



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116298909 A

(43) 申请公布日 2023. 06. 23

(21) 申请号 202310179998.5

(22) 申请日 2023.03.01

(71) 申请人 上海空间电源研究所

地址 200245 上海市闵行区东川路2965号

(72) 发明人 宋缙华 张兴浩 丰震河 刘通

陈健 王可

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心

11009

专利代理师 范晓毅

(51) Int. Cl.

G01R 31/367 (2019.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06T 17/20 (2006.01)

G06F 111/04 (2020.01)

G06F 119/08 (2020.01)

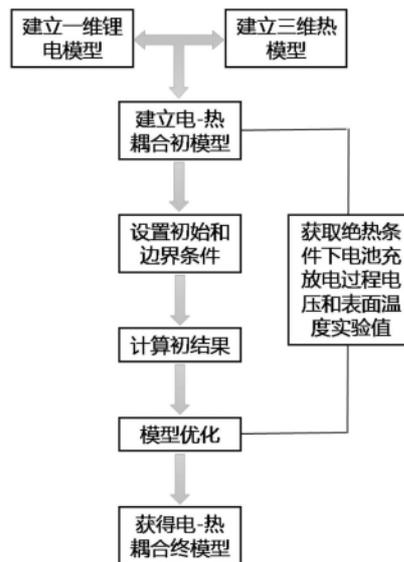
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法

(57) 摘要

本发明公开了一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,包括基于电芯单元厚度方向建立一维锂离子电池模型;基于空间用锂离子蓄电池单体结构建立三维热模型;在所述一维锂离子电池模型和三维热模型中分别加入平均热源和平均温度的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系;设置建模参数,划分网格,获得电-热耦合初始模型;在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值;利用电-热耦合初始模型计算得到电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线;对所述电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正,获得用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型。本发明能够消除外部环境热交换对试验数据的影响,显著提升模型的准确性。



1. 一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于,包含以下步骤:  
基于电芯单元厚度方向建立一维锂离子蓄电池模型;  
基于空间用锂离子蓄电池单体结构建立三维热模型;  
在所述一维锂离子蓄电池模型和三维热模型中分别加入平均热源和平均温度的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系;  
设置建模参数,划分网格,根据耦合关系,建立电-热耦合初始模型;  
在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值;  
利用电-热耦合初始模型计算得到电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线;  
将电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线与实验值进行对比分析,对所述电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正,获得用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型。
2. 根据权利要求1所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述在一维锂离子蓄电池模型和三维热模型中分别加入平均热源和平均温度的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系,具体为:  
将一维锂离子蓄电池模型中的电化学产热作为三维模型的热源,计算平均温度;  
将所述平均温度反馈回一维锂离子蓄电池模型,迭代计算一维锂离子蓄电池模型的电、热特性,实现电-热双向耦合,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系。
3. 根据权利要求1所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述电-热耦合初始模型,包括变量函数负极平衡电位 $E_{eq\_neg}$ 和正极平衡电位 $E_{eq\_pos}$ 。
4. 根据权利要求3所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述变量函数 $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 通过将活性物质材料制备成的扣式半电池以充放电电流 $I$ 进行充放电测试,得到的曲线拟合得到,其中, $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 是关于荷电状态的函数。
5. 根据权利要求4所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述充放电电流 $I=C/50\sim C/20$ 。
6. 根据权利要求1所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述电-热耦合初始模型中的材料参数包括负极电压-温度系数 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和正极电压-温度系数 $dE_{eq\_pos}/dT$ 。
7. 根据权利要求6所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和 $dE_{eq\_pos}/dT$ 是采用电位滴定法测试得到的关于荷电状态变化的曲线。
8. 根据权利要求1所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述电-热耦合初始模型的边界条件包含锂离子蓄电池的外表面为热绝缘;所述电-热耦合初始模型中三维热模型的热源为锂离子蓄电池内部的电芯。
9. 根据权利要求1所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,其特征在于:所述在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值,具体为:  
将连接充放电测试线缆的锂离子蓄电池单体放入加速量热仪中;  
锂离子蓄电池单体的表面粘贴热电偶,测试得到锂离子蓄电池单体在绝热环境下充放

