

加速量热仪在锂离子电池热测试中的应用

刘恒伟¹ 李建军¹ 谢潇怡¹ 方 谋¹ 王 莉^{1,2}

何向明^{1,3} 欧阳明高² 李茂刚⁴

¹(清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

²(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

³(江苏华东锂电技术研究院 张家港 215600)

⁴(瑞典凯戈纳斯有限公司上海代表处 上海 200120)

摘 要 利用绝热加速量热仪提供绝热环境,研究了三元软包锂离子动力电池在不同倍率充放电时的发热行为。锂离子电池内部的总热量由可逆的熵变热和不可逆的焦耳热组成。进一步研究结果表明,电池发热量的大小主要由充放电倍率决定:低倍率充放电时电池发热量较小,0.2 C 倍率时电池温度上升 7.16℃,熵变热有明显的体现;高倍率充放电时焦耳热占主导地位,熵变热几乎可以忽略,1 C 倍率时电池温度上升 25.63℃。同一倍率下放电过程发热量大于充电过程,放电过程中电池荷电状态为 0~10% 时,直流内阻突然增大,此处电池发热功率最大。该研究对锂离子电池热管理的散热设计有一定的参考价值。

关键词 锂离子电池;发热量;熵变热;焦耳热;热管理

中图分类号 TM 911 **文献标志码** A

Application of Accelerating Rate Calorimeter in the Lithium-ion Battery Thermal Test

LIU Hengwei¹ LI Jianjun¹ XIE Xiaoyi¹ FANG Mou¹ WANG Li^{1,2}

HE Xiangming^{1,3} OUYANG Minggao² LI Maogang⁴

¹(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

³(Huadong Institute of Lithium Ion Battery, Zhangjiagang 215600, China)

⁴(K-analys AB Shanghai Office, Shanghai 200120, China)

Abstract In this work the thermal behavior of the $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathode material for soft packed lithium-ion power batteries during charging and discharging at different C-rate were conducted using the ARC (accelerating rate calorimeter) to provide an adiabatic environment. The overall heat generated by the lithium-ion battery during use, is partly reversible and partly irreversible, due to entropy change and joule heating, respectively. It indicates that the heating

收稿日期: 2014-09-20 修回日期: 2014-09-21

基金项目: 国家 973 计划(2011CB935902, 2013CB934000); 国家 863 计划(2013AA050903, 2011AA11A257); 科技部国际合作(2010DFA72760); 清华大学自主科研计划(2010THZ08116, 2011THZ08139, 2011THZ01004, 2012THZ08129); 汽车安全与节能国家重点实验室基金(ZZ2012-011); 清华大学苏州汽车研究院(吴江)基金(2012WJ-A-01)

作者简介: 刘恒伟, 硕士, 测试工程师, 研究方向为锂离子蓄电池; 李建军, 博士, 高级工程师, 研究方向为锂离子蓄电池; 谢潇怡, 博士, 助理研究员, 研究方向为锂离子蓄电池; 方谋, 博士, 助理研究员, 研究方向为动力电池热; 王莉, 博士, 副教授, 研究方向为锂离子蓄电池; 李茂刚, 硕士, 研究方向为锂离子蓄电池; 欧阳明高, 博士, 教授, 研究方向为节能与新能源汽车动力系统; 何向明(通讯作者), 博士, 副教授, 研究方向为锂离子蓄电池, E-mail: hexm@tsinghua.edu.cn.

generation of lithium-ion cell is decided by the C -rate of charge and discharge. The heat is smaller at low C -rate of charge and discharge. For example, the heating generation of battery increases 7.16°C at $0.2C$ -rate and the entropy change heat is clearly embodied. The joule heating is more remarkable than the entropy change during charging and discharging at high C -rate. For instance, the heating generation of cell increased 25.63°C at $1C$ -rate. The heat generation of charge is less than discharge at the same C -rate. The DC inter insistence of cell at the SOC (State of Charge) of 0 to 10% increases suddenly, so the heating generation power will reach its maximum in this period during discharge. It is valuable for the design of heat dissipation in lithium-ion battery thermal management.

