

# 插电式燃料电池车锂电池热管理系统设计

戴海峰<sup>1</sup>, 党丰玲<sup>2</sup>, 朱 维<sup>3</sup>, 魏学哲<sup>1</sup>

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 上海燃料电池动力系统有限公司, 上海 201804;  
3. 上海恒动汽车电源有限公司, 上海 201804)

**摘要:** 采用强制风冷的方案, 对世博燃料电池插电式混合动力微型车 40 A·h 磷酸铁锂动力电池系统进行了热管理的结构设计和性能研究. 详细分析了动力蓄电池的散热需求, 在此基础上, 结合整车布置, 完成了热管理系统的结构设计, 并对设计结果进行了数值模拟. 将设计方案制作成实体样品, 分别在不同的环境温度下, 以一定的电流工况对电池加载, 测试电池系统的温升情况. 最后, 对世博运营过程中具有代表性的两日测试数据进行了分析. 仿真计算结果、测试试验结果以及实车数据分析结果均表明, 设计方案在电池系统温升控制和电池单体温度一致性控制方面都达到了预期的需求.

**关键词:** 插电式混合动力; 磷酸铁锂电池系统; 热管理; 数值模拟; 测试评价

中图分类号: TM912.1

文献标识码: A

## Thermal Management System Design for Li-ion Batteries Used in Plug-in Fuel Cell Vehicles

DAI Hai Feng<sup>1</sup>, DANG Feng Ling<sup>2</sup>, ZHU Wei<sup>3</sup>, WEI Xue Zhe<sup>1</sup>

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Fuel Cell Vehicle Power-train Co. Ltd., Shanghai 201804, China; 3. Shanghai evBattery Co. Ltd., Shanghai 201804, China)

**Abstract:** This paper focuses on the structural design and performance study of the thermal management of 40 Ah LiFePO<sub>4</sub> battery systems for Expo plug-in fuel cell vehicles by using the forced air cooling. Based on a detailed analysis on the thermal requirements of battery, and consideration of the layout of the vehicle, this paper presents a structural design and a simulation of the thermal management system. Then the tests on the temperature rise of the battery system sample based on the structural design were done under certain current cycle in different temperatures. Finally, an analysis was made of a two-day testing data, the most typical of Expo.

Simulation and experiment results and road data analysis indicate that the design meet the expected requirements on temperature-rising control of battery system and the uniformity of cells temperature.

**Key words:** fuel cell plug-in; LiFePO<sub>4</sub> battery; thermal management; numerical simulation; testing and evaluation

在 2010 年上海世博会中, 有超过 1 000 辆新能源汽车服务于交通以实现“园区零排放, 周围低排放”的目标. 其中, 300 辆车为超级电容车和纯电动车, 200 辆为燃料电池车, 其余 500 辆则为包括混合动力车在内的低碳排放车.

动力电池作为电动汽车的主要储能部分, 是电动汽车的关键部件, 直接影响到电动汽车的性能. 电池组热管理系统的研究与开发对现代电动汽车是必需的, 原因在于: ① 电动汽车电池组会长期工作在比较恶劣的热环境中, 这将缩短电池的使用寿命, 降低电池的各种性能; ② 电池箱内温度场长时间的不均匀分布将造成各电池模块、单体性能的不均衡; ③ 电池组的热监控和热管理对整车的安全运行意义重大.

为提高电动汽车电池组的性能, 一方面电池生产商努力开发满足电动汽车使用要求的电池, 另一方面电池的使用者也应该通过优化电池的使用环境保证电池的潜力得到最大程度的发挥. 电池的热管理系统是从电池使用者的角度出发, 用来确保电池组工作在适宜温度范围的整套系统.

实际上, 电池热管理应该包括电池散热(在高温情况下)和电池加热(在低温启动情况下), 目前的大部分热管理方案集中在对电池散热的研究中. 考虑到世博车辆运行在 5 月到 10 月, 在这段时间内环境

收稿日期: 2011-01-19

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展规划(2011CB711202); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20100072120026); 上海市科委“登山行动计划”(09dz2201400); 上海市重点学科建设基金(B03)

第一作者: 戴海峰(1981—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为新能源汽车车载电源系统. E-mail: tongjidai@tongji.edu.cn

温度相对较高,因此,本文研究也集中在对电池散热的方案. 电池热管理系统按照采用的传热介质可以分为:采用空气为介质的热管理系统,采用液体介质的热管理系统和采用相变材料 PCM(phase change material)的热管理系统<sup>[1-3]</sup>.