电时的电压和表面温度的实验值；

获得电池充放电电压曲线A1与表面温度变化曲线B1，曲线A1和B1的横坐标均为时间。

10. 根据权利要求9所述的一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法，其特征在于：所述将电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线与实验值进行对比分析，对所述电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正，具体为：采用最小二乘法同时对电-热耦合初始模型计算得到的电池充放电电压曲线A2与表面温度变化曲线B2和实验得到的电池充放电电压曲线A1与表面温度变化曲线B1进行对比分析，对所述电-热耦合初始模型的关键参数进行优化修正。

## 一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,属于锂离子电池技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着我国航天技术的不断发展,对于能源系统的要求越来越高。作为目前空间储能电源的主力军,进一步提升锂离子电池的能量密度势在必行,但随着能量密度的提升,锂离子电池的循环寿命、安全性能、热特性等面临着极大的挑战。其中,电池的热特性直接影响了锂离子电池的本征安全性以及循环寿命,同时单体的热特性参数也是电池组热管理的关键输入。对于高比能锂离子电池体系,正负极材料锂离子扩散速率慢、极片载量高、导电剂含量低、电池极化大等特点都会很大程度上增大电池产热,劣化电池性能,因此,针对高比能体系的热特性研究是非常重要的研究方向。

[0003] 传统的锂离子蓄电池单体热特性研究大多采用外部检测的方法,通过各类温度传感器可以表征电池在特定工况下的温度变化,检测结果一般为电池表面的热数据,无法获取电池内部的实际温度场分布。随着近年来多物理场仿真软件的发展与应用,采用有限元方法建立锂离子电池的热模型,可以获取电池内部的温度场分布,但是缺少电性能的对应,模型准确性和适用性较低。针对空间锂离子蓄电池的特殊使用环境,不仅要考虑电池内部的电化学反应产热,还需加入外部热传导的影响,因此,需要建立一种空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型,实现电池放电电压、内部温度场分布、瞬时发热量的仿真计算,为空间用储能蓄电池组和电源分系统的电、热仿真提供重要的研制基础。

[0004] 中国发明专利申请(公布号CN105206888B)公开了一种锂离子电池内部温度监测方法,通过测试电池内阻及开路电压温度系数等参数,建立了锂离子电池电热耦合模型,将仿真曲线与测试得到的电池在不同环境条件充放电时电池表面的温度变化曲线进行分析对比,优化模型,最终获得了可以对电池内部温度实时监测的电热耦合模型。此方法认为开路电压温度系数是一个定值,并不准确;其次,并未考虑到模型中散热速率参数与试验过程中的环境散热速率值的偏差,会导致最终模型的准确度降低;而且发明中的模型无法获取电池的电化学信息,如电池放电电压、电池内部锂离子浓度分布、电流密度分布等。

[0005] 中国发明专利申请(公布号CN114184958A)公开了一种考虑热特性的锂离子电池建模方法,通过将建立的锂离子电池二阶RC等效电路模型与基于发热和传热的热模型进行双向耦合,得到了锂离子电池的电热耦合模型。此方法对锂离子电池的内部信息做了很多简化,且无法获取电池的内部温度场分布等信息。

### 发明内容

[0006] 本发明的技术解决问题是:克服现有技术的不足,提供一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,该方法能够消除外部环境热交换对试验数据的影响,模型输入的正、负极电压-温度系数可通过实验获取,同时采用电池充放电电压曲线与表面温度变化曲

线双优化的方法,可以显著提升模型的准确性。通过建立的电-热耦合模型可用于计算获取电池内部温度分布、发热量等热参数和电池充放电电压、锂离子浓度分布、电流密度分布等电化学参数的实时信息。

[0007] 本发明的技术解决方案是:

[0008] 11、本发明公开了一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,包含以下步骤:

[0009] 基于电芯单元厚度方向建立一维锂离子蓄电池模型;

[0010] 基于空间用锂离子蓄电池单体结构建立三维热模型;

[0011] 在所述一维锂离子蓄电池模型和三维热模型中分别加入平均热源和平均温度的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系;

[0012] 设置建模参数,划分网格,根据耦合关系,建立电-热耦合初始模型;

[0013] 在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值;

[0014] 利用电-热耦合初始模型计算得到电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线;

[0015] 将电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线与实验值进行对比分析,对所述电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正,获得用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型。

[0016] 进一步地,在上述建模方法中,所述在所述一维锂离子蓄电池模型和三维热模型中分别加入平均热源和平均温度的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系;具体为:

[0017] 将一维锂离子蓄电池模型中的电化学产热作为三维模型的热源,计算平均温度;

