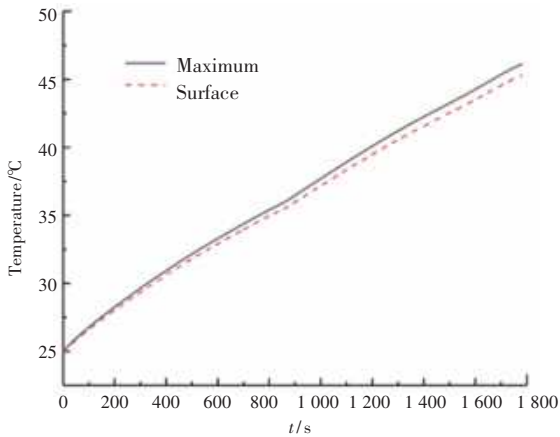


图9 2C放电时,电池内部最高温度和表面平均温度的对比

Fig. 9 Comparison of maximum temperature and average surface temperature during the discharge of 2C

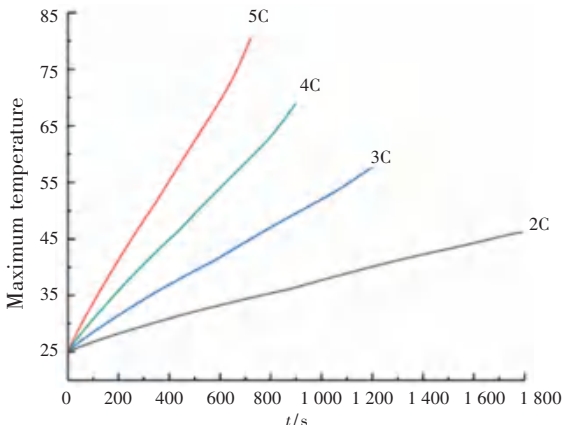


图10 不同电池放电倍率下,电池的最高温度随放电过程的变化

Fig. 10 Maximum temperature variation during the discharge process with different discharge rate

在2C放电结束时,焦耳热和熵变热贡献的热量分别占82.89%和17.11%,如图11所示。随着放电倍率的增加,熵变热和焦耳热所贡献热量间的差距进一步扩大,焦耳热对电池温度的影响变得更为显著,如图12所示。当放电倍率为5C时,焦耳热对热量的贡献上升到92%,熵变热对热量的贡献降低到8%。这是因为热源的大小与电流的大小关系密切,由公式(5)和(6)可知, q_{entropy} 与 I 呈正比, q_{joule} 与 I^2 呈正比。

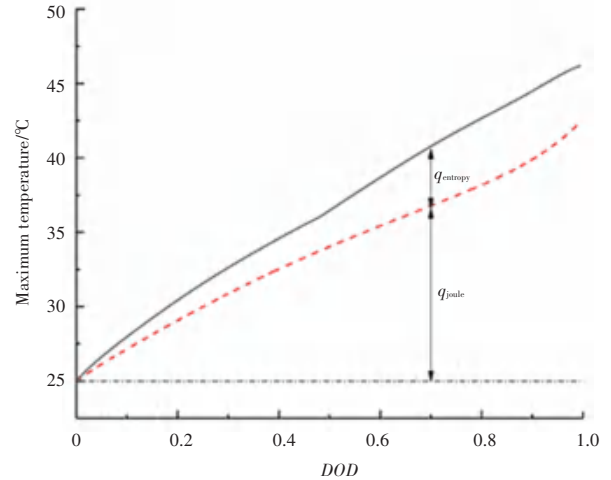


图11 2C放电时,不同热源对最高温度的影响

Fig. 11 Maximum temperature profile and contribution of each heat sources during the discharge of 2C

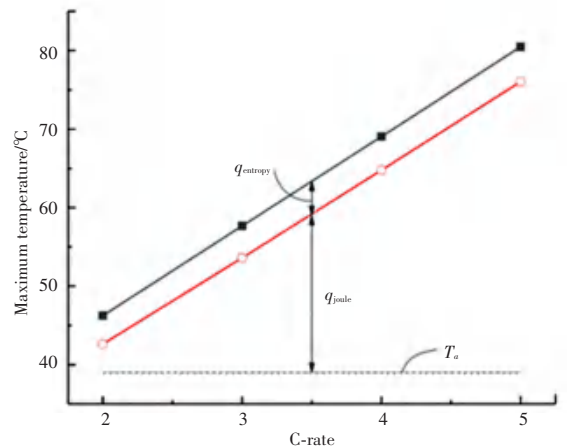


图12 不同放电倍率下(放电结束时),不同热源对最高温度的影响

Fig. 12 Maximum temperature profile and contribution of each heat sources at the end of discharge with different discharge rate

