

电动汽车用锂离子电池热特性试验研究

冯能莲¹, 陈龙科¹, 邹广才²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京汽车集团有限公司, 北京 101300)

摘要: 为研究锂离子电池的热特性, 以 3 200 mA·h, 3. 67 V 圆柱形三元材料锂电池为研究对象, 进行了不同温度、不同充/放电倍率的热特性试验和低温加热试验. 试验结果表明: 随着充/放电电流的增大以及环境温度的降低, 电池温度快速升高, 低温下加热可以提高锂离子电池的充/放电性能.

关键词: 锂离子电池; 电动汽车; 热特性; 热管理系统

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2017)11 - 1737 - 06

doi: 10. 11936/bjtxb2017020006

Experimental Study of Thermal Characteristics of Li-ion Battery in Electric Vehicles

FENG Nenglian¹, CHEN Longke¹, ZOU Guangcai²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Automobile Group Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: In order to study the thermal characteristics of 3 200 mA·h, 3. 67 V cylindrical ternary material lithium battery, the charge/discharge thermal characteristics test at different temperature and charge/discharge rate were carried out. The test results show that the battery temperature rises rapidly with the increase of charge-discharge current and the decrease of the ambient temperature, and heating lithium-ion under low-temperature can improve the charge/discharge performance of lithium-ion batteries.

Key words: lithium-ion battery; electric vehicles; thermal characteristics; thermal management system

锂离子电池以其比功率高、能量密度大、寿命长、自放电率低和贮藏时间长等优势, 已成为电动汽车的主要动力源^[1-2]. 然而, 锂离子电池的性能和循环寿命易受温度的影响, Ramadass 等^[3]对索尼 18650(容量 1. 8 A·h) 锂离子电池的循环性能进行了研究, 电池在 25 °C 和 45 °C 时工作 800 个循环之后, 电池容量分别下降 31% 和 36%; 当工作温度为 55 °C 时, 500 个循环之后, 容量下降 70%. Wu 等^[4]将锂离子电池充满后分别在 25 °C 和 60 °C 环境中放置 60 d 后, 电池容量从 800 mA·h 分别衰减到 790 mA·h 和 680 mA·h. 当容量衰减为 30% 时, 锂离子

电池在 45 °C 时循环寿命为 3 323 次, 而在 60 °C 时仅为 1 037 次^[5]. 锂离子电池在工作中会产生反应热、焦耳热和极化热等大量的热量, 导致电池本体温度升高^[6-7]. 串并联成组是电动汽车锂离子电池的主要使用方式之一, 使用过程中产生的热量易于集聚, 如果不对其进行有效的散热, 其温度将会显著上升, 甚至导致电池组热失控, 影响系统的安全性与可靠性^[8]. 另一方面, 锂离子电池在低温下使用亦存在着诸多问题: 比容量低、衰减严重、循环倍率性能差、析锂现象明显、脱嵌锂不平衡等^[9-13]. 因此, 研究锂离子电池的热特性, 采取有效途径对锂离子电池进

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075010); 北京市教育委员会重点资助项目(KZ200910005007)

作者简介: 冯能莲(1962—), 男, 教授, 主要从事新能源汽车、智能车辆、汽车电子方面的研究, E-mail: fengnl@bjut.edu.cn

行散热或加热,对提高锂离子电池的性能及安全性有重要意义。

本文试验研究了环境温度和充/放电倍率对锂离子电池热特性的影响以及低温下加热对锂离子电池性能的影响,为锂离子电池热分析建模和后续锂离子电池热管理系统的设计提供依据。

1 试验平台及对象

锂离子电池热特性试验平台如图1所示,主要由电池、恒温箱、电池充放电设备和工控机组成。被试电池为LG INR18650 MH1,额定容量为3 200 mA·h,充电方式为恒流-恒压方式,最大充电电流3.2 A。为确保电池充满,参考GB/T 31486—2015^[14]对充电制度做如下规定:先恒流(1.6 A)充电至充电终止电压4.2 V,再以4.2 V恒压充电至充电电流50 mA时充电完成;放电方式为恒流放电,最大放电电流为10 A。恒温箱的作用是提供试验过程中所需要的环境温度,以此来模拟锂离子电池在不同环境温度下的真实状态,恒温箱外形尺寸为540 mm × 540 mm × 1 040 mm,内部工作室尺寸为350 mm × 400 mm × 500 mm。电池充放电设备为深圳新威尔电子有限公司的BTS5V300A-TF电池性能测试仪,电流测量精度为±(0.1%读值+0.1%计数),电压测量精度为±(0.1%读值+0.05%计数),温度测量精度为±0.5℃。试验过程中,锂离子电池置于恒温箱内,在其表面布置温度传感器,采集试验过程中锂离子电池的温度数据。