Keywords lithium-ion battery; heating generation; entropy change heat; joule heat; thermal management

1 引 言

自 1991 年锂离子电池商业化以来, 锂离子电池已被广泛用作各种电子器件的电源。随着环境污染问题的加剧, 人们对新能源汽车的需求更为迫切。锂离子电池具有高能量密度、高电压、低自放电率、环境友好等优点, 成为了电动汽车的首选动力来源。锂离子电池主要由金属氧化物材料、电解液、隔膜、石墨等材料组成, 在误操作或滥用条件下容易发生着火、爆炸等现象, 负面影响极大。人们对电动汽车的接受程度与锂离子电池的安全性密切相关^[1]。近年来对锂离子电池在热和电等滥用条件下的安全性问题已经有了比较深入的研究^[2-4]。

对于电动汽车或储能系统而言, 其动力系统是由大量的锂离子电池串并联组合而成。如果不能对其进行有效的热管理, 将会造成电池组中局部区域过热, 使得电池容量、内阻的一致性变差。这样一来, 电池不但不能在最佳状态下工作, 而且会极大地缩短电池的使用寿命。另一方面, 电池或模块的一致性变差会导致部分电池过充或过放, 极端情况下会引发热失控等安全问题。因此, 对电池正常充放电条件下的热特性研究尤为重要^[5,6]。

绝热加速量热仪 ARC (Accelerating Rate Calorimeter) 是目前全球使用最广泛的绝热安全量热技术^[2,3,7]。在绝热条件下, 电池的产热速率是电池内部产热以及电池各组份的比热容的

函数。本文主要利用 EV ARC (Extended Volume Accelerating Rate Calorimeter) 提供绝热环境, 研究了锂离子电池在不同倍率充放电条件下的发热行为, 可以为锂离子电池热管理的散热设计提供一定的参考。

2 材料与方 法

实验中使用的电池为 16 Ah 三元软包锂离子动力电池, 采用 CT2001B 5V 20A 8 点蓝电电池测试系统为电池充放电, 实验绝热环境则采用英国 HTT 公司生产的绝热加速量热仪 EV ARC 来提供。电池在不同温度下存储使用上海博迅实业有限公司医疗设备厂的数显鼓风干燥箱; 电池熵变系数电压采集使用中国台湾 Agilent Technologies 34450A 高精度数字多用表; 电池直流内阻测试采用深圳新威 BTS 20V 100A 电池检测设备。在测试方法上, 采用绝热量热法测试锂离子电池在充放电过程的发热量; 采用 peak power 法测试电池的直流内阻; 采用开路电压变化法测试电池的熵变系数。

3 实 验

3.1 电池发热量测试

测试前先将电池悬挂在绝热加速量热仪 EV ARC 量热腔中, 然后将 ARC 热电偶贴在电池表面中心处, 最后将电池正负极分别与 CT2001B 5V 20A 8 点蓝电电池测试系统通道连接线的正负

极鳄鱼夹相连, 盖好量热腔顶盖。启动 ARC 控制程序, 等到 ARC 量热腔 Zone 温度和 Bomb 温度达到热平衡之后, 在 Exotherm 模式下对电池进行充放电测试。不同倍率充放电测试制度如表 1 所示。

表 1 不同倍率充放电测试程序

Table 1 The process of charge and discharge at different C-rate

工步	0.2 C	1 C
1	搁置 10 min	搁置 10 min
2	0.2 C 恒流充电至 4.2 V	1 C 恒流充电至 4.2 V
3	4.2 V 恒压充电至 0.03 C	4.2 V 恒压充电至 0.03 C
4	搁置 10 min	搁置 10 min
5	0.2 C 恒流放电至 3 V	1 C 恒流放电至 3 V
6	停止	停止

3.2 电池熵变系数测试

将电池荷电状态 (State of Charge, SOC) 调整到 100%, 然后将电池放入 25°C 烘箱中搁置 4 h, 待其达到稳定状态时测试开路电压 OCV_1 , 随后将烘箱温度调整到 45°C, 搁置 4 h 后测试电池开路电压 OCV_2 , 由 $\frac{OCV_2 - OCV_1}{\Delta T}$ 计算得到 100% SOC 荷电状态下的熵变系数值。将电池荷电状态依次调整到 90% SOC、80% SOC、70% SOC、60% SOC、50% SOC、40% SOC、30% SOC、20% SOC、10% SOC, 然后重复上面的步骤依次得到 90% SOC、80% SOC、70% SOC、60% SOC、50% SOC、40% SOC、30% SOC、20% SOC、10% SOC 荷电状态下的熵变系数值。

