

车载镍氢电池热学模型的建立与试验

何常明^{1,2}, 许思传^{1,2}, 陈磊涛^{1,2}, 常国峰^{1,2}

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804)

摘要: 根据现有电池热学模型存在的不足, 利用 Fluent 建立了更为完善的基于耦合传热 (CHT) 算法的电池热学模型, 并针对所使用的镍氢电池模型确定了各项参数指标. 然后通过搭建相关试验平台对该模型的精确性进行了试验验证, 二者数据对比表明由热学模型得到的计算结果与试验值具有良好的 consistency. 最后对镍氢电池的发热量比例分配及随电池负荷状态 (SOC) 的变化规律进行了分析, 研究结果表明: 随着充电电流的增大, 焦耳热所占比例从 1C (1 A 电流) 充电时的 40% 迅速增大到 5C 充电时的 70% 以上.

关键词: 镍氢电池; 耦合传热; 发热量比例

中图分类号: TM 912.2

文献标识码: A

Thermal Model and Experimental Investigation of Vehicle-mounted Ni-MH Power Battery

HE Changming^{1,2}, XU Sichuan^{1,2}, CHEN Leitao^{1,2}, CHANG Guofeng^{1,2}

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: An improved battery thermal model based on coupled heat transfer (CHT) is established with the Fluent software. All parameters are determined for the nickel-metal hydride battery. Then a corresponding test platform is built up to validate the accuracy of the calculated model, and a comparison of the results obtained from the thermal model simulation and the experiment shows that they keep the good consistency with each other. Finally, the quantity proportion of Ni-MH battery heat distribution and the variation with SOC are analyzed, the experimental results show that the proportion of Joule heat rapidly increases from 40% to over 70% when charge current increases from 1C to 5C.

Key words: Ni-MH battery; coupled heat transfer; heat production ratio

目前应用于混合动力汽车 (HEV) 的动力电池主要有 3 种, 它们分别为铅酸电池、镍氢电池和锂离子电池. 铅酸电池性能可靠, 易于维护且价格低廉, 但动力特性与镍氢电池和锂电池相差甚远. 镍氢电池和锂电池各有优势, 但从安全性和成本考虑, 锂电池在过充电状态下存在较大的安全隐患且价格相对较高^[1-3]. 因此, 目前镍氢电池仍旧是 HEV 的主流动力电池.

温度仅是热学特性的表征, 真正影响电池温度变化的是电池内部和外部的热量交换原理和各种热学参数, 而将原理和热学参数结合在一起的便是电池的热学模型. 为此, 国内外众多研究者针对不同电池类型建立了相应的电池热学模型^[4-5]. Masato Nakayama 等^[2]建立了镍氢电池的 3D 热学模型, 并研究了不同充电倍率下电池的温度变化情况. 目前的电池热学模型虽然其理论描述均差不多^[6-9], 但由于不同电池自身各项参数的差异导致电池热模型差别较大, 在模型构建方法以及参数设置上仍存在一定的不足. 本文采用流固耦合 (耦合传热) 方法, 建立了镍氢单电池模块热学模型, 对现有电池热学模型进行了一定的改进和优化, 同时搭建起相应的试验平台, 将温度测量值和计算值进行对比, 分析不同倍率充放电工况下发热量随 SOC (电池负荷状态) 的变化规律.

1 动力电池的热力学分析

1.1 实际电池的热量计算

包括镍氢电池在内的所有电池, 在电化学反应过程中都伴随着热量的迁移, 而关于热量的定性和定量分析均基于电池的基本热力学公式. 对于实际电池, 电化学反应热仍然存在, 与电池内阻产生的焦耳热共同组成实际电池的总发热量. 因此, 对于实际

电池其热量的计算公式^[10]则为

$$q = I(U - E) - IT \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

式中: U 为电池电压; E 为电池电动势; T 为电池温度; I 为电流.下标 p 表示压力.式(1)表明实际电池总发热量 q 由两部分组成,即由电池内阻产生的焦耳热 q_{irr} 和电化学反应热 q_{re} 共同组成,即 $q = q_{irr} + q_{re}$.其中,内阻焦耳热: $q_{irr} = I(U - E)$;电化学反应热: $q_{re} = -IT \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p$.

