



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111475963 A
(43)申请公布日 2020.07.31

(21)申请号 202010329609.9

(22)申请日 2020.04.24

(71)申请人 中国科学技术大学

地址 230026 安徽省合肥市包河区金寨路
96号

(72)发明人 王青松 张丹枫 段强领 孙金华

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责
任公司 11251

代理人 杨学明

(51)Int.Cl.

G06F 30/20(2020.01)

G16C 20/10(2019.01)

G06F 111/10(2020.01)

G06F 119/08(2020.01)

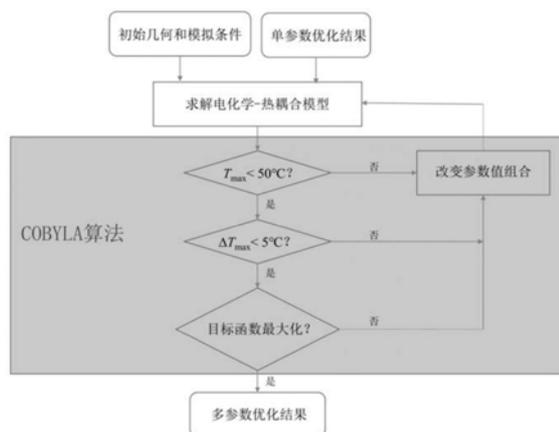
权利要求书1页 说明书12页 附图11页

(54)发明名称

一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法

(57)摘要

本发明涉及一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,步骤如下:(1)获取电池和模组的外部设计参数、电极材料的电化学参数和热物性参数、相变材料的热物性参数;(2)建立一维电化学-三维热耦合模型;(3)对比不同放电倍率下实验和模拟分别得到的电压曲线和温度曲线结果,验证模型的正确性;(4)采用模型分析单一变量在不同放电倍率下,满足电池组热管理目标情况下的最优值;(5)以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,以最优单一变量组合作为优化初始值,以热管理目标作为约束,对变量值进行多参数优化求解。本发明的方法克服了单参数优化忽略不同变量组合对模组热性能影响的问题,以及人为选定变量取值带来的主观性和不全面性。



1. 一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一,获取电池和模组外部设计参数、电极材料的电化学参数和热物性参数、相变材料的热物性参数,所述模组即多个单体电池经串并联方式组合并加装电池管理系统后形成的结构;

步骤二,建立一维电化学-三维热耦合模型;

步骤三,对比不同放电倍率下实验和模拟分别得到的电压曲线和温度曲线结果,验证所述一维电化学-三维热耦合模型的正确性;

步骤四,采用所述一维电化学-三维热耦合模型分别研究不同单一变量在不同放电倍率下,满足电池热管理目标情况下的最优值;得到各最优单一变量值组合;

步骤五,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,以最优单一变量组合值作为优化初始值,以热管理目标作为约束,使用线性近似约束优化算法COBYLA对变量进行多参数优化求解。

2. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,所述步骤二,建立一维电化学-三维热耦合模型具体包括:

首先分别建立一维电化学模型、三维热模型,然后通过一维电化学模型计算出电池电化学反应过程中的平均产热,传递给三维热模型并计算出温度分布,将平均温度返给一维电化学模型,从而将两个模型耦合起来,形成一维电化学-三维热耦合模型。

3. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,所述步骤三,对比不同放电倍率下实验和模拟分别得到的电压曲线和温度曲线结果,验证模型的正确性,具体包括:

通过对比实验和模拟得到的放电曲线以及有代表性的探针点,得到温升曲线,对一维电化学-三维热耦合模型进行验证,所述代表性的探针点是指热电偶布置点。

4. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,所述步骤五具体包括:

使用线性近似约束优化算法COBYLA,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,各最优单一变量组合值作为优化的初始值,以热管理目标作为约束,进行多参数优化求解。

5. 根据权利要求4所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,加快模型优化求解。

6. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,以各最优单一变量值的组合作为优化初始值,加快模型优化求解。

7. 根据权利要求1所述的一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,其特征在于,所述单一变量包括电池间距、外部对流换热系数、膨胀石墨质量分数。

一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及锂离子电池热管理领域,具体涉及一种优化基于相变材料的锂离子电池热管理系统的方法。

