

文章编号:1000-582X(2009)04-0415-05

混合动力汽车用镍氢电池的散热结构分析

杨亚联,张 昕,李隆键,秦大同,胡明辉

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要:以混合动力车用镍氢电池为研究对象,利用计算流体力学分析软件对现有电池组的散热结构进行了流场和温度场的仿真分析,研究结果表明现有电池组的温度场均匀性较差。通过调整挡板及电池的位置、改变电池倾斜角度和电池的间距、施加挡风结构、包覆保温层等方法改善了电池组冷却气流分布和电池组温度场均匀性,其中包覆保温层的效果最好。为混合动力车用镍氢电池热管理的设计提供了依据。

关键词:混合动力汽车;镍氢电池;散热结构;温度场

中图分类号:TH132.46

文献标志码:A

The cooling structure of Ni-MH batteries in hybrid-electric vehicles

YANG Ya-lian, ZHANG Xin, LI Long-jian, QIN Da-tong, HU Ming-hui

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Focusing on Ni-MH batteries used in hybrid-electric vehicles (HEV), a simulation analysis of the flow and temperature fields of the cooling structure in existing batteries is carried out using computational fluid dynamics software. The results show that the temperature uniformity is poor. The uniformity of the flow and the temperature fields is improved by adjusting the baffle and battery positions, changing the tilt angle and the distance between the batteries, inserting wind plates and a coating insulation layer. The coating insulation layer achieves the best effect. Further simulation shows that the coating insulation layer method has the best effects. The results provide the design basis for thermal management program of Ni-MH batteries in HEV.

Key words: hybrid electric vehicle; Ni-MH battery; cooling structure; temperature field

日益严重的能源与环境压力使传统内燃机汽车的发展面临着严峻的挑战,环保节能汽车的开发已成为世界范围内各国政府和各大汽车公司关注和研究的焦点。其中混合动力车(hybrid electric vehicle, HEV)是具有重要商业开发价值的节能环保汽车。

电池作为 HEV 的主要储能元件,对 HEV 的性能有直接影响。动力镍氢电池以其比能量高、比功率高、循环寿命长、环境污染小、安全性高等优点,成为 HEV 车用的首选电源。但镍氢电池性能受温度

的影响较大,电池组中温度分布不一致,各单体电池的容量和充放电性能也不一致。在整组电池充电时,容量低的电池早已充满,很容易产生过充;相应地,在放电过程中,这部分电池也容易过放;在经过若干次充放电过程之后,各单体电池间的性能差异越来越大,造成恶性循环:电池性能下降,可充入的电量减少,发热更加严重,减小了安全性和寿命^[1-5]。由于电池组中单体电池是互相串联的,任何一只电池性能下降都会影响电池组的整体表现。温差为

收稿日期:2008-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50305037);重庆市自然科学基金资助项目(2006BB3195);重庆市科技攻关重大专项资助项目(2006AA6006)

作者简介:杨亚联(1972-),男,重庆大学副研究员,主要从事车辆动力传动与控制方向的研究,(E-mail)yyl@cqu.edu.cn。欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

5、10、15℃时,相同充电条件下电池组的荷电态分别下降10%、15%、20%^[6-7]。

因此设计良好的散热结构,对于电池组温度场均匀分布,对保障电池的使用性能和可靠性具有重要作用。

1 镍氢电池组电池结构

研究对象为一款 HEV 车用镍氢电池组,整组电池包括 24 个由圆柱型镍氢电池构成的模块,每个模块由 5 个单体电池构成。左边为进风口,右边为出风口,出风口采用轴流式风机抽风。整块电池结构如图 1 所示。

在对该镍氢电池组的使用和试验的过程中,发现该电池组散热不均匀,电池性能显著下降,可充入电量减小 10%,且在 80% 的放电深度下,只有 1 000 次循环寿命,在 45℃ 条件下工作时,循环次数减小近 60%。在高倍率充电时,每 5℃ 的温升会导致电池寿命减半。严重影响了电池组的使用性能和可靠性。笔者根据混合动力车安装的要求,在不改变该电池组外观尺寸和安装方式的前提下,对电池组的散热结构进行了优化设计。

