

数值模拟铅蓄电池在 SFUDS 循环下的行为

叶芳¹ 苑中显¹ 马重芳¹ 肖劲松¹ Wang C Y²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022;

2. The Pennsylvania State University, Univ. Park, USA PA 16802)

摘要 本文应用传热传质理论, 提供了一种用于模拟电动汽车用铅酸蓄电池工作的计算机数值计算方法。该数值方法采用高级计算流体动力学技术, 结合铅酸蓄电池内部的电化学反应和传质过程进行计算, 可用于预测电动汽车用铅酸蓄电池在 SFUDS 循环下的非稳态行为, 如酸浓度, 电极的多孔率, 活性物质利用率, 以及电池在放电、休息、充电的循环过程中的充电状态等各种性能。模拟结果显示电池的负极有 50% 的活性物质未充分利用。

关键词 铅蓄电池; 数值模拟; 传质

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2001)Suppl.-0074-03

NUMERICAL SIMULATION FOR THE BEHAVIOR IN SFUDS PROFILE OF LEAD-ACID BATTERIES

YE Fang¹ YUAN Zhong-Xian¹ MA Chong-Fang¹

XIAO Jin-Song¹ WANG C Y

(1. School of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022;

2. The Pennsylvania State University, Univ. Park, USA PA 16802, China)

Abstract A numerical simulation approach is presented to evaluation lead-acid batteries for electric vehicle (EV) applications. The numerical model is created using an advanced computational fluid dynamics (CFD) technique, combines the electrochemistry process and mass transfer in the lead-acid battery. It is developed to predict transient behaviors in SFUDS profile of EV lead-acid batteries: the acid concentration, the porosity of the electrode, the active material utilization, and the state of charge of the battery during discharge, rest, charge cycles, etc. The computer simulations reveal that the studied lead-acid battery underutilizes the active material by as much as 50%.

Key words lead-acid batteries; numerical simulation; mass transfer

1 前言

在新的世纪, 人们越来越重视环境保护。在城镇地区, 汽车尾气成为大气污染的主要原因之一, 因此提高大气质量的一个重要途径是将传统的内燃机汽车替换为使用清洁能源——电能的电动汽车。这种替换的一个关键是动汽电池技术的发展。

为评价电动汽车用电池的性能, 需要进行充、放电测试, 极其费时, 成本极高。在电动汽车行业, 有许多测试系统直接测试电池性能, 如基于比功率的

SFUDS (the Simplified Federal Urban Driving Schedule) 循环, 需要尖端设备才能进行实验。

为了超越测试电动汽车电池性能实验中的种种限制, 随着计算机技术的发展, 人们正将数值模拟技术应用到电池测试中^[1~4]。本文提出的铅酸电池的数值模拟方法, 应用了高级计算流体动力学技术和传热传质理论, 结合了实验测试提供的电池性能参数, 对一个铅酸电池在 SFUDS 循环下的工作过程进行模拟, 得到电池的性能分布曲线, 从而可为该电池的进一步的改进和发展提供详尽的信息。

收稿日期: 2001-03-06; 修订日期: 2001-05-10

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No.3992002)

作者简介: 叶芳 (1973-), 女, 浙江江山人, 讲师, 1998 年西安交通大学硕士毕业, 主要从事传热及流动过程的数值模拟技术的研究。

2 数值模拟模型

2.1 电池模型

一个电动汽车用铅酸蓄电池组 (Batteries) 一般是由单个电池 (Cell) 串联和并联而成, 才能满足电动汽车对电压和电量的要求。因此蓄电池的性能实际上决定于单个电池的电化学和传质性能。单个电池由正极板, 电池槽, 多孔隔板, 负极板组成, 其结构示意图见图 1。由于电池的正负极板和隔板都是多孔结构, 电极的孔隙率将是重要的参数。

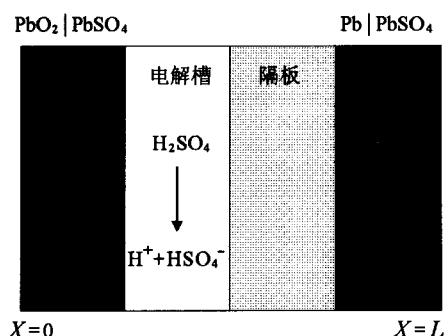
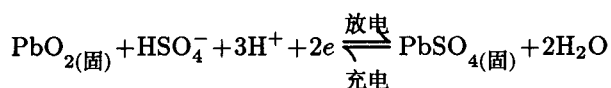