3.3 外部冷却条件的影响

自然对流下,高倍率放电时,电池的温度会显著上升,在4C和5C放电结束时,电池的最高温度分别达到了 69.05°C 和 80.48°C 。高温会使电池内部的固体电解质界面膜分解,从而导致电池的容量和使用寿命缩减,甚至有热失控的风险^[10]。图13为

不同对流条件下,在 2C、3C 和 5C 放电时,电池最高温度的变化情况。强迫对流时,对流换热系数 h 设置为 $75\text{W}/\text{m}^2\text{K}^{[11]}$ 。当外部冷却条件为强迫对流时,电池的最高温度明显降低,在放电结束时,2C、3C 和 5C 放电对应的最高温度分别下降了 73.63%、63.04% 和 47.48%,且最高温度均能控制在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。但是,强迫对流下,电池内部最高温度与表面平均温度之间的温差进一步加大。如图 14 所示,从表 4 中可以看出,在放电结束时,2C、3C、4C 和 5C 放电对应的温差分别为 $1.79\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $3.81\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $6.3\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $9.11\text{ }^\circ\text{C}$ 。所以,强迫对流与自然对流相比,电池的最高温度显著下降,而温差也会上升,电池的温度均匀性下降。

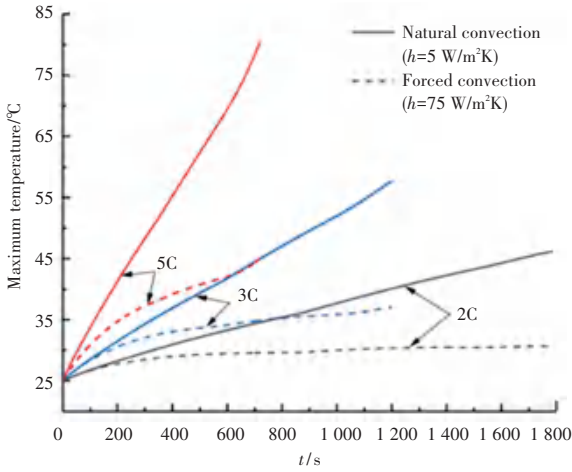


图 13 2C、3C 和 5C 放电倍率下,不同对流条件对电池最高温度的影响

Fig. 13 Maximum temperature variation during the discharge process under different convection conditions at the discharge of 2C, 3C and 5C

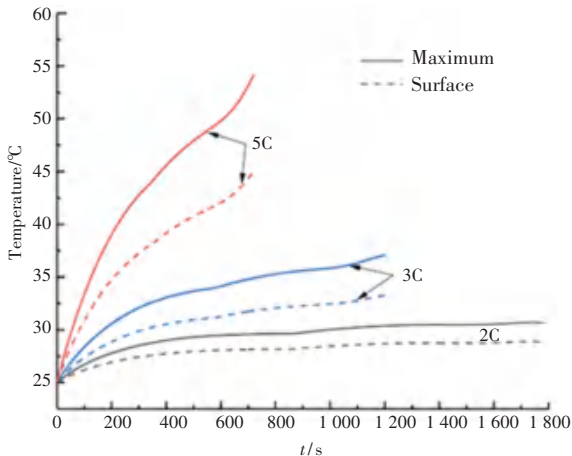


图 14 2C、3C 和 5C 放电倍率下,强迫对流对电池最高温度和表面平均温度的影响

Fig. 14 Comparison of average surface temperature and maximum temperature under forced convection at the discharge of 2C, 3C and 5C

表 4 DOD=1.0 时,不同放电倍率下电池的最高温度、表面平均温度以及温差

Tab. 4 T_{max} , $T_{surface}$ and ΔT of battery with different discharge rate at DOD=1.0

C-rate	$h = 5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$			$h = 75\text{W}/\text{m}^2\text{K}$		
	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$T_{surface}/^\circ\text{C}$	ΔT	$T_{max}/^\circ\text{C}$	$T_{surface}/^\circ\text{C}$	ΔT
2	46.24	45.42	0.82	30.60	28.81	1.79
3	57.66	56.28	1.38	37.07	33.26	3.81
4	69.05	67.03	2.02	45.05	38.75	6.3
5	80.48	77.77	2.71	54.14	45.03	9.11

4 结束语

本文研究了圆柱形锂离子电池放电时的热特性,建立了基于电芯内部正负极、隔膜多层结构的详细电池热模型,并根据 Bernardi 方程获得了电池的焦耳热和熵变产热特性。与实验结果对比表明,仿真结果与实验数据有相似的趋势,这验证了电池模型的准确性。不同倍率下的模拟仿真结果表明,随着放电倍率的增加,电池的温升速率逐渐增大,最高温度明显上升,且电池的内外温差也逐步扩大。其中,焦耳热对电池的温升起主导作用,熵变热的影响相对较小,在高倍率 5C 放电情况下占比仅 8%。通过改善外部冷却条件,可降低电池的温度。与自然对流相比,强迫对流下,电池的最高温度显著降低,但是电池内部的温差加大,温度均匀性有所下降。

