

圆柱锂离子动力电池电热特性仿真

杜双龙, 赖延清, 贾明, 程 昀, 张红亮, 张 凯, 刘业翔

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要: 基于 COMSOL MULTIPHYSICS 平台建立三维热仿真模型, 定量分析不同工作电流条件下的温度分布。结果表明: 单体及模块最高温度集中在中心区域, 温度呈辐射状由内向外逐渐降低。在换热系数 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 作用下, 低于 8C 倍率放电可使单体电池工作在正常温度范围, 而使三并五串电池模块最高温度在正常范围, 放电电流应低于 5C ; 在 5C 倍率下放电结束后, 荷电状态(SOC)为 0 模块中心电池最高温度达到 322.88 K , 比同倍率绝热条件下单体最高温度仅低 2.81 K 。

关键词: 锂离子电池; 热模型; 温度分布; 仿真

中图分类号: TM911

文献标志码: A

Electrothermal characteristics simulation of cylindrical automotive lithium-ion battery

DU Shuang-long, LAI Yan-qing, JIA Ming, CHENG Yun, ZHANG Hong-liang, ZHANG Kai, LIU Ye-xiang

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A three-dimensional thermal simulation model was established based on the finite element commercial software COMSOL MULTIPHYSICS to analyze the influence of different discharge rates on temperature distribution. The results show that the highest temperature locates at the central area, and the temperature decreases from inside to outside. Besides, the single cell can work well below 8C discharge current when the coefficient of heat transfer is set to $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, but 5C for the module. The highest temperature of the central cell of the module under 5C is 322.88 K , only 2.81 K lower than that of single lithium-ion battery working at adiabatic condition nearly.

Key words: lithium-ion battery; thermal model; temperature distribution; simulation

圆柱形锂离子电池由于具有各个方向张力可相互抵消, 不易膨胀变形, 一致性较好, 并且产生气体不易泄露、耐压性好等优点, 在电动工具等高功率应用领域中已经得到广泛应用^[1-3], 但是其所产生的热问题依然不可忽视。实际应用中为提供足够容量, 一个大型电池组通常由多个单体电池并联或串联组成, 这种结构潜在增加了电池的接触电阻, 而接触电阻产热是电池重要的热源之一, 因此, 这造成了电池运行过程中欧姆热的增加。如果热量不能及时散失, 便在有限

空间累积, 从而致使电池的温度升高。

电池散热率与生热率的关系如图 1 所示, T_0 是稳态温度平衡点, T_1 是非稳态温度平衡点, 在 T_1 以下温度, 散热速率强于生热率, 电池的温度降低至平衡点 T_0 , 在 T_1 以上温度, 生热率强于散热速率, 温度不断升高, 电池将面临热失控, 最终到达着火点温度 T_2 。锂离子电池正常工作温度范围在 $-20\sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$, 若高于 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 电化学性能和循环寿命会明显下降^[5]。另外, 电池组在运行过程中不仅要求各电池单体间具有电化

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204211); 中国博士后科学基金资助项目(2012M521543); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120162120089)

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2014-01-06

通信作者: 贾明, 讲师, 博士; 电话: 13975127722; E-mail: jiamingsunmoon@aliyun.com

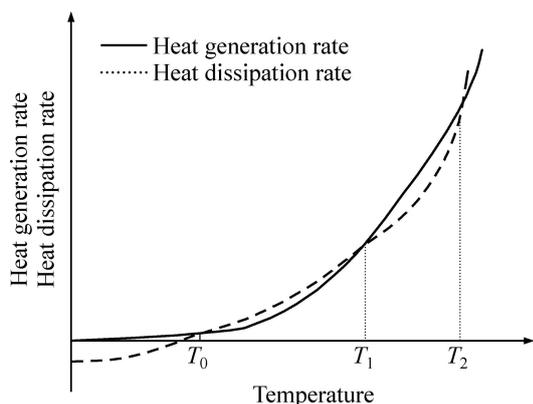


图1 电池生热与散热的平衡关系^[4]

Fig. 1 Relationship between heat generation rate and heat dissipation rate^[4]

学一致性, 还要保证具有温度一致性。研究表明, 为保证电池正常工作, 电池单体温差不应大于 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6]。

