

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107356

# 车用大尺寸软包锂离子电池在高低温升工况下的生热率测定

王帅林<sup>1</sup>, 盛雷<sup>1,2</sup>, 苏林<sup>1</sup>, 方奕栋<sup>1</sup>, 李康<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2. 上海理工大学机械工程学院 上海 200093)

**摘要:**提出了一种电动汽车用大尺寸软包锂离子电池的生热率测量方法——热补偿法,研究了电池生热率与工作电流、温度之间的曲线关系,其有效性得到了常规热流计法的验证,最后结合这两种方法研究了电池在高、低温升工况下的生热特性。研究表明,基于热补偿法的电池生热率平均测算偏差低于5.6%;电池的生热率随工作电流的增大而增大,二者呈二次非线性关系;电池在高温升工况下的生热率随放电深度呈先降后升趋势,形似U型曲线;电池在低温升工况下的平均生热率较其在高温升工况下高约13.7%。提出的热补偿法具有精度高、成本低、简便灵活等优势,研究成果可为大尺寸软包锂离子电池的热模型建立和热管理系统设计给予指导。

**关键词:**大尺寸软包锂离子电池;生热率;高低温升工况;热补偿法;实验测试

**中图分类号:** TM911 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 530.4130

## Determination of heat generation rate for a large-size vehicle pouch lithium-ion battery under high and low temperature rise conditions

Wang Shuailin<sup>1</sup>, Sheng Lei<sup>1,2</sup>, Su Lin<sup>1</sup>, Fang Yidong<sup>1</sup>, Li Kang<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;  
2. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The paper proposes a heat generation rate measurement method for large-size pouch lithium-ion batteries used in electric vehicles (EV), namely, the thermal compensation method. The curve relationship between the battery heat generation rate and operating current, temperature was studied, the effectiveness of the thermal compensation method was verified with the conventional method using heat flow meter. Finally, combining these two methods, the heat generation characteristics of the battery under high and low temperature rise conditions were studied. The study results show that the average calculated deviation of battery heat generation rate based on thermal compensation method is less than 5.6%. The battery heat generation rate increases with the increase of operating current, and the relationship between the two shows quadratic nonlinear relationship. The heat generation rate of the battery under high temperature rise condition first decreases and then rises with the depth of discharge as a U-shaped curve. The average heat generation rate of the battery under low temperature rise condition is about 13.7% higher than that under high temperature rise condition. The thermal compensation method proposed in this paper has the advantages of high accuracy, low cost, simplicity and flexibility. The research results can provide a guidance for the establishment of thermal model and thermal management system design of large-size pouch lithium-ion batteries.

**Keywords:** large-size pouch lithium-ion battery; heat generation rate; high and low temperature rise conditions; thermal compensation method; experiment test

## 0 引言

当前,电动汽车的发展已步入高速通道,其续航能力在逐步提升,电池组的能量密度在逐渐增大,这使电池单体的尺寸和主体分别逐趋大型化和软包化。然而,随着电池尺寸的增大,其在工作过程中产生热量逐渐增多,致使电池单体的温度上升较高,且温均性亦较差。研究表明,较高的工作温度可严重影响锂离子电池的工作性能和循环寿命<sup>[1-3]</sup>。因此,部分车企对电动汽车电池组制定了严苛的热管理措施,要求将电池组在常温 25 °C 下工作时的温度控制在 32 °C 以内(最大温升不高于 7 °C)。但目前许多关于电池生热率的测试常常在高温升工况(high temperature-rise, HTR)下开展,与车企的实际需求不匹配。故此,测算大尺寸软包锂离子电池在高温升和低温升(low temperature-rise, LTR)工况下的生热率和分析其在该工况下的生热特性,具有重要意义。

目前,国内外学者对锂离子电池生热特性的研究可大致归结为两个方面:其一通过建立电池生热分析模型,然后假以实验分析电池生热状况;另一则采用专用仪器分析电池的生热特性。在建立生热分析模型时又可分为 3 类:一类从微观机理分析电池生热特性。Bernardi 等<sup>[4]</sup>从电池工作过程中的微观产热机理出发,提出了包含焦耳热、可逆熵变热、混合热和相变热的电池热模型,是目前计算锂离子电池生热率最常用的理论模型之一。Kim 等<sup>[5]</sup>和许建青等<sup>[6]</sup>基于 Bernardi 电池热模型测定锂离子电池的生热率,并结合实验和仿真研究了电池温度场的分布。基于 Bernardi 电池生热模型的电池生热率测试方法,需要先确定电池的内阻和熵变系数,测算周期较长;第二类是通过实验建立简单的温升热模型。Drake 等<sup>[7]</sup>基于能量守恒定律建立锂离子电池的生热模型,实验过程中采用热流计(heat flux-meter, HFM)监测了电池热损,指出电池的生热率受温度和工作电流影响较大,Sheng 等<sup>[8]</sup>基于能量守恒定律提出了考虑热损的电池生热率理论模型,通过实验研究了方形 LiFePO<sub>4</sub> 电池在不同环境温度和放电倍率下的生热特性,指出电池的生热率随环境温度的降低和放电倍率的增大而增大。Zhang 等<sup>[9]</sup>基于导热微分方程及傅里叶定律(Fourier's Law)建立锂离子电池的热分析模型,通过实验测试电池的生热率,测算误差在 10% 以内;第三类是关于电池热场仿真的研究,侧重于采用电化学-热耦合模型、电-热耦合模型。Wang 等<sup>[10]</sup>通过建立锂离子电池的电化学-热耦合模型分析了电池模块串联和并联情况下的温度和电流分布,指出与串联方式相比,并联时电池的平均温升和电池间最大温差较低。该模型较适用于小尺寸电池的热仿真研究。宋文吉等<sup>[11]</sup>通过建立分层结构的电-热耦合模型,分