3.3 电池直流内阻测试

(1) 电池以基础电流 $I_{基} = \frac{2}{7}C$ 放电 30 s; (2) 再以高电流 $I_{高} = 2C$ 放电 30 s; (3) 再以基础电流 $I_{基} = \frac{2}{7}C$ 放电 1050 s, SOC 正好下降 10%; (4) 再从 (2) 开始循环测试到 10% SOC; 每下降 10%

SOC 记录一次内阻; 直流内阻可由下式计算得到:

$$R_{总} = \frac{V_1 - V_3}{I_{高} - I_{基}} \quad (1)$$

$$R_{欧姆} = \frac{V_1 - V_2}{I_{高} - I_{基}} \quad (2)$$

$$R_{极化} = \frac{V_2 - V_3}{I_{高} - I_{基}} \quad (3)$$

其中, V_1 为基础电流放电末电压; V_2 为高电流放电初电压; V_3 为高电流放电末电压。

4 结果

图 1 和图 2 分别表示电池在 EV ARC 中以 0.2 C 倍率充放电时温度的变化情况, 充电过程中温度上升了 2.8°C, 放电过程中温度上升了 4.3°C, 整个充放电过程中电池的温度上升了 7.1°C, 但充放电温度曲线有明显差异。充电过程中低 SOC 区温度先有一段下降及相对平稳, 随后快速增长, 之后缓慢增长, 在充电末端再次加快; 放电过程中随着 SOC 的下降, 温度快速增长, 在中间区域有一段下降, 然后再次快速增长, 放电末期温度增长最快。