鉴于锂离子电池实际工况的复杂性, 单纯使用实验测量的方法研究电池的电热性能需要花费大量的人力、物力。使用计算机数值仿真技术, 建立电池电热模型研究电池热行为, 能够有效缩短设计周期, 节约时间和成本^[7-9]。BERNARDI 等^[10]基于能量守恒的基本原理, 通过锂离子电池的热力学计算, 提出目前被广泛使用的电池热模型; JEON 等^[11]在柱坐标下, 以 LiCoO_2/C 体系为研究对象, 建立 18650 圆柱电池电热模型, 采用有限元分析方法对放电过程热效应进行研究, 只考虑放电过程中的焦耳热和熵变热, 研究发现高倍率下焦耳热在热量来源中占主导地位, 低倍率条件下熵变热在热量来源中占据主要地位。周方等^[12]针对不同厂家 18650 型号的 $3.7\text{ V}/2\text{ Ah}$ 锰酸锂动力电池, 采用非稳态导热微分方程对电池温升问题进行数值计算模拟, 并实验验证得出电池内阻 R 对温升有较大影响。以上圆柱电池模拟文献研究电热模型建立机理, 对模型进行优化, 并且根据实际研究电池单体类型, 建立相应简化模型, 从不同角度对电池热分布进行分析。

单体电池以及模块热行为是影响其性能发挥的关键, 较高倍率放电下的热问题已不容忽视, 尤其是对于电动工具所使用的电池模块, 在密闭工作环境缺少高效外部散热措施下, 其热量更易累积, 导致发生安全问题, 但是在此条件下开展电池模块实验研究, 具有较大难度。本文作者以锂离子电池热模型为理论基础, 基于 COMSOL MULTIPHYSICS 仿真平台, 建立电动工具用 18650 锂离子电池单体以及三并五串电池模块三维模型, 并结合实际应用部分圆柱电池组在

密闭空间的工况特点, 研究工作电流以及特定换热系数条件下的温度分布, 为圆柱形电池及电池组的优化设计及热管理提供理论指导。

1 仿真及计算方法

1.1 模拟对象

本研究使用的是卷绕型 18650 电池。正极活性材料为锰酸锂, 负极活性材料为石墨, 标称电压 3.7 V , 标称容量 $2.5\text{ A}\cdot\text{h}$ 。表 1 所列为实验用锰酸锂体系单体电池基本参数。

表 1 卷绕型锰酸锂电池单体基本参数

Table 1 Parameters of lithium ion battery

Capacity/ (A·h)	Mass/ g	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Voltage/ V	Dimension/ mm	Height/ mm
2.5	48	2055.2	3.7	18	65

1.2 模型建立

为简化模型计算, 提高模型的实用性和收敛性, 通常模型需要做以下几点合理假设:

- 1) 电池内部各种材料具有各向同性且物理性质均一;
- 2) 电池内部电解液流动性很差, 忽略其内部对流换热影响;
- 3) 电池内部发热均匀。

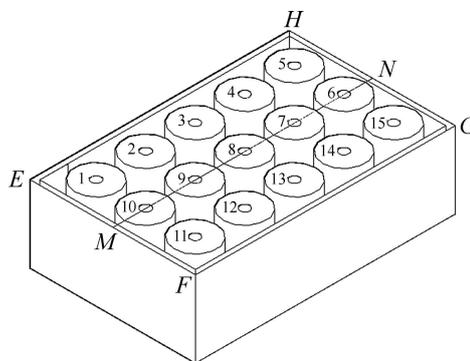


图2 三并五串电池模块半结构示意图

Fig. 2 Semi-structure of schematic diagram of battery pack

模块由 1~15 共 15 个 18650 电池单体组成三并五串电池组, 各单体间距 3 mm , 外部铝制箱体厚度 2 mm , 整个电池组处在封闭环境中。整个模型可看做由 3 个部分构成: 铝外壳、内部空气和电池组。由于体系具有对称性, 图 2 所示为三并五串电池模块的半

结构示意图, MN 是电池组中心线; $EFGH$ 面是中心截面。

仿真研究中假定每个单体电池的生热速率相同, 且电池能够进行理论完全放电(即假定放电倍率为 nC , 则放电时间为 $\frac{3600}{n} s$)。电流条件为 $1C$ 、 $3C$ 、 $5C$ 、 $8C$ 、 $10C$, 初始温度均为 $300 K$ 。

1.3 热物性参数

热物性参数是电池模拟过程中的基础, 可靠的参数对工况条件下的模拟结果准确性有很大影响。表 2 所列为各材料的热物性参数, 其中正极材料、负极材料、隔膜的物性参数参照文献[13], 其他材料物性参数通过查阅手册^[14]得到。

表 2 用于建模的锰酸锂电池单体各材料的物性性能参数
Table 2 Thermal-physical properties parameters of lithium-ion battery materials

Material	Density/ ($kg \cdot m^{-3}$)	Specific heat/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Separator	1008.98	1978.16	0.3344
Positive electrode	2328.5	1269.21	1.58
Negative electrode	1347.33	1437.4	1.04
Aluminum foil	2770	875	170
Copper foil	8933	385	398
Nylon	1150	1700	0.26
Steel can	7850	475	44.5