析软包电池容量变化对温度梯度的影响,指出只通过层叠的方式增加容量会大幅度增加热管理的难度。Cui 等<sup>[12]</sup>提出了用于硬壳锂离子电池的 3 种集总参数热模型,分析了圆柱形锂离子电池内部生热情况及沿径向和轴向的导热情况。采用专用仪器测量方面, Lin 等<sup>[13]</sup>采用加速绝热量热仪(accelerating rate calorimeter, ARC)研究了大容量方形磷酸铁锂电池的生热特性,指出电池的生热率受环境温度、荷电状态(state of charge, SOC)和工作电流影响较大,并通过数值仿真分析了测试结果的准确性。此外,亦有许多其它研究人员<sup>[14-17]</sup>采用 ARC、等温量热仪(isothermal battery calorimetry, IBC)等专业仪器研究电池的生热特性,往往测算周期较长,测试成本难以控制。

综上所述,以往关于锂离子电池生热特性的研究多着眼于小尺寸电池,其多采用 ARC、IBC 等专业设备进行实验,使电池在工作过程中的温升较高。然而,随着电池尺寸逐步增大,常规测量仪器因其测试腔较小而难以满足大尺寸电池的生热率测量,且所测 HTR 下的电池生热率较难满足当前车企对电池热管理的需求。为此,本文开发了一种简便的电池生热率测试方法——热补偿法,并借助现在常用的热流计法<sup>[18]</sup>验证热补偿法的有效性。基于该方法,考虑热损的影响,首先研究了电池在 HTR 下的电池生热率与工作电流和放电深度(depth of discharge, DOD)之间的曲线关系;进而通过实验研究了电池在 LTR 下(采用风机冷却电池,采用热流计监测电池表面的热流密度)的生热特性。本文提出的热补偿法具有精度高、简便灵活和不依赖专用设备成本低等优势,在电动汽车动力电池系统的热设计与优化方面具有较高的现实指导意义和工程应用价值。

## 1 理论分析

### 1.1 热补偿法

电池在工作过程中产生的热量主要包括两个部分:一部分热量  $q_1(t)$  被电池本身吸收,使电池温度升高,另一部分热量  $q_2(t)$  因热损而流散于周围环境。

1) 基于能量守恒定律,电池自身吸收的热量  $q_1(t)$ :

$$q_1(t) = c_p m \frac{dT_b(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: $c_p$  为电池的比热容, J/(kg·K);  $m$  为电池的质量, kg;  $T_b(t)$  为电池温度, K;  $t$  为时间, s。

2) 基于牛顿冷却定律,电池向周围环境流散的热量  $q_2(t)$ :

$$q_2(t) = hA[T_b(t) - T_a] \quad (2)$$

式中: $h$  为电池表面与环境的对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $T_a$  为环境温度, K;  $A$  为电池的表面积, m<sup>2</sup>。

其中  $h$  可通过温降实验测得:

$$h = \frac{c_p m \frac{dT_{\text{drop}}(t)}{dt}}{A [T_b(t) - T_a]} \quad (3)$$

式中:  $T_{\text{drop}}(t)$  为温降实验中电池的下降温度, K。

因此, 电池总的生热率为:

$$q_b(t) = hA [T_b(t) - T_a] + c_p m \frac{dT_b(t)}{dt} \quad (4)$$

式中:  $q_b(t)$  为电池的生热率, W。

由式(4)可知, 只要知悉电池工作过程中的温升率  $dT_b(t)/dt$  和对流换热系数  $h$ , 即可确定电池的总生热率。

### 1.2 常规热流计法

电池工作过程产生的部分热量因热损而通过自身表面流散于周围环境, 在其表面形成热流密度  $\dot{q}(t)$ , 该参数可通过常规热流计设备测得:

$$q_2(t) = \dot{q}(t)A \quad (5)$$

式中:  $\dot{q}(t)$  为电池与外界换热而产生的面热流密度(热损),  $W/m^2$ 。

电池自身吸收的热量可通过式(1)测获, 则电池的总产热率为:

$$q_b(t) = \dot{q}(t)A + c_p m \frac{dT_b(t)}{dt} \quad (6)$$

由式(6), 只要获取电池工作过程中的温升率  $dT_b(t)/dt$  和表面热流密度  $\dot{q}(t)$  即可获取电池的生热率。本文借助热流计法测试电池在 HTR、LTR 下的生热率, 用以验证热补偿法的有效性以及对比两种工况下的生热特性。