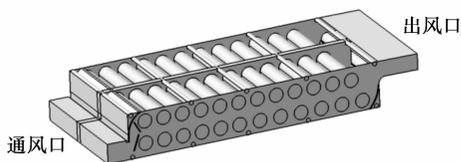
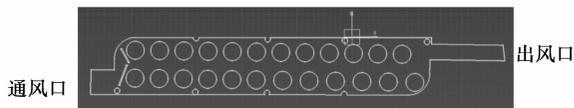


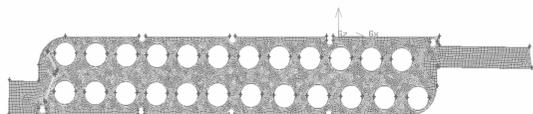
图 1 镍氢动力电池组结构图

2 温度场计算模型的建立

由于电池的结构具有对称性,笔者采用二维基面分析方法来进行仿真分析。在 CATIA 中,对电池组在其纵向对称面上投影,获得仿真分析所用的二维结构。如图 2 所示,挡风板处为进风口。



(a) 现有电池组的二维结构



(b) 现有电池组的网格模型

图 2 电池组模型的建立

围流场进行分析。根据 CFD 基本原理,把电池区域分为流体和固体区域,空气流过的区域为流体区域,电池壁厚为固体区域。对不同的区域划分网格^[8-9]。如图 2(b) 所示。

由于风道内的气体流动是通过轴流式风机的抽吸作用形成的,根据风机的参数,得出压差为 230 Pa。固体区域的材料为低碳钢,表面镀镍,流体为 40℃ 的空气。因为电池在充放电过程中会产生大量的热,为了获得良好的电池散热结构,以极限工况时的电池组发热功率 1 750 W 来计算^[10-13]。电池的发热表面积为 0.672 m²,根据传热学公式,计算出单个模块的热流密度为 2 605.46 W/m²。

在 fluent 软件中进行仿真计算,由于标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型能提供流动的真实情况,尤其适合于计算通道中的湍流流动,计算时采用该模型。

3 散热结构的设计与分析

3.1 现有结构的温度场分析

在 fluent 软件中,对现有散热结构模型进行了发热功率为 1 750 W 时的速度场和温度场的数值模拟,如图 3 所示。

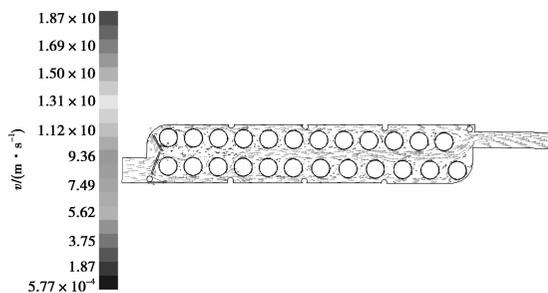


图 3 现有方案速度矢量图

在进出口压力一定情况下,电池组内压力场和速度场一定;电池进口处由于挡板作用,局部速度较大。进入风道后,各个电池、支撑杆起到分流作用,使气流较均匀地流过电池表面,对电池起均匀散热作用。但气流由进口水平流向出口,近似于串联式冷却。气流逐步加热,温度逐渐升高,散热均匀性差,极端工况下最大温度与最小温度温差达到 33 K,如表 1 所示,出口附近电池温度明显高于入口附近电池温度。

表 1 现有散热结构温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{\max}	370.78	355.92	14.86	0.04	0.96
T_{\min}	337.50	355.92	-18.42	0.05	0.95

