

锂离子电池可逆与不可逆生热特性研究

李维平, 李隆键, 陈化雨

(重庆大学 能源与动力工程学院, 重庆 400044)

摘要: 以商用圆柱形 18650 电池为研究对象, 利用 Bernardi 简化生热模型, 综合考虑了电池单体在不同温度、不同荷电状态 (SOC) 下的实际生热情况, 通过混合脉冲功率性能放电测试 (HPPC) 和开路电压测试, 拟合得到电池单体生热、直流内阻与 SOC、温度的函数关系。结果表明, 电池单体的生热与温度、SOC 有很大关联, 建立的单体生热模型可为动力电池包热管理的模拟和优化提供参考。

关键词: 电动汽车; 锂离子电池; 生热; 热管理

中图分类号: TM911

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2019.02.07

Investigation on Reversible and Irreversible Heat Generation of Lithium-Ion Battery

LI Weiping, LI Longjian, CHEN Huayu

(School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Temperature and state of charge (SOC) are two important factors for the heat generation of lithium-ion battery in electric vehicles. In this study, the heat generation of a commercial cylindrical lithium-ion battery was studied by using the simplified Bernardi heat model. Considering the impact of temperature and SOC in heat generation, the reversible and irreversible heat curves were fitted by the hybrid pulse power characteristic (HPPC) test and open circuit voltage measurement. Results show that the internal resistance and heat generation have a strong correlation with temperature and SOC. The fitting formulas of heat generation provide a reference for the simulation and optimization of power battery thermal management.

Keywords: electric vehicle; lithium-ion battery; heat production; thermal management

锂离子动力电池热管理技术对动力电池在电动汽车领域的安全高效利用具有重要作用。一般来说, 电池单体最佳工作温度是在 $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$, 而实际电动汽车的工作温度则处于较大的波动范围。因此, 为防止电池工作温度的急剧变化导致不可控反应的

发生, 需对锂离子电池包的换热方式进行优化, 一方面控制工作环境的最高温度, 另一方面控制内部温度的一致性, 预防电池包内部局部热点的产生, 保证电池包整体性能的高效和安全。

在工程应用中, 电池单体常被视作均匀发热体,

收稿日期: 2018-09-19 改稿日期: 2018-10-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0104502)

参考文献引用格式:

李维平, 李隆键, 陈化雨. 锂离子电池可逆与不可逆生热特性研究 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(2): 123-129.

LI Weiping, LI Longjian, CHEN Huayu. Investigation on Reversible and Irreversible Heat Production of Lithium-Ion Battery [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(2): 123-129. (in Chinese)

忽略生热特性对电池电化学反应过程以及单体空间上温度的不一致性等因素的影响,利用集总参数思想简化成一维热模型。在最初的研究中,BERNADI等^[1]将电池生热分成不可逆热和可逆热两部分,研究了工作电流与电压降对电池生热的影响。随着研究的深入,发现电池的瞬态生热量受温度、SOC、充放电倍率等因素的影响。GERVER等^[2]和XU等^[3]研究了温度对电池特性参数的影响。INUI等^[4]、LIU等^[5]、KARIMI等^[6]研究了SOC和温度与电池生热的关系,为电池单体生热模型的建立提供了建议。

本文选用Panasonic NCR18650B商用钴酸锂电池进行研究,综合考虑了温度 T 和SOC对于电池生热的影响,采用开路电压法和混合脉冲功率性能放电测试(HPPC测试),对比研究了不可逆热、可逆热与电池单体直流内阻的关系,分析并得到了不同温度 T 与SOC以及电池单体生热 Q 之间的经验关系式,为电池包生热模拟提供了数据基础。

1 电池单体生热数学模型

合理的电池单体生热模型,是研究电池生热速率、电池包温度分布以及换热情况的基础。电池单体内部由正负极材料、集流片、隔膜等不同材料堆叠组成,实际的微观生热和导热较为复杂,常利用集总参数法对电池的热特性进行简化。将电池单体视为均质材料,假设其内部的材料特性和生热速率一致,与空间位置无关,利用加权平均方式对其合理取值,从而建立简化的生热模型。