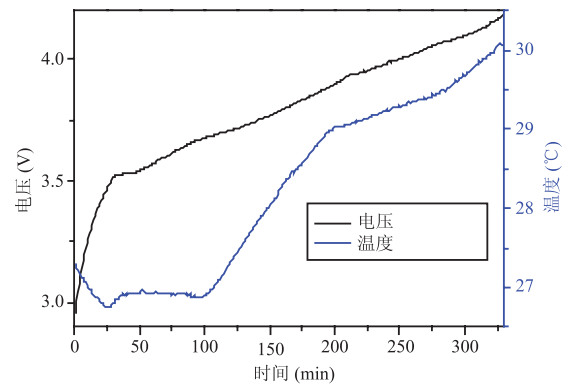


图 1 0.2 C 充电时温度与时间的变化关系
Fig. 1 Temperature as a function of time at 0.2 C charge

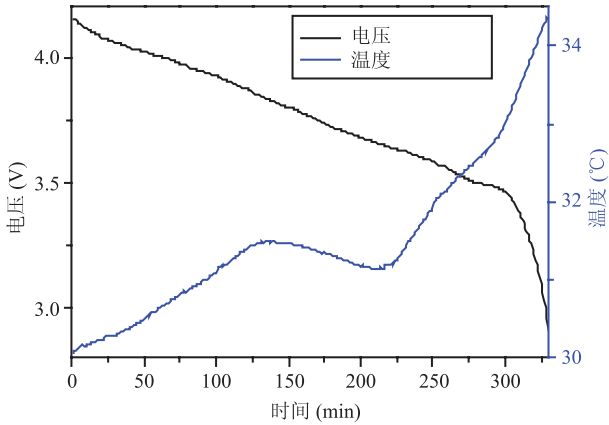


图2 0.2 C 放电时温度与时间的变化关系

Fig. 2 Temperature as a function of time at 0.2 C discharge

图3为16 Ah三元软包电池熵变系数与SOC的测试结果。熵变系数随SOC的变化而变化。其中，熵变系数在中间区域为正值，其他区域为负值。

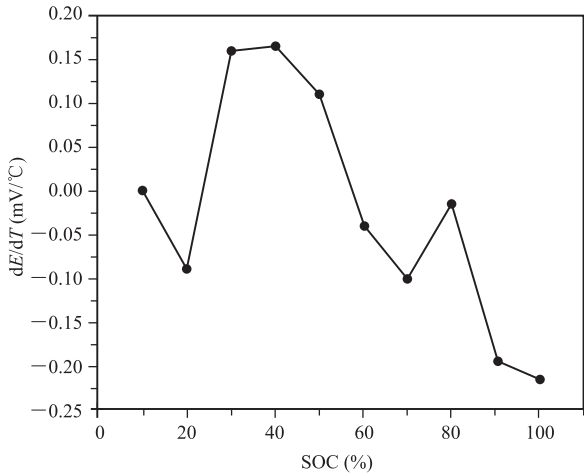


图3 软包16 Ah三元电池熵变系数与SOC的关系

Fig. 3 The entropy coefficient vs SOC for 16 Ah lithium-ion cell

图4是0.2 C倍率充放电时温度速率随温度的变化关系。0.2 C倍率充放电时温度速率均很小，而在充电初段和放电末端温度速率最大。

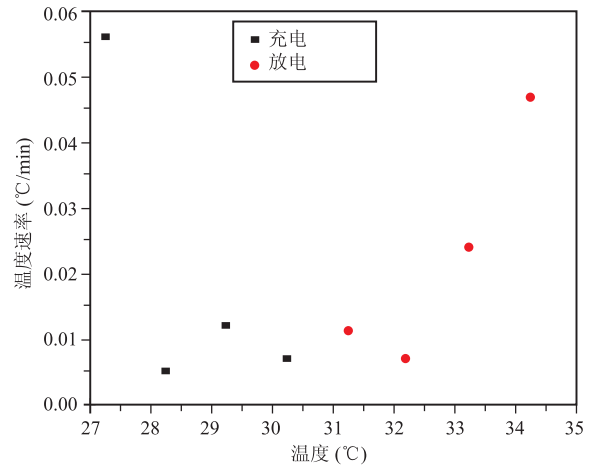


图4 0.2 C 充放电时温度速率与温度的变化关系

Fig. 4 Temperature rate as a function of temperature at 0.2 C charge and discharge

图5为16 Ah软包电池放电直流内阻测试结果。在测试直流内阻的过程中同时得到了欧姆内阻和极化内阻。结果显示，直流内阻随SOC变化而变化，欧姆内阻变化较小，极化内阻在两端变化较大，且直流内阻在10% SOC处突然增大。

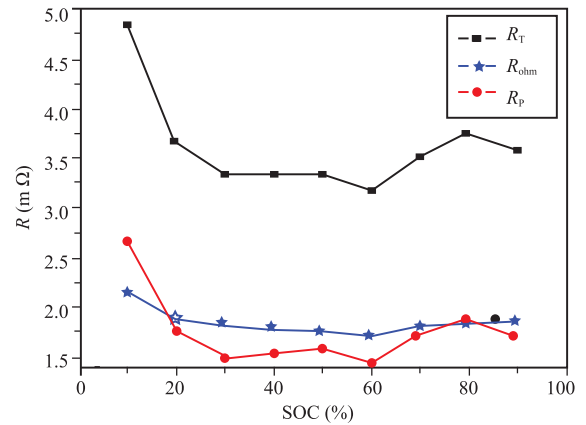


图5 软包16 Ah 电池放电直流内阻测试结果

Fig. 5 The results of DC inter resistance at discharge for 16 Ah lithium-ion cell

