基于 CFD 的锂电池温度场仿真^{*}

欧阳唐文,张兴娟,杨春信

(北京航空航天大学航空科学与工程学院,北京100191)

摘 要:建立了锂电池热特性的三维数学模型。将结构复杂的锂电池当成一个整体获取其热物理参数, 同时采用分段线性插值的方式考虑比热容、导热系数随电池的 SOC(荷电状态)的变化。利用商业 CFD 软件 FLUENT 对锂/二氧化硫单体电池进行了三维温度场仿真计算,分析了电池热物理参数的变化、放 电电流以及散热环境对电池温度分布的影响。

关键词:锂/二氧化硫电池;温度场;仿真;CFD

中图分类号:TM912.9 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2013)02-0014-04

Simulation of Temperature Field of Lithium Battery Based on CFD OUYANG Tang-wen, ZHANG Xin-juan, YANG Chun-xin

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A three-dimensional mathematical model is built to describe the thermal characteristic of lithium battery. Lithium battery which has very complicated internal structure is considered as a whole to get its thermo-physical parameters. A method of piecewise linear interpolation is used to study the variation of specific heat capacity and thermal conductivity as SOC (state of charge) of battery changes. The three-dimensional temperature field of a single lithium/sulfur dioxide battery is simulated using commercial CFD software FLU-ENT, then the factors affecting the temperature distribution of the battery including variation of thermo-physical parameters, discharge current and cooling environment are analyzed.

Key words: lithium/sulfur dioxide battery; temperature field; simulation; CFD

引 言

锂电池作为新型的高能化学电源,具有比能量高、 湿贮存寿命长、放电电压平坦、宽广的使用范围等特 性,在武器装备领域已经得到了广泛应用^[1]。锂电池 在军事装备上的应用能够实现军事装备的小型化、轻 量化和节能化。以锂/二氧化硫(Li/SO₂)电池为代表 的锂一次电池作为高输出功率的电源,如导弹深井发 射时的备用电源、水下航行器动力电源等军事装备中 的特殊功能,是其他电池所无法替代的^[2]。

锂电池在实际应用过程中最重要的问题是热安全 性问题。原因在于锂电池放电时,电池内阻发热、电极 极化发热及化学反应放热等会使电池温度快速升高, 电池温度的升高会进一步促使反应的加剧,从而形成 产热与温升的正反馈。尤其是在密闭空间的电池组大 电流长时间放电时,内部温度上升更为明显。当温度 超过一定限制时,电池可能会出现鼓胀、泄漏、乃至爆 炸等危险^[3]。因此,对锂电池的热分析和热设计是十 分必要的。

文献[4]将电池当作各向同性的均质材料,建立 了 US16850 型锂离子蓄电池温度场分析的二维模型。 文献[5]建立了 ER48660 型锂电池温度场分析的三维 模型,分析了放电电流和表面传热系数对电池温度分 布的影响。文献[6]建立了锰酸锂动力电池的热模 型,分析了对流表面换热系数、外壳材料和厚度对电池 散热能力的影响。本文在现有锂电池热特性三维数学 模型基础上,考虑电池热物理参数随电池 SOC(荷电 状态)的变化,采用线性插值的方法获得电池不同 SOC 时的热物理参数。利用商业 CFD 软件 FLUENT 14.0 对某型锂/二氧化硫单体电池进行了三维温度场 仿真计算,分析了电池热物理参数的变化、放电电流以 及散热环境对电池温度分布的影响。

^{*} 收稿日期:2012-12-10

1 仿真模型

1.1 物理模型

锂/二氧化硫正极为多孔碳,正极集流器为铝网,正 极活性物质 SO₂ 以液体形式加入电解液中;负极材料为 锂片,负极集流器为铜网;电解液采用碳酸丙烯酯和乙 腈的混合溶剂,电解质盐为溴化锂;隔膜为多孔聚丙乙 烯。电池直径 40 mm,长度 150 mm,总质量 0.286 kg,内 部为卷绕结构,其结构示意图如图 1 所示。



图 1 锂/二氧化硫电池结构示意图 电池放电,过程的总反应:

$$2\mathrm{Li} + 2\mathrm{SO}_2 \to \mathrm{Li}_2\mathrm{S}_2\mathrm{O}_4 \tag{1}$$

正极反应:

$$2SO_2 + 2Li^+ + 2e^{-\frac{\pi}{2}}Li_2S_2O_4 \qquad (2)$$

负极反应:

$$2\mathrm{Li} \xrightarrow{\sim} 2\mathrm{Li}^+ + 2\mathrm{e}^- \tag{3}$$

锂/二氧化硫放电过程发生化学反应,因此电池的 热物理参数随其 SOC 发生变化。根据电池的结构尺 寸,结合文献[7]和文献[8],电池的热物理参数如表 1 所示。

放曲

表1	锂/二氧化硫电池热物理参数1/

会教	荷电状态(%)		
参 奴	100	50	0
密度/(kg・m ⁻³)		1 517.3	
内阻/Ω		0.1	
比热容/(J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	1 158.6	1 061.2	1 004.1
导热系数/(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	10.90		7.51