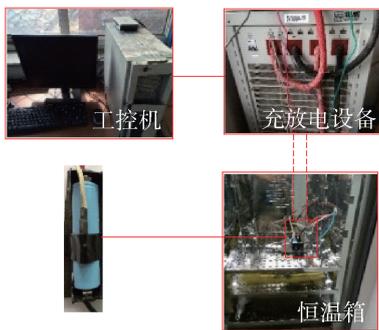


图1 锂离子电池热特性试验平台

Fig. 1 Li-ion battery thermal characteristics experimental platform

2 锂离子电池放电热特性研究

2.1 放电倍率对锂离子电池热特性的影响

为研究不同放电倍率下电池的热特性,分别以0.5、1.0、2.0、3.0放电倍率对锂离子电池进行放

电,具体试验步骤如下:首先,室温下文献[14]将电池充满,搁置1 h;然后以某一倍率进行恒流放电,放电截止电压为2.5 V。记录放电过程中锂离子电池的温度数据,绘制锂离子电池在不同倍率放电过程的温度曲线,如图2所示。由于不同时间段的室温有所差异,为了便于分析和研究,作图时将锂离子电池的起始温度统一设置为25℃。

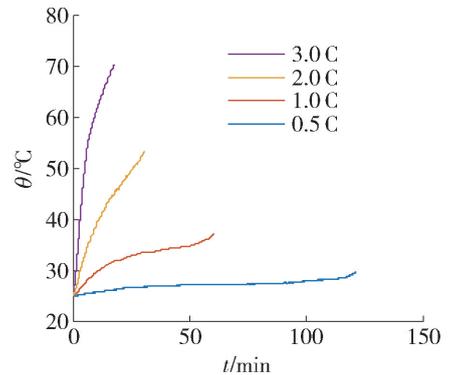


图2 不同放电倍率下电池表面温度变化曲线
Fig. 2 Surface temperature of battery change curve at different discharge rates

从图2的结果可以看出:

1) 随着放电倍率增加,锂离子电池的温度快速上升。0.5 C放电过程的温度从25.0℃上升到29.1℃,上升了16.4%;1.0 C放电过程的温度从25.0℃上升到36.2℃,上升了44.8%;2.0 C放电过程的温度从25.0℃上升到53.2℃,上升了112.8%;3.0 C放电过程的温度从25.0℃上升到70.2℃,上升了180.8%。主要原因是放电电流增大导致电池的发热功率增大,因而电池的温升增大。

2) 低倍率(≤ 1.0 C)放电时,锂离子电池的温升速率呈现先减小后增大趋势,即放电初期(电池荷电状态(SOC) $\geq 90\%$)温度升高较快,这是由于放电初期导致内阻较大,温升速率较大;放电中期($10\% < \text{SOC} < 90\%$)温升缓慢;放电末期(SOC $\leq 10\%$),锂离子电池的极化现象较为严重,内阻增大导致温升速率再次增大。以1.0 C倍率放电为例,放电初期温升速率为0.400℃/min,放电中期为0.195℃/min,放电末期为0.240℃/min。

3) 高倍率(≥ 2.0 C)放电时,锂离子电池的温度几乎成线性关系上升,3.0 C倍率放电时,电池的温度上升到70.2℃,已经超出了电池正常工作温度范围-20℃~60℃。因此,电池进行大倍率放电时,必须采取相应的冷却措施。

2.2 环境温度对锂离子电池放电过程热特性的影响

为研究环境温度对放电过程锂离子电池热特性的影响,将电池放置在不同的环境温度下,以不同的倍率进行恒流放电,具体的试验步骤如下:室温下,按文献[14]将锂离子电池充满,并在某一温度下的恒温箱内搁置 5 h;以某一倍率进行恒流放电,放电截止电压为 2.5 V. 不同温度下、不同放电倍率过程中电池的温度变化曲线如图 3~6 所示.