图6和图7分别给出了电池在EV ARC中以1 C倍率充放电时温度的变化情况。在整个过程

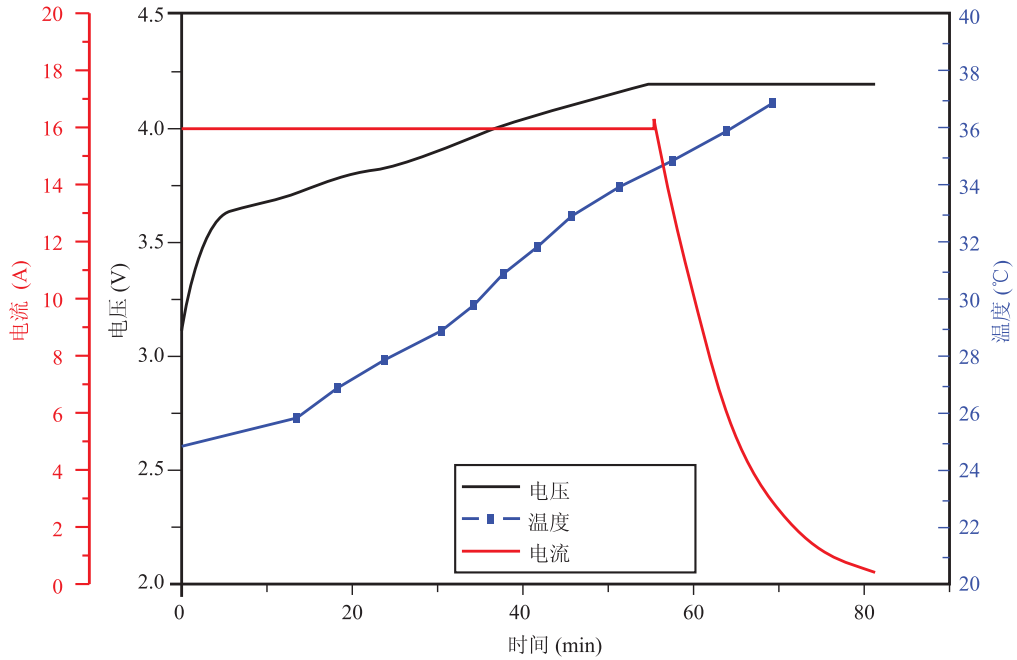


图 6 1 C 充电时温度与时间的变化关系

Fig. 6 Temperature as a function of time at 1 C charge

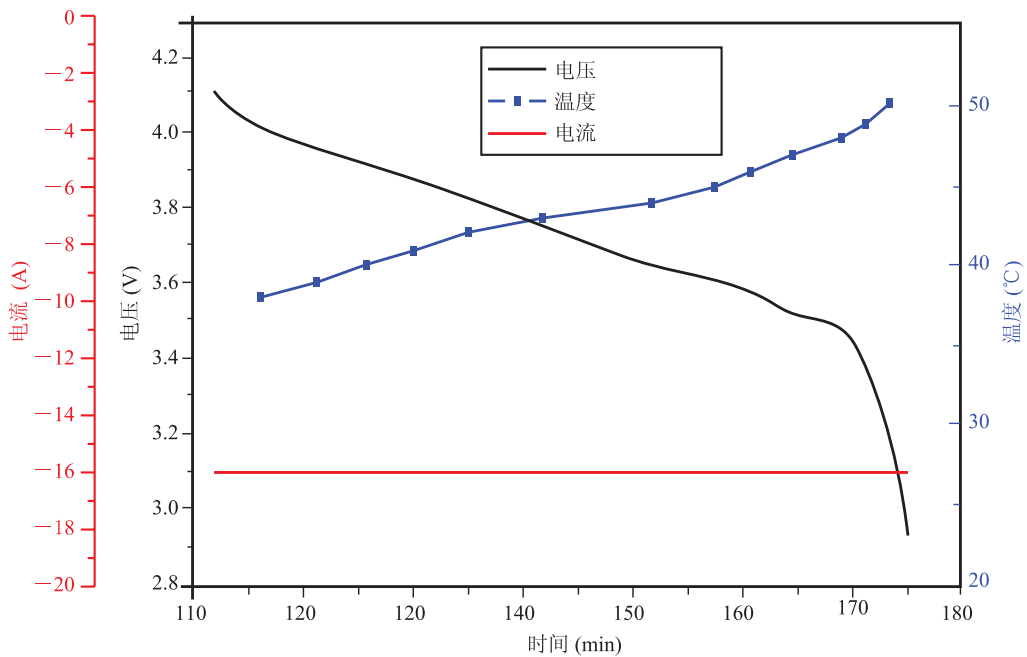


图 7 1 C 放电时温度与时间的变化关系

Fig. 7 Temperature as a function of time at 1 C discharge

中, 电池温度上升了 25°C。其中, 充电过程中温度上升了 12°C, 放电过程中温度上升了 13°C。虽然充放电过程中温度变化曲线不同, 但放电过

程已观察不到温度下降的现象。

图 8 给出了充放电过程中温度速率随 SOC 的变化关系。从图 8 可以看出, 充放电过程中电池的

产热速率与 SOC 有着较为相似的变化趋势,但不完全相等,尤其在低 SOC 段。图 9 表示充放电过程中电池发热量及发热功率随温度的变化情况。结果显示,放电过程的发热量大于充电过程。