计算过程中锂离子电池的平均比热容可以通过式(1)计算:

$$\rho_{cell} c_{cell} = \frac{\sum \rho_i c_i V_i}{\sum V_i} \quad (1)$$

式中: ρ_{cell} 、 ρ_i 分别为电池的平均密度、各种材料的密度; c_{cell} 、 c_i 分别为电池的平均热容、各种材料的比热容; V_i 为各种材料所占的体积。

由于锂离子电池是由多层的不同材料浸润在电解液中, 因此电池的导热系数存在各向异性。根据传热的基本原理, 传热分为并联传热和串联传热两种。并联平均导热系数可以通过式(2)确定, 串联平均导热系数可以通过式(3):

$$\lambda_x = \lambda_z = \frac{\lambda_p L_{x_p} + \lambda_n L_{x_n} + \lambda_s L_{x_s}}{L_y} \quad (2)$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{\frac{L_{x_p}}{\lambda_p} + \frac{L_{x_n}}{\lambda_n} + \frac{L_{x_s}}{\lambda_s}} \quad (3)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为单体电池内核材料 x 、 y 、 z 方向导的热系数; λ_p 、 λ_n 、 λ_s 分别表示电池单体内的正极极片、负极极片、隔膜的导热系数。

圆柱型电池在径向可以看做是正极极片、负极极片、隔膜串联; 轴向可看做是三者的并联。

经计算, 得单体圆柱电池内核材料各方向导热系数为 $\lambda_x = \lambda_y = 0.89724 J/(m \cdot K)$, $\lambda_z = 29.557 J/(m \cdot K)$, 电池内芯的平均比热为 $1.399 1 kJ/(kg \cdot K)$, 平均密度为 $2055.2 kg/m^3$ 。

1.4 模型载荷及边界条件

锂离子电池热模拟的本质是电池内部能量偏微分守恒方程如式(4)所示:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (4)$$

式中: ρ 为电池平均密度; c_p 为电池平均比热容; T 为温度; t 为时间; \dot{q} 为电池内生热率。

考虑到电池单体的体积整体较小, 因此, 在计算中将电池看做均一发热体。电池热量来源主要为电池内芯生热。由于实时准确测量电池的生热速率非常困难, 因此, 计算电池内芯生热时采用 Bernardi 电池生热速率方程:

$$\dot{q} = \frac{I}{V} \left(E_{oc} - U - T \frac{dE_{oc}}{dT} \right) \quad (5)$$

式中: I 为电流; V 为电池体积; E_{oc} 为电池平衡电动势; U 为电池工作电压; T 为电池初始温度, 取 $300 K$; dE_{oc}/dT 为电池电压随温度变化的温度系数, 取 $0.22 mV/K$ ^[15]。计算过程中 $E_{oc} - U$ 等于 IR (R 为电池内阻)。

严格意义上讲, 电池在充放电过程中, 由于其各部位的电流密度的不同, 将导致各点热物性参数略有差异。但目前所用的热模型在充放电过程中采取相同的热物性参数, 其不同主要体现在生热速率模型上^[16]。

根据牛顿冷却定律, 锂离子电池热模型的边界条件可以用式(6)来描述:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_{amb} - T_{\infty}) \quad (6)$$

式中: h 为电池表面与周围流体间的对流传热系数; T_{amb} 为周围流体的温度; T_{∞} 为电池表面温度; λ 为电池

表面材料的导热系数； n 表示垂直电池表面的矢量方向。

1.5 网格模型

采用自由四面体剖分网格，得到的单体网格模型如图 3(a)所示，用同样方法进行电池组网格划分(见图 3(b))。其中单体电池共计 212148 个网格，模块共计 462183 个。

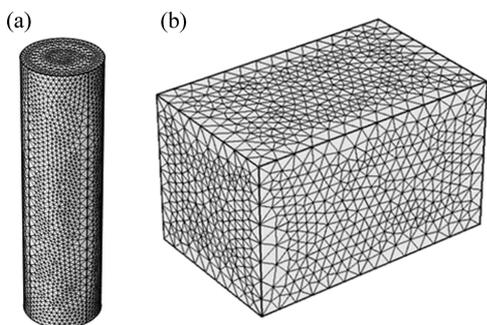


图 3 自由四面体剖分网格

Fig. 3 Finite element model of lithium-ion battery: (a) Cell; (b) Packs

2 结果与讨论

2.1 单体电池热效应和温度分布

为研究单体电池在不同电流下的热效应，对上述单体分别进行 1、3、5、8、10C 放电，设定的电池表面换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，其温度变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出，8C 以上倍率电池温升几乎呈直线上升。这是因为在此高倍率下，电池内部生热率非