说明:温度表示为 T ;平均值表示为 t ;温差表示为 $T-t$;不

均匀度表示为 $\frac{|T-t|}{t}$;均匀度表示为 $1-\frac{|T-t|}{t}$ (后面涉及到

要知道电池表面温度分布情况,就要对电池周

3.2 调整挡板及电池的位置的方案

为了改进电池组的温度均匀性,调整了挡板的位置以及电池的位置,具体修改尺寸如下:上下挡板下端都缩短 3 mm,电池波浪形排开,高出的电池为向上提高 10 mm。图 4 是该方案发热功率为 1 750 W 时的速度矢量图。

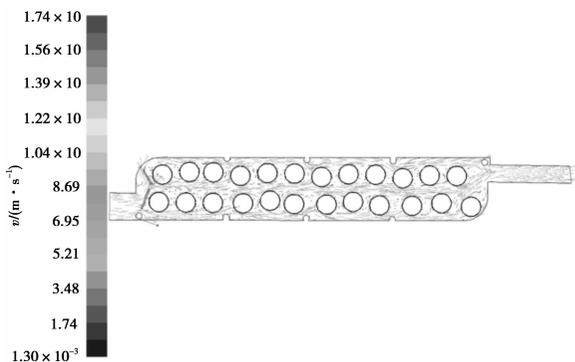


图 4 调整挡板位置方案速度矢量图

极端工况下,系统温度不均匀度达到了 28 K,如表 2 所示。

表 2 调整挡板位置方案温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{max}	365.13	352.11	13.02	0.04	0.96
T_{min}	336.91	352.11	-15.21	0.04	0.96

图 5 为该方案的另一优化模型,发热功率为 1 750 W 时的速度矢量图。具体方案为:去掉上挡板,下挡板下端缩短 3 mm,电池错排开。

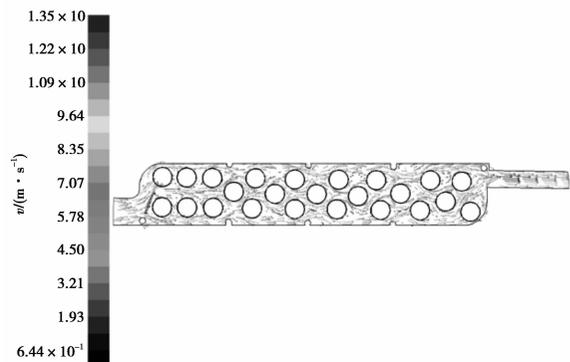


图 5 调整电池位置方案速度矢量图

极端工况下,系统温度不均匀度达到了 19 K,如表 3 所示。

表 3 调整电池位置方案温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{max}	358.83	348.32	10.50	0.03	0.97
T_{min}	338.98	348.32	-9.34	0.03	0.97

通过上述结果的分析,发现温度场均匀性改进有限。这是由于串联冷却路径长,所以无论怎么微调电池和挡板的位置,都会出现散热不均匀的情况。

3.3 改变电池倾斜角度和电池间距方案

为了减少电池之间温差,考虑将空气从进口到出口的水平流动改变为从两排电池一侧到另一侧的垂直流动。把电池流道分为上行流道和下行流道,尽可能使空气通过下行流道垂直流向上行流道,再从出口流出,这样,空气就能从电池一侧流向另一侧,空气冷却途径变短,避免了串联冷却路径长导致的空气温度逐步加热,使得温度场不均匀的状况。要使空气均匀地从下行通道流向上行通道,需要找出一个合理的电池间距和一个合适的倾角;使电池组内流阻分布合理,使流场分布均匀;从而达到减小电池温差的目的。优化模型电池中心线与箱体的倾斜角度为 3.5° ,两排电池的距离为 30 mm。图 6 是发热功率为 1 750 W 时的速度矢量图。