## 2 实验测试

### 2.1 实验对象

实验对象为车用高比能三元软包锂离子电池, 正极为镍钴锰酸锂 ( $Li(Ni_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3})O_2$ ), 负极材料为石墨, 规格参数如表 1 所示。

表 1 软包三元锂离子电池的规格参数

Table 1 Specifications of pouch ternary lithium-ion battery

项目名称	数值
尺寸(L×W×H)/mm	300×100×11.2
质量/g	781.50
标称容量/(A·h)	55
标称电压/V	3.6
放电截止电压/V	2.8
充电截止电压/V	4.2
工作温度范围/℃	充电 0~45 放电 -20~60

### 2.2 实验布置

图 1 展示了电池生热率测试示意图、实物图及热电偶和热流计测点布置状况。

#### 1) 高温升工况(HTR)

通过使用当前的热补偿方法和常规的热流计法测量在 HTR 下电池的生热率。如图 1 中(I)部分所示, 将电池置于由珍珠棉(expandable polyethylene, EPE)材料制成的保温盒( $700 \times 300 \times 180 \text{ mm}^3$ )中心, 以减小电池向环境散失的热量。此外, 将装有电池的保温盒放置在恒温箱内, 提供初始温度和恒定的环境温度。利用电池充放电仪(60 V 100 A)进行充放电实验。布置热电偶 TC(K 型, 国 I 精度  $\pm 0.4\%$ )及热流计探头 HFS 分别测量电池的温度变化及电池因热损造成的热流损失  $\dot{q}(t)$ 。为准确测量电池整体的温度, 将电池主体分成四个部分, 将各测点均匀布置在电池表面, 其中测点 1、3 位于电池正面, 带括号的测点 2、4 位于电池背面。实验过程中, 电池正反两面各布置两个热流测头 HFS1~HFS4(HFS1 和 HFS3 的尺寸为  $10 \times 9.1 \times 0.28 \text{ mm}^3$ , 另两个测头尺寸为  $53.5 \times 10 \times 0.28 \text{ mm}^3$ ), 同时, 在电池正反两面距热流传感器中心 7 mm 处(在垂直其侧边方向相距 2 mm 处)各布置 1 枚热电偶 TC1~TC4。

#### 2) 低温升工况(LTR)

根据热流计法确定 LTR( $7^\circ\text{C}$  以内)下的生热率。将电池裸露于环境室(通过空调控温), 然后在距离电池两侧面 10 cm 处各布置一台风机(型号 T(FD)-300, 风量  $3\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ ), 对电池进行冷却以确保其最大温升不超过  $7^\circ\text{C}$ 。此外, 热流计探头布置与 HTR 实验中布置的位置相同。

## 3 结果与讨论

首先, 分别通过使用当前的热补偿方法和常规的热流计法测量在 HTR 下电池的生热率。在这种情况下, 热流计法主要用于本方法的有效性验证。其次, 在 LTR 下再次根据热流计法确定低温升工况下的生热率。此外, 对比了高、低温升工况下的测量结果, 并研究了温度升高对电池生热特性的影响。

### 3.1 高温升工况下的生热率

#### 1) 对流换热系数的测定

根据图 1(a)所示装置测量电池在 HTR 下的生热率。基于热补偿法测算电池的生热率, 须首先明确电池与周围环境间的对流换热系数  $h$ , 用于计算热量损失。测试前将环境室温度调至  $25^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ), 然后将电池静置于保温盒。待电池温度与环境室温度一致, 开启电池充放电测试仪对电池进行循环充放电以将电池平均温度提升至  $53^\circ\text{C}$ , 然后令其温度自由下降, 并同时记录其降温过程, 当电池平均温度降至  $30^\circ\text{C}$  以下时结束测试。为

排除实验的偶然性误差,重复测试3次。以其中一次测试为例,图2展示了电池的自由温降过程,其中  $T_{avg}$  为电池的平均温度。对平均温降数据进行回归分析,对拟合方

程( $R^2 = 0.999$ )求取一阶导数,得电池的平均温降率  $dT_{drop}/dt$ ,然后根据式(3)即可算取对流换热系数  $h$ ,其中  $T_b - T_a$  为电池与环境间的温差。

(I) 高温升工况(热补偿法+热流计法)