背景技术

[0002] 随着能源危机的加重以及人们对环境保护的逐渐重视,锂离子电池作为一种新能源被广泛使用在电动汽车、储能电站上,但其在使用过程中仍然存在一定的危险性。电池充放电过程中,尤其是放电过程中产生大量的热,如果散热不及时,导致电池温度超过正常使用范围,会极大影响电池使用寿命,如果温度继续上升,可能导致电池发生热失控,进一步引发火灾爆炸事故,如果电池间温差超过指定范围,会导致模组内电池充放电不一致,严重时可能导致过充或过放,因此电池热管理系统的存在极为重要。相变材料(PCM)热管理系统相比于空冷和液冷,具有系统简单、形状适应能力强、无外加能耗、温度均一性好的特点,受到广泛关注。

[0003] 采用传统实验方法进行热管理系统的优化设计需要耗费大量人力物力财力。采用计算机数值模拟方法不仅成本低,而且周期短,能极大提高设计效率,因而成为指导热管理系统设计的常用手段。现有技术以相变材料质量最小为优化目标,使用CFD分别求解不同电池组结构下的最优配置,但其实质上是通过控制变量法对单个参数进行优化,没有考虑到不同变量组合对模组热性能的综合影响。现有技术中还有其他方法的数值模型只考虑了传热问题,没有考虑到电池温度对电池内部电化学反应的影响。

发明内容

[0004] 为了解决上述技术问题,本发明提供一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,通过建立一维电化学-三维热耦合模型,首先得到单参数优化结果,之后将单参数优化结果作为初始值,将电池体积占模组总体积最大作为优化目标函数,热管理目标作为约束,使用COBYLA算法进行优化求解,从而得到锂离子电池相变热管理系统最优设计方案。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提出的技术方案为:一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法,包括以下步骤:

[0006] 步骤一,获取电池和模组外部设计参数、电极材料的电化学参数和热物性参数、相变材料的热物性参数,所述模组即多个单体电池经串并联方式组合并加装电池管理系统后形成的结构;

[0007] 步骤二,建立一维电化学-三维热耦合模型;

[0008] 步骤三,对比不同放电倍率下实验和模拟分别得到的电压曲线和温度曲线结果,验证所述一维电化学-三维热耦合模型的正确性;

[0009] 步骤四,采用所述一维电化学-三维热耦合模型分别研究不同单一变量在不同放电倍率下,满足电池热管理目标情况下的最优值;得到各最优单一变量值组合;

[0010] 步骤五,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,以最优单一变量值组合

作为优化初始值,以热管理目标作为约束,使用线性近似约束优化算法COBYLA对变量进行多参数优化求解。

[0011] 进一步的,所述步骤二,建立一维电化学-三维热耦合模型具体包括:

[0012] 首先分别建立一维电化学模型、三维热模型,然后通过一维电化学模型计算出电池电化学反应过程中的平均产热,传递给三维热模型并计算出温度分布,将平均温度返给一维电化学模型,从而将两个模型耦合起来,形成一维电化学-三维热耦合模型。

[0013] 进一步的,所述步骤三,对比不同放电倍率下实验和模拟分别得到的电压曲线和温度曲线结果,验证模型的正确性,具体包括:

[0014] 通过对比实验和模拟得到的放电曲线以及有代表性的探针点,得到温升曲线,对一维电化学-三维热耦合模型进行验证,所述代表性的探针点是指热电偶布置点。

[0015] 进一步的,所述步骤五具体包括:

[0016] 使用线性近似约束优化算法COBYLA,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,各最优单一变量值组合作为优化的初始值,以热管理目标作为约束,进行多参数优化求解。

[0017] 进一步的,电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,加快模型优化求解。

[0018] 进一步的,以各最优单一变量值的组合作为优化初始值,加快模型优化求解。

[0019] 进一步的,所述单一变量包括电池间距、外部对流换热系数、膨胀石墨质量分数。

[0020] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0021] 1)、使用锂离子电池一维电化学-三维热耦合模型,通过温度和热源作为耦合变量,充分考虑到了电化学反应和电池温度之间的关联;

[0022] 2)、使用多参数优化方法,在目标函数和约束条件的基础上自适应选定最优参数值组合,克服了单参数优化忽略不同变量值对优化目标综合影响的问题,以及人为选定变量取值带来的主观性和不全面性;