目前,常采用Bernardi^[1]生热速率模型作为锂离子电池单体的简化生热模型,如式(1)所示。该模型主要考虑了不可逆热、可逆热两部分因素影响,忽略了副反应热和混合热。副反应热主要是由电池老化所导致,其过程较为缓慢,而混合热主要是由多孔电极中活性物质在电解液中的传输扩散造成的。考虑到商用电池的电化学性能稳定,为简化实际模型,可以忽略副反应热和混合热。

$$q = I(U_{\text{ocv}} - U) - IT \frac{dU_{\text{ocv}}}{dT} \quad (1)$$

式中: I 为充放电电流,负号表示放电电流,A; U_{ocv} 为开路电压,V; U 为工作电压,V; T 为单体

温度,K; $\frac{dU_{\text{ocv}}}{dT}$ 为电池开路电压的温度系数,V/K。

q 为负表示放热。

由式(1)可知,建立Bernardi生热模型时需获得有两个关键参数,一是开路电压所影响的焦耳生热,二是开路电压的温度系数,即可逆热部分。对于焦耳生热也可通过假设电池单体为均匀发热体,利用电池直流内阻 R 来等效电池生热,进一步简化生热模型,如式(2)所示。

$$q = I^2 R - IT \frac{dU_{\text{ocv}}}{dT} \quad (2)$$

2 电池单体物理模型与测试方法

本研究采用的商用圆柱形锂离子电池,额定容量为3250mAh,最高充电电压4.2V,标准1C倍率放电电流为3.25A。该电池正极材料为钴酸锂,电池单体主要特性参数见表1。

表1 电池单体主要特性参数^[7]

参数	值
额定容量 C/Ah	3.25
充电电压 U_1/V	4.2
截止电压 U_2/V	2.5
内阻 $R/\text{m}\Omega$	< 100
质量 m/g	48.5
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 939
比热容 $c_p/[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$	814 ~ 2 400
导热系数 $\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$	0.219 ~ 28.05

电池单体充放电测试采用恒温恒湿试验箱(APKJ, HX-408)控制试验温度,利用数据采集仪(Agilent, 34901A)采集单体表面温度,通过电池充放电设备(NEWARE, CT-5V100A)对电池单体进行充放电测试,测得不同SOC、温度下的开路电压和直流内阻 R ,充放电测试系统如图1所示。

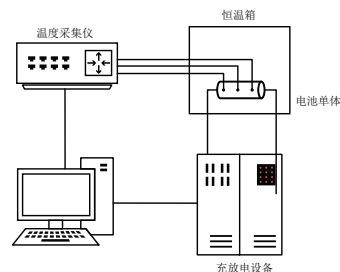


图1 电池单体充放电试验系统

2.1 电池单体实际容量测试

电池在出厂后会出现不同程度的老化和衰减, 为了保证电池处于正常测试状态, 需在测试前对单体进行实际容量测试。利用测得的电池单体实际容量, 可以计算得到不同 SOC 状态下电池的容量。其具体步骤为:

(1) 将电池单体搁置于恒温箱中, 稳定在标准温度 25°C , 电池单体以 1C 先恒流再恒压标准方式充电, 将电池充电至 4.2V , 截止电流 0.2A , 此刻电池为满电状态, 规定 SOC 为 100% 。

(2) 静置 2h , 使电池温度稳定至标准温度; 以 1C 恒流放电, 将电池放电至截止电压 2.5V , 规定此刻电池 SOC 为 0% 。

(3) 以上充放电步骤可重复 3 次, 计算得到电池单体平均实际放电容量。

2.2 电池单体不同温度下的开路电压测试

简化的 Bernardi 生热速率模型中, 如式(3)所示, 包括不可逆生热和可逆生热两大部分, 其中获得不同温度、SOC 状态下的开路电压是建立电池生热模型的关键。

电池的不可逆生热, 如式(4)所示, 主要来自于电池的内部阻抗, 内部阻抗会导致电压降, 可利用开路电压或直流内阻的方式获得电池的不可逆生热。电池的可逆生热, 如式(5)所示, 则主要来自于电池的熵变产热, 可利用平衡电位法, 测得不同 SOC 下的开路电压温度系数, 计算获得电池的可逆生热。

$$q = q_{\text{irr}} + q_{\text{re}} \quad (3)$$

$$\text{不可逆热: } q_{\text{irr}} = I(U_{\text{OCV}} - U) = I^2 R \quad (4)$$

$$\text{可逆热: } q_{\text{re}} = -IT \frac{dU_{\text{OCV}}}{dT} \quad (5)$$

不同温度、SOC 状态下的开路电压测试, 具体是将电池单体放置在恒温箱中, 通过稳定至目标温度, 放电至目标 SOC 状态, 来获得电池单体的开路电压。本试验主要测试了 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 温度下 $0\% \sim 100\%$ SOC 状态下的开路电压数据。