[0018] 将所述平均温度反馈回一维锂离子蓄电池模型,迭代计算一维锂离子蓄电池模型的电、热特性,实现电-热双向耦合,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系。

[0019] 进一步地,在上述建模方法中,所述电-热耦合初始模型,包括变量函数负极平衡电位 $E_{eq\_neg}$ 和正极平衡电位 $E_{eq\_pos}$ 。

[0020] 进一步地,在上述建模方法中,所述变量函数 $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 通过将活性物质材料制备成的扣式半电池以充放电电流 $I$ 进行充放电测试,得到的曲线拟合得到,其中, $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 是关于荷电状态的函数。

[0021] 进一步地,在上述建模方法中,所述充放电电流 $I=C/50\sim C/20$ 。

[0022] 进一步地,在上述建模方法中,所述电-热耦合初始模型中的材料参数包括负极电压-温度系数 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和正极电压-温度系数 $dE_{eq\_pos}/dT$ 。

[0023] 进一步地,在上述建模方法中,所述 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和 $dE_{eq\_pos}/dT$ 是采用电位滴定法测试得到的关于荷电状态变化的曲线。

[0024] 进一步地,在上述建模方法中,所述电-热耦合初始模型的边界条件包含锂离子蓄电池的外表面为热绝缘。

[0025] 所述电-热耦合初始模型中三维热模型的热源为锂离子蓄电池内部的电芯。

[0026] 进一步地,在上述建模方法中,所述在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值,具体为:

[0027] 将连接充放电测试线缆的锂离子蓄电池单体放入加速量热仪中;

[0028] 锂离子蓄电池单体的表面粘贴热电偶,测试得到锂离子蓄电池单体在绝热环境下充放电时的电压和表面温度的实验值;

[0029] 获得电池充放电电压曲线A1与表面温度变化曲线B1,曲线A1和B1的横坐标均为时间。

[0030] 进一步地,在上述建模方法中,所述将电池充放电电压曲线和表面温度变化曲线与实验值进行对比分析,对所述电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正,具体为:采用最小二乘法同时对电-热耦合初始模型计算得到的电池充放电电压曲线A2与表面温度变化曲线B2和实验得到的电池充放电电压曲线A1与表面温度变化曲线B1进行对比分析,对所述电-热耦合初始模型的关键参数进行优化修正。

[0031] 本发明与现有技术的有益效果在于:

[0032] (1)本发明该方法可以消除外部环境热交换对试验数据的影响,提高模型准确性;模型输入的正、负极电压-温度系数可通过实验获取,提高模型准确性;同时,采用了电池充放电电压曲线与表面温度变化曲线双优化的方法,进一步提升模型的准确性。

[0033] (2)本发明采用建立的电-热耦合模型可用于反向优化电池设计,降低内部极化和放电产热等;此外,通过在建立的电-热耦合模型中增加外部热环境参数,可用于计算获取空间应用环境和地面试验环境下,电池内部温度分布、产热速率等热参数和电池放电电压、锂离子浓度分布、电流密度分布等电化学参数的实时信息,为空间用储能蓄电池组和电源分系统的电、热仿真提供重要的研制基础。

## 附图说明

[0034] 图1是本发明锂离子蓄电池电-热耦合建模方法的流程图;

[0035] 图2是本发明锂离子蓄电池不同工况放电的计算值与实验值对比图;

[0036] 图3是本发明锂离子蓄电池0.67C放电结束时的温度场分布图。(a)为电池外部温度场分布,(b)为电池厚度方向截面的温度场分布,(c)为电池宽度方向截面的温度场分布。

## 具体实施方式

[0037] 下面结合附图及具体实施方式对本发明专利做进一步详细说明。

[0038] 如图1所示,本发明提供了一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,该方法的步骤包括:

[0039] 第一步,基于电芯单元厚度方向建立一维锂离子蓄电池模型;

[0040] 第二步,基于空间用锂离子蓄电池单体结构建立简化的三维热模型;

[0041] 第三步,在模型中加入平均热源 $Q_m$ 和平均温度 $T_m$ 的探针及参数,建立电池内部电化学与热特性之间的耦合关系;

[0042] 第四步,设置电和热模型需要的基本参数、初始条件和边界条件等,划分网格,获得电-热耦合初始模型;

[0043] 第五步,在加速量热仪中测得锂离子蓄电池单体充放电时的电压和表面温度的实验值;