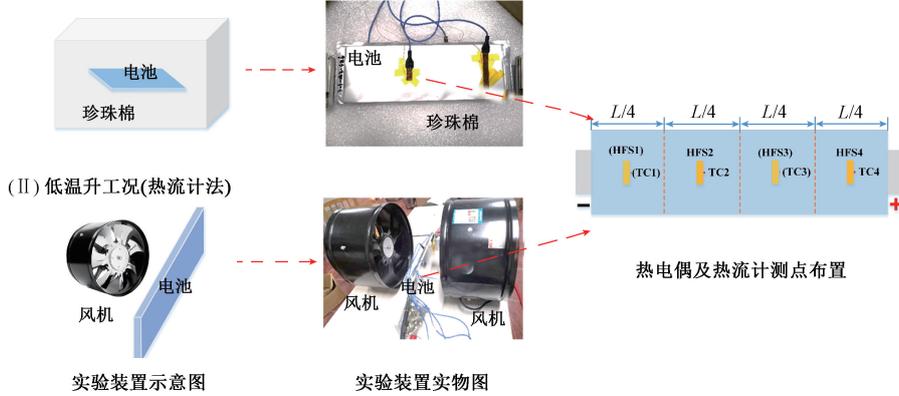


图1 高、低温升工况实验装置示意图、实物图及热电偶和热流计测点布置

Fig. 1 Schematic diagram, physical diagram of high and low temperature rise conditions experimental device and layout of thermocouple and heat flow meter measurement points

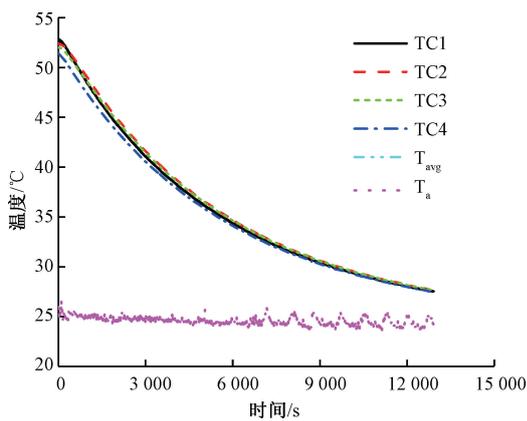


图2 电池的自由温降曲线

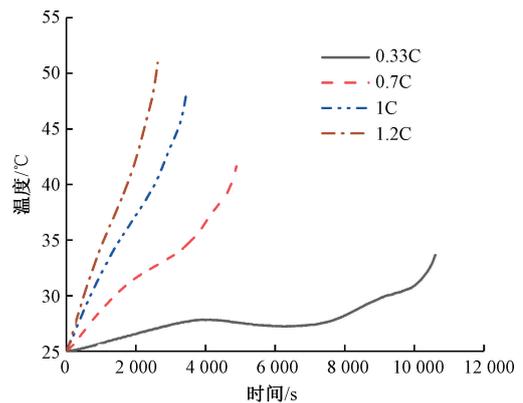
Fig. 2 Free temperature drop curve of the battery

计算过程中电池的比热容取  $c_p = 4.02T_b + 901.1$ , 该结果(随温度线性增大)依据文献[4]中介绍的电池热物性表征方法测算得到。

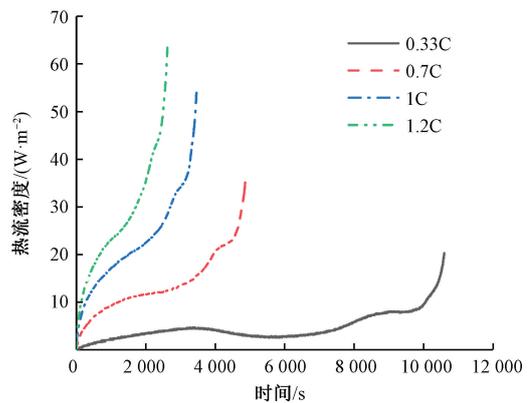
依据上述测算过程,算得电池与周围环境间的流换热系数分别为  $2.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $2.59 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、 $2.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,平均值  $2.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,最大偏差不超过 2.7%。

2) 生热率计算

该实验研究了在 0.33 C、0.7 C、1 C 和 1.2 C 等不同放电倍率下电池的生热率。图3展示了电池在 HTR 下的各测点的平均温变情况及平均热流密度。



(a) 高温升工况下电池的温变曲线  
(a) Curves of temperature change of the battery under high temperature rise condition



(b) 高温升工况下电池表面的热流密度曲线  
(b) Curves of heat flow density on the battery surface under high temperature rise condition

图3 高温升工况下电池的温变和热流密度的曲线

Fig. 3 Curves of temperature change and heat flow density of the battery under high temperature rise condition