[0023] 3)、只需通过少量的实验对模型进行验证,极大降低设计成本,缩短设计时间。

附图说明

[0024] 图1为本发明中优化步骤的流程图。

[0025] 图2为本发明的实施例一中三维热模型示意图。

[0026] 图3为本发明的实施例一中三维模型网格示意图。

[0027] 图4为本发明的实施例一中验证实验的实验装置图。

[0028] 图5为本发明的实施例一中验证实验的热电偶布置示意图(俯视图)。

[0029] 图6为本发明的实施例一中不同放电倍率下实验与模拟放电曲线对比图。

[0030] 图7为本发明的实施例一中不同放电倍率下实验与模拟电池温升曲线对比图。

[0031] 图8为本发明的实施例一中不同放电倍率下实验与模拟PCM温升曲线对比图。

[0032] 图9为本发明的实施例一中表2中的锂离子迁移数与浓度的关系。

[0033] 图10为本发明的实施例一中表3中的液相锂离子扩散系数方程参数 $D(c)$ 。

[0034] 图11为本发明的实施例一中表3中的液相电导率方程参数 $\sigma(c)$ 。

[0035] 图12为本发明的实施例一中表3中的平均摩尔活度系数方程参数 $f(c)$ 。

[0036] 图13为本发明的实施例一中表3中平衡电位方程参数 $\partial U_{oc}/\partial T$ 。

- [0037] 图14(a)为不同放电倍率下不同电池间距对电池间最大温差的影响；
- [0038] 图14(b)为不同放电倍率下不同电池间距对电池最大温度的影响。
- [0039] 图15(a)为电池间距为2mm时不同外部对流换热系数对电池间最大温差的影响；
- [0040] 图15(b)为电池间距为2mm时不同外部对流换热系数对电池最大温度的影响；
- [0041] 图15(c)为电池间距为10mm时不同外部对流换热系数对电池间最大温差的影响；
- [0042] 图15(d)为电池间距为10mm时不同外部对流换热系数对电池最大温度的影响。
- [0043] 图16(a)为电池间距为2mm时不同膨胀石墨质量分数对电池间最大温差的影响；
- [0044] 图16(b)为电池间距为2mm时不同膨胀石墨质量分数对电池最大温度的影响；
- [0045] 图16(c)为电池间距为10mm时不同膨胀石墨质量分数对电池间最大温差的影响；
- [0046] 图16(d)为电池间距为10mm时不同膨胀石墨质量分数对电池最大温度的影响。

具体实施方式

[0047] 为了便于理解本发明，下文将结合较佳的实施例对本发明作更全面、细致的描述，但本发明的保护范围并不限于以下具体的实施例。

[0048] 根据本发明的一个实施例，参见图1，提出一种锂离子电池相变热管理系统的优化方法，具体步骤包括：

[0049] 步骤一，获取电池和模组的外部设计参数、电极材料的电化学参数和热物性参数、相变材料的热物性参数。

[0050] 步骤二，建立一维电化学-三维热耦合模型，主要包括一个一维电化学模型和一个三维热模型，通过一维电化学模型计算出电池电化学反应过程中的平均产热，传递给三维热模型并计算出温度分布，将平均温度返给一维电化学模型从而影响部分电化学参数的值，进而影响热源，依此类推，从而将两个模型耦合起来，既考虑到了电化学反应的温度依赖性，又考虑到了不同热源对温度分布的影响。其中温度对电化学参数的定量影响用阿伦尼乌斯定律描述。模型的控制方程和边界条件均列在表1中。文中出现的符号与术语列在表2中。

[0051] (1) 一维电化学模型：主要描述锂离子在电极材料颗粒内部的固相扩散过程、锂离子在电解液中的液相扩散过程和电极材料颗粒表面的电化学反应过程，主要遵循的原理是质量守恒和电荷守恒。锂离子在电极材料内部的固相扩散过程由Fick第二定律和欧姆定律描述，锂离子在电解液中的液相扩散过程，包括在隔膜和多孔电极的电解液中的扩散，由Nernst-Planck方程和欧姆定律描述，电极材料表面的电化学反应由Butler-Volmer方程描述。

[0052] (2) 三维热模型：主要描述电池产热在电池内部、相变材料内部、环境中的热传递过程，主要遵循的原理是能量守恒。电池产热包括由电化学反应引起的可逆热与欧姆内阻和极化内阻引起的不可逆热两部分。由于相变过程的存在，相变材料的热物性不能当作常数，而与相变程度直接相关。边界条件由牛顿冷却定律给出。