1.2 电池热学模型

所有的电池热学模型都意在确定电池的温度变化和电流之间的关系,从而根据电池的工况预测电池的温度变化.这类模型的数学描述就是固体导热能量守恒方程:

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

式中: ρ 为电池密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c_p 为电池定压比热容, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; λ_x, λ_y 和 λ_z 分别为 x, y, z 方向上的导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; q 为电池发热量, $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$.

而方程的边界条件满足:

$$-\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_\infty), x = 0, L_x$$

$$-\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_\infty), y = 0, L_y$$

$$-\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_\infty), z = 0, L_z$$

式中: h 为换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; T_∞ 为环境温度, $^\circ\text{C}$; L_x, L_y 及 L_z 为电池在 x, y, z 方向的尺寸, m .

2 基于耦合传热的电池热学模型

2.1 耦合传热(CHT)算法

采用CHT算法可以同时计算出流体区域和固体区域的温度场,更关键的是将流体和固体的接触面设为热耦合边界后,该算法可以根据流场特性自行计算出热耦合边界上的换热系数分布情况.因此只要为精确的电池热学模型设置热耦合边界就可以保证模型在各种流场环境中的准确性.文中模型计算域包括流体和固体区域,而热边界条件为热耦合边界,如图1所示.

现对仿真模型采用如下假设条件:①忽略辐射换热,即只考虑电池内部的导热和热耦合边界处的对流换热;②电池内部物质分布式是均匀的, ρ 为常

量;③忽略温度对电池比热的影响,即 c_p 为常数;④径向导热系数和轴向导热系数均为定值,但二者取值则并不相等.

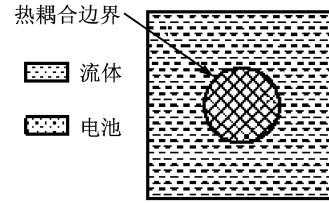


图1 镍氢电池单体热耦合示意图

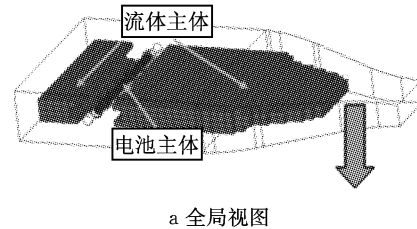
Fig.1 Thermal coupled model of single Ni-MH battery

2.2 电池热学模型的数值计算

在建立电池热学模型后,须进一步实现模型的数值计算.其中求解器选用通用计算流体动力学(CFD)计算软件Fluent,而网格生成则采用前处理软件(ICEM-CFD).

2.2.1 计算域网格

选定风道壁面和进出口围成的闭合区域为计算域后,根据风道的设计尺寸和电池的尺寸及位置在计算域内生成网格.其中,流体和电池的核心主体采用尺寸较大的六面体网格,从而在保证网格质量的同时可大大减少网格的数量,如图2所示.



a 全局视图

b 局部放大

图2 网格全局视图和局部放大

Fig.2 Global and local views of the meshes

2.2.2 边界条件的设置

(1)风道入口采用速度入口,测量风机出口的流速分布,采用Fluent UDF编写速度入口边界条件施加于风道入口;热边界设为温度边界,温度取大气环境温度.

(2)风道出口采用压力出口,压力值为大气环境压力;温度设为大气环境温度.