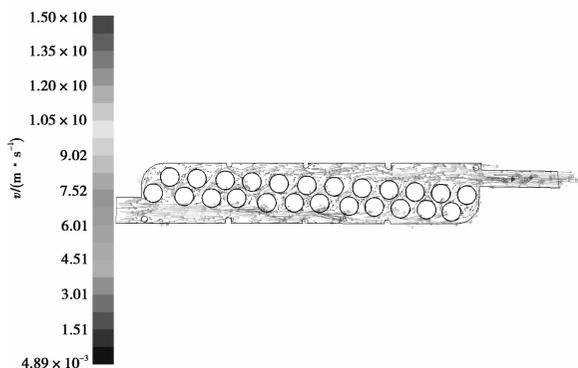


图 6 改变电池倾斜角度和电池间距方案速度矢量图

如图 6 所示,极端工况下电池组的温差达到 15 K,如表 4 所示温度的均匀性有了明显的改善。但该方案中电池位置的微调对最高温度、最低温度位置敏感性较大。

表 4 改变倾斜角度和间距方案温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{max}	358.69	350.36	8.34	0.02	0.98
T_{min}	343.47	350.36	-6.89	0.02	0.98

3.4 增加挡风结构的方案

在不改变电池组结构的情况下,为了使电池表面的温度分布趋于一致,通过加挡风结构来改变空气的流场,该方案根据计算的流场结果来调节挡风结构的位置和大小,从而改善电池组的温度均匀性。优化模型采用了圆弧形引流板、长条形引流板和菱形引流板,起到引流和散热均匀的目的。图 7 是发

热功率为 1 750 W 时的速度矢量图。

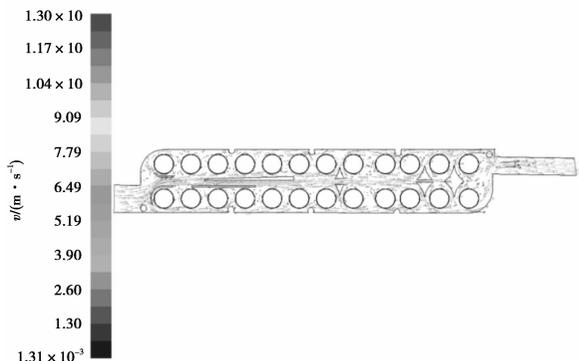


图 7 增加挡风结构方案的速度矢量图

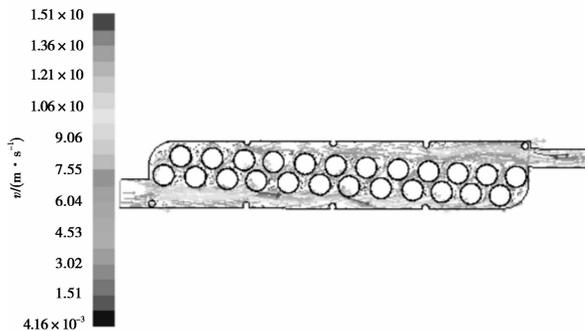


图 9 包覆保温层方案速度矢量图

极端工况下电池组的温差约为 12 K,如表 5 所示温度场的均匀性有了较大的改善。但该方案增加挡风结构,流阻增大,使得压力损失增大,流速减小,增加了电池组的整体温升。

表 5 增加挡风结构方案温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{max}	367.41	361.71	5.71	0.02	0.98
T_{min}	355.86	361.71	-5.85	0.02	0.98

3.5 增加包覆保温层的方案

为了保证电池表面温度的均匀性,在温度低散热效果好的电池表面增加热阻,减少换热,提高局部电池温度,改善整个电池组的温度均匀性。

施加热阻保温材料的物性参数如下:导热系数 $\lambda=0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;密度 $\rho=2\ 320 \text{ kg}/\text{m}^3$;比热容 $c_p=1\ 138 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对方案二中的模型包覆热阻参照方案四,每个电池增加热阻厚度情况如图 8(厚度单位为 mm)。