[0053] 模型在一定假设前提下建立：忽略辐射传热，忽略电池内部的对流传热；电极活性材料由尺寸均匀的球形颗粒组成且忽略其体积变化，忽略副反应的影响。

[0054] 表1一维电化学-三维热耦合模型中的控制方程和边界条件

[0055]

物理量	控制方程以及边界条件	编号
固相电荷守恒	$j = \nabla \cdot (\sigma_s^{eff} \nabla \varphi_s)$	(1)
	$-\sigma_s^{eff} \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} \Big _{x=L_{diff}} = i_{app}$	(2)
	$-\sigma_s^{eff} \frac{\partial \varphi_s}{\partial x} \Big _{x=L_{sep,oc}+L_{sep}, x=L_{sp}+L_{sep,oc}+L_{sep}} = 0$	(3)
液相电荷守恒	$j = -\sigma_l^{eff} \nabla \varphi_l + \frac{2RT\sigma_l^{eff}}{F}(1-t_+) \left(1 + \frac{d \ln f_{\pm}}{d \ln c_l} \right) \nabla \ln c_l$	(4)
	$\frac{\partial \varphi_l}{\partial x} \Big _{x=0, x=L_{diff}} = 0$	(5)

[0056]

固相扩散	$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \right]$	(6)
	$-D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=0} = 0$	(7)
	$-D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \Big _{r=R_s} = \frac{j}{SF}$	(8)
液相扩散	$\varepsilon_l \frac{\partial c_l}{\partial t} = \nabla \cdot (D_l^{eff} \nabla c_l) + \frac{1-t_+}{F} j$	(9)
	$\frac{\partial c_l}{\partial x} \Big _{x=0, x=L_{diff}} = 0$	(10)
电化学反应	$j = a_v j_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha_a \eta F}{RT} \right) - \exp \left(\frac{-\alpha_c \eta F}{RT} \right) \right]$	(11)
	$\eta = \varphi_s - \varphi_l - U_{oc}$	(12)
	$j_0 = F k c_l^{\alpha_s} (c_{s,max} - c_{s,surf})^{\alpha_s} c_{s,surf}^{\alpha_c}$	(13)
电池能量守恒	$\rho_{batt} C_{p,batt} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{batt} \nabla T) + q_{batt}$	(14)
	$q_{batt} = q_{rev} + q_{ohm} + q_{rxn}$	(15)
可逆热	$q_{rev} = jT \frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$	(16)
欧姆热	$q_{ohm} = -i_s \cdot \nabla \varphi_s - i_l \cdot \nabla \varphi_l$	(17)
反应热	$q_{rxn} = j\eta$	(18)
PCM 能量守恒	$\rho_{PCM} C_{p,PCM} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{PCM} \nabla T)$	(19)
PCM 密度	$\rho_{PCM} = \theta \rho_1 + (1-\theta) \rho_2$	(20)
PCM 导热系数	$\lambda_{PCM} = \theta \lambda_1 + (1-\theta) \lambda_2$	(21)
PCM 热容	$C_{p,PCM} = \frac{1}{\rho_{PCM}} (\theta \rho_1 C_{p,1} + (1-\theta) \rho_2 C_{p,2}) + l_{PCM} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}$	(22)
	$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{(1-\theta) \rho_2 - \theta \rho_1}{\theta \rho_1 + (1-\theta) \rho_2}$	(23)
热边界条件	$-\lambda \nabla T = h(T - T_{ref})$	(24)

[0057] 表2文中出现的符号及术语

术语		
[0058]	c	锂离子浓度(mol/m ³)
	D	锂离子扩散系数(m ² /s)
	r	半径(m)
	R_s	电极颗粒半径(m)
	R_{batt}	电池半径(m)
	t	时间(s)
	j	局部电流密度 (A/m ²)
	j_0	交换电流密度(A/m ²)
	i_{app}	应用电流密度(A/m ²)
	σ	电导率(S/m)
	φ	电势(V)
	ε	体积分数
	L	厚度(m)
	L_{all}	一维电池厚度(m)
	B	Bruggeman 系数
[0059]	T	温度(K)
	E_a	活化能(kJ/mol)
	R	理想气体常数(J/mol/k)
	Φ	与温度有关的参数
	F	法拉第常数(C/mol)
	t_+	锂离子迁移数
	f_{\pm}	平均摩尔活度系数
	α_a	阳极电荷转移系数
	α_c	阴极电荷转移系数
	k	反应速率系数(m/s)
	U	电压(V)
	U_{oc}	开路电压(V)
	η	过电势(V)
	ρ	密度(kg/m ³)