其具体步骤为:

(1) 将电池单体搁置于恒温箱中, 稳定在标准温度 25°C , 1C 恒流恒压方式充电至 4.2V , 截止电流 0.2A , 充满, SOC= 100% 。

(2) 恒温箱调至目标温度 T_1 , 搁置 3h , 测得 SOC= 100% 时的开路电压。

(3) 按 1C 依次放电至各目标 SOC, 并各自搁置 1.5h , 测得开路电压, 至 SOC= 0% 。

此步骤为一个目标温度下不同 SOC 状态下的开路电压测试, 结束后将电池搁置在 25°C 的恒温箱中并充满, 再改变恒温箱温度 T_2 , 进行其它目标温度下的开路电压测试。

2.3 HPPC 混合脉冲功率性能测试

电池直流内阻是研究电池单体生热的关键参数之一, 具体可分为欧姆内阻和极化内阻, 其中欧姆内阻主要是由电池内部材料对离子的传输阻力引起的, 并且与接触内阻有关; 极化内阻则是由电池在电化学反应过程中, 电流通过电极导致其电势偏离标准平衡电极电势所引发的极化现象造成的, 与电流密度和温度有关。

为深入研究电池单体的不可逆生热与其直流内阻的关系, 参考美国《FreedomCAR 动力电池测试手册》中的 HPPC 方法(混合脉冲功率性能测试)对电池进行测试。HPPC 测试是一种使用放电和反馈脉冲的方式来确定电池动态性能的测试方法, 如图 2 所示, 通过对电池单体瞬时大电流放电、搁置、再充电的过程, 得到单体电池电压变化曲线, 再进行分析可得到电池的内部直流阻抗 R 与荷电状态 SOC 的函数关系, 可为动力电池生热模型的建立提供参考。

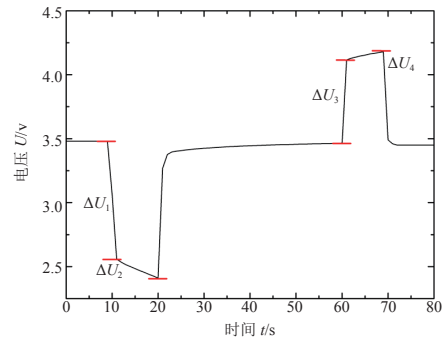


图 2 HPPC 脉冲测试工步示意图

由于温度也是影响电池电化学性质的重要参数之一，会对其内部阻抗产生较大的影响。因此，综合考虑了温度参数对于其不同荷电状态下阻抗的影响。利用 HPPC 进行直流内阻测试，测得锂离子电池单体阻抗 R 与温度 T 、SOC 的关系，获得电池的不可逆生热，进一步简化 Bernardi 生热模型。

电池直流内阻测试的温度范围为 $10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ，SOC 范围为 $10\% \sim 90\%$ 。测试的具体步骤见表 2。

表 2 电池单体目标温度、SOC 状态下 HPPC 测试步骤

工步名称	时间 t/s	倍率 $/\text{C}$	电流 I/A
恒流放电	10	-2	-6.5
搁置	40	0	0
恒流充电	10	1.5	4.875

(1) 将满电状态下的电池单体搁置在恒温箱中，调至测试温度 T_1 ，稳定 3 h，经 1 C 放电 10%DOD 至目标 SOC=90%，再静置 1.5 h，稳定后测得此目标 SOC 的开路电压。

(2) 进行该目标 SOC 下的 HPPC 测试，考虑到此款电池最大充放电电流的限制，采用 2 C 电流先放电 10 s，静置 40 s，再以 1.5 C 充电 10 s，完成一次目标 SOC 的 HPPC 测试。