空气冷却一般指通过风扇从外界环境中吸入(吹入)空气,空气流过电池表面带走热量,达到散热的目的. 这种方案使用方便,安装容易,维护成本低,但散热能力相对较弱. 一般采用液体作为介质的冷却系统比较适用于发热量很多的电池组,且系统结构比较紧凑,对于电池系统的整体降温以及实现单体电池间的温度均匀性都有利;但其整体结构复杂,维护和保养的费用较高,难度较大. 相变材料具有在一定的温度范围内改变物理状态的能力,在这个物相改变过程中,相变材料能够吸收或者释放大量的潜热. 相变储能材料在电池热管理系统中具有降低整个电池系统体积,减小运动部件,不需要模块间的冷却通道,不需要耗费电池额外能量等优势;但是现有较合适的相变材料还存在导热性差,储热速率低等缺点,进而降低整体功能. 在以后随着 PCM 新材料的发现或是新技术的发展,相变材料在电池组热管理方面将得到很好的应用<sup>[4]</sup>.

本文从分析电池的热特性入手,设计并评估了世博插电式燃料电池混合动力车所使用的电池包热管理系统,所使用的单体电池为某公司产的 40A·h LiFePO<sub>4</sub> 电池.

## 1 设计需求和目标

本研究中的电池单体及模块数模如图 1 所示,基本性能参数如表 1. 电池模块由 10 节电池单体串联而成,电池单体之间有塑料隔板(图 1b),电池包由 2 个电池模块串联组成,整车由 2 个电池包串联而成.

表 1 电池基本参数

Tab.1 Primary parameters of the battery cell

基本参数	数值
尺寸/(mm×mm×mm)	32×100×195
额定电压/V	3.2
额定容量/(A·h)	40
内阻/mΩ	≤2
工作温度/℃	充电 0~45 放电 -20~45
贮藏温度/℃	-10~35

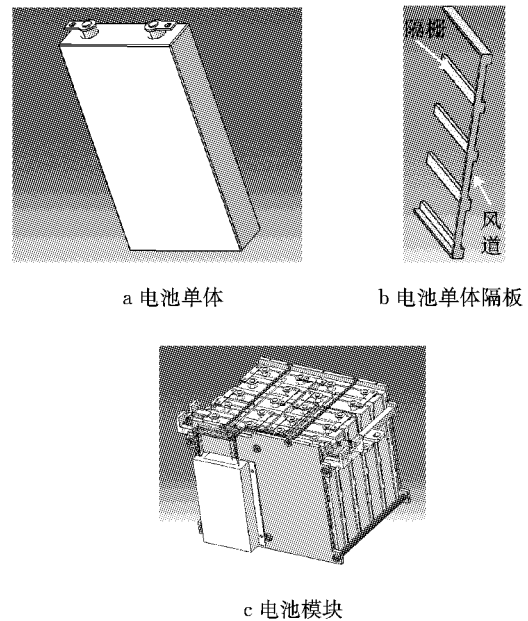


图 1 电池单体与模块数模

Fig.1 3-D data of battery cell and module

### 1.1 热负荷计算

电池单体的发热量计算可按下式计算<sup>[5-6]</sup>:

$$Q = I^2R - IT(dE/dT) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为电池的发热量;  $I$  为电池工作电流;  $R$  为电池内阻;  $T$  为环境温度;  $E$  为电池的电动势.

根据车的实际使用情况,在分析中,设定电池的工作条件为  $I=40$  A,  $T=298.15$  K(即为 25 °C),  $dE/dT$  由电池特性决定,此处  $dE/dT=-0.0005$ .

由式(1)及上述条件,计算电池单体的发热量为 4.478 W,电池包内共有 20 节单体电池,因此,初步估算电池包的发热量为 89.56 W. 电池总的发热面积计算结果为 0.588 m<sup>2</sup>,所以电池发热面的平均发热量约为 200 W·m<sup>-2</sup>.