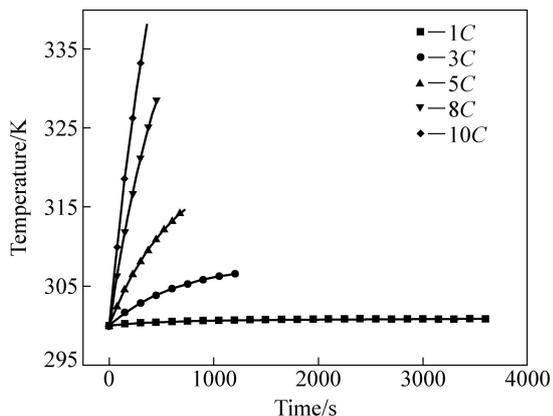


图 4 不同放电倍率下单体温度变化

Fig. 4 Comparison of temperature difference under different discharge rates

常高，而外部对流相对较小，电池的生热率远大于散热率，热量不断累积，使得单体中心位置温度急剧升高。模拟结果显示，8C 放电结束后，电池最高温度达到 328.53 K，超过正常工作温度范围 323.15 K，电池将面临热失控的风险；在 1C 放电条件下，由于单位时间电芯产热较小，在设定的电池表面换热系数下，电池内部生热量能够很好的散失到周围环境，电池基本保持热平衡状态，放电结束后温度升幅很小，仅有 0.83 K。

图 5 所示为此单体电池在 5C 倍率放电结束时温度分布，表面换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，整体温度分布如图 5(a)所示；为清楚地观察单体内部温度分布，取单体 YOZ 截面，如图 5(b)所示。可以看出，电池最高温度分布于单体中心区域，电池表面由于对流换热，温度较低。根据仿真结果，电池内部最高温度可达到 313.16 K。从前面计算可以看出，电池径向导热系数远小于轴向导热系数，这使得在相同时间同等间距内，径向导热量远小于轴向导热量。在 5C 放电条件下，电池活性材料生热率较高，外部换热率相对较小，电池内部在较短时间内累积大量热量。越靠近电池两端，轴向导热影响越明显，因此，在单体高度方向上，呈现如图 5(b)的温度分布。

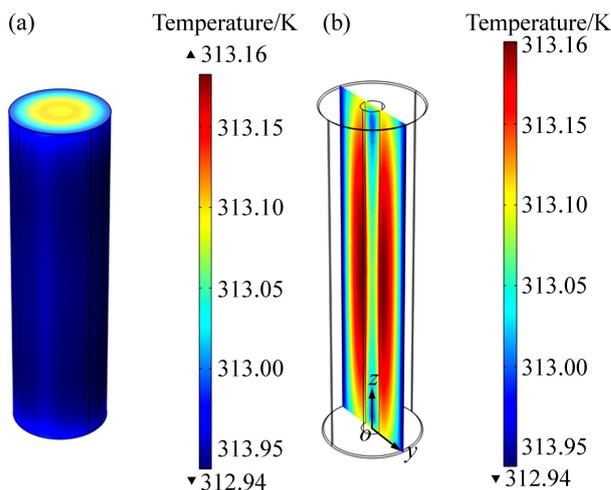


图 5 18650/2.5 Ah 单体电池 5C 放电结束仿真温度场

Fig. 5 Simulated contours of temperature for 18650/2.5 Ah cell at end of 5C discharge: (a) Overall temperature field; (b) YOZ cross section temperature

2.2 电池模块热效应和温度分布

电动工具实际使用过程中，根据工作工况需求，电池组需要在不同电流条件下正常工作，大电流工作对模块性能发挥将是重大考验。表 3 所列为不同工作电流下中心电池 8，边角电池 1 以及模块内部不同单

体之间温差变化情况。

由表 3 可以看出, 电池活性材料温差随着电流增大而增大, 且边角电池的温差比中心电池的温差更大, 即温度分布均匀性更差; 模块内部单体之间的温差 ΔT_{\max} 也随电流逐步增大, 这对模块内部电池组热管理提出了考验。另外, 5C 倍率放电结束时, 中心电池温度达到 322.85 K, 接近 323.15 K; 8C 放电结束最高温度达到 336.45 K。这远超过正常工作温度范围, 不仅存在热失控的隐患, 并且严重损害电池的使用寿命, 所以应尽量避免此电池组在 5C 及以上倍率放电。注意到 5C 放电结束时, 中心电池 8 最大温差 1.45 °C 左右, 边角电池 5 为 1.94 °C 左右, 可见 5C 倍率放电下模块中单体电池具有较好的温度均匀性, 此外, 注意到模块内部不同单体间最大温差仅为 2.90 °C, 说明电