[0044] 第六步,将电-热耦合初始模型计算得到的电池充放电电压曲线与表面温度变化曲线和第五步中获取的实验值进行对比分析,对第四步中建立的电-热耦合初始模型进行关键参数的优化修正,获得最终的用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型。

[0045] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第一步中,使用

Comsol软件建立一维锂离子电池模型；

[0046] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第二步中,使用Comsol软件建立三维热模型,模型几何简化了正、负极极柱和密封部位；

[0047] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第三步中,将一维模型中的电化学反应热作为三维模型的热源,计算平均温度,再将平均温度反馈回一维模型,迭代计算电池的电、热特性,实现电-热双向耦合；

[0048] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第四步中,电化学反应模型包含变量函数负极平衡电位 $E_{eq\_neg}$ 和正极平衡电位 $E_{eq\_pos}$ ；

[0049] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,上述变量函数 $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 是通过将活性物质材料制备成的扣式半电池以C/50~C/20恒流充放电测试得到的曲线进行拟合得到, $E_{eq\_neg}$ 和 $E_{eq\_pos}$ 是关于荷电状态SOC的函数；

[0050] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第四步中,电化学反应模型中的材料参数包含负极电压-温度系数 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和正极电压-温度系数 $dE_{eq\_pos}/dT$ ；

[0051] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,上述 $dE_{eq\_neg}/dT$ 和 $dE_{eq\_pos}/dT$ 是采用电位滴定法测试得到的关于荷电状态SOC变化的曲线；与其它模型中认为电压-温度系数为定值相比,可以大大增加电-热耦合模型计算结果的准确性；

[0052] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第四步中,热模型的边界条件包含锂离子电池的外表面为热绝缘；传统热模型会设置环境散热速率为边界条件,但是实验过程中的实际环境散热速率是无法定量的,这将会造成实验值与模型计算值对比分析时,自带偏差,因此,本发明模型中设置了热绝缘,与实验中的绝热环境保持一致,可以避免偏差,提高模型准确性；

[0053] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第四步中,热模型的热源为锂离子电池内部的电芯；由于高比能电池空间应用时的充放电倍率较小,极柱等产生的欧姆热可忽略不计；

[0054] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第五步中,将连接充放电测试线缆的锂离子蓄电池单体放入加速量热仪中,电池表面粘贴热电偶,测试得到蓄电池在绝热环境下充放电时的电压和表面温度的实验值,获得电池充放电电压曲线A1与表面温度变化曲线B1,曲线A1和B1的横坐标均为时间；

[0055] 优选地,在一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法中,第六步中,采用最小二乘法同时对模型计算得到的电池充放电电压曲线A2与表面温度变化曲线B2和第五步中获取的实验值曲线A1与B1进行优化,修正关键的模型参数。采用双曲线优化的方法,可以显著提升电-热耦合模型的准确性。

[0056] 以下结合具体实施例对本发明的技术方案进行进一步的说明：

[0057] 实施例

[0058] 一种用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合建模方法,流程图如图1所示。

[0059] 第一步,使用Comsol软件建立一维锂离子电池模型。

[0060] 第二步,使用Comsol软件建立三维热模型。

[0061] 第三步,在模型中加入平均热源 $Q_m$ 和平均温度 $T_m$ 的探针及参数,建立电池内部电化

学与热特性之间的耦合关系；

[0062] 第四步,设置电-热耦合模型需要的基本参数。在电池模型中加入变量函数负极平衡电位 $E_{eq\_neg}$ 和正极平衡电位 $E_{eq\_pos}$ 。这两个函数的获取方法如下:分别将硅-石墨复合负极、镍钴铝酸锂正极制备成扣式半电池,以C/25恒流充放电,然后将获得的充电曲线和放电曲线依次进行求平均值、归一化以及函数拟合处理,获得 $E_{eq\_neg}$ 关于SOC的函数以及 $E_{eq\_pos}$ 关于SOC的函数。在电池模型的材料参数中设置负极电压-温度系数曲线和正极电压-温度系数曲线,相关结果通过电位滴定法获取。在热模型中设置电池的外表面为热绝缘,内部电芯为热源。

[0063] 第五步,采用加速量热仪对硅-石墨/镍钴铝酸锂体系锂离子蓄电池单体开展比热容和发热量测试,测试得到的 $C_p$ 值是热模型的一个关键参数,同时,通过充放电设备和电池表面的热电偶,记录得到电池充放电时的电压和表面温度的变化曲线。