另外,考虑到夏季地面温度较高,由此带来的地面辐射强度也很强烈,就会造成电池包渗入热有所增加. 本文中把地表辐射能转化为相当的温度形式和电池包外部的大气温度叠加在一起,形成一个综合温度值  $t_t$ ,其中地表辐射能造成的温升为  $\Delta t$ ,则有

$$\Delta t = \epsilon I / (\alpha + k)$$

式中:  $\epsilon$  为地面表面灰度,这里取  $\epsilon=0.8$ ;  $I$  为辐射强度,取值  $I=500$  W·m<sup>2</sup><sup>[7]</sup>;  $\alpha$  为包外空气与电池包外表面的传热系数,由于车速变化范围较大,电池包外表面结构复杂,表面的对流传热系数难以精确计算,因此采用近似经验公式计算,  $\alpha=1.163(4+12\sqrt{v})$ ; 车速  $v=30$  km·h<sup>-1</sup>,因此得出  $\alpha=45.1$  W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>;  $k$  为电池包外壳导热系数,考虑到需要减少渗入热量,电池包的外壳设计外层用聚氨酯

泡沫,其导热系数为  $\lambda_2 = 0.023 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;设计厚度为  $\delta_2 = 25 \text{ mm}$ ;电池包外壳设计内层用钢板,导热系数为  $\lambda_1 = 49.8 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;设计厚度为  $\delta_1 = 0.8 \text{ mm}$ ;因此,电池包外壳导热系数为  $k = 1/(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2) = 0.92 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ,因此得出  $\Delta t = 8.69 \text{ }^\circ\text{C}$ .若电池包尺寸取为  $40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ ,则外界向电池包内部的渗入热约为  $Q_1 = kA\Delta t_1 \approx 9 \text{ W}$ ,其中  $A$  为换热面积.

### 1.2 设计目标

本研究中设计的热管理系统需要同时保证两项温度控制指标:① 根据磷酸电池自身的高温特性,在测试工况和实车运行中,保证电池表面的最高温升不超过  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ ;② 保持电池温度的均匀性,即保证电池单体之间的温差不得超过  $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .对于目标②,这里需要说明一下.图 2 所示为 7 节电池单体在  $40 \text{ A}$  放电过程中的温度变化情况(电池放置在环境舱中,环境舱设定温度为  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ).可见,不同电池单体自身发热量相差并不大,因此,一般只要保证电池单体与空气的换热均匀一致即可满足.并且由于热容较大,电池温升较慢,这一定程度上降低了热管理系统的负荷<sup>[8-11]</sup>.

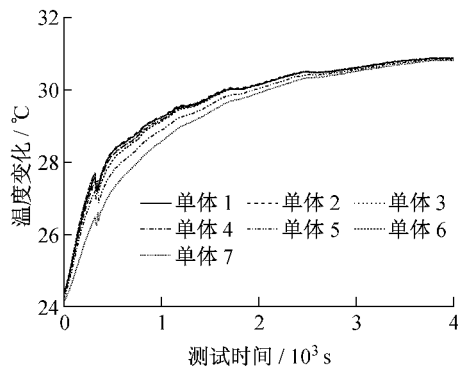


图 2 自然对流下单体电池间的温度差异

Fig.2 Temperature differences among cells under the natural convection condition

## 2 系统方案

### 2.1 冷却介质选择

从前述的发热量计算中可以看出,插电式燃料电池车的电池发热量不大,加之  $40 \text{ A} \cdot \text{h}$  电池自身热容较大,因此,热负荷相对较小,本研究中采用空气作为冷却介质,即采用风冷方案.目前采用空气对电池进行冷却的热管理系统又分为自然对流冷却法和强迫空气对流冷却法.本研究采用强迫空气对流冷却法.对于上述热管理系统温度控制目标①,通过

加大电池和气流之间的对流换热系数来达到,对于控制目标②是通过流场设计保证单体电池与空气的换热量均匀.

### 2.2 结构设计

结合整车布置方案,在前期工作和初步仿真计算的基础上,图 3 和图 4 为本文设计的结构方案,图 3 是风道模型,图 4 是整个电池包的 3 维数模.从图 3 中可以看出,冷却风扇安装在出风口处,通过吸风,将冷却空气吸入电池包内部.冷却空气首先进入一个渐变的内部风道 1(位于电池包内部,渐变角  $4^\circ$ ),然后经由单体电池格栅(图 1b)流经每个单体电池表面,从而将电池产生的热量带走,以达到冷却电池的效果.空气流经电池表面之后,通过渐变的内部风道 2(位于电池包内部,渐变角  $4^\circ$ ),从出风口排出.利用这种方案设计达到上述两个控制目标.