池组整体温度均匀性较好。

在 5C 倍率下, 放电结束(SOC=0)模块中心电池最高温度达到 322.88 K, 仅比同倍率绝热条件下单体最高温度低 2.81 K。其主要原因是模块换热系数作用在箱体表面, 通过降低箱体表面的温度进而在箱体内部产生一定温度梯度, 中心电池在此梯度下由内向外传输热量, 而对于单体电池, 换热系数直接作用于电池壳体, 电池内部将产生较大的温度梯度, 热量传输很快, 因此其降温效果也更明显。这种情况下模块中心电池接近于绝热过程。

为清楚了解电池内部温度分布情况, 对模块进行不同倍率放电, 放电结束(SOC=0)时中心截面 EFGH 温度分布如图 6 所示。由图 6 可以看出, 不同倍率电流放电时, 电池中心截面温度具有大致相同的分布规

表 3 锂离子电池模块不同倍率放电结束(SOC=0)时电池温度情况

Table 3 Temperature distribution of lithium-ion module at different discharge rates

Rate/C	Heat transfer coefficient/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	Temperature rise/K		ΔT_{\max} /K	T_{\max} /K
		Cell 8	Cell 1		
1	20	0.23	0.30	0.45	304.19
3	20	0.80	1.06	1.61	313.76
5	20	1.45	1.94	2.90	322.88
8	20	2.58	3.50	5.17	336.45
10	20	3.43	4.71	6.89	345.42

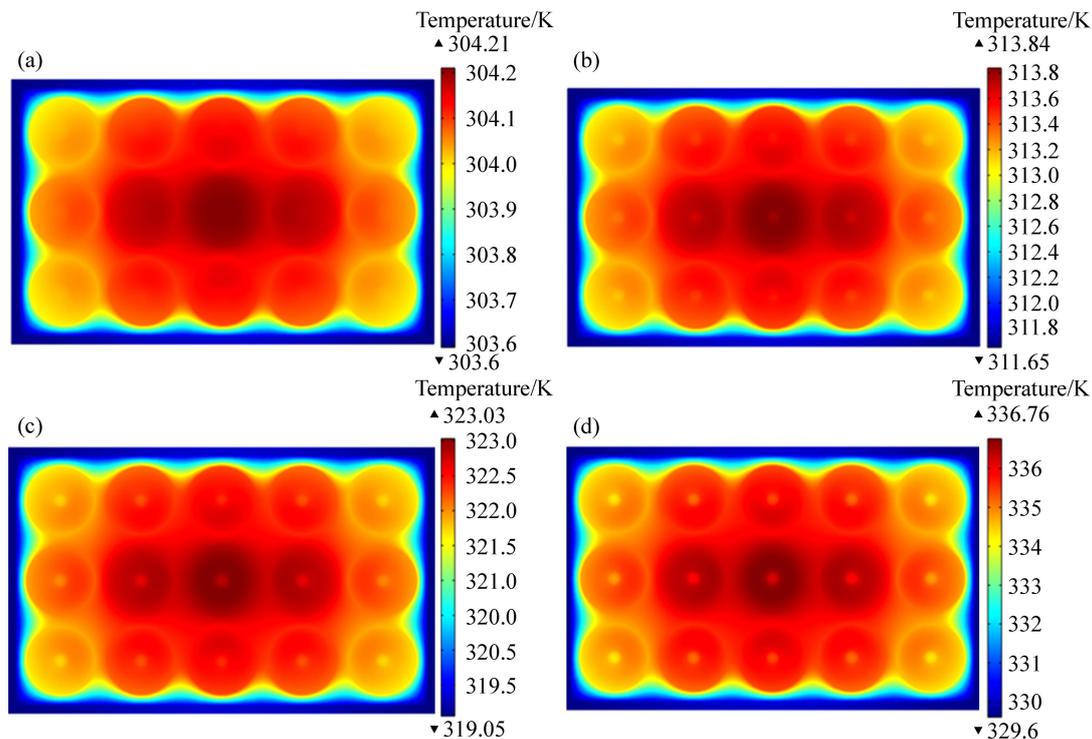


图 6 不同放电倍率下放电结束模块中心截面 EFGH 温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of cross-section EFGH of battery module under different discharge rates: (a) 1C, 3600 s; (b) 3C, 1200 s; (c) 5C, 720 s; (d) 8C, 450 s