如图 3(a) 所示, 电池放电初期和末期温度上升速度较快, 高温升工况下电池的最大温升可达到  $27^{\circ}\text{C}$ , 由图 3(b), 电池表面的热流损失密度变化趋势与图 3(a) 所示的温变趋势一致; 主要原因为, 当电池与周围环境间的换热系数一定时, 根据牛顿冷却定律知热流密度与温差成正比, 故而温差越大, 其值越大。

对图 3(a) 中电池的温升数据进行多项式回归分析, 并对拟合方程求一阶导数, 得电池温升率  $dT_b/dt$ , 再结合依据图 2 中数据求取的  $h$  值, 即可根据热补偿法的式(4) 算取不同放电倍率高温升工况下的电池生热率  $q_{\text{HTR}}$ 。再结合图 3(b) 所示的电池表面热流密度损失  $\dot{q}(t)$ , 由式(6) 可求出基于热流计法测得的电池高温升工况下的生热率  $q'_{\text{HTR}}$ 。图 4 展示了电池生热率与放电深度 DOD 间的曲线关系。电池的 DOD 被 10 等分, 自放电伊始至结束, 依次记为 0、0.1、0.2、...、1.0。

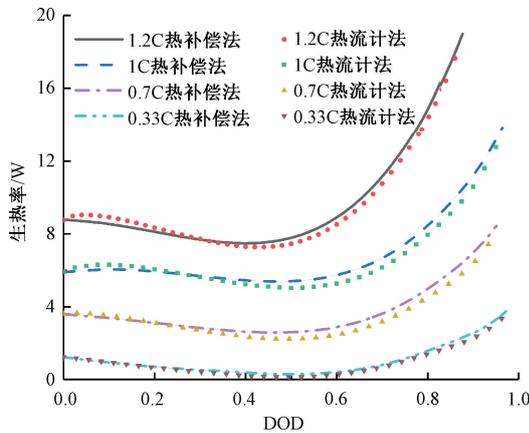


图 4 高温升工况下生热率与 DOD 的曲线关系

Fig. 4 Curve relationship between heat generation rate and DOD under high temperature rise condition

由图 4 所示, 电池的生热率随 DOD 的增大呈现出先降低后升高的变化趋势, 其曲线形式类似“U”型曲线, 这主要归因于电池放电过程中内阻的变化。锂离子电池的内阻分为欧姆内阻和极化内阻。当 DOD 在 0~0.5 区间内时, 电池欧姆内阻随温度的升高而降低, 且温度越高欧姆内阻增大的幅度越小, 受 DOD 的影响较小, 因此电池的生热率表现逐渐下降的趋势; 在 0.5~1.0 区间内, 极化内阻明显增大, 且在总内阻中所占比例较大。在放电过程中锂离子  $\text{Li}^+$  从电池负极石墨碳层中脱嵌迁移到正极, 在放电后期正极的锂离子浓度较高, 变为富锂态, 离子间排斥力较大, 锂离子迁移至正极的阻力增大, 宏观反映为放电后期极化内阻随 DOD 的增大而迅速增大。因此, 放电末期生热率快速上升, 出现明显的“上翘”现象。文献[19-20]得到了类似趋势。

根据图 4 所示数据, 对电池生热率与 DOD 间的曲线

关系进行回归分析, 进而求取电池的平均生热率:

$$\bar{q}_b = \frac{1}{D_{1.0} - D_{0.0}} \int_{D_{0.0}}^{D_{1.0}} q_b(D) dD \quad (7)$$

式中:  $q_b$  为电池的平均生热率,  $D$  代表 DOD,  $D_{1.0}$  和  $D_{0.0}$  分别表示 DOD 值为 1.0 和 0。

图 5 展示了分别基于热补偿法和热流计测得的电池平均生热率。

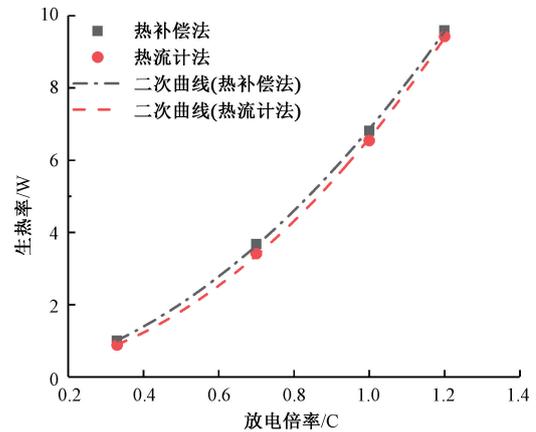


图 5 高温升工况下电池平均生热率与放电倍率间的曲线关系

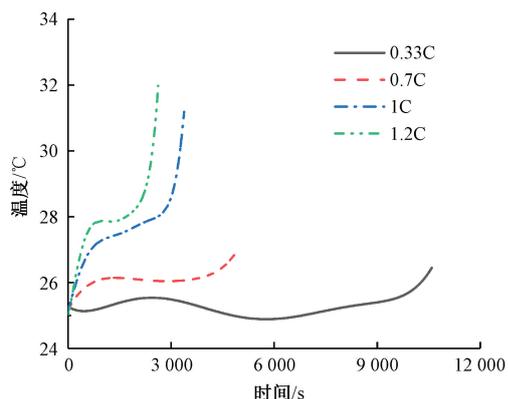
Fig. 5 Curve relationship between battery average heat generation rate and discharge rate under high temperature rise condition