(3) 风道壁面处设为壁面边界且绝热。

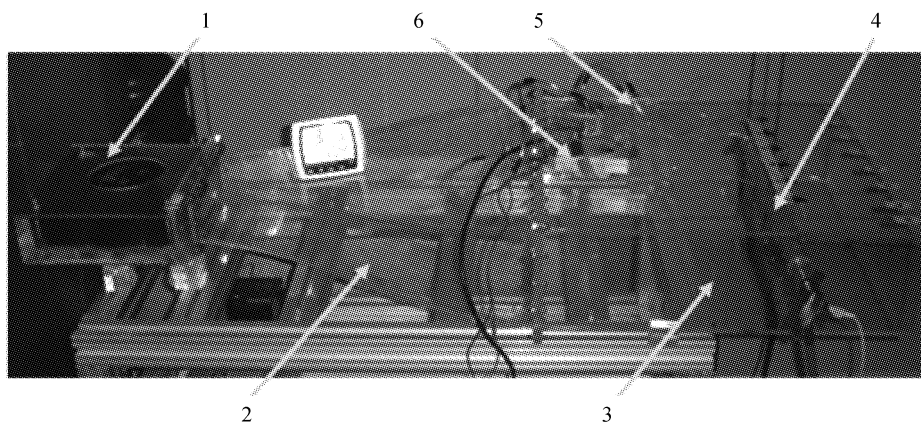
(4) 发热量源项的加载. 利用 UDF 提供的源项宏 DEFINE_SOURCE 编写发热量源项的程序代码, 并加载在电池所在的区域内。

Fluent 可自动联合求解流体区域和固体区域的能量守恒方程, 故只需将电池表面设置成热耦合边界即可. 为保证流场计算的准确性, 将湍流模型选为 RNG k -epsilon 模型. 求解器选择瞬态非耦合模式。

3 模型的试验验证及结果分析

3.1 试验平台的搭建

首先根据设计图纸为电池加工风道, 选择合适的风机后, 将风道、风机和电池组装并配备相应的温度传感器和温度采集模块. 搭建好的试验平台如图 3 所示. 镍氢电池所在位置靠近风道出口, 即离风机比



1-风机; 2-风道扩压段; 3-风道测量段; 4-单个镍氢电池模块; 5-T型热电偶; 6-温度采集模块

图 3 单电池模块试验平台

Fig.3 Single battery module test platform

较远, 这主要是冷却空气在到达电池前已得到充分发展, 从而在电池周围形成稳定的流场. 另外, 电池的充放电和电流的控制通过高精度 Arbin BT Cycler 来实现。

3.2 温度测点数量及位置的确定

由于单个电池模块是由 6 个电池单体组成, 则在每个电池单体的正中位置布置一个测量点, 共 4 个测量点. 测量点的编号按照图 4 片中所标记, 即面对着风道出口, 测量点从右到左依次标记为 No1 至 No4.



图 4 温度测点的数量及位置

Fig.4 The amount and positions of the temperature measuring points

试验验证方案如下: 在电池表面上选取多个温

度测量点, 在一定流场环境下(风机转速一定), 使电池运行于不同倍率的充放电工况, 与此同时记录多个测量点的温度变化。

而在模拟计算中, 在模型中的电池表面的相同位置也须标记相应的温度测点. 在与试验相同的流场环境下让电池模型运行于相同的电流工况, 然后进行瞬态数值模拟, 输出和记录标记点温度, 并获得各标记点温度随时间的变化曲线。

3.3 试验与模拟结果对比

按照上述试验条件对镍氢单电池模块进行试验, 分别记录 4 个测点的温度变化, 并在相同条件下利用电池热学模型进行模拟计算. 将每个测点的试验值和模拟值进行比较, 并绘制成温度随时间的变化曲线, 测点的对比结果如图 5 和图 6 所示。

为了便于从整体上评价模型的准确性, 采用如下方法进行评价: 将 4 个测点温度的平均值作为衡量电池整体温度的指标, 设 T_c 为计算值的平均值, T_m 为测量值的平均值以及模型的偏差率 δ , 则:

$$\delta = \frac{T_c - T_m}{T_m} \times 100\% \quad (3)$$

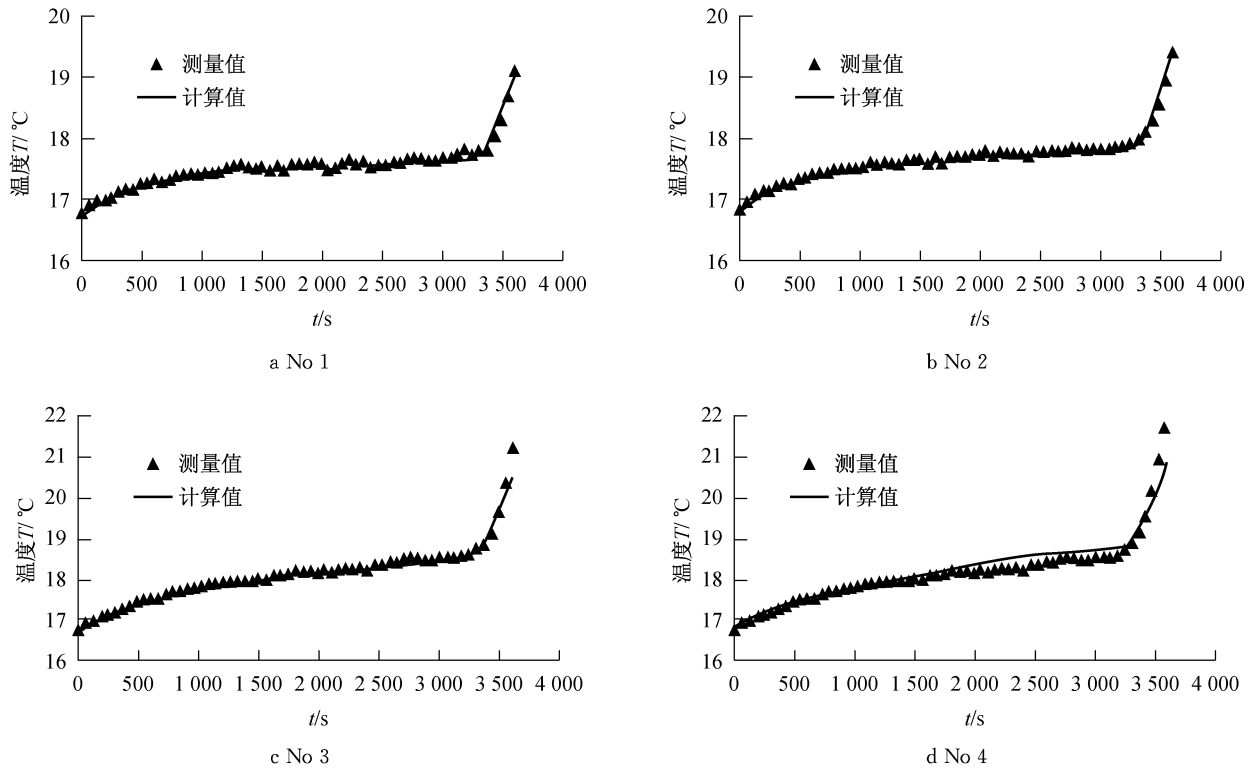


图 5 1C 充电时各测点测量值与计算值对比结果

Fig.5 The comparison of the measured and calculated values as 1C charging

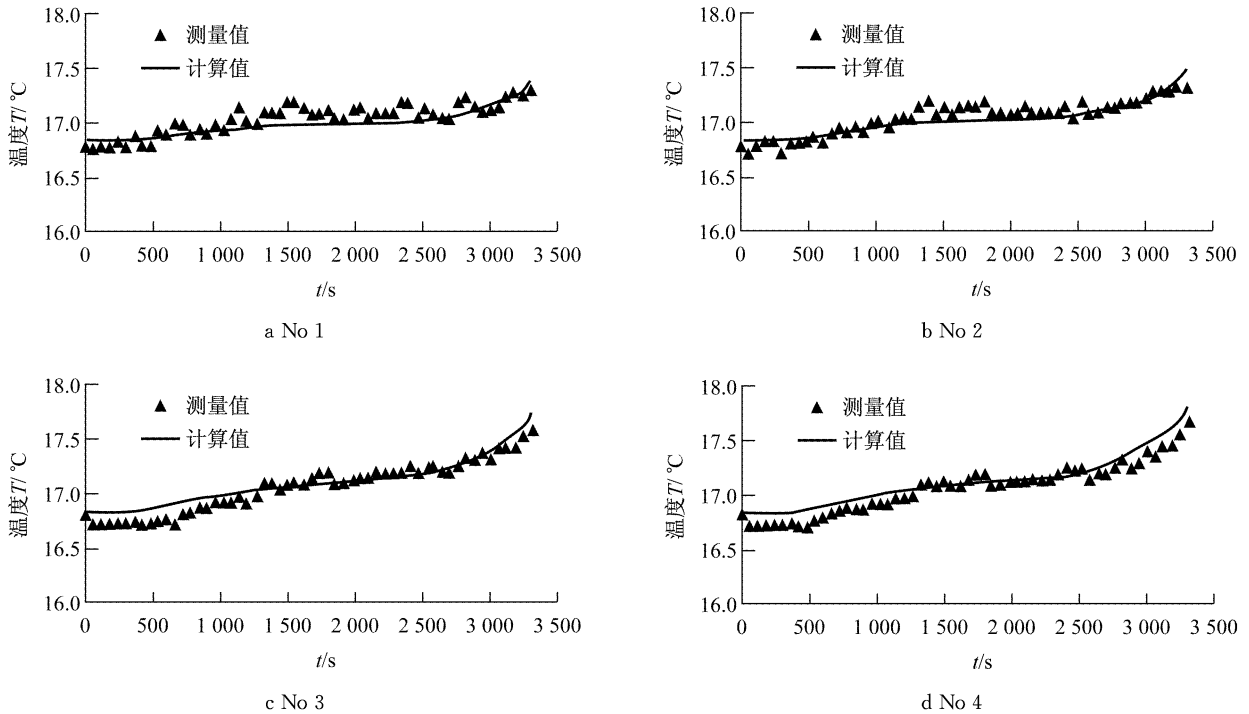


图 6 1C 放电时各测点测量值与计算值对比结果

Fig.6 The comparison of the measured and calculated values as 1C discharging

仿真模型出现的最大正偏差为 6.0%，最大负偏差约为 2.2%，则模型的计算温度与实测温度的差值为 ±6.0%，也就是说模型的偏差率为 ±6.0%。由此

可见，在 1C 充放电电流下，采用热耦合边界的镍氢电池热学模型计算精度基本维持在工程精度可接受范围内，而造成偏差的主要原因可分成以下两大类：

(1) 模型中的电池内阻 R_d 偏大. 当 1C 充放电时, 偏差曲线在 0% 附近变化, 一般是随着充放电倍率的增大, 偏差也相应增大. 温度计算值几乎均高于实测值的原因是: ①模型所采用的电池比热偏低; ②模型所计算出的发热量偏高. 这是由于发热量是随着电流的增大而增大, 这与正偏差率随着电流增大而增大相吻合.