律,即高温区都集中在中心电池活性材料位置,靠近边缘的部分温度逐渐降低。

图7所示为电池模块在不同工作电流时MN线上温度变化。由图7可以看出,温度变化曲线具有对称性,小于5C倍率工作电流下,电池模块内部具有良好的温度一致性;大于5C时,温度的一致性则变差。曲线两端的急剧变化是由于外层电池与箱体之间存在较大的温度梯度,可以定性看出,低倍率下此梯度较小,高倍率下此梯度较大。另外,随着工作电流的增大,电池生热率增强,而电池中心尼龙材料以及内部空气的热阻较大,热量不能够及时散失,由此产生的温度梯度也越来越大,即曲线的波动性也逐渐趋于显著。

图8(a)所示为5C倍率放电结束时电池模块整体温度分布。由图8(a)可以看出,模块表面温度呈现不均匀性,上下表面中心区域温度稍高,前后左右面域温度略低。为更清楚看出电池组内部的温度分布情况,图8(b)给出此模块不同位置YOZ切面温度结果。

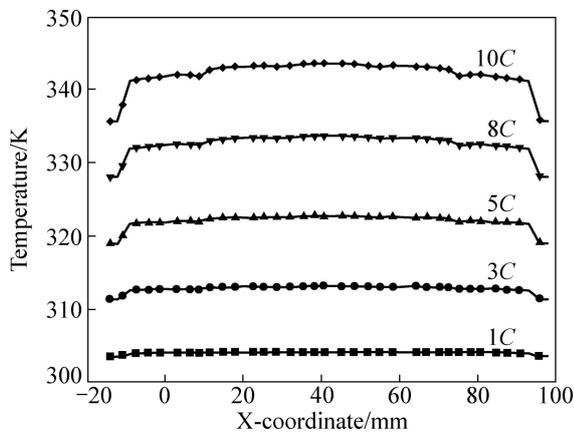


图7 不同倍率放电结束中心线MN温度分布
Fig. 7 Comparison of temperature change along MN line under different discharge rates

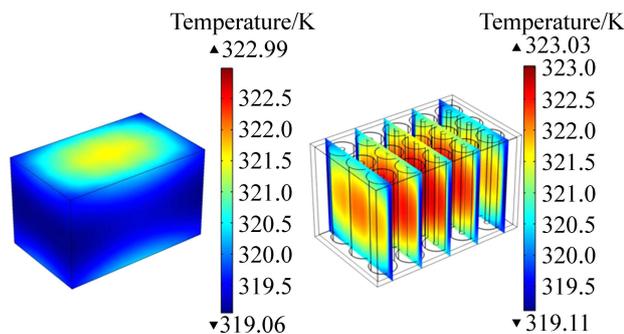


图8 三并五串电池模块5C放电结束(SOC=0)温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of pack at end of 5C discharge: (a) Overall temperature field; (b) YOZ cross section temperature

为研究模块内部温度动态变化,假定外表面换热系数为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,在5C倍率下,分别在放电深度(Depth of discharge, DOD)为0、0.2、0.4、0.6、0.8、1等6个关键点处给出中心线MN上温度变化,如图9所示。

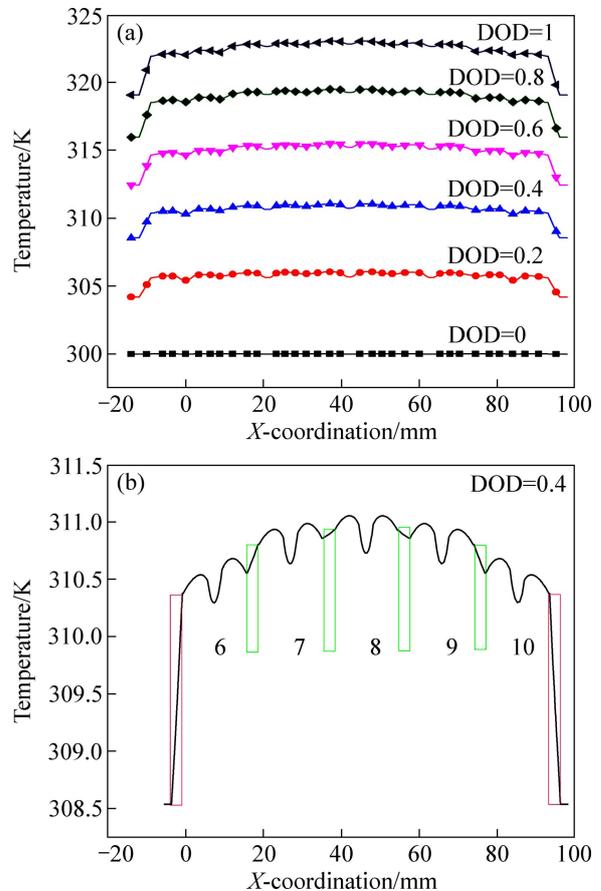


图9 5C倍率不同放电深度时模块中心线MN温度变化
Fig. 9 Comparison of temperature along MN line of pack: (a) Temperature change at different DOD; (b) Temperature change at DOD=0.4