由图 5 可知, 电池的平均生热率随放电倍率的增大而增大, 二者近似呈二次曲线关系 ( $R^2 = 0.999$ ), 主要原因为电池工作过程中的生热率与电流的平方接近成正比。此外, 基于热补偿法与基于常规热流计法的测算结果相符, 经计算的生热率平均偏差不高于 5.6%, 表明本文提出的热补偿法具有较高的有效性。相比而言, 热补偿法通过简便的实验即可确定电池的生热率, 不依赖专用仪器, 成本低、测试灵活, 具备较高的普适性。

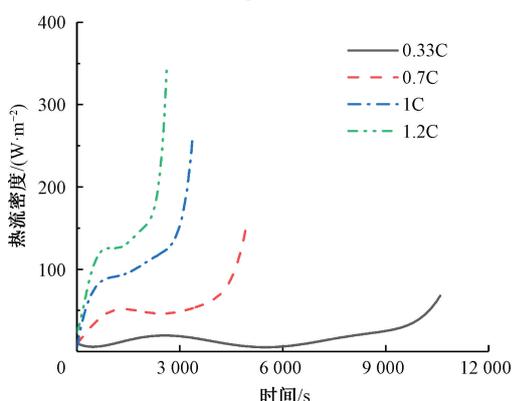
### 3.2 低温升工况下的电池生热率

测试电池在 LTR 下的生热率时, 采用电动风机冷却电池, 并确保电池初始温度与环境温度一致。此外, 测试电池在 LTR 下的生热率时, 根据电池的温变状况实时对电动风机的风量做出调整, 以确保电池的最大温升不高出  $7^{\circ}\text{C}$ 。图 6 所示为电池在该工况下的温变及表面热流密度。

由图 6 可知, 低温升工况下的电池最大温升仅为  $6.9^{\circ}\text{C}$ , 电池表面的热流损失密度变化趋势与温变趋势一致。低温升工况下的热流损失密度明显高于高温升工况下的热流损失密度, 电池产生的热量大部分通过对流换热流散到周围环境中, 仅有小部分热量用于电池自身加热。



(a) 低温升工况下电池的温变曲线  
(a) Curves of temperature change of the battery under low temperature rise condition



(b) 低温升工况下电池表面的热流密度曲线  
(b) Curves of heat flow density on the battery surface under low temperature rise condition

图6 低温升工况下电池的温变和热流密度的曲线

Fig. 6 Curves of temperature change and heat flow density of the battery under low temperature rise condition

利用热流计法计算电池在LTR下的生热率 $q_{LTR}$ ,如图7所示。

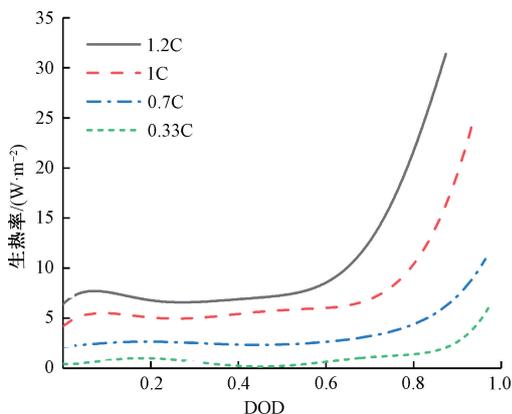


图7 低温升工况下的电池生热率与DOD间的曲线关系  
Fig. 7 Curve relationship between battery heat generation rate and DOD under low temperature rise condition

图7显示,电池生热率在DOD区间0~0.5内的变化较为平缓,其趋势与图4所示高温升工况下的生热率趋势差异较大,主要因为,电池在低温升工况下其工作前半期自身温度变化较小,进而使其内阻变化不大;而在放电后半期,电池的生热率上升较快,与图4所示电池的生热率呈现出相同的趋势,这主要是由电池的极化内阻引起。但由于放电末期温度对电池的影响,造成电池在低温升工况下的内阻和生热率比高温升工况下的高,其中最大生热率平均高约62%。