(3) 静置 1.5 h，使电池温度与电压稳定。

(4) 设定下一阶段所需放电的实际容量，放电至下一目标 SOC，重复 HPPC 测试，直至 SOC=10%，停止。

此步骤为一个目标温度各 SOC 状态下的 HPPC 测试，将电池在常温下充满，改变恒温箱温度，进行其它目标温度测试。

利用 HPPC 测试结果，可以发现电池的直流内阻 R 包括欧姆内阻 R_{Ω} 和极化内阻 R_p 两部分，充放电直流内阻可分别表示为式 (6) 和式 (7)。

$$\text{放电直流内阻: } R_D = (\Delta U_1 + \Delta U_2) / I_D. \quad (6)$$

$$\text{充电直流内阻: } R_C = (\Delta U_3 + \Delta U_4) / I_C. \quad (7)$$

在 HPPC 测试过程中，电池单体会被瞬间施加较大的充放电电流，此刻电池会产生瞬时电压变化，如 ΔU_1 ， ΔU_3 ，该瞬间的电压降反映了电池内部的欧姆内阻特性，因此，电池单体的充放电欧姆内阻可以表示为式 (8) 和式 (9)。

$$\text{放电欧姆内阻: } R_{\Omega-D} = \Delta U_1 / I_D. \quad (8)$$

$$\text{充电欧姆内阻: } R_{\Omega-C} = \Delta U_3 / I_C. \quad (9)$$

3 试验结果与分析

表 3 是根据 2.1 节中电池单体实际容量测得的 3 次充放电循环的平均放电容量，3.135 6 Ah。考虑到电池在低温、低 SOC 测试状态下会有一定程度的衰减，假定每 10%DOD 放电容量为 0.3 Ah，实际 1 C 放电电流按其额定容量的 1 C 电流 3.25 A 设定，放电截止电压设定为 2.5 V。

表 3 电池单体实际容量测试

循环次数	放电容量 C_1/Ah	充电容量 C_2/Ah
1	3.178 6	3.098 4
2	3.085 5	3.156 8
3	3.142 8	3.154 1
平均	3.135 6	3.136 4

3.1 不同温度下开路电压及可逆热温度系数测试结果

通过对不同温度、SOC 状态下的电池开路电压进行测试，结果表明，某一恒定温度下电池的开路电压与其荷电状态 SOC 呈正线性关系。如图 3 所示，随着电池单体容量的增加，电池的开路电压线性增加。试验表明在 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 温度下，电池开路电压与容量均呈较好的线性关系，可根据某一温度状态下的开路电压大小得到电池实际容量状态。

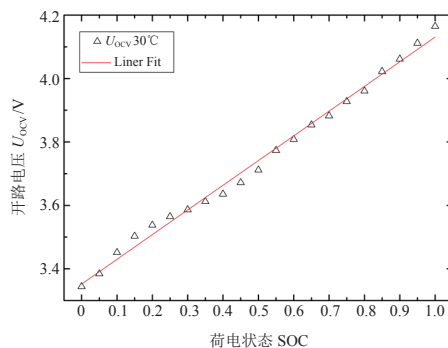


图 3 电池单体 30 °C 不同 SOC 开路电压

图 4 是对不同温度、SOC 状态下的电池开路电压的 Matlab 拟合结果。考虑到电池开路电压与温度和 SOC 的相互联系，选择精度较高、较为简单合理的数学模型，得到开路电压的拟合公式：

$$U_{OCV} = 0.1843 \times \text{SOC}^{1.12} \times T^{0.2538} + 3.368. \quad (10)$$

根据 Bernardi 生热模型, 电池单体不可逆生热部分, 用开路电压可以表示为:

$$q_{\text{irr}} = I \left[(0.1843 \times \text{SOC}^{1.12} \times T^{0.2538} + 3.368) - U \right] \quad (11)$$

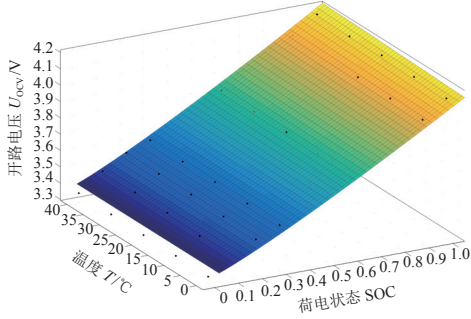


图 4 不同温度、不同 SOC 状态下的开路电压 U_{OCV}
(拟合度 $R^2=0.9941$)