C_p	热容(J/kg/K)
λ	热导率(W/m/K)
q	产热速率(W/m ³)
l_{PCM}	相变潜热(J/kg)
θ	相变前相态所占体积分数
α_m	潜热对热容的贡献系数
h	对流换热系数(W/m ² /K)
T_{ref}	环境温度(K)
Q	电池热容(Ah)
H_{batt}	电池高度(m)
b	膨胀石墨质量分数
d_{batt}	电池间距(m)
上下标	
0	初始值
end	结束值
s	固相
l	液相
pos	正极
neg	负极
sep	隔膜
cc	集流体
can	电池外壳
surf	表面
eff	有效值
batt	电池
rev	可逆热
ohm	欧姆热

[0060]

[0061]	rxn	反应热
	ref	参考值
	1	相变前相态
	2	相变后相态
	max	最大值
	min	最小值
	缩写	
	PA	石蜡
	PCM	相变材料
	SOC	荷电状态
EG	膨胀石墨	

[0062] 步骤三,通过对比不同放电倍率下分别通过实验和模拟得到的电压曲线和探针点温度曲线结果,验证步骤二中建立的一维电化学-三维热耦合模型的正确性。

[0063] 步骤四,使用步骤二建立的模型分别研究不同单一变量在不同放电倍率下,满足电池组热管理目标情况下的最优值,其中热管理目标是指电池最高温不超过50℃,电池间温差不超过5℃;得到各最优单一变量值组合。

[0064] 步骤五,以电池体积占模组总体积最大为优化目标函数,一方面考虑到实际使用时减小相变材料质量的需求,另一方面考虑到归一化提高模型收敛性,以步骤四中得到的各最优单一变量值组合作为优化的初始值,以热管理目标作为约束,使用线性近似约束优化算法(COBYLA)对步骤四中的变量进行优化求解。即先将初始值代入步骤二建立的一维电化学-三维热耦合模型,计算目标函数值,基于COBYLA算法选择下一组变量组合的值,并代入一维电化学-三维热耦合模型计算目标函数值,不断进行迭代,直到目标函数最大,从而得到优化后的变量值组合。

[0065] 实施例一

[0066] 以力神三元2.5Ah圆柱形18650电池作为实验电池,以熔点48~50℃的石蜡混合200目可膨胀石墨制成的膨胀石墨(EG)作为PCM,研究变量是电池间距、膨胀石墨质量分数、模组外部对流换热系数。目标是找到1~3C放电过程中,满足热管理条件前提下,能使得电池体积占模组总体积最大的变量组合。正常情况下,电池体积占模组总体积的大小只与电池间距直接相关,但是应用本发明提出的方法,可以综合考虑电池间距(d_{batt})、膨胀石墨质量分数(b)、外部对流换热系数(h)对目标函数的影响,得到更优化的设计方案。该方法不仅限于对该热管理系统的优化设计,对所有锂离子电池相变热管理系统均适用。

[0067] 进行模型验证时,电池间距、膨胀石墨质量分数、外部对流换热系数分别设置为2mm、1%、0(即绝热条件),与验证实验中的工况保持一致。注意模型验证时的初始值与优化初始值并不相同。

[0068] 步骤一,基于实验测量和文献调研得到电池技术参数、基本电化学参数、与温度有关的电化学参数、电池和相变材料的热物理参数,分别列于表3~6中。

[0069] 表3电池技术参数

参数名称	符号(单位)	数值
电池容量	Q (Ah)	2.5
初始电压	U_0 (V)	4.2
截止电压	U_{end} (V)	2.75
电池半径	R_{batt} (mm)	9
电池高度	H_{batt} (mm)	65