注:"一"表示文献中未提供。

1.2 数学模型

Bernardi 等^[9]认为锂电池内部热流量是均匀产生的。为建立锂/二氧化硫的热特性的数学模型,需对物理模型进行如下简化和假设:

将电池当作一个整体,电池放电前后质量守恒,体积不变,因此其密度不变。

2)由于电池内部电解液的流动性很差,因此可以 忽略电池内部的对流换热。 3)由于电池内部的温差较小,辐射换热也可以忽略不计。

4) 热量是电池内部均匀产生的。

根据以上简化和假设,可建立锂/二氧化硫的三维 瞬态传热的数学模型^[10]:

$$\frac{\partial(\rho c_p t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + Q$$
(4)

式中: ρ 是电池密度,kg/m³; c_p 是比热容,J/(kg·K);t是温度,K; τ 是时间,s; λ 是导热系数,W/(m·K);Q为电池内部单位体积的热生成率,W/m³。

1.3 网格划分

仿真模型采用 Gambit 2.4.6 软件对单体电池进行几何建模并进行结构化网格划分,网格总数为45 000,如图2 所示。





1.4 边界条件

从电学角度分析,锂/二氧化硫电池内部的热生成 率可由式(5)计算^[11]:

$$Q = \frac{I}{V} \left(E_r - E_l - T \frac{\mathrm{d}E_r}{\mathrm{d}T} \right)$$
(5)

式中:Q 为电池内部单位体积的热生成率, W/m³; V 为 电池体积, m³; I 为电池放电电流, A; T 为电池温度, K; E_r 为电池的开路电压, V; E_l 为电池的工作电压, V; $E_r - E_l = IR(R$ 为电池内阻); $\frac{dE_r}{dT}$ 只在很小的范围内变 化, 取其值为-0.5 mV/K。由此可计算得到锂/二氧化 硫电池恒流 1.0 A, 2.0 A 和 3.0 A 放电时的电池内部 单位体积的热生成率, 结果如表 2 所示。

表 2 锂/二氧化硫电池内部单位体积的热生成率

<i>T</i> /K	$Q_{1.0A}/(W \cdot m^{-3})$	$Q_{2.0A}/(W \cdot m^{-3})$	$Q_{3.0A}/(W \cdot m^{-3})$
300	1 326	3 714	7 162
310	1 353	3 767	7 241
320	1 380	3 820	7 321
330	1 406	3 873	7 401

2 结果分析

将初始温度设定为 300 K,周围流体的温度也为

300 K。分析热物理参数的变化、放电电流以及散热环 境对电池温度变化和温度分布的影响。

2.1 热物理参数的变化对电池最高温度的影响

锂/二氧化硫电池放电过程发生化学反应,电池内 部组分随电池的 SOC 发生变化,电池的比热容和导热 系数也会随之发生变化。利用 FLUENT 14.0 软件对恒 流3.0 A 放电,对流表面换热系数为10 W/(m²·K),电 池热物理参数为常数和随电池 SOC 发生变化时的电池 温度场进行了瞬态计算。电池的比热容和导热系数根 据表1中的数据,采用分段线性插值的方法获取各时刻 的数值。图3 所示为两种情况下电池恒流3.0 A 放电 12 h 电池内部最高温度温升曲线。



图 3 电池内部最高温度温升曲线

由图 3 可知,采用随电池 SOC 变化的热物理参数 的计算结果与采用常数热物理参数的计算结果极为接 近,最大温差仅为0.1℃。由此可知,在相同散热环境 下,锂/二氧化硫电池放电过程热物理参数的变化对电 池内部最高温度的影响很小,在后续仿真计算中均采 用常数热物理参数。

2.2 放电电流对电池温度的影响

锂/二氧化硫电池在不同的放电电流下工作时,电 池内部单位体积的热生成率也不同,对电池内部最高温 度和温度梯度的影响也不同。利用 FLUENT 14.0 软件 对电池在对流表面换热系数为10 W/(m²·K),恒流 1.0 A、2.0 A 和 3.0 A 三种放电情况下的电池温度场进 行了瞬态计算。图 4 所示为三种恒流放电情况下电池 内部最高温度的温升曲线。图 5 为恒流 1.0 A、2.0 A 和 3.0 A 放电 12 h 后的电池截面温度分布云图。



图 4 三种电流下电池内部最高温度温升曲线



图 5 不同放电电流电池截面温度分布

由图4和图5可以看出,恒流1.0A、2.0A和3.0A 放电情况下电池内部最高温度分别为301.2K、303.4K 和306.5K。而三种情况下电池温度达到平衡的时间均 为2.5h左右。由此可知,放电电流越大,电池内部温度 越高,温差也越大。原因在于放电电流越大,电池内部加 度就越高;同时,当对流表面换热系数为10W/(m²·K) 时,从集总参数法的角度分析,时间常数 $\tau_e = \frac{\rho c_p V}{hA}$,电池热 物理参数不变,对流表面换热系数相同,则时间常数相 等,即达到温度平衡的时间基本相同。