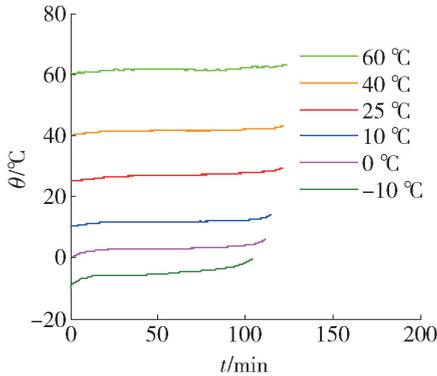


图 3 不同环境温度下 0.5 C 放电过程电池表面温度变化曲线

Fig. 3 Surface temperature of battery change curve under 0.5 C discharge rate at different ambient temperature

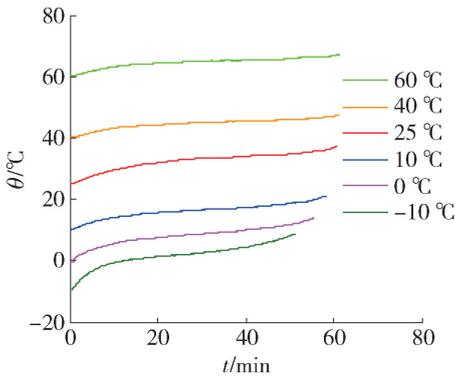


图 4 不同环境温度下 1.0 C 放电过程电池表面温度变化曲线

Fig. 4 Surface temperature of battery change curve under 1.0 C discharge rate at different ambient temperature

由图 3~6 的结果可得锂离子电池在不同温度、不同放电倍率下温升大小,具体数值如表 1 所示.

从图 3~6 和表 1 的结果可以看出:

1) 同一放电倍率下,环境温度越低,放电完成后锂离子电池的温升越大. 这是由于环境温度越低,电解液的导电性能越差,锂离子电池的内阻越大,发热功率越大,锂离子电池的温升随之越大.

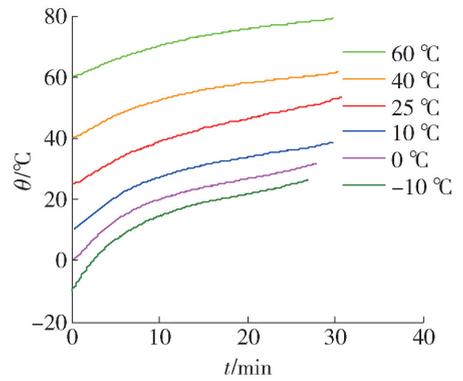


图 5 不同环境温度下 2.0 C 放电过程电池表面温度变化曲线

Fig. 5 Surface temperature of battery change curve under 2.0 C discharge rate at different ambient temperature

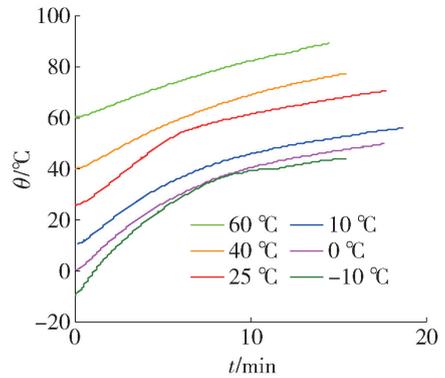


图 6 不同环境温度下 3.0 C 放电过程电池表面温度变化曲线

Fig. 6 Surface temperature of battery change curve under 3.0 C discharge rate at different ambient temperature

表 1 不同环境温度和不同放电倍率下的锂离子电池温升
Table 1 Temperature rise of Li-ion at different ambient temperature and different discharge rates

环境温度/°C	°C			
	0.5 C	1.0 C	2.0 C	3.0 C
60	3.1	7.3	18.2	28.7
40	3.2	7.4	21.6	37.2
25	4.1	11.2	28.2	45.2
10	4.5	12.5	29.5	46.9
0	6.0	14.0	31.8	49.5
-10	9.6	18.7	36.3	53.8

2) 环境温度越低,锂离子电池放电初期的温升速率越大. 为研究放电初期锂离子电池的温升速率情况,取放电过程的前 10 min 锂离子电池温度变化情况作为参考,以 2.0 C 倍率放电为例,锂离子电池

的温升与环境温度的关系如表 2 所示.