### 3.3 高、低温升工况下的电池生热率对比分析

此外,测得电池在高、低温升工况下分别以0.33C、0.7C、1C、1.2C倍率放电时的最大温升如图8所示。

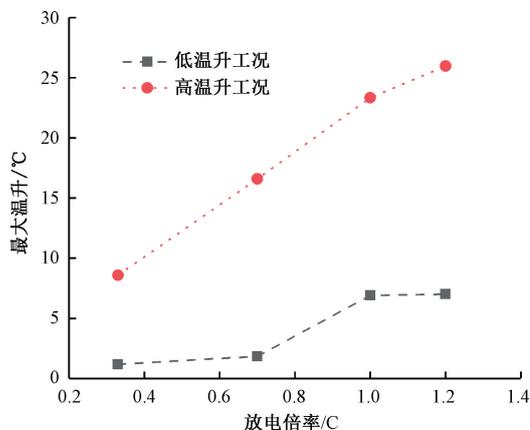


图8 高低温升工况下电池工作时的最大温升

Fig. 8 The maximum temperature rise when the battery is working under high and low temperature rise conditions

由图8可知,低温升工况下电池的最大温升均被控制在7°C以内;高温升工况下电池的最大温升随放电倍率的最大而增大,在1.2C放电时达到了26°C。由Bernardi电池生热模型<sup>[4]</sup>可知电池的生热率与工作电流的平方近似成正比,而电池又在近似绝热环境下工作,产生的热量不易疏散,致使其自身温度上升较高。而在低温升工况下,电动风机开启,使空气与电池之间形成强迫对流,可及时疏散电池产生的热量,使其自身温度上升较低。

根据3.1节中第2)小节中式(7)求取低温升工况下的电池平均生热率,并将其与图4中所示高温升工况下基于热流计法的测算结果进行对比,结果如图9所示,图中展示了低温升工况下电池平均生热率 $q_{LTR}$ 相对于高温升工况下生热率 $q_{HTR}$ 的增大比例 $[(q_{LTR}-q_{HTR})/q_{HTR}]$ 。

如图9所示,低温升工况下的电池平均生热率高于高温升工况下的电池生热率,平均高约13.7%。主要因为,在电池放电过程中,低温升工况下的电池内阻变化较小,而高温升工况下电池的内阻因电池温变较大而降低,使电池生热较少。此外,锂离子电池的电解质在有

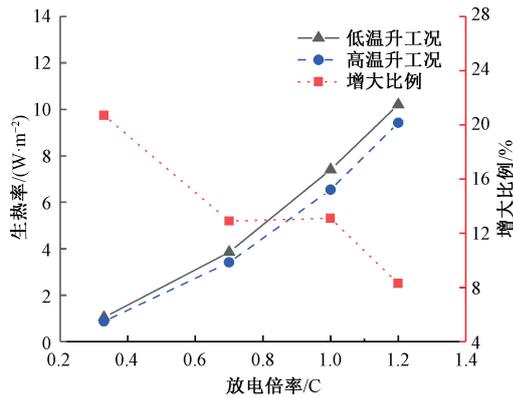


图9 高、低温升工况下的电池平均生热率

Fig. 9 The average heat generation rate of the battery under high and low temperature rise conditions

机溶剂中的溶解度随温度的升高而降低,这促使电解液的电导率降低,并且电池有机溶剂的粘稠度随温度的降低而增大,粘度的增大会增大离子的扩散阻力,同样会降低电导率,使电池内阻值增大。上述原因综合使电池在低温升工况下的生热率较高温升工况下的高。

## 4 结 论

本文基于提出的热补偿法和常规热流计法对大尺寸软包锂离子电池在高低温升工况下的生热特性开展了实验研究,得出主要结论:

1) 本文提出的锂离子电池产热测试热补偿法与基于常规热流计法精度相近,平均偏差不超过 5.6%,但热补偿法不依赖专用设备,具备成本低、测试简便等优势;

2) 工作电流和放电深度对锂离子电池的生热率影响显著。电池的工作电流和放电深度越大,其自身温升越高,生热率越大。电池在高温升工况下的生热率随 DOD 的升高呈现先降低后升高的变化趋势,形似“U”型曲线,尤其在放电末期,由于电池内阻的增大,使电池生热率上升较快;低温升工况下,电池在放电前半期生热率变化较为平缓,放电末期受电池温度的影响,最大生热率比高温升工况下的最大生热率高约 62%;

3) 由于电池内阻受温度影响较大,使低温升工况下的电池平均生热率比高温升工况下的平均生热率高约 13.7%,且放电倍率越大,两者相差越大;此外,电池的平均生热率与工作电流呈二次曲线关系。