由图9(a)可以看出,随着电池组放电深度加强,电池中心线上温度逐渐增高,曲线上移,同时曲线出现振荡,线上温度均匀性变差;除此之外,可以定性看出外部电池与铝箱之间的温度梯度也逐渐增大。图9(b)给出模块在DOD=0.4时刻的中心线MN温度分布,图中6~10依次代表从右至左电池单体,绿框代表模块中电池单体之间间隙,红框代表电池单体与箱体之间间隙,可以看到中心线MN上分布的五块电池温度具有对称性,中心电池8温度最高,两侧电池温度依次减小;并且6~10单体电池曲线均由两个波峰,一个波谷组成,波峰是电池活性材料区域温度较高所致,波谷是因为电池中心尼龙材料温度较低。

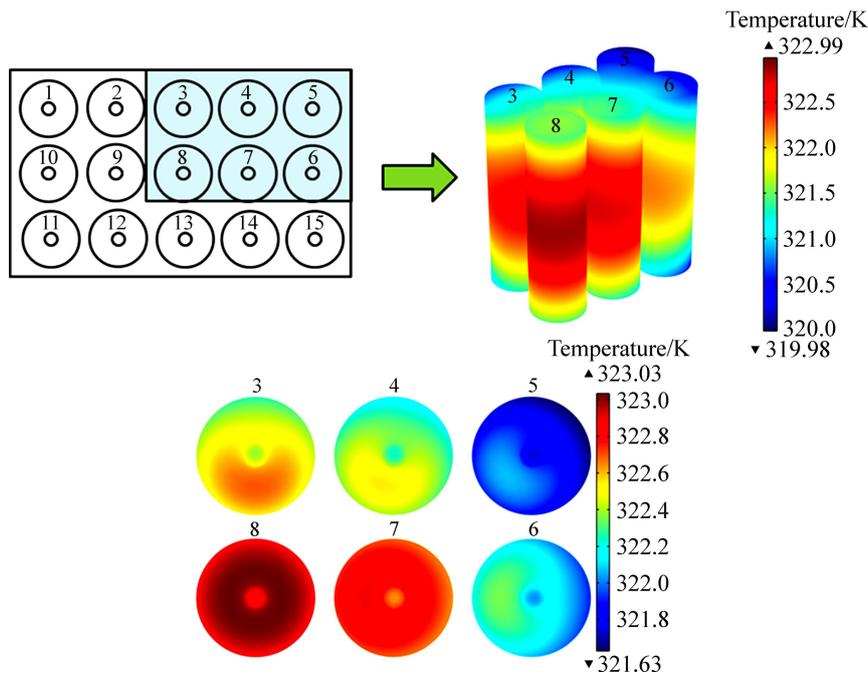


图 10 电池 3~8 的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of cells 3~8

注意到图 9(b)中 6 单体曲线部分右侧波峰高于左侧, 表明此条件下单体内部活性材料之间存在一定温度梯度。由于模块中电池组具有高度对称性, 以右上角 6 个单体电池为研究对象, 分析上述现象产生的原因。图 10 所示为 5C 倍率放电结束时右上角电池整体温度分布和中心截面温度分布。由图 10 可以明显看出, 电池组内部以及单体内部温度分布具有不均匀性, 且单体中心区域温度偏高, 两侧较低; 电池组体系温度分布由内向外呈辐射状, 单体内部越靠近中心位置, 温度越高, 远离中心位置温度则较低; 中心电池温度最高, 且分布比较均匀; 电池中心尼龙材料由于比热很大而导热系数较小并且没有热量产生, 因此活性材料区域所产生的热量不易传递到该部分, 只是其温度较低。

在实际应用中, 为促进模块内部单体之间的温度分布均匀性, 提高电池组倍率性能, 通常采用其它填充介质, 如水, 煤油, 以及热容较大的相变材料(Phase change materials, PCM)等^[17-19]。除此之外, 电池模块中单体温度分布特性也不容忽视, 应积极针对不同电池温度分布设计合理的电池成组方式以及冷却机制, 因篇幅关系, 相关研究工作另外成文。