[0071] 表4电池基本电化学参数

参数名称	符号(单位)	正极	负极	隔膜
活性材料颗粒半径	R_s (μm)	10.5	10.5	-
活性材料体积分数	ε_s	0.52	0.498	-
Bruggeman 系数	B	2.98	2.98	3.15
电解液体积分数	ε_l	0.31	0.33	0.37
反应速率系数	k (m/s)	11e-12	11e-12	-
初始锂离子浓度	$c_{s,0}$ (mol/m ³)	2500	30876	-
最大锂离子浓度	$c_{s,\text{max}}$ (mol/m ³)	30000	31507	-
初始电解液浓度	$c_{l,0}$ (mol/m ³)	1200	1200	1200
固相电导率	σ_s (S/m)	100	100	-
电荷转移系数	α	0.5	0.5	-
锂离子迁移数	t_+	-	-	附图 9

锂离子扩散系数	D (m ² /s)	5e-13	表 5	表 5
一维长度	L (μm)	60	65	25
法拉第常数	F (C/mol)	96487		
理想气体常数	R (J/mol/K)	8.314		
环境温度	T_{ref} (K)	293.15		

[0074] 注:“-”表示该参数不存在或忽略该参数。

[0075] 表5与温度有关的电化学参数

参数名称	符号(单位)	方程	编号
负极锂离子扩散系数	$D_{s,neg}(m^2/s)$	$1.4523 \times 10^{-13} \exp \left[\frac{68025.7}{8.314} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$	(25)
电解液锂离子扩散系数	$D_l(m^2/s)$	$D(c) \times \exp \left[\frac{16500}{8.314} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$ ($D(c)$ 见附图 10)	(26)
[0076] 电解液电导率	$\sigma_l(S/m)$	$\sigma(c) \times \exp \left[\frac{4000}{8.314} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$ ($\sigma(c)$ 见附图 11)	(27)
电解液平均摩尔活度系数	f_l	$f(c) \times \exp \left[-\frac{1000}{8.314} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]$ ($f(c)$ 见附图 12)	(28)
正极平衡电位	$U_{oc,pos}(V)$	$-10.27 \left(\frac{c_{s,pos}}{c_{s,pos,max}} \right)^4 + 23.9 \left(\frac{c_{s,pos}}{c_{s,pos,max}} \right)^3 + 4.56 - 16.77 \left(\frac{c_{s,pos}}{c_{s,pos,max}} \right)^2$ $+ 2.59 \frac{c_{s,pos}}{c_{s,pos,max}} + (T - T_{ref}) \frac{\partial U_{oc,pos}}{\partial T}$ ($\partial U_{oc,pos} / \partial T$ 见附图 13)	(29)
[0077] 负极平衡电位	$U_{oc,neg}(V)$	$U_{oc,neg} = 0.844 \exp \left(-61.79 \frac{c_{s,neg}}{c_{s,neg,max}} \right) + (T - T_{ref}) \frac{\partial U_{oc,neg}}{\partial T}$ $+ 0.382 \exp \left(-665.8 \frac{c_{s,neg}}{c_{s,neg,max}} \right) - \exp \left(39.42 \frac{c_{s,neg}}{c_{s,neg,max}} - 41.9 \right)$ $- 0.03 \arctan \left(25.59 \frac{c_{s,neg}}{c_{s,neg,max}} - 4.1 \right) - 0.01 \arctan \left(32.5 \frac{c_{s,neg}}{c_{s,neg,max}} - 15.7 \right)$ ($\partial U_{oc,neg} / \partial T$ 见附图 13)	(30)

[0078] 注:1. Comsol中默认开路电势与平衡电位相等;

[0079] 2. Comsol中默认SOC = $c_s / c_{s,max}$ 。

[0080] 表6电池和相变材料的热物性参数

	热导率 $\lambda(\text{W/m/K})$	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	热容 $C_p(\text{J/kg/K})$	潜热 $l(\text{J/kg})$
正极	1.58	2328.5	1269.21	-
负极	1.04	1347.33	1437.4	-
正极集流体	170	2770	875	-
负极集流体	398	8933	385	-
隔膜	0.344	1008.98	1978.16	-
膨胀石墨	129	11	900	-
石蜡（固态）	0.35	814	2500	176460
石蜡（液态）	0.15	724	2180	-
PCM	$\frac{129\rho_{PCM}b}{2333}$	$\rho_{EG}b + \rho_{PA}(1-b)$	$C_{P,EG}b + C_{P,PA}(1-b)$	$l_{PA}(1-b)$