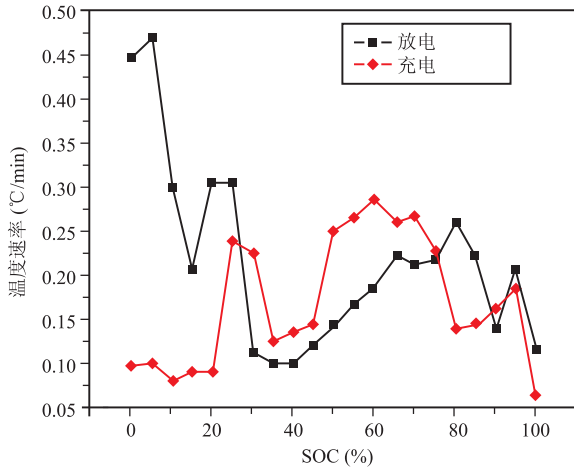


图 8 1 C 充放电时温度速率与 SOC 的变化关系

Fig. 8 Temperature rate as a function of SOC at 1 C charge and discharge

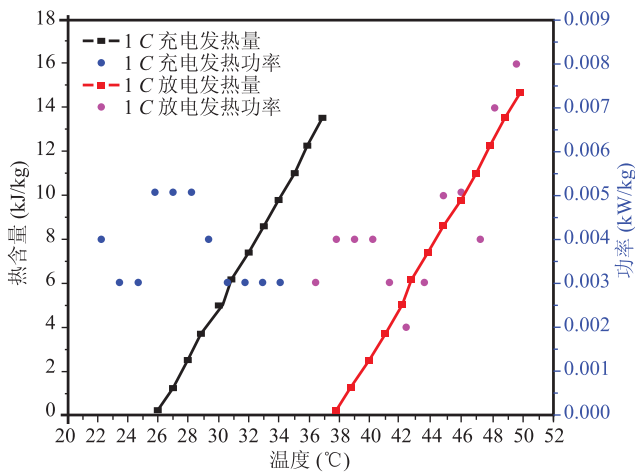


图 9 1 C 充放电时发热量及发热功率与温度的变化关系

Fig. 9 Enthalpy and power as a function of temperature at 1 C charge and discharge

表 2 给出了电池在 0.2 C 和 1 C 充放电过程中的电池性能的对比情况。

表 2 不同倍率下电池性能对比

Table 2 The performance of cell compare at different

参数	C-rate	
	0.2 C	1 C
起始温度(°C)	27.2	24.85
终止温度(°C)	34.36	50.48
温升幅度(°C)	7.16	25.63
最大的升温速率 (°C/min)	0.056	0.432
最大温升速率温 度(°C)	27.25	49.91
最大温升速率 阶段	0 SOC~10% SOC	0 SOC~10% SOC
电池容量(Ah)	16.643	16.962

5 讨论

5.1 热量的产生与消散

一般来说,锂离子电池在充放电过程中产生的总热量由可逆的熵变热和不可逆的焦耳热组成^[8,9]。

从热力学角度分析,电池内部发生电化学反应可以表述为^[8]:

$$\Delta G = -nFE_{OCV} \quad (4)$$

其中, G 为吉布斯自由能; n 为参与反应的电荷数(对于锂离子电池来说 $n=1$); F 为法拉第常数; E_{OCV} 为电池开路电压。

常压状态下吉布斯自由能随温度的变化可以用熵变 ΔS 表述为:

$$\frac{d\Delta G}{dT} = -\Delta S \quad (5)$$

即

$$\Delta S = nF \frac{dE_{OCV}}{dT} \quad (6)$$

由熵变 ΔS 引起的可逆的电化学反应热 Q_r 由下式表示

$$Q_r = T\Delta S \frac{I}{nF} = IT \frac{dE_{OCV}}{dT} \quad (7)$$

其中, T 为电池温度; I 为充放电电流(规定充电时为正)。由于充放电过程中电化学反应的方向是相反的, 因此在充放电过程中吸热反应与放热反应也发生了转换。

另一方面, 当有电流 I 通过电池时, 由于电化学极化会导致电池电压 V 偏离其开路电压 V_0 , 而这种电压变化可以用电流 I 及与电池的荷电状态 SOC 及温度 T 相关的内阻 R_{int} 来表示, 这种电化学极化以热量的形式将能量耗散掉, 不可逆反应热 Q_{irr} 可表示为^[9,10]:

$$Q_{irr} = I(V - V_0) = I^2 R_{int} \quad (8)$$

不可逆反应热 Q_{irr} 在充放电过程中均表现为吸热, 大小与通过电池的电流及直流内阻有关。

电池表面和环境之间主要是通过对流和辐射的方式进行热交换。电池表面温度一旦高于环境温度, 就开始以对流的方式开始散热。当电池在低温工作时, 辐射效果可以忽略不计; 但是当电池温度较高时, 辐射将会起到重要的作用^[11,12]。当电池向环境散热时, 对流和辐射可以用下式来描述^[11,13]:

$$Q_{对流} = hA(T_{表面} - T_{环境}) \quad (9)$$

$$Q_{辐射} = \varepsilon\sigma A(T_{表面}^4 - T_{环境}^4) \quad (10)$$

其中, h 为热对流系数; A 为电池表面积; ε 为电池表面的辐射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。公式表示辐射是非线性的, 与温度的 4 次方成比例, 温度越高, 辐射效应越显著。