图 5 反映了温度对某一 SOC 状态下电池开路电压的影响, 通过对电池在 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 温度下的开路电压进行测试, 分析其不同 SOC 下开路电压随温度变化的趋势。结果表明, 随着温度的升高, 开路电压缓慢提升, 呈线性变化趋势, 可通过开路电压随温度的变化关系, 得到电池的开路电压系数 dU_{OCV}/dT 。

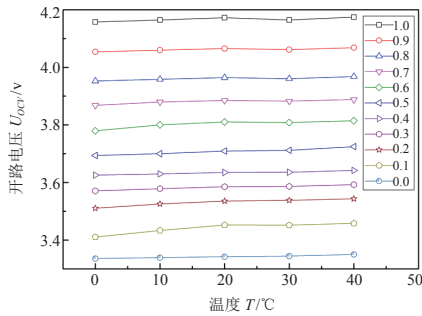


图 5 电池单体 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 不同 SOC 下的开路电压

通过对其开路电压温度系数 dU_{OCV}/dT 的分析, 如图 6 所示, 可以发现该系数的变化呈非线性关系。电池单体在 $\text{SOC}=40\% \sim 70\%$ 时存在波峰, 这与文献 [7] 所得的试验结果一致, 而试验在 $\text{SOC}=0\% \sim 20\%$ 时出现的波峰可能与该电池性能有关, 在低 SOC 荷电状态下, 电池内部的电化学性质不稳定, 存在急剧的变化。

通过对试验结果进行拟合, 得到开路电压的温度系数与温度、SOC 的关系:

$$\frac{dU_{\text{OCV}}}{dT} = (-380.48553 \times \text{SOC}^7 + 1038.97059 \times$$

$$\text{SOC}^6 - 849.40359 \times \text{SOC}^5 - 6.82787 \times \text{SOC}^4 + 321.17041 \times \text{SOC}^3 - 142.48702 \times \text{SOC}^2 + 19.06194 \times \text{SOC} + 0.33553) / 1000 \quad (12)$$

根据 Bernardi 生热模型, 电池单体可逆生热部分, 用开路电压的温度系数可以表示为:

$$q_{\text{re}} = -IT \frac{dU_{\text{OCV}}}{dT} = -I \times T (-380.48553 \times \text{SOC}^7 + 1038.97059 \times \text{SOC}^6 - 849.40359 \times \text{SOC}^5 - 6.82787 \times \text{SOC}^4 + 321.17041 \times \text{SOC}^3 - 142.48702 \times \text{SOC}^2 + 19.06194 \times \text{SOC} + 0.33553) / 1000 \quad (13)$$

利用开路电压和温度系数所得到的不可逆生热和可逆生热, 式 (11) 和式 (13), 建立生热模型, 得到其生热经验关系式:

$$q = q_{\text{irr}} + q_{\text{re}} = I \left[(0.1843 \times \text{SOC}^{1.12} \times T^{0.2538} + 3.368) - U \right] - I \times T (-380.48553 \times \text{SOC}^7 + 1038.97059 \times \text{SOC}^6 - 849.40359 \times \text{SOC}^5 - 6.82787 \times \text{SOC}^4 + 321.17041 \times \text{SOC}^3 - 142.48702 \times \text{SOC}^2 + 19.06194 \times \text{SOC} + 0.33553) / 1000 \quad (14)$$

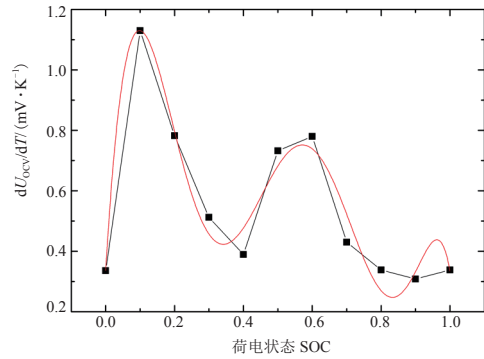


图 6 电池单体开路电压的温度系数 dU_{OCV}/dT
(拟合度 $R^2=0.8642$)