本文开发的热补偿法可良好应用于大尺寸软包电池产热测试,成本低且普适性强,同时该方法已为业内动力电池企业提供了良好的技术支持,具备积极的市场应用价值。

## 参考文献

- [1] GOMEZ J, NELSON R, KALU E, et al. Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(10): 4826-4831.
- [2] BARONTI F, FANTECHI G, LEONARDI E, et al. Effective modeling of temperature effects on lithium polymer cells [C]. *IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, IEEE, 2010: 990-993.
- [3] 程夕明,唐宇,王寿群. 锂离子电池热物性参数测量方法综述[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(14): 140-150.
- [4] CHENG X M, TANG Y, WANG SH Q. Overview of measurement methods for thermal properties of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(14): 140-150.
- [5] BERNARDI D, POWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [6] KIM U S, SHIN C B, KIM C S. Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 180: 909-916.
- [7] 许建青. 锂离子动力电池热状态研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [8] XU J Q. Research on the thermal state of lithium-ion power batteries [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [9] DRAKE S J, MARTIN M D A, WETZ D A, et al. Heat generation rate measurement in a Li-ion cell at large C-rates through temperature and heat flux measurements[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 285: 266-273.
- [10] SHENG L, SU L, ZHANG H, et al. An improved calorimetric method for characterizations of the specific heat and the heat generation rate in a prismatic lithium ion battery cell[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 724-732.
- [11] ZHANG J N, YANG X G, SUN F C, et al. An online heat generation estimation method for lithium-ion batteries using dual-temperature measurements [J]. *Applied Energy*, 2020, 272: 1-12.
- [12] WANG B, JI C W, WANG S F, et al. Study of non-uniform temperature and discharging distribution for lithium-ion battery modules in series and parallel connection [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 168: 235-250.

- [11] 宋文吉, 陈明彪, 白帆飞, 等. 基于电-热耦合模型的锂离子电池热特性与优化. [J] 电池, 2018, 48(5): 309-312.  
SONG W J, CHEN M B, BAI F F, et al. Thermal performance and optimization of lithium-ion battery based on electric-thermal coupling model [J]. Battery, 2018, 48(5): 309-312.
- [12] CUI X F, ZENG J, ZHANG H L, et al. Optimization of the lumped parameter thermal model for hard-cased li-ion batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 446-459.
- [13] LIN C J, XU S C, LIU J L. Measurement of heat generation in a 40Ah LiFePO<sub>4</sub> prismatic battery using accelerating rate calorimetry[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(17): 8375-8384.
- [14] KOBAYASHI Y, MIYASHIRO H, KUMAI K, et al. Precise electrochemical calorimetry of LiCoO<sub>2</sub>/Graphite lithium [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2002, 149(8): 978-982.
- [15] ZHANG J B, HUANG J, LI Z, et al. Comparison and validation of methods for estimating heat generation rate of large-format lithium-ion batteries[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2014, 117(1): 447-461.
- [16] 王莉, 冯旭宁, 薛钢, 等. 锂离子电池安全性评估的 ARC 测试方法和数据分析[J]. 储能科学与术, 2018, 7(6): 1261-1270.  
WANG L, FENG X N, XUE G, et al. ARC test method and data analysis for safety assessment of lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(6): 1261-1270.
- [17] 盛雷, 徐海峰, 苏林, 等. 车用磷酸亚铁锂电池的热特性与热物性研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(10): 1152-1157+1171.  
SHENG L, XU H F, SU L, et al. Research on the thermal and thermophysical properties of lithium iron phosphate batteries for vehicles [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(10): 1152-1157+1171.
- [18] 盛雷. 车用锂离子电池的热物性、热行为与液冷式热管理研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2020.  
SHENG L. Investigations of lithium ion batteries on thermophysical properties, thermal behaviors and liquid

cooling thermal management for electric vehicles [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2020.

- [19] 吴青余, 张恒运, 李俊伟. 校准量热法测量锂电池比热容和生热率[J]. 汽车工程, 2020, 42(1): 59-65.  
WU Q Y, ZHANG H Y, LI J W. Calibration calorimetry to measure the specific heat capacity and heat generation rate of lithium batteries [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 59-65.
- [20] 叶飞, 方奕栋, 苏林, 等. 车载动力电池内阻特性实验研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(9): 50-56.  
YE F, FANG Y D, SU L, et al. Experimental study on the internal resistance characteristics of vehicle power batteries [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2019, 57(9): 50-56.

### 作者简介



王帅林, 2019年于安徽建筑大学获得学士学位, 现为上海理工大学在读硕士, 主要研究方向为电动汽车电池热管理及电池热物性测试。

E-mail: mo12134@163.com

Wang Shuailin received his B. Sc. degree in 2019 from Anhui Jianzhu University, and he is currently studying for a master degree at University of Shanghai for Science and Technology. His main research direction is electric vehicle battery thermal management and battery thermal property testing.



苏林(通信作者), 1981年于南京航空航天大学获得学士学位, 1986年于美国纽约州克拉克森大学获得硕士学位, 1990年于纽约州克拉克森大学获得博士学位, 现为上海理工大学特聘教授, 主要研究方向为汽车热管理。

E-mail: Linsu78@yahoo.com

Su Lin (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1981 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, received his M. Sc. degree in 1986 and Ph. D. degree in 1990 both from Clarkson University, State of New York, USA. Now, he is a professor in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes automotive thermal management.