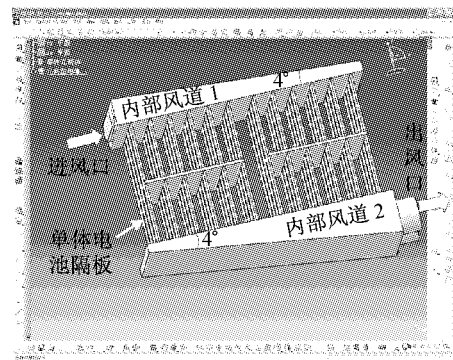


图 3 热管理系统的风道

Fig.3 Wind tunnel of the thermal management system

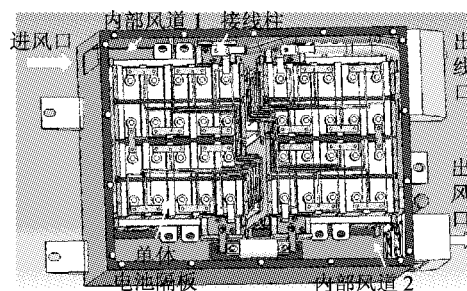


图 4 电池包数模

Fig.4 3-D data of the battery pack

## 3 仿真评估

### 3.1 建模与仿真环境

利用 Catia 软件建立电池包的数模,Ansys Icem CFD 软件对数模进行前处理,画 3 维计算网格.然后导入 Fluent 软件中,选择求解器,边界条件.进行模拟计算,得到其温度场、速度场和压力场的相关数

据. 本模拟选用的求解器为  $k-\epsilon$ , 耦合能量方程进行稳态计算<sup>[12-13]</sup>.

### 3.2 边界条件设定

模拟的边界条件为: 进风口为外界自然大气压力入口, 出风口为抽风冷却风扇, 本研究中风扇的额定功率为 16.8 W, 共使用了 2 个风扇并排放置, 风扇的特性曲线如图 5 所示, 以多项式拟合该特性曲线, 如下式:

$$p = -0.1003v^4 + 1.978v^3 - 9.9455v^2 - 36.077v + 535.59 \quad (3)$$

式中:  $p$  为压力, Pa;  $v$  为空气流速,  $m \cdot s^{-1}$ .

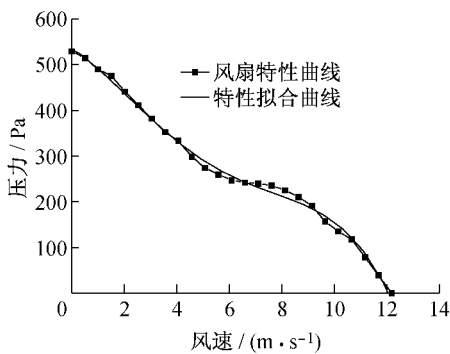


图 5 风扇特性曲线

Fig.5 Characteristics of the cooling fan

### 3.3 网格画分

计算前处理时, 对电池包划分的网格如图 6 所示. 本研究中, 网格类型为四面体(最小边长为 2 mm), 划分的网格数约为 36 万.

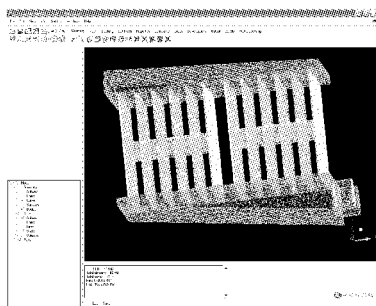


图 6 电池包网格划分

Fig.6 Mesh generation of the battery pack

### 3.4 计算结果及分析

#### 3.4.1 压力场分布情况

计算出的压力场分布如图 7 所示. 压力值从进气侧开始, 取平均值计算. 取 10 个点, 分布如图 7 中圆圈所示, 从进气侧开始, 依次为点 1, 2, ..., 10, 排气侧与之相同, 求两侧的压力差, 压力差的分布如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 各比较处的压差分布比较一致, 但 2, 5, 6 这 3 个部分依然超出平均值约 15%. 一

方面这是由于计算精度导致, 另一方面这可能确实是本系统设计的一个缺陷, 然而这可以通过结构调整进行改进, 并且实际测试结果表明, 这种压力差的分布影响可以接受.