3.2 不可逆产热过程中直流内阻变化情况

为了进一步了解电池直流内阻对不可逆生热的影响, 利用 HPPC 方式进行脉冲测试。试验结果表明, 电池在某一温度状态下的充放电内阻随 SOC 的增加呈指数形式递减, 并趋于稳定, 如图 7 所示。

在低 SOC 荷电状态下 ($\text{SOC}=0\% \sim 30\%$), 由于电池内部浓度变化等因素造成电化学性质的不稳定, 内部阻抗会急剧变化; 并且, 随着电池温度不断降低, 电池内部锂离子热运动能力减弱, 导致充放电内阻增大。这一方面反映了电池在低荷

电状态和较低温度下会造成锂离子传输能力的下降,另一方面也表现了其在低荷电状态下电池生热能力的增强。此外,电池单体在富裕荷电状态(SOC=30%~100%)下,充放电内阻趋于稳定,近似常数,表明该状态的电池一致性较好,较为稳定,是最佳的工作区间。

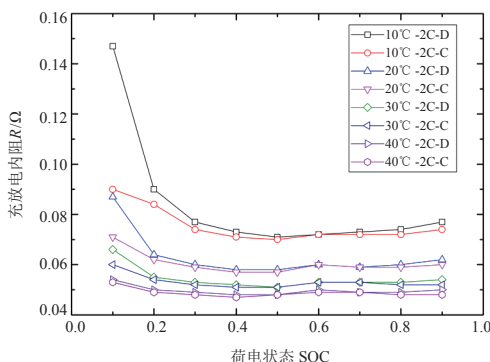


图7 电池单体在10℃~40℃下的充放电内阻

对充放电内阻进行比较,可以发现不同温度下电池单体的放电内阻略大于充电内阻,这表明充电时锂离子从正极脱离到嵌入负极石墨层的阻力较小,而放电时锂离子嵌入正极材料的阻力较大,因此,造成了电池单体充放电生热的不同。对于电池单体充电内阻,可以发现在不同SOC状态下大致趋于平缓,锂离子在充电脱嵌过程中的阻力较小,在低荷电充电状态下,锂离子能够较快且均匀地嵌入负极石墨层中。而放电内阻在低荷电状态下呈增大趋势,这是由于锂离子在正极材料内富集,造成局部浓度的升高,导致锂离子继续传输能力的减弱。

适度提高电池温度,能在一定程度上降低电池单体的充放电内阻。温度的升高可以提高锂离子的内能,从而增加了锂离子转化的动能,这使得锂离子更能克服由电极材料所造成的势能差,从微观上促进了锂离子的扩散和传递能力,从宏观上降低了电池的充放电内阻。

图8是各充放电状态的平均内阻,根据温度、SOC与平均内阻的变化关系,可以拟合得到其多项关系式(拟合度 $R^2=0.8838$):

$$R = 0.07347 \times \text{SOC}^2 - 0.4083 \times \text{SOC} + 3.319 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.02132 \times T + 0.001073 \times \text{SOC} \times T + 3.484. \quad (15)$$

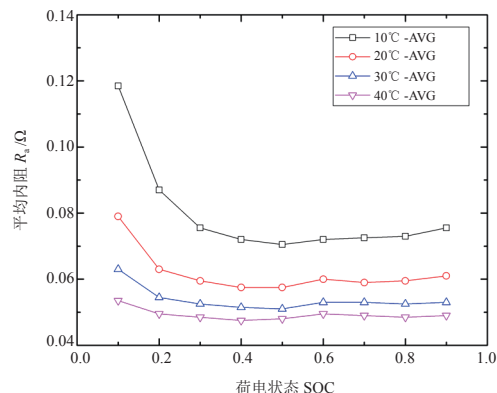


图8 电池单体在10℃~40℃下的平均内阻

电池不可逆生热部分可表示为:

$$q_{\text{irr}} = I^2 R = I^2 \times (0.07347 \times \text{SOC}^2 - 0.4083 \times \text{SOC} + 3.319 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.02132 \times T + 0.001073 \times \text{SOC} \times T + 3.484). \quad (16)$$