(2) 电流分配系数与实际情况有偏差. 对于充电时的电流分配系数, 其主要问题在 SOC 大于 80% 以后的充电阶段. 这种相对的平衡说明: 在这段时间模型计算的发热量与电池实际发热量之间的差值是基本不变的, 而电池热学模型中唯一与 SOC 建立函数关系的就是电流分配系数.

3.4 电池发热量分析

本试验中所使用的镍氢电池为圆柱形, 由 6 节单电池封装成的电池模块, 单电池及电池模块见图 7. 镍氢电池单体尺寸: 电池外直径 $\Phi_{\text{外}} = 22.5 \text{ mm}$; 高度 $H = 43 \text{ mm}$; 重量 $W = 56 \sim 58 \text{ g}$, 而其内阻: $3.5 \sim 4.5 \text{ m}\Omega$. 电池组开路电压为 7.2 V , 容量为 6 安时 (Ah). 该款电池具有以下特性: (1) 较高的充放电效率. 当 SOC 在中等状态时, 电池的安时效率可达 100%, 而瓦时效率则为 90%~95%; (2) 优良的安全性. 电池具有很强的抵抗过充电和过放电的能力, 从而大大提高了电池在极端情况下的安全性能; (3) 出色的寿命特性. 某款配备该电池的 HEV 的道路测试表明, 在车辆行驶上万公里后, 电池性能并没有发生明显的退化.