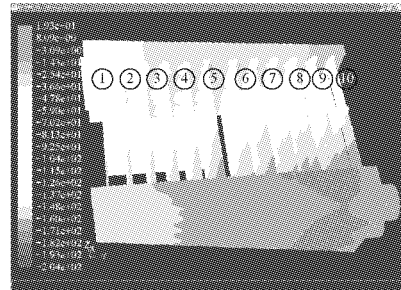


图 7 电池包内部压力场分布

Fig.7 Inner pressure distribution of the battery pack

需要注意的是, 图 8 中的纵坐标单位是 Pa, 这是因为该计算所得压力差是相对标准大气压的值, 即是减去标准大气压后得到的结果.

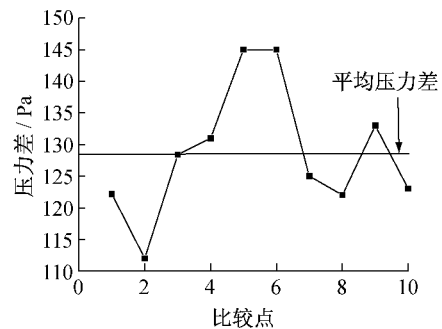


图 8 电池包内部压力差分布

Fig.8 Distribution of inner pressure difference of the battery pack

#### 3.4.2 速度场分布情况

如模型所标记的, 速度值从进气侧开始, 取平均值计算. 取 12 个点, 分布如图 9 中圆圈所示, 从进气侧开始, 依次为点 1, 2, ..., 12. 从图 9 中可以看出, 在整个电池包内部, 流经各单体电池的空气流速比较均匀, 也说明了电池内部单体电池间温度可以保持较好的一致性.

#### 3.4.3 温度场分布情况

电池包内部的温度场分布如图 10 所示. 可以看出, 整个电池包的最高温升在 8 °C 左右, 并且电池包内部各单体之间的温差也较小. 图中 A 内的温度相对较高, 这主要是由于流过此处的空气风速较低, 因此, 冷却能力稍显不足. 这是此种类型冷却方案的弊端之一. 但由于只是很小的局部, 因此, 对电池包整体性能的影响不大.

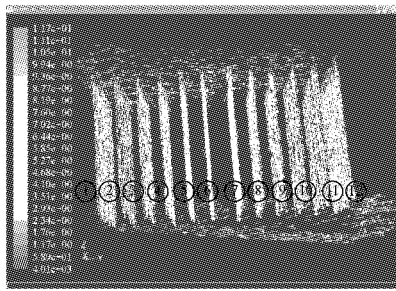


图 9 电池包内部风速分布

Fig.9 Inner air speed distribution of the battery pack

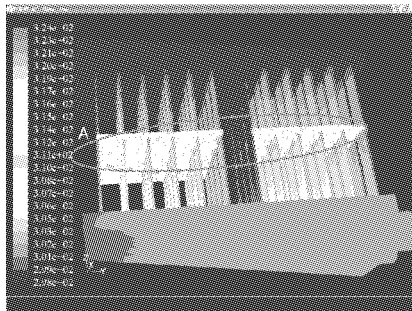


图 10 电池包内部温度场分布

Fig.10 Inner temperature distribution of the battery pack

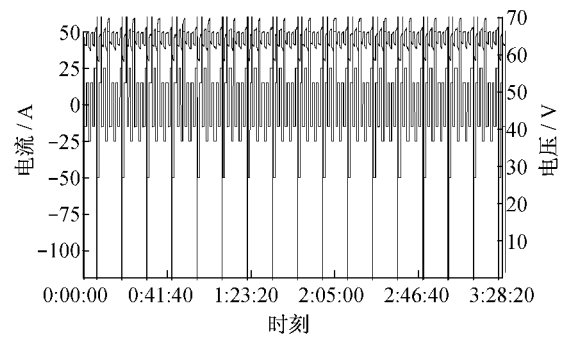


图 11 电池包加载电流工况

Fig.11 Voltage and current profiles of the battery pack under test

C1	C2	C3	C4	C5	C11	C12	C13	C14	C15
T6	-	T5	-	T4	T3	-	T2	-	T1
T18				T17			T16		
电池模块 1					电池模块 2				
T2	-	T11	-	T10	T9	-	T8	-	T7
		T13			T14				T15
C6	C7	C8	C9	C10	C16	C17	C18	C19	C20