参考文献

- [1] AMJAD S, NEELAKRISHNAN S, RUDRAMOORTHY R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3):1104-1110.
- [2] ZHANG T, GAO C, GAO Q, et al. Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC[J]. Applied Thermal Engineering, 2015 (88):398-409.
- [3] 王健雁, 廖成龙, 凌泽. 锂离子电池的循环寿命影响因素研究进展[J]. 化工新型材料, 2019, 11(47):33-35. WANG J, LIAO C, LING Z. Research progress on the factors affecting the cyclic life of lithium ion battery[J]. New Chemical Materials, 2019, 11(47):33-35.
- [4] JEON D H, BAEK S M. Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(8-9):2973-2981.
- [5] INUI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7):2103-2109.
- [6] BERNARDI D. A General Energy Balance for Battery Systems[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1985, 132(1):5-12.
- [7] WILLIFORD R E, VISWANATHAN V V, ZHANG J G. Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1):101-107.

[8] REYNIER Y, YAZAMI R, FULTZ B. Thermodynamics of lithium intercalation into graphites and disordered carbons [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2004 (151):A422-A426.

[9] INUI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries [J]. Energy Conversion and Management, 2007 (48):2103-2109.

[10] 邵丹, 骆相宜, 钟灿鸣, 等. 动力锂离子电池安全性研究的进展

[J]. 电池, 2020, 1(50):83-86.

SHAO D, LUO X, ZHONG C, et al. Progress in safety research of automotive Li-ion battery [J]. Battery Bimonthly, 2020, 1(50):83-86.

[11] LING Z, CAO J, ZHANG W, et al. Compact liquid cooling strategy with phase change materials for li-ion batteries optimized using response surface methodology. Applied Energy, 2018, (228):777-788.

(上接第209页)

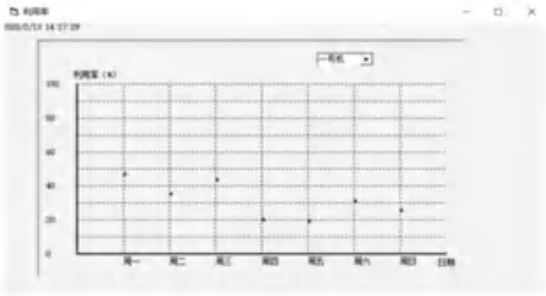


图14 垃圾站利用率界面

Fig. 14 Interface of garbage station utilization rate



图16 实时监控界面

Fig. 16 Real-time monitoring interface



图15 人工清理界面

Fig.15 Manual cleaning interface

为了充分了解人们垃圾分类回收行为和垃圾站工作状态,设计了实时垃圾站监控界面,如图16所示。通过实时的监控,能够有效监督每个用户的垃圾分类行为,有利于管理者及时做出下一步的合理决策,还可以减少人为损坏垃圾站的现象。监控视频有利于了解实时工作情况,当设备损坏可及时处理,也可以帮助管理人员了解不同地区垃圾分类情况,为不同地区制定独特的垃圾回收清理方案,提高了管理部门决策的科学性和管理的便捷性。

考虑到不同管理用户的需求,设计了个性化设置界面,如图17所示。该界面可根据管理人员的要求实现对系统界面字体、字形、字号大小以及背景颜色的调整,达到满足不同管理人员个性化需求的目的。



图17 个性化设置界面

Fig. 17 Personalization interface

4 结束语

本文开发设计了一种新型的智能垃圾分类回收系统,通过实时监控以及自动预警等技术实现对社区垃圾站的及时清理,降低了人工管理的繁琐性和人为垃圾分类回收的复杂性,增强了人们垃圾分类的意识,提高了生活环境质量。该系统结构简单、功能全面,具有较好的稳定性和实用性。在实际应用中,还可以设计垃圾站数据分析系统,为垃圾分类回收管理工作做出更进一步的科学指导。

参考文献

[1] 孟小燕,王毅,苏利阳,等. 我国普遍推行垃圾分类制度面临的问题与对策分析[J]. 生态经济,2019,35(5):184-188.

[2] 李亚惠. 城市生活垃圾分类回收的问题及对策探究[J]. 资源节约与环保,2019(3):56.

[3] 张园,江民欢,阚辉昂,等. 基于 Arduino 控制器的校园智能垃圾桶设计[J]. 智能城市,2019,5(6):15-16.

[4] 李明,王晨景. 绿色全自动智能分类垃圾桶[J]. 科技资讯,2017,15(16):124+126.

[5] 黄凤英. 基于 STM32F103C8T6 单片机的多功能智能手表设计[J]. 物联网技术,2019,9(3):49-51.

[6] 王风. 基于 CC2530 的 ZigBee 无线传感器网络的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.