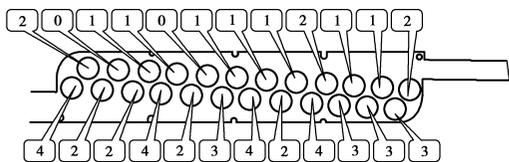


图 8 包覆保温层方案每个电池模块包覆热阻的厚度

图 9 是发热功率为 1 750 W 时的施加热阻模型的速度矢量图,极端工况下最高温度与最低温度之差为 5 K,如表 6 所示温度均匀性有了较大的改善,达到了温度均匀性控制的要求。

表 6 包覆保温层方案温度不均匀度计算表

极限温度	温度/K	平均值/K	温差/K	不均匀度	均匀度
T_{max}	364.87	362.08	2.79	0.01	0.99
T_{min}	359.17	362.08	-2.92	0.01	0.99

4 温度场试验测试

为了评价 HEV 样车用镍氢动力电池箱内散热结构形式是否合理和验证仿真结果的正确性与可靠性,在整车行驶状态下,对 HEV 原有车用镍氢动力电池进行了温度场试验^[14]。试验结果如图 10 所示,可知电池组进出风口温差约 10 K,温度较不均匀。

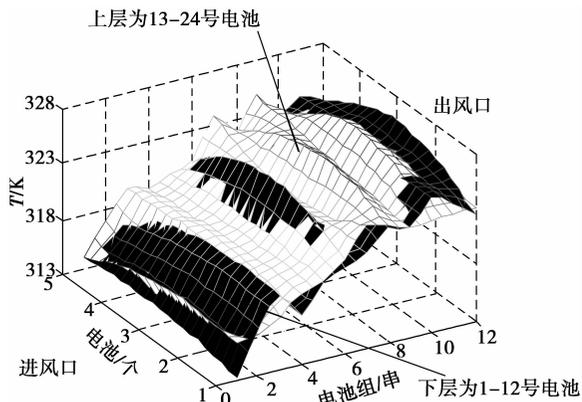


图 10 镍氢电池车载试验结果分析

1 号电池对应进风口位置以及挡板位置,13 号电池对应电池的出风口,顺序依次排序。如图 11 所示,

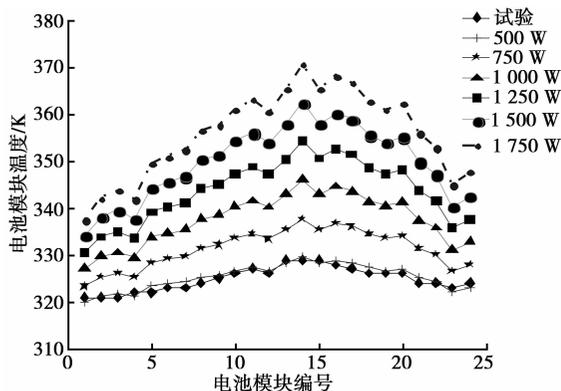


图 11 仿真分析结果与试验数据处理结果的评价

比较了试验中平均持续发热功率下和6种稳态仿真工况下,24个电池模块的温度分布情况。试验与仿真结果对比发现:试验和仿真的温度分布趋势,基本一致。试验中的平均持续发热功率与仿真中发热功率为500W时的仿真结果基本吻合,仿真中使用的持续750W及以上的发热功率在实际中就已经很少出现,试验验证了仿真计算的准确性和可靠性。

5 结论

一个好的HEV车用镍氢电池的散热结构,可以明显改善电池间的温度不均匀性和温升^[15]。通过对散热结构的几种改进方案,可以看出:

1)原有电池散热结构的速度场和温度场分布都不均匀。在极限工况1750W时,温差为33.3℃,整体温度不均匀度为9.34%。通过改进设计散热结构,温度场的均匀性有了较大的提高。

2)调整挡板及电池的位置,在1750W时,2个优化模型的温差减小到28.22和19.84℃,电池组内温度分布不均匀度降低了14.2%和39.1%左右,温度场均匀性得到改进程度较小。串联方式冷却,气体从进风口流经出风口,由于冷却路径长,在冷却电池的过程中自身温度不断升高,严重影响了电池的散热效果。所以无论怎么微调电池和挡板的位置,都会出现散热不均匀的情况,改进程度较小。