电池单体总生热可表示为:

$$q = q_{\text{irr}} + q_{\text{re}} = I^2 R - IT \frac{dU_{\text{OCV}}}{dT} = I^2 \times (0.07347 \times \text{SOC}^2 - 0.4083 \times \text{SOC} + 3.319 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.02132 \times T + 0.001073 \times \text{SOC} \times T + 3.484) - I \times T(-380.48553 \times \text{SOC}^7 + 1038.97059 \times \text{SOC}^6 - 849.40359 \times \text{SOC}^5 - 6.82787 \times \text{SOC}^4 + 321.17041 \times \text{SOC}^3 - 142.48702 \times \text{SOC}^2 + 19.06194 \times \text{SOC} + 0.33553) / 1000. \quad (17)$$

表4是根据简化的用直流内阻表示的生热模型,得到的在25℃、1C放电电流3.25A状态下的生热

表4 电池单体25℃-3.25A放电状态生热速率

SOC	可逆生热速率/W	不可逆生热速率/W	总生热速率/W
0	0.3251	0.8219	1.1470
0.1	1.0948	0.7363	1.8311
0.2	0.7720	0.6662	1.4382
0.3	0.4426	0.6117	1.0542
0.4	0.4621	0.5727	1.0347
0.5	0.6607	0.5491	1.2098
0.6	0.7158	0.5411	1.2570
0.7	0.5061	0.5487	1.0548
0.8	0.2613	0.5717	0.8330
0.9	0.3221	0.6103	0.9324
1	0.3241	0.6644	0.9885

速率。拟合的结果表明, 电池单体总体生热速率在 1 W 左右, 符合常规工程应用中的设定。

4 结论与展望

综上所述, 电池单体的瞬态生热与其荷电状态 SOC 和温度 T 密切相关, 通过经验生热模型可以分别得到不可逆生热和可逆生热。本文利用 Bernardi 简化生热模型, 综合考虑了温度 T 和荷电状态 SOC 对生热的影响, 并利用 HPPC 确定了其直流内阻 R 随 SOC 和温度 T 的变化关系, 建立的单体生热模

型为模拟电池在不同温度、SOC、放电倍率下的瞬时生热状态奠定了基础。

电池的生热状态与其自身特性具有较大联系, 电池性能的一致性对其高效安全使用至关重要。通过对单体电池充放电特性的试验研究和文献分析发现, 电池的种类、制造工艺、生产批次均会影响电池的性能一致性, 电池的成组则会进一步扩大不一致性的影响, 导致电池管理系统 (BMS) 的管理难度增加, 因此, 选择合适的电芯进行充放电特性测试是检验电池一致性、了解电池性能的必要手段。

参考文献 (References)

- [1] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A General Energy-Balance for Battery Systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.
- [2] GERVER R E, MEYERS J P. Three-Dimensional Modeling of Electrochemical Performance and Heat Generation of Lithium-Ion Batteries in Tabbed Planar Configurations [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(7): A835.
- [3] XU Meng, ZHANG Zhuqian, WANG Xia, et al. A Pseudo Three-Dimensional Electrochemical-Thermal Model of a Prismatic LiFePO₄ Battery During Discharge Process [J]. Energy, 2015, 80: 303-317.
- [4] 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.
- [5] LIU Rui, CHEN Jixin, XUN Jingzhi, et al. Numerical Investigation of Thermal Behaviors in Lithium-Ion Battery Stack Discharge [J]. Applied Energy, 2014, 132: 288-297.
- [6] KARIMI G, LI Xiaogao. Thermal Management of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles [J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(1): 13-24.
- [7] GÜMÜŞSU E, EKICI Ö, KÖKSAL M. 3-D CFD Modeling and Experimental Testing of Thermal Behavior of a Li-Ion Battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 484-495.

作者介绍



通讯作者: 李隆键 (1966-), 男, 重庆市人。教授, 博士生导师, 主要研究方向为传热传质极其强化、计算流体力学、新能源技术及装置、冶金过程中的关键热物理问题及节能、电力电子设备散热、汽车热管理、动力电池热管理等。

Tel: 023-65111867

E-mail: longjian@cqu.edu.cn



责任作者: 李维平 (1993-), 男, 重庆市人。博士研究生, 主要从事动力电池热管理及高效冷却技术的研究。

Tel: 18983366257

E-mail: weiping@cqu.edu.cn