图 12 温度测点布置图

Fig.12 Locations of the temperature sensors

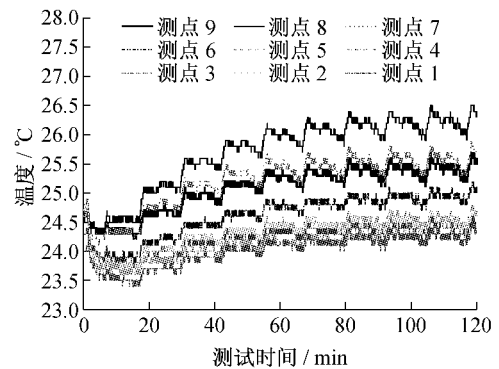
## 4 试验验证

### 4.1 试验工况和条件

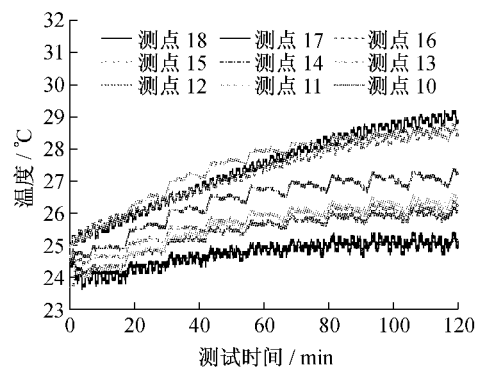
将电池包分别放置在设定为不同温度的环境舱中(Espec SETH-Z-040L),环境温度分别设定为 25, 35 和 42 °C,以考察热管理系统在不同环境温度下对电池包的温度控制能力.对电池包施加如图 11 所示的工况,并在电池包内部各单体电池上布置温度测点.图 12 为电池内部模块和温度测点布置的示意图. C<sub>x</sub> 表示第 x 个电池单体, T<sub>x</sub> 表示第 x 个温度测点.在单体 1,3,5,8,13,15,16 和 20 两侧分别布置了两个温度测点,一个测点靠近图 10 中的 A 部分,另一个测点靠近风道.

### 4.2 测试结果与分析

在上述试验工况和设定条件下,电池包在 25,33 和 41 °C 这 3 个设定的环境温度下温度的变化如图 13—15 所示.由于比较注重电池系统的高温问题,因此 41 °C 的环境温度下的测试时间稍长,约为 200 min.需要注意的是,在这些实验结果图中,由于实验初始电池并未在环境温度下静置足够长的时间,尚未达到热平衡,因此,电池各单体的初始温度并不一致,由此造成的初始影响应该在后面的分析中去除.