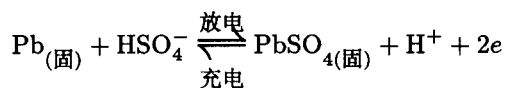
图 1 单个电池 (Cell) 模型

电极上的电化学反应式为:

PbO₂ 电极 (正极):



Pb 电极 (负极):



可以看到, 在铅酸电池中, 无论正极或负极都是放电时消耗酸, 生成水, 充电时又消耗水生成酸, 因此酸的消耗通常成为电池放电的限制因素。酸能否从电池槽或隔板顺利流入多孔电极是电池性能好坏的关键之一。另外也可看到, 放电时, 正极和负极上 PbO₂ 和 Pb 分别都变成 PbSO₄, 由于 PbSO₄ 的摩尔体积比 PbO₂ 和 Pb 的摩尔体积都大, 所以电极的孔隙变小, 这将改变电极的孔隙率; 充电时则相反。

2.2 数值技术

我们应用计算流体动力学技术进行铅酸电池的内部过程的数值模拟计算, 方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma \Delta \Phi) + S$$

非稳态项 对流项 扩散项 源项

其中 Φ 代表求解的一般变量, 包括几种物质各自的浓度, 电动势, 电流密度等, Γ 是扩散系数, S 是

源项, 包括所有不能写进前几项的内容。边界条件为脉冲比功率。起始条件为全充电状态。由于 SFUDS 的特性, 电流可能在几秒内就会改变方向, 因此为了获得收敛解, 必须选用较小的时间步长, 此处时间步长为 2 s。

电化学反应由 Butler-Volmer 方程控制。计算时采用半隐式压力修正方法 (SIMPLE) 进行求解。

3 一电动汽车用铅酸电池在 SFUDS 下数值模拟行为分析

在本节中对一用于电动汽车的铅酸蓄电池通过数值方法进行分析评价, 模拟电池在 SFUDS 循环下的工作行为。算例中所用电池的数据见表 1。该电池属于贫液型电池, 正负极板之间只有隔板, 没有电池槽, 因此此处不考虑酸的对流。此时沿电池高度方向各项性能一致, 因此计算分析属于一维情况。

表 1 算例所用电池数据

电池组容量 (Ah)	85
电池组重量 (kg)	29
串联电池数	6
并联电池数	8
PbO ₂ 电极厚度 (cm)	0.15875
隔板厚度 (cm)	0.15875
Pb 电极厚度 (cm)	0.15875
全充电时 PbO ₂ 电极多孔率	0.61
隔板多孔率	0.92
全充电时 PbO ₂ 电极多孔率	0.55
全充电时 H ₂ SO ₄ 的浓度 (mol/cm ³)	0.0051

SFUDS 曲线见图 2。SFUDS 循环以 360 s 为一个周期, 纵坐标为电池组比功率。比功率值为负值时表示电池在放电, 比功率值为正值时表示电池在充电。SFUDS 循环可模拟电动汽车驾驶时的匀速、加速、爬坡、休息、充电等实际过程中的电池的行为。