3 结论

1) 电池单体高温区位于单体中心区域, 并且在

外部对流换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 下, 5C 倍率放电结束(SOC=0)时, 内部最高温度可达到 313.16 K; 8C 放电结束时, 最高温度达到 328.53 K, 略高于电池正常工作的上限温度, 需进行强化散热。

2) 电池模块高温区集中于中心区域, 温度分布由内向外逐渐降低; 随着放电倍率增加, 模块内部温度均匀性变差; 箱体表面换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 5C 放电结束中心电池温度达到 322.88 K, 接近电池正常工作上限温度 323.15 K, 可见在此对流换热条件下, 为保证电池组正常工作, 应控制放电电流在 5C 以下。

3) 模块中心电池在箱体表面换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 5C 倍率放电下的最高温度接近于绝热过程下单体的最高温度, 并且电池组整体温度均匀性较好。

REFERENCES

- [1] RAMADASS P, HARAN B, WHITE R, POPOV B N. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part I. Cycling performance[J]. Journal of Power Sources, 2002, 112(2): 606-613.
- [2] RAMADASS P, HARAN B, WHITE R, POPOV B N. 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.
- [3] KHATEE S A, FARID M M, SELMAN J R, AL-HALLAJ S. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric

- scooter[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 128(2): 292–307.
- [4] GUO G, LONG B, CHENG B, ZHOU S, XU P, CAO B. Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(8): 2393–2398.
- [5] SATO N, YAGI K. Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles[J]. *JSAE Review*, 2000, 21(2): 205–211.
- [6] KIZILEL R, SABBAH R, SELMAN J R, AL-HALLAJ S. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105–1112.
- [7] 汤依伟, 贾明, 程昀, 张凯, 张红亮, 李劫. 基于电化与热能的耦合关系演算聚合物锂离子动力电池的温度状态及分布[J]. *物理学报*, 2013, 62(15): 158201-1–10.
TANG Yi-wei, JIA Ming, CHENG Yun, ZHANG Kai, ZHANG Hong-liang, LI Jie. Estimation of temperature distribution of the polymer lithium ion power battery based on the coupling relationship between electrochemistry and heat[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(15): 158201-1–10.
- [8] LI Jie, CHEN Yun, JIA Ming, TANG Yi-wei, LIN Yue, ZHANG Zhi-an, LIU Ye-xiang. An electrochemical-thermal model based on dynamic responses for with Li iron phosphate battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255: 130–143.
- [9] 张凯, 汤依伟, 邹忠, 程昀, 宋文锋, 贾明, 卢海, 张治安. 锂离子电池 LiMn_2O_4 /石墨电极放电过程中扩散极化的仿真[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(8): 2235–2242.
ZHANG Kai, TANG YiWei, ZOU Zhong, CHENG Yun, SONG Wen-feng, JIA Ming, LU Hai, ZHANG Zhian. Simulation of diffusion polarization in LiMn_2O_4 /graphite Liion battery during discharge process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(8): 2235–2242.
- [10] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5–12.
- [11] 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.
- [12] 周方, 李茂德. 圆柱形锂离子电池温升效应研究[J]. *电源技术*, 2011, 35(9): 1601–1608.
- ZHOU Fang, LI Mao-de. Effect of temperature rising of cylindrical lithium-ion batteries[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2011, 35(9): 1601–1608.
- [13] DOYLE M, NEWMAN J, GOZDZ A S, SCHMUTZ C N, TARASCON J M. Comparison of modeling predictions with experimental data from plastic lithium ion cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, 143(6): 1890–1903.
- [14] 陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物性测量[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 18–62.
CHEN Ze-shao, GE Xin-shi, GU Yu-qubg. *Measure technology of heat & thermophysics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990: 18–62.
- [15] WU M S, HUNG Y H, WANG Y Y, WAN C C. Heat dissipation behavior of the nickel/metal hydride battery[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(3): 930–935.
- [16] 林成涛, 李腾, 陈全世. 锂动力蓄电池散热影响因素分析[J]. *兵工学报*, 2010, 31(1): 88–93.
LIN Cheng-tao, LI Teng, CHEN Quan-shi. Analysis of the heat dissipation capability influence factors of LiMn_2O_4 -based lithium-ion power battery[J]. *Acta Aramamentar II*, 2010, 31(1): 88–93.
- [17] FARID M M, KHUDHAIR A M, RAZACK S A K, AL-HALLAJ S. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9/10): 1597–1615.
- [18] KIZILEL R, LATEEF A, SABBAH R, FARID M M, SELMAN J R, ALHALLAJ S. Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 183(1): 370–375.
- [19] SABBAH R, KIZILEL R, SELMAN J R, AL-HALLAJ S. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 182(2): 630–638.

(编辑 李艳红)