a 测点 1—9 处的温度



b 测点 10—18 处的温度

图 13 在环境温度 25 °C 下的测试结果

Fig.13 Testing results under 25 °C ambient temperature

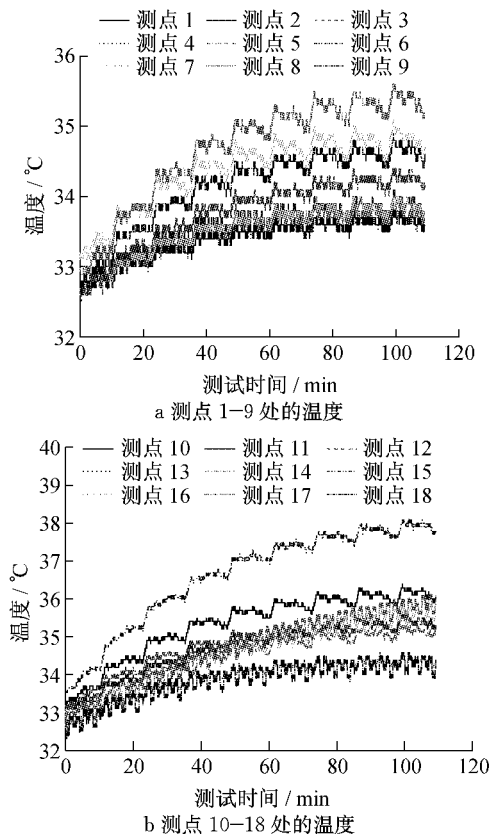


图14 在环境温度33 °C下的测试结果

Fig. 14 Testing results under 33 °C ambient temperature

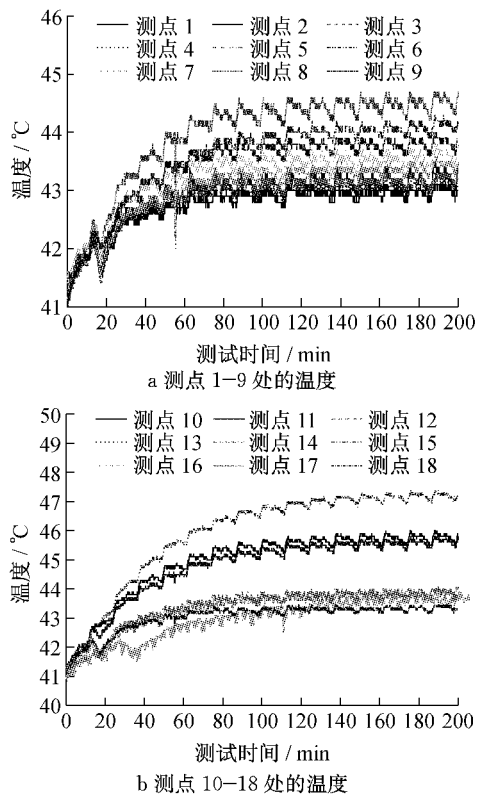


图15 在环境温度41 °C下的测试结果

Fig. 15 Testing results under 41 °C ambient temperature

由测试结果可见,随着电池的充放电过程,电池

表面的温度变化比较明显.同时可以看出,测点10, 11, 8和13处的温度比其他测点处要高,这与前面的仿真结果相对应.这些测点都位于出风口一侧,这是由于空气在经过入风口一侧的电池后,温度上升,导致与电池表面的换热系数降低,从而导致换热效果变差.在测试条件下,电池包内部各单体的温升在120 min左右开始上升变慢,电池进入热平衡状态.

同时还可以看出,在24和33 °C的测试条件下,电池包内部的整体温升均小于5 °C,各电池单体间温差也小于3.5 °C.因此在这两种测试条件下,热管理满足设计要求.在41 °C的测试条件下,电池包内部的整体温升最大约为6~7 °C,而单体间的温差也略大,且略高于设计要求,为3.9 °C.

考虑到插电式燃料电池车的实际工作条件,电流工况不如设计的测试电流工况剧烈,因此,电池包内部的温升以及各单体的温差均应小于测试条件下的值.即实际使用中,设计的热管理系统能满足需求.

## 5 实车运行数据分析

图16和图17为该插电式燃料电池车在世博园区运营过程中的某两天的实测数据.可见在实际运营的过程中,车辆的电流工况不如测试实验中设定的电流工况剧烈,因此,温升较测试实验结果要小.

图16和图17分别是2010年5月和8月份某日的运营数据,之所以选择这两日的数据是基于以下因素:第一次,电池相对较新,内阻较小,充放电效率较高,并且环境温度也相对较低;第二次,电池已经使用了几个月,性能有一定的衰减,而且环境温度相对较高.选择这两日的数据可以在电池不同性能状态、不同环境温度下考察热管理系统的性能.

图16所示的运营中,当天的环境温度约为24 °C,运营过程中电池包内部的单体最高和最低温度如图16a所示,可见整个运营过程中电池包的温升最大约为3 °C,并且单体间的最高最低温差小于2 °C.图17所示的运营当天环境温度为37 °C,同样可见,热管理系统较好地控制了电池包内部的环境变化.图16和图17中,温度之所以每0.5 °C变化是因为电池包内实际安装的温度传感器精度仅达到±0.5 °C.尽管电流工况比实验测试工况缓和,在8月份的测试数据中,仍然可以看到电池温升变化较大.这主要是由于电池老化导致的.电池老化一方面导致电池内阻变大,另一方面导致充放电效率变低,