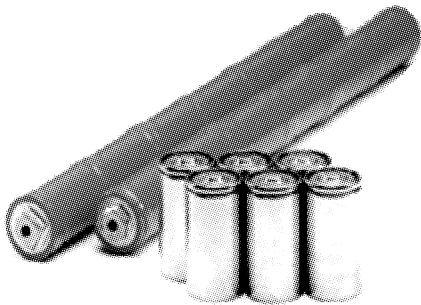


图 7 镍氢电池单体和电池组

Fig.7 Single battery and package of Ni-MH battery

镍氢电池在各个工况的总发热量随 SOC 的变化关系如图 8 所示. 在充电工况中, 随着电流的增大, 电池的发热量也相应增大; 同理, 在放电工况中也是如此. 在电流相同时, 充电时的发热量大于放电时的发热量. (1) 对于充电工况, 在 SOC 小于 0.9

时, 电池的发热量基本不变, 而当其大于 0.9 时, 发热量骤然上升, 故所用电池其过充容量应 ≤ 0.9 . (2) 对于放电工况, 电池发热量在 SOC 大于 0.4 时基本不变, 在 SOC 小于 0.4 后, 发热量虽然有一定上升, 但上升比例不大, 一般可认为在放电过程中电池发热量为定值.

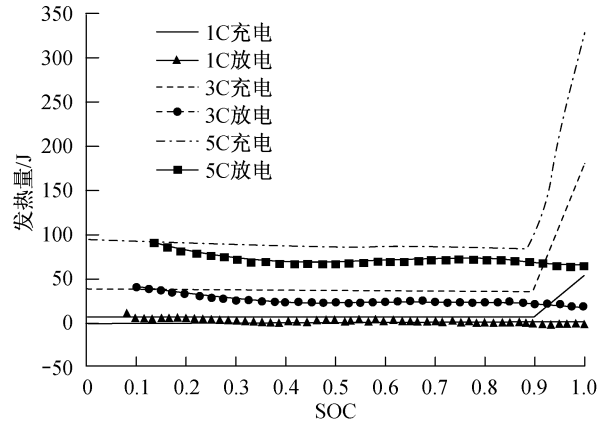


图 8 各工况下电池发热量随 SOC 的变化曲线

Fig.8 The heat productivity variation curve with the SOC in all operation conditions

另外, 1C 放电时, 电池在放电的开始阶段处于短暂的吸热阶段, 而且吸热量非常小. 出现吸热的原因是: 放电过程中的主化学反应占很大比重且为吸热反应, 而且焦耳热又很小, 从而使电池在总体上是吸热的, 而大约在 3 min 后, 电池开始进入放热阶段.

电池的总发热量为焦耳热、主化学反应热和副反应热 3 项之和. 按照这样的推论, 则电池任何时候的发热量都应该由 3 部分构成:

$$q = q_J + q_m + q_s \quad (4)$$

式中: q_J 为焦耳热; q_m 为主化学反应生热; q_s 为副反应生热. 设总电流为 I , 主反应电流为 I_m , 副反应电流为 I_s , 则:

$$q_J = \frac{1}{V} I^2 R_d; q_m = \frac{1}{V} I_m E_m; q_s = \frac{1}{V} I_s E_s.$$

其中: R_d 为电池内阻, Ω ; E_m 为主反应的热值电压, V ; E_s 为副反应的热值电压, V ; V 为电池体积, m^3 .

由于发热量在 SOC 为 0.4 至 0.8 范围内内基本为定值, 故在这段时间内对总发热量进行比例分析. 在图 9 中为充电时的分析结果. 在中等容量状态充电时, 副反应热所占的比重是很小的, 而值得注意的是: 随着充电电流的增大, 焦耳热比重越来越大, 从 1C 充电时的 40% 迅速增大到 5C 充电时的 70% 以上.