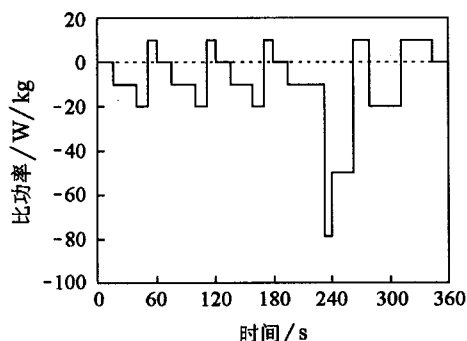


图 2 SFUDS 曲线图

图 3 至图 6 为该铅蓄电池在 SFUDS 循环下的运行数值模拟结果。

图3为电池电流密度曲线。图4为电池组电压随时间变化的曲线。由于SFUDS循环模拟的工况中

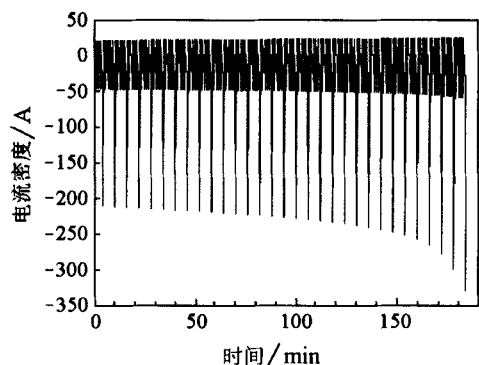


图3 电流密度曲线

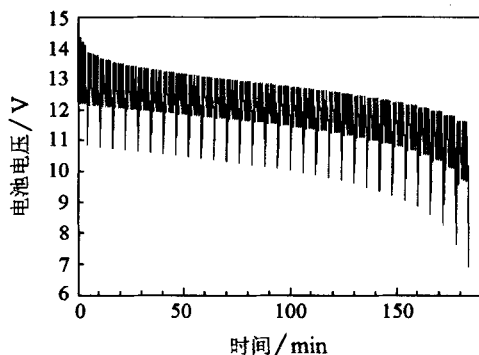


图4 电压曲线

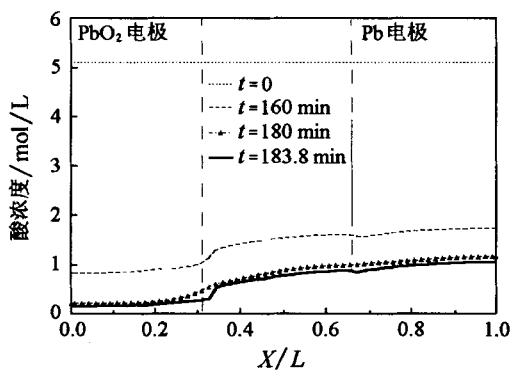


图5 酸浓度分布

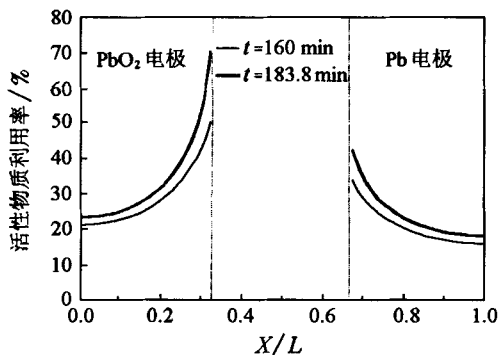


图6 电极活性物质利用率分布

电池组放电的时间多于充电的时间,因此可以看到电池组电压的总体水平是下降的,而电流密度在相应地逐步增大,这样才能保证电池组功率在一定水平上。这样才能驱动汽车。

图5是沿着 X 方向酸浓度在几个不同时刻的分布情况。可以看到,最后制约电池结束放电的原因正是在于 PbO_2 电极中酸几乎消耗完了。另外也可发现在电极和隔板交界面上酸浓度变化幅度很大,这是由于此处的活性物质利用率达到最高(图6),引起孔隙率下降至最小,形成一种所谓的堵塞现象而导致的。可见,在可能的情况下,应该增加 PbO_2 电极的初始多孔率。活性物质的利用率定义为:参与电极反应的活性物质的量占初始量的百分比。可以看到,放电结束时,在 PbO_2 电极利用率分布极不均衡,尤其在与隔板的交界面处几乎都耗完了;而同时在 Pb 电极中利用率却还是很低,大约有50%的活性物质没有用上。所以负极的设计量偏大。根据这一结果,改进电池仅须减小负极尺寸就可以减轻负极重量,从而提高电池比能。

4 结论

本文提供了一种数值模拟计算电动汽车用铅酸蓄电池工作过程中各种性能的方法,对一铅酸蓄电池进行分析,找到改进该电池的方向和方法。得到许多实验测试无法得到的信息,因为实际测试时为了防止损坏电池,放电不能进行这么长的时间,另外有些重要参数如各点酸浓度值等极难直接测量。因此发展电动汽车用电池时,数值模拟是一种很有效的方法。

铅蓄电池电极里的多孔结构,燃料电池里的微通道结构,都是传热传质理论的用武之地。本文的工作也证明了这一点。传热传质理论必将在跨学科研究方面取得更新进展。

参考文献

- [1] Alavyoon F, Eklund A, Bark FH, et al. Theoretical and Experimental Studies of Free Convection and Stratification of Electrolyte in a Lead-acid Cell During Recharge. *Electrochem, Acta*, 1991, 36: 2153-2164
- [2] Gu W B, Wang C Y, Liaw B Y. Numerical Modeling of Coupled Electrochemical and Transport Processes in Lead-Acid Batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 1997, 144: 2053-2061
- [3] Gu W B, Wang C Y, Liaw B Y. The Use of Computer Simulation in the Evaluation of Electric Vehicle Batteries. *Journal of Power Sources*, 1998, 75(1), 154-164
- [4] 叶芳, 陈峰, 苑中显等. 电动汽车铅酸蓄电池的数值模拟技术. 见: *EV & SFV 研讨会论文集*, 1998