在低倍率充放电情况下热量消散比产生要快, 因此不存在安全问题。而在高倍率充放电情况下就需要采取有效措施以加快热量的消散, 一旦不能及时地将热量消散掉就有可能导致电池的热失控甚至引发一些灾难性的后果^[14]。因此, 定量的研究电池在充放电过程中的产热行为, 对于合理的设计电池散热具有非常重要的意义。

5.2 电池发热量研究

对于图 1 和图 2 的结果可以用锂离子电池产热理论来解释: 电池的总发热量是由可逆的熵变

热及不可逆的焦耳热共同组成^[8,9]。焦耳热与电流的平方以及电池的直流内阻相关, 在低倍率情况下焦耳热较小, 因此电池的总热量较小, 只上升了 7℃; 充放电过程中电化学反应进行的方向是相反的, 因此在充放电过程中吸热、放热发生了转换, 根据公式(7)以及图 3 可知, 充电时中间区域熵变热为正值, 其余为负值, 而放电时中间段熵变热为负值, 其余为正值, 因此充电时中间段温升较快, 放电时中间段温度有所下降, 充放电过程中温度变化差异明显。在 Eddahech 等^[6]的研究中, 12 Ah 三元软包电池在 0.5 C 充放电过程中电池温度上升了 3.64℃, 充电时温度仅上升了 0.95℃, 放电时温度上升了 2.69℃, 放电过程中同样有一段明显的温度下降区间, 充放电过程中温升差异更为明显, 该电池的熵变系数变化结果与本文图 3 的结果有较大的差异。这一结果表明, 低倍率充放电条件下电池熵变热作用明显。对于图 4 温度速率与温度关系中充电初段及放电末端温度速率最大的现象, 可用图 5 表示的该电池放电过程直流内阻与 SOC 的变化关系来解释。图 5 表明: 放电过程中直流内阻随着 SOC 的变化而变化; 直流内阻在 10% SOC 处突然增大; 极化内阻和欧姆内阻在 10% SOC 处都有突变, 但极化内阻变化更为明显。由于直流内阻的突然增大导致了焦耳热增大, 因此放电末端温度速率最大。与本文不同的是, Eddahech 等^[6]通过测试电池的交流阻抗来解释电池不可逆热。

图 6、图 7 表示的 1 C 倍率充放电过程中电池温度共升高了 25℃, 充电过程中温升为 12℃, 放电过程中温升为 13℃。与 0.2 C 倍率充放电过程相比, 电池温度变化高出了 18℃, 且放电中段已观察不到有温度下降。原因如前所述: 电池的总发热量是由可逆的熵变热及不可逆的焦耳热组成^[8,9], 充放电过程中电化学反应进行的方向是相反的, 因此在充放电过程中吸热、放热发生了转换; 但由于焦耳热与电流的平方成正

比,因此在大倍率充放电情况下,焦耳热占了主导地位,熵变热作用不够明显。Eddahech 等^[6]的研究中,12 Ah 三元软包电池在 1 C 倍率充放电时,电池温度共上升了 7.71℃,充电过程中温度上升了 2.28℃,放电过程中温度上升了 5.43℃,放电过程已没有温度下降的区间,但在该区域温度变化极小。这个温度变化与本文 16 Ah 电池 0.2 C 充放电温度变化相当,但是远小于本文 1 C 倍率的温度变化。这是因为大倍率充放电过程中,电池的发热量主要由不可逆的焦耳热决定,焦耳热与电流的平方成正比,与直流内阻成正比,而电流的大小与电池额定容量相关;不同电池,直流内阻差异较大;再加上 2 只电池熵变系数的不同,造成了温升变化的巨大差异。Eddahech 等^[6]研究中,1.5 C 倍率充放电过程中温度上升了 12.1℃,充电过程中温升为 4.25℃,放电过程中温升为 7.85℃。这个温升变化依然小于本文 1 C 倍率的温升变化,表明该电池具有更好的热安全性。

本文 0.2 C 放电温升与充电温升比为 1.54,1 C 放电温升与充电温升比为 1.08;Eddahech 等^[6]研究显示,0.5 C 放电温升与充电温升比为 2.83,1 C 放电温升与充电温升比为 2.38,1.5 C 放电温升与充电温升比为 1.85。因此,可得出结论:随着充放电倍率的增大,充放电温升差异逐渐减小。