3) 相同倍率下,环境温度越低,放电过程的时间越短,相应的放电容量越少,即环境温度越低,锂离子电池的放电性能越差.

表 2 2.0 C 放电过程的前 10 min 电池温升

Table 2 Battery temperature rise in the first 10 minutes during 2.0 C discharge rate

环境温度/ ℃	放电时间/ min	温升/ ℃	温升速率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)
60	10	10.1	1.01
40	10	12.3	1.23
25	10	13.9	1.39
10	10	17.2	1.72
0	10	19.3	1.93
-10	10	24.5	2.45

3 锂离子电池充电热特性研究

3.1 充电倍率对锂离子电池热特性的影响

为研究充电倍率对锂离子电池热特性的影响,室温下对电池进行充电试验,试验步骤与放电试验相似,首先,室温下以 1.0 C 倍率将锂离子电池放空,搁置 1 h;以某一倍率进行恒流-恒压充电.不同倍率充电过程的温度曲线如图 7 所示.

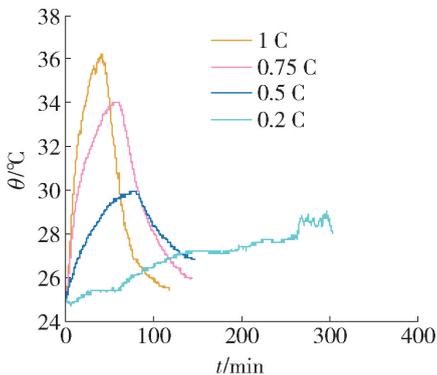


图 7 不同充电倍率下电池表面温度变化曲线

Fig. 7 Surface temperature of battery change curve at different charge rates

从图 7 的结果可以看出:

1) 恒流充电阶段温度升高,恒压阶段温度降低.这是由于电池的产热主要有焦耳热和极化反应热(充电表现为吸热),当充电电流较小时,极化反应热所占比例较大,恒流阶段的电流较恒压阶段大且维持恒定,因此,电池的发热量大,温度持续上升;

恒压阶段电流不断减小且由于极化反应热的作用,导致电池发热量逐渐减小,温度逐渐降低.由于 0.2 C 倍率充电时锂离子电池发热量较小且恒压阶段时间较短,故恒压阶段电池的温度变化不太明显.

2) 恒流充电阶段,随着充电倍率的增大,锂离子电池的发热功率增大,温升增大.0.2 C 充电时最高温度为 28.7 $^{\circ}\text{C}$,0.5 C 充电时最高温度为 29.9 $^{\circ}\text{C}$,0.75 C 充电时最高温度为 34 $^{\circ}\text{C}$,1.0 C 充电时最高温度为 36.1 $^{\circ}\text{C}$.相同倍率下,充电过程中锂离子电池的温升比放电过程小.

3) 恒流-恒压充电过程中,恒流充电过程是锂离子电池内部热量积聚的重要阶段.

3.2 环境温度对锂离子电池充电过程热特性的影响

为研究环境温度对充电过程电池生热特性的影响,对电池进行不同环境温度和不同充电倍率的充电试验,记录试验过程中电池的温度数据,绘制不同温度下、不同倍率充电过程锂离子电池的温度曲线,由于充电过程中锂离子电池的整体温升较小,以 1.0 C 倍率恒流-恒压充电为例进行研究和分析,如图 8 所示.

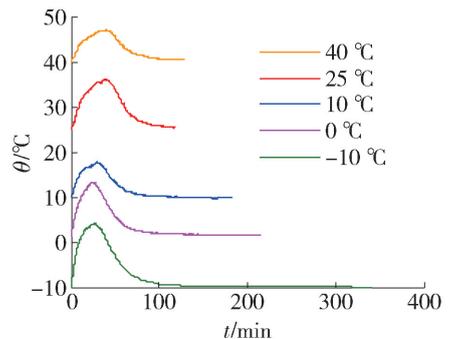


图 8 不同环境温度下 1.0 C 充电过程电池表面温度变化曲线

Fig. 8 Surface temperature of battery change curve under 1.0 C charge rate at different ambient temperature

从图 8 的结果可以看出:

1) 相同充电倍率下,环境温度越低,恒流充电阶段锂离子电池温升越大.-10 $^{\circ}\text{C}$ 时的最大温升为 13.4 $^{\circ}\text{C}$,25 $^{\circ}\text{C}$ 时的最大温升为 11.1 $^{\circ}\text{C}$,而 40 $^{\circ}\text{C}$ 充电时的最大温升为 7.0 $^{\circ}\text{C}$.