3)改变电池布置倾斜角度和电池的间距,在极限工况1750W时,优化模型的温差减小到15.2℃,电池组内温度分布不均匀度降低了53.5%,温度场的均匀性有了较大的改善。但该方案中电池位置的微调对最高温度、最低温度位置敏感性较大。

4)给电池施加恰当的挡风结构,在极限工况1750W时,优化模型的温差减小到11.6℃,电池组内温度分布不均匀度降低了65.84%,温度场的均匀性有很大的改善,但该方案增加挡风结构,流阻增大,使得压力损失加大,流速减小,增加了电池组的整体温升。

5)增加包覆保温层,在极限工况1750W时,温差减小到5.7℃,电池组内温度分布不均匀度降低了83.2%。温度场的均匀性有了明显的改善。极端工况下电池组的温差不大于6℃,方案较合理,能够满足电池温度均匀性控制要求。

参考文献:

- [1] ALAQUI C, SALAMEH Z M. A novel thermal management for electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 468-476.
- [2] STUART T A, HANDE A. HEV battery heating using AC currents[J]. Journal of Power Sources, 2004, 129(2): 368-378.
- [3] AHMAD PESARAN. Improving battery design with electro-thermal modeling[R]. California: NREL Report, 2005.

- [4] BHARATHAN D, PESARAN A, VLAHINOS A. An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles [C] // 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-9 Sept. 2005, Vienna, Austria. Austria: IEEE, 2005: 8.
- [5] KHATEEB S A, AMIRUDDIN S, FARID M. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters; experimental validation[J]. Journal of Power Sources, 2005, 142(1/2): 345-352.
- [6] ARAKI T, NAKAYAMA M, FUKUDA K, et al. Thermal behavior of small nickel metal hydride battery during rapid charge and discharge cycles[J]. Electrochemical Society, 2005, 152(6): A1128-A1135.
- [7] BELT J R, HO C D, MILLER T J. The effect of temperature on capacity and power in cycled lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 142(1/2): 354-360.
- [8] ANDREW M, SAID A. Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2005, 141(2): 307-315.
- [9] SOMOGYE R. An aging model of Ni-MH batteries for use in hybrid-electric vehicles[D]. Columbus: The Ohio State University, 2004.
- [10] 孙逢春, 陈勇, 何洪文, 等. 镍氢电池充放电终止指标的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 11(1): 56-60.
SUN FENG-CHUN, CHEN YONG, HE HONG-WEN, et al. Experiment study on the ending criteria of charge and discharge of nickel-hydride battery[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(1): 56-60.
- [11] 曾佳. 混合动力镍氢电池的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机械工程学院, 2006: 3-11.
- [12] 齐晓霞, 王文, 邵力清. 混合动力电车用电源热管理技术现状[J]. 电源技术, 2005, 29(3): 178-181.
QI XIAO-XIA, WANG WEN, SHAO LI-QING. Battery cooling issues and solutions in HEV[J]. Power Technology, 2005, 29(3): 178-181.
- [13] 胡明辉, 秦大同, 石万凯, 等. 混合动力汽车 Ni-MH 电池组温度场研究[J]. 汽车工程, 2007, 22(4): 38-41.
HU MING-HUI, QIN DA-TONG, SHI WAN-KAI, et al. A study on temperature field of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2007, 22(4): 38-41.
- [14] 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.
FU ZHENG-YANG, LIN CHENG-TAO, CHEN QUAN-SHI. Key technologies of thermal management system for EV battery packs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 119-123.
- [15] 徐顺余, 高海鸥, 邱国茂, 等. 混合动力汽车车用镍氢动力电池分析[J]. 上海汽车, 2006(2): 7-9.
XU SHUN-YU, GAO HAI-OU, QIU GUO-MAO, et al. A study on Ni-MH batteries for hybrid electric vehicle[J]. Shanghai Automobile, 2006(2): 7-9.