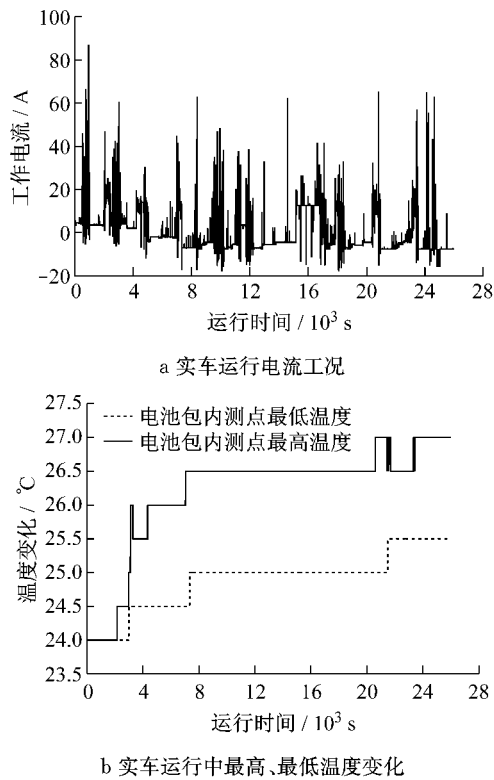


图 16 2010年5月某日的运行数据

Fig. 16 Running data on a day of May, 2010

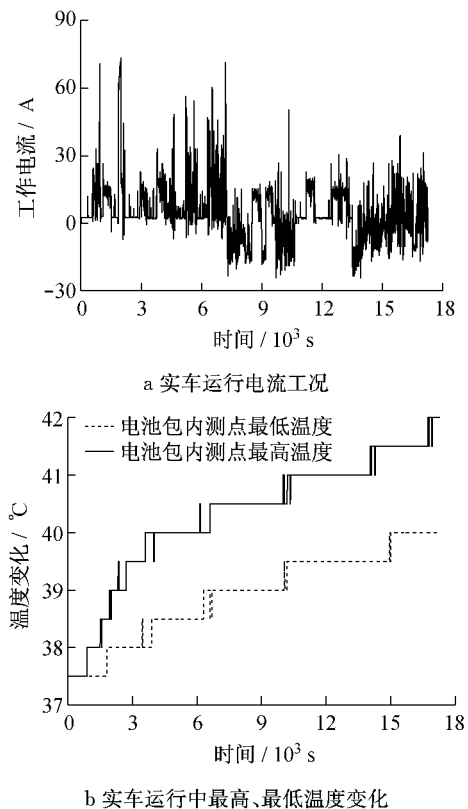


图 17 2010年8月某日的运行数据

Fig. 17 Running data on a day of August, 2010

方案依然可以基本满足使用需求。

## 6 结论

(1) 合理设计电池系统的流场,配合冷却风扇控制,可以有效地控制电池系统的温升和电池单体间的温度差异,更好地发挥电池性能。

(2) 设计的电池系统在测试工况以及实车运行过程中,最高温升均 $<7^{\circ}\text{C}$ ,电池单体之间的最大温差 $<4^{\circ}\text{C}$ ,电池系统内部各单体之间,温度最高点靠近风道2(出风道),电池温度分布符合使用需求。

(3) 随着电池的老化以及环境温度的升高,电池热管理系统的负荷会增加,当电池系统处于某些极限工况的情况下,热管理系统可能难以控制电池系统的温升和温度一致性,此时,可以通过增大风扇功率(改善温升情况)和改善电池包的流场设计(改善温度场分布)解决,同时,可以考虑从车内引入空调制冷风(或其他冷源来改善温升情况)来提高制冷的效果。

## 参考文献:

- [1] Pesaran A. Battery thermal management in EVs and HEVs: issues and solutions [EB/OL]. [2006-12-20]. [http://www.nrel.gov/vehicleandfuels/energystorage/pdfs/aabc\\_lv.Pdf](http://www.nrel.gov/vehicleandfuels/energystorage/pdfs/aabc_lv.Pdf).
- [2] 齐晓霞,王文,邵力清. 混合动力电动车用电源热管理的技术现状[J]. 电源技术, 2005, 29(3): 178.  
QI Xiaoxia, WANG Wen, SHAO Liqing. Battery cooling issues and solutions in HEVs [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2005, 29(3): 178.
- [3] 付正阳,林成涛,陈全世. 电动汽车电池组的热管理系统的核心技术[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 119.  
FU Zhengyang, LIN Chengtao, CHEN Quanshi. Key Technologies of Thermal Management System for EV Battery Packs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 119.
- [4] Khateeb S A, Amiruddin S, Farid M, et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters; experimental validation [J]. Journal of Power Sources, 2005(142): 345.
- [5] 朱冰. 电动汽车用磷酸铁锂电池组热管理技术研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2010.  
ZHU Bing. The research of thermal management technology for electric vehicle Li-ion battery pack [D]. Shanghai: Tongji University. College of Automotive studies, 2010.
- [6] 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: 535.

(下转第 609 页)

因此,产生的热量较新电池要多.但即便如此,设计