2) 环境温度越高,恒流充电阶段锂离子电池的温升速率越小.由于低温充电时恒流阶段时间较短,为说明此现象,故取前 10 min 作为参考,得到恒流充电初期锂离子电池的温升速率情况如表 3 所示.

3) 环境温度越低,充电过程的时间越长,-10

℃与 25 ℃相比, 充电时间由 111.6 min 增加到 340.5 min, 增加了 205.1%, 严重影响了锂离子电池的充电性能。

表 3 1.0 C 充电过程的前 10 min 电池温升

Table 3 Battery temperature rise in the first 10 minutes during 1.0 C charge ratio

环境温度/ ℃	充电时间/ min	温升/ ℃	温升速率/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)
40	10	3.7	10.00
20	10	5.6	0.56
10	10	6.7	0.67
0	10	7.9	0.79
-10	10	9.9	0.99

4 低温加热对锂离子电池性能的影响

由锂离子电池充放电过程的热特性试验可知, 低温环境下, 锂离子电池的充放电性能下降, 为研究低温下加热对电池充放电性能的影响, 采用电加热膜对低温下的锂离子电池加热并进行充放电试验。

电加热膜以金属箔、金属丝为内导电发热体, 经高温高压热合而成, 当有电流通过时, 电发热体会生热, 产生的热量通过电加热膜的另一侧可以均匀地传递给锂离子电池, 实现加热锂离子电池的目的, 加热膜的供电电压为 12 V, 功率为 15 W。加热试验的具体操作为: 将锂离子电池外敷电加热膜, 搁置在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱内 5 h, 电加热膜工作 5 min 后 (锂离子电池的表面温度由 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$) 进行充/放电试验。图 9 和图 10 为充/放电过程中加热前和加热后的容量比较。

从图 9 和图 10 的结果可以看出: 加热后, 充电容量由 $2\ 869.2\ \text{mA}\cdot\text{h}$ 增加到 $2\ 986\ \text{mA}\cdot\text{h}$, 锂离子电池的充电性能得到提高; 放电容量由加热前的 $2\ 445.3\ \text{mA}\cdot\text{h}$ 增加到了 $2\ 540\ \text{mA}\cdot\text{h}$, 放电电压平均提高了 $0.15\ \text{V}$, 增大了锂离子电池的放电功率。因此, 为提高锂离子电池的低温性能, 需要有效的锂离子电池加热方法。

5 结论

1) 同一倍率下, 充电过程中锂离子电池的温升比放电过程小。

2) 环境温度越低, 锂离子电池充/放电过程的

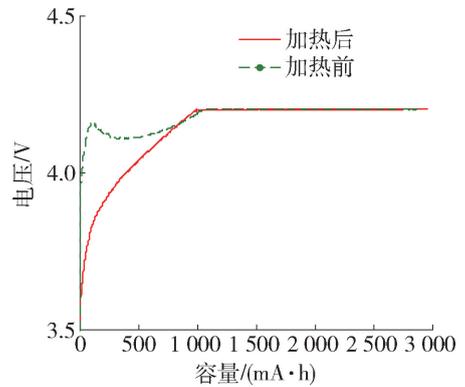


图 9 加热前/后电池的 1.0 C 充电容量对比
Fig. 9 Capacity comparison before and after heating during 1.0 C charging

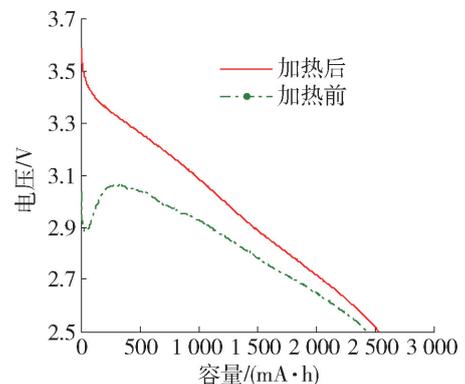


图 10 加热前/后电池的 2.0 C 放电容量
Fig. 10 Capacity comparison before and after heating during 2.0 C discharging