[0064] 第六步,通过建立的电-热耦合模型计算得到相同条件下电池的电压和表面平均温度变化曲线,将计算值与实验值对比分析,采用最小二乘法对电池充放电电压曲线与表面温度变化曲线进行参数优化,修正得到了最终的用于空间锂离子蓄电池的电-热耦合模型。

[0065] 通过该模型可以计算得到空间用锂离子蓄电池在不同工况放电时的电压、温度数据,相关计算值与实验值对比如图2所示。同时,还可以计算得到锂离子蓄电池在0.67C放电结束时的内部温度分布,相关结果如图3所示。

[0066] 尽管本发明的内容已经通过上述优选实施例作了详细介绍,但应当认识到上述的描述不应被认为是对本发明的限制。在本领域技术人员阅读了上述内容后,对于本发明的多种修改和替代都将是显而易见的。因此,本发明的保护范围应由所附的权利要求来限定。

[0067] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员的公知技术。

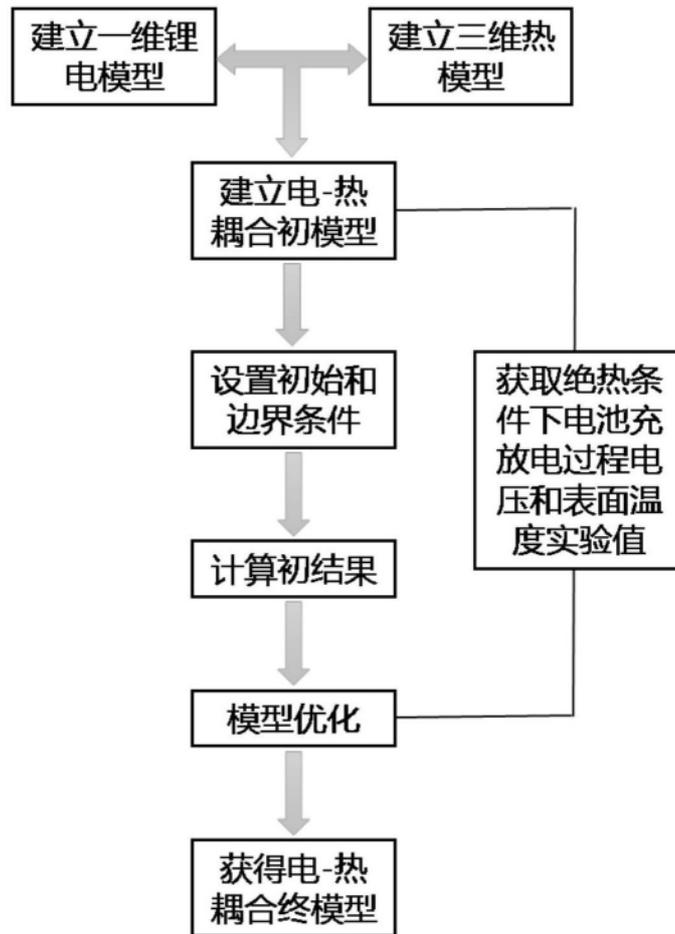


图1

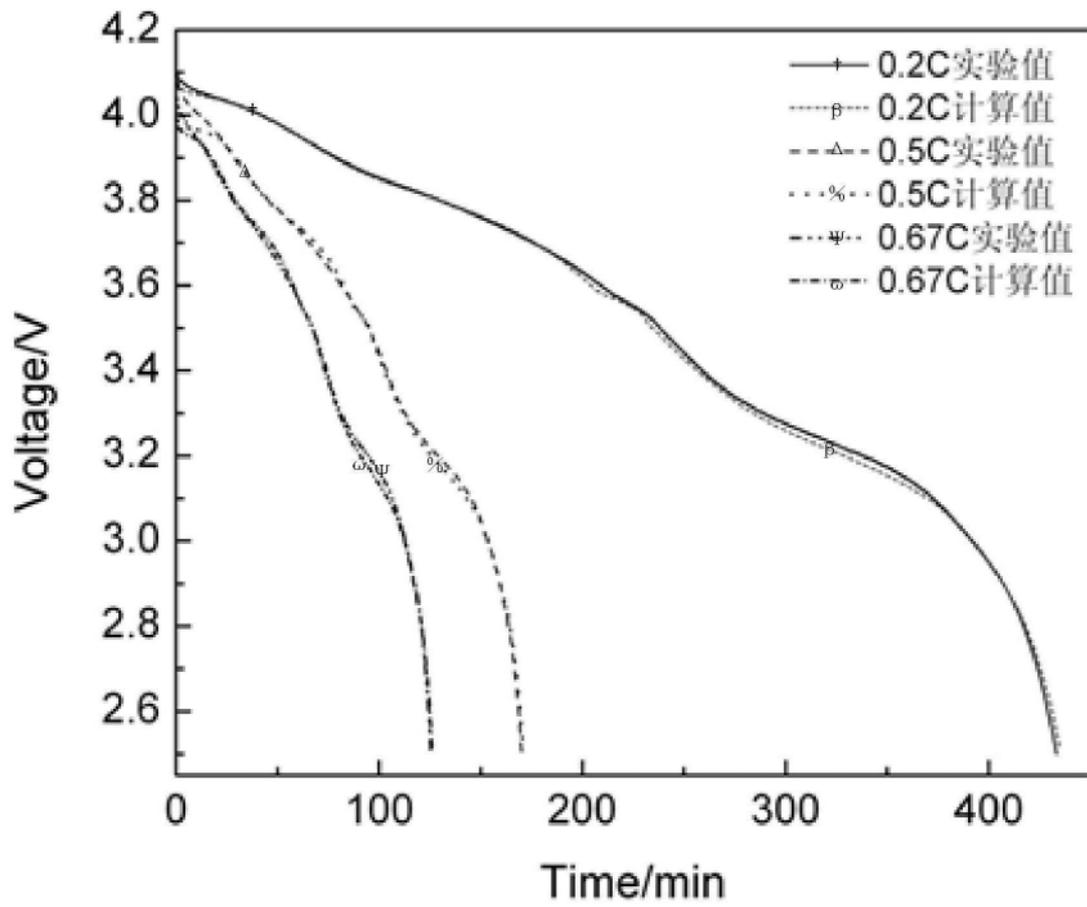
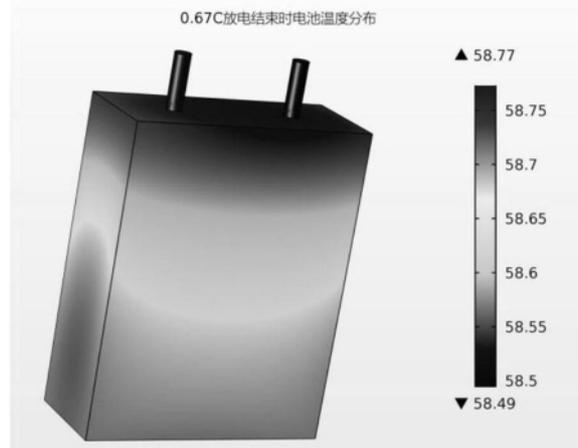
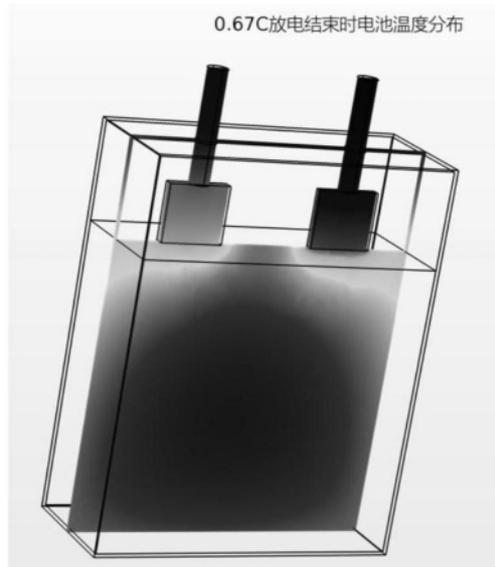


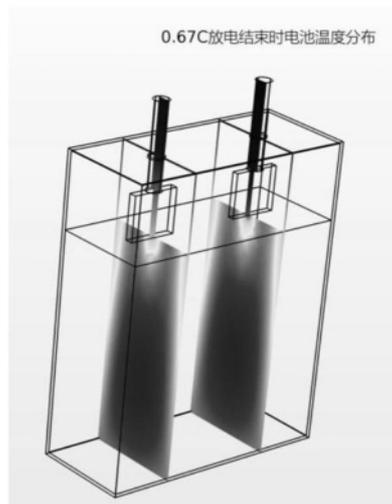
图2



(a)



(b)



(c)

图3