2.3 对流表面换热系数对电池温度的影响

锂/二氧化硫电池与环境之间的热量传递包括对 流传热和辐射传热,其中对流传热占主要地位。不同 的散热环境对电池内部的最高温度和温度分布有着重 要影响。利用 FLUENT 14.0 软件对恒流 3.0 A 放电, 对流表面换热系数为2 W/(m²・K)、10 W/(m²・K) 和20 W/(m²·K)三种情况下的电池温度场进行了瞬 态计算。图6为两种对流表面换热系数情况下电池的 温度分布云图。由图6可以看出,对流表面换热系数 为2 W/(m² · K)和20 W/(m² · K)时电池内部的最 高温度分别为332.1 K和303.3 K,电池温度达到平衡 的时间分别约为3h和2h。由此可知,对流表面换热 系数越大,电池内部的温度越低,电池温度达到平衡的 时间越短。原因在于对流表面换热系数越大,则时间 常数越小,说明散热速度也越快,通过电池表面散发的 热量就越多,因此电池内部的温度就越低,达到温度平 衡所需的时间就越短。

第29卷第2期



3 结束语

本文在理论分析的基础上,建立了锂/二氧化硫电 池热特性的三维数学模型,利用 FLUENT 14.0 软件对 单体电池的温度场进行了仿真计算,分析了电池热物 理参数随电池 SOC 的变化、放电电流以及对流表面换 热系数对电池温度分布的影响。结果表明:(1)锂/二 氧化硫电池放电过程热物理参数的变化对其最高温度 和温度分布的影响较小。(2)电池的放电电流越大,则电池的发热功率越大,电池内部温度越高,温差相对 也较大。(3)对流表面换热系数越大,则电池的散热 越快,电池内部温度越低,电池温度达到平衡所需的时 间越短;而随着对流表面换热系数的增大,其对电池内 部最高温度的影响越小,而相应的成本越高,需要在电 池的热设计中进行综合考虑。

参考文献

- [1] 李国欣. 新型化学电源[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2006: 234-241, 308-322, 356-362.
- (上接第13页)

4 结束语

防雷设计是一项系统工程,涉及机房建设、屏蔽设 计、接地设计、设备自身防雷、线缆布设、设备内部电路 与元器件耐冲击设计等多个方面。只要综合考虑各项 措施,严格遵守防雷接地规范,就能达到理想的防护效 果。近期的几个测控站按照上述设计采取防雷措施, 到目前为止,系统运行正常。

参考文献

[1] 朱新第. 弱电设备防雷初探[J]. 浙江电力, 2002(1): 43-47.

- [2] 赵佳明,杨维芝.一次锂电池在军事装备中的特殊功能 [J].电池工业,2000,5(5):221-222.
- [3] 陈玉红, 唐致远, 卢星河, 等. 锂离子电池爆炸机理研 究[J]. 化学进展, 2006, 18(6): 823-831.
- [4] 王晋鹏,胡欲立. 锂离子蓄电池温度场分析[J]. 电源技术, 2008(2): 120-121.
- [5] 王艳峰,胡欲立,王家军. ER48660 型锂/亚硫酰氯电池
 热分析[J]. 电源技术,2010,34(8):809-811.
- [6] 林成涛,李腾,陈全世. 锰酸锂动力蓄电池散热影响因素分析[J]. 兵工学报,2010(1):88-93.
- [7] 贾丽,张兴娟,杨春信. 锂/二氧化硫电池稳态法导热系数试验研究[J]. 电子机械工程,2011,27(5):5-7.
- [8] 白清源, 张兴娟, 杨春信. 锂/二氧化硫电池比热容的测量与分析[J]. 电子机械工程, 2011, 27(6): 1-3.
- [9] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery system [J]. Journal of The Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育 出版社, 2006.
- [11] MILLS A, AL-HALLAJ S. Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs [J]. Journal of Power Sources, 2005, 141(2): 307-315.

欧阳唐文(1989-),男,硕士,主要研究方向为热 控技术,载人航天环境控制与生命保障技术。

张兴娟(1969-),女,博士,副教授,主要从事多相 流传热、飞行器环境控制与安全救生技术。

杨春信(1965-),男,博士,教授,博士生导师,主 要从事多相流传热、载人航天环境控制与生命保障技 术、飞行器环境控制与安全救生技术等研究。

[2] 潘忠林. 现代防雷技术[M]. 成都: 电子科技大学出版 社, 1997.

- [3] 王振旺. 微波雷达防雷措施研究[J]. 雷达与对抗, 2007 (1): 17-20.
- [4] 全国信息技术标准化技术委员会. GB/T 2887—2011 电
 子计算机场地通用规范[S].北京:中国标准出版社,
 2011.
- [5] 中国人民解放军总装备部. GJB 6784—2009 军用地面电 子设施防雷通用要求[S]. 2009.

张一帆(1976-),男,工程师,主要从事电子设备 结构总体工作。