图 8 中充放电过程中温度速率随 SOC 的变化为电池熵变热和焦耳热的耦合结果。充放电曲线上数值差异最为明显的区域出现在 0 SOC~20% SOC 段,虽然充放电过程中熵变热方向相反,但在大倍率充放电情况下焦耳热占主导地位,因此 0 SOC~20% SOC 段温度速率巨大的差异可能是由于充放电过程中电池的直流内阻的差异所致,放电直流内阻在 0 SOC~20% SOC 区域变化更大。

利用图 9 给出的发热功率等热参数就可以对不同的电池组合方式进行仿真模拟,进一步优化

电池系统的散热设计,从而维持电池的最佳使用性能。目前电池热管理系统的散热设计主要有空冷、液冷和相变材料冷却 3 种方式^[15]。日本丰田公司的混合动力电动汽车 Prius 和本田公司的 Insight 都采用了空冷的方式。特斯拉则采用液冷方式,在电池组的热管理系统中使用了一种液体冷却歧管组件^[16],液体冷却歧管组件包括冷却剂运行的管道和冷却剂管道与电池组中电池间的双层热界面。其中,双层热界面的内层是由高可压缩材料组成,外层是由一种非导电性、可形变的、耐撕裂的高介电材料组成,并且具有高拉伸强度和低表面摩擦特性,工作液体由 50% 乙二醇和 50% 水混合而成。

6 结 论

本文利用绝热加速量热仪 EV ARC 提供绝热环境测试了三元软包锂离子电池在不同倍率条件下的产热行为。

(1) 锂离子电池的总热量由可逆的电化学反应热和不可逆的焦耳热组成,因此充电和放电过程温度曲线不同;

(2) 低倍率条件下焦耳热很小,因此可逆的电化学反应热效果明显;

(3) 高倍率条件下不可逆的焦耳热很大,可逆的电化学反应热效果不明显;

(4) 同倍率条件下放电过程电池温升较大;

(5) 电池熵变系数的大小、正负与 SOC 有关,直流内阻大小与 SOC 有关;

(6) 电池发热功率与 SOC 有关,放电末期发热功率最大。

参 考 文 献

- [1] 狩集浩志,林咏. 安全性是车载锂离子电池走向实用的关键因素 [J]. 电子设计应用, 2007, 8: 72-75.

- [2] Jhu CY, Wang YW, Wen CY, et al. Thermal runaway potential of LiCoO_2 and $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ batteries determined with adiabatic calorimetry methodology [J]. *Applied Energy*, 2012, 100: 127-131.
- [3] Feng XN, Fang M, He X, et al. Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 294-301.
- [4] Ishikawa H, Mendoza O, Sone Y, et al. Study of thermal deterioration of lithium-ion secondary cell using an accelerated rate calorimeter (ARC) and AC impedance method [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 198: 236-242.
- [5] Chacko S, Chung YM. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 213: 296-303.
- [6] Eddahech A, Briat O, Vinassa JM. Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery: potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes [J]. *Energy*, 2013, 61: 432-439.
- [7] Jhu CY, Wang YW, Shu CM, et al. Thermal explosion hazards on 18650 lithium ion batteries with a VSP2 adiabatic calorimeter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 99-107.
- [8] Huang Q, Yan MM, Jiang ZY. Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 156(2): 541-546.
- [9] Onda K, Ohshima T, Nakayama M, et al. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(1): 535-542.
- [10] Wang QS, Ping P, Zhao XJ, et al. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 208: 210-224.
- [11] Torabi F, Esfahanian V. Study of thermal-runaway in batteries I. theoretical study and formulation [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(8): A850-A858.
- [12] Hatchard TD, MacNeil DD, Stevens DA, et al. Importance of heat transfer by radiation in Li-ion batteries during thermal abuse [J]. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2000, 3(7): 305-308.
- [13] Kim GH, Pesaran A, Spotnitz R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 170(2): 476-489.
- [14] Shukla AK, Kumar TP. Materials for next-generation lithium batteries [J]. *Current Science*, 2008, 94(3): 314-331.
- [15] 付正阳, 林成涛, 陈全世. 电动汽车电池组热管理系统的关键技术 [J]. *公路交通科技*, 2005, 22(3): 119-123.
- [16] Hermann WA. Liquid cooling manifold with multi-function thermal interface: US, 20100104938 [P]. 2010-04-29.