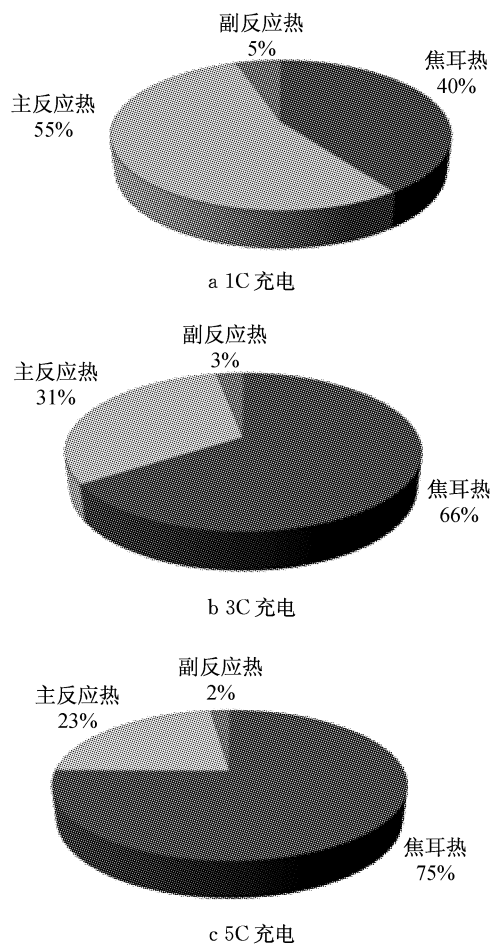


图 9 不同充电倍率下的热量比例组成
Fig.9 Heat ratio percentage under different charging rates

4 结论

文中通过建立镍氢电池热学模型,执行瞬态数值模拟,计算出不同倍率充放电工况下电池表面各个标记点温度随充放电时间的变化趋势,并将计算值与试验测量结果进行了对比,得出结论:(1)电池发热量随充放电电流的增大而增加,而充放电电流

相同时,充电发热量均大于放电时的发热量;(2)在放电工况下, $SOC < 0.9$ 时电池发热量为定值;(3)提高电池充电倍率,焦耳热会相应增加,而主反应热和副反应热则均相应降低。

参考文献:

- [1] 邢树佩,胡立祥,侯岩,等.电动汽车车用电池及其发展[J].山东机械,2004(5):44.
XING Shupei, HU Lixiang, HOU Yan, et al. Electric vehicle car battery and development[J]. Shandong Machinery, 2004(5): 44.
- [2] Masato Nakayama, Kenichi Fukuda, Takuto Araki, et al. Thermal behavior of nickel metal hydride battery during rapid charge and discharge cycles [J]. Electrical Engineering in Japan, 2006(157): 4.
- [3] YANG X G, LIAW B Y. Numerical simulation on fast charging nickel metal hydride traction batteries [J]. Journal of Electrochemical Society, 2004(151): 265.
- [4] Paul Nelson, Dennis Dees, Khalil Amine, et al. Modeling thermal management of Lithium-ion PNGV batteries [J]. Journal of Power Sources, 2002(110): 349.
- [5] SHI Jianzhen, WU Feng. Thermal analysis of rapid charging nickel/metal hydride batteries[J]. Journal of Power Sources, 2006(157): 592.
- [6] LI Dahe, YANG Kai, CHEN Shi, et al. Thermal behavior of overcharged nickel/metal hydride batteries [J]. Journal of Power Sources, 2008(184): 622.
- [7] GU W B, WANG C Y. Modeling discharge and charge characteristics of nickel-metal hydride batteries [J]. Electrochimica Acta, 1999(44): 4525.
- [8] PAN Y H, Srinivasan V, WANG C Y. An experimental and modeling study of isothermal charge/discharge behavior of commercial Ni-Mh cells [J]. Journal of Power Sources, 2002(112): 298.
- [9] WU M S, WANG Y Y, WAN C C. Thermal behavior of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge [J]. Journal of Power Sources, 1998(74): 202.
- [10] 程新群.化学电源[M].北京:化学工业出版社,2008.
CHEN Xinqun. Electrochemical cell [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.