温升越大; 充/放电电流越大, 电池的温升速率越大。

3) 低温环境下对锂离子电池加热可以提高其充/放电性能, 因此, 有效的锂离子电池热管理可以改善其低温性能。

4) 本文所用试验方法和结论可为锂离子电池的热特性分析建模、热管理系统设计提供理论依据和技术支撑; 对其他类型电池的相关研究及工程应用具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] HUANG C K, SAKAMOTO J S, WOLFENSTINE J, et al. The limits of low temperature performance of Li-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2000, 147(8): 2893-2896.
- [2] 辛明华, 余楚礼, 车杜兰. 电动汽车锂离子电池的生热特性[J]. 汽车工程师, 2012, 187(7): 26-28.
XIN M H, YU C L, CHE D L. Thermal performance of lithium-ion battery in electric vehicles[J]. Auto Engineer,

- 2012, 187(7): 26-28. (in Chinese)
- [3] RAMADASS P, HARAN B, WHITE R, et al. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part II. Capacity fade analysis [J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 112(2): 614-620.
- [4] WU M S, CHIANG P C J. High-rate capability of lithium-ion batteries after storing at elevated temperature [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(11): 19-25.
- [5] 黎火林, 苏金然. 锂离子电池循环寿命预计模型的研究[J]. *电源技术*, 2008, 32(4): 242-246.
LI H L, SU J R. Cycle-life prediction model studies of lithium-ion batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2008, 32(4): 242-246. (in Chinese)
- [6] NOBORU S. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles [J]. *Journal of Power Sources*, 2001(99): 70-77.
- [7] 杨凯, 李贺, 陈实, 等. 电动汽车动力电池的热效应模型[J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(9): 782-785.
YANG K, LI H, CHEN S, et al. Thermal model of batteries for electric vehicles [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(9): 782-785. (in Chinese)
- [8] 邱景义, 余仲宝, 李萌. 高功率锂离子电池热特性研究[J]. *电源技术*, 2015, 39(1): 40-42.
QIU J Y, YU Z B, LI M. Thermal properties of high-power lithium ion batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2015, 39(1): 40-42. (in Chinese)
- [9] 赵世玺, 郭双桃, 赵建伟, 等. 锂离子电池低温特性研究进展[J]. *硝酸盐学报*, 2016, 44(1): 19-28.
ZHAO S X, GUO S T, ZHAO J W, et al. Development on low-temperature performance of lithium ion batteries [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(1): 19-28. (in Chinese)
- [10] PETZL M, KASPER M, DANZER M A. Lithium plating in a commercial lithium-ion battery—a low-temperature aging study [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275: 799-807.
- [11] 付庆茂, 文钟晟, 谢晓华, 等. 电化学阻抗图谱用于锂离子电池低温性能的研究 [C] // 第二十六届全国化学与物理电源学术年会. 厦门: 中国电子学会, 2004: 170-171.
FU Q M, WEN Z S, XIE X H, et al. Application of electrochemical impedance technology in research on lithium-ion batteries [C] // 26th Annual Meeting on Power Sources. Xiamen: Chinese Institute of Electronics, 2004: 170-171. (in Chinese)
- [12] 李青海, 蒲薇华, 任建国, 等. 锂离子电池低温性能的研究 [C] // 2005 中国储能电池与动力电池及其关键材料学术研讨会. 长沙: 中国材料研究学会, 2005: 111-112.
LI Q H, PU W H, REN J G, et al. The low-temperature performance of lithium-ion batteries [C] // The 2005 China Energy Storage and Power Battery and Key Materials Academic Symposium. Changsha: Chinese Materials Research Society, 2005: 111-112. (in Chinese)
- [13] QIAO Y Q, TU J P, WANG X L, et al. The low and high temperature electrochemical performances of $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ cathode material for Li-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 199: 287-292.
- [14] 中国汽车技术研究中心. 电动汽车用动力电池电性能要求及试验方法: GB/T 31486—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 4-5.

(责任编辑 张 蕾)