[0082] 注:1. “-”表示该参数不存在或忽略该参数;

[0083] 2. PCM密度和PCM热容按石蜡和膨胀石墨机械混合计算,PCM热导率参考文献(DOI: 10.1016/j.enconman.2014.11.040),其中b为膨胀石墨质量分数。

[0084] 步骤二,基于本实施例一步骤一中的参数,使用Comsol建立整个电池组热管理系统的一维电化学-三维热耦合模型,模型示意图和网格图见附图2、3。

[0085] 步骤三,通过验证实验验证模型有效性,其中实验设置具体见附图4、5,通过对比1C、1.5C、2C放电倍率下的放电曲线和温升曲线的模拟结果和实验结果进行验证,对比结果详见附图6、7、8。注意为使温升对比图看起来更直观清晰,只在探针点/热电偶布置点中选取代表性的点进行温升曲线对比。从对比结果可以看出模型有效,且电池模拟数据相较PCM模拟数据更准确,可能与模型模拟时简化相变材料多相变过程(固-固相变和固-液相变)有关。

[0086] 步骤四,由验证实验结果可知,电池间距、膨胀石墨质量分数、外部对流换热系数分别为2mm、1%、0时电池组无法满足热管理条件,为了加快模型优化求解,应取单参数最优解的组合作为模型初始值。

[0087] (1) 电池间距

[0088] 分别取电池间距为5mm、7mm、10mm,膨胀石墨质量分数和外部对流换热系数分别为1%、0,其他工况参数保持不变,取1、2、3C三个倍率进行放电模拟,截止电压设置2.75V,不同电池间距和放电倍率下电池最大温度和电池间最大温差见附图14(a)、(b)。由图可知,放电倍率越大,电池最大温度和电池间最大温差越大;电池间距越大,电池最大温度越小,与PCM潜热总量更大,能吸收更多电池产热直接相关;电池间最大温差随着间距变大而变大,且倍率越高越明显,可能与PCM质量越大电池最低温越小,且PCM导热系数过小,电池最高温无法进一步降低有关;电池间最大温差在3C放电过程以及电池间距5mm时的2C放电过程出现先上升后下降的趋势,主要是由于PCM达到相变温度,吸收大量电池产热,1C放电时由于

电池最高温也未超过相变温度,最大温差曲线无下降趋势也可验证这一观点;电池间距5mm时的3C放电过程中,电池间最大温差在下降过后还出现上升趋势,可能因为模组其他区域开始发生相变,电池最低温上升速度减缓。根据热管理目标,电池间距为5、7、10mm均满足电池间最大温差小于5℃的要求,但只有间距为10mm时满足电池最大温度小于50℃的要求,因此将10mm作为电池间距的单参数最优解。

[0089] (2) 外部对流换热系数

[0090] 从电池间距影响的研究结果可知放电倍率越大,电池最大温度和电池间最大温差越大,同时为了使图更清晰直观,下文仅研究3C放电过程中的电池最大温度和电池间最大温差。分别取外部对流换热系数为5、10、20、30、40W/m²/K,膨胀石墨质量分数和电池间距分别为1%、2mm,其他工况参数保持不变,3C放电过程中不同对流换热系数下电池最大温度和电池间最大温差见附图15(a)、(b)。由图可知,外部对流换热系数越大,电池最大温度越小,但是电池组最大温差越大,主要由于外部相变材料和外围电池温度过低导致;相同的,电池间最大温差先上升后出现下降的趋势也是由PCM相变吸热引起,所以外部对流换热系数越大,最大温差的峰出现越晚;外部对流换热系数越大,最大温差下降阶段斜率越小,也是因为对流换热系数通过影响电池最高温从而影响系统潜热利用导致;当对流换热系数较小时,电池间最大温差在下降后出现上升趋势,可能是因为模组其他区域开始发生相变,电池最低温上升速度减缓所致。由图可知当膨胀石墨质量分数和电池间距分别为1%和2mm时,所取任何对流换热系数数值均无法保证系统满足热管理目标。将电池间距重新设置为10mm并增加外部对流换热系数为0的选择,其他参数保持不变,3C放电过程中不同对流换热系数下电池最大温度和电池间最大温差见附图15(c)、(d)。与电池间距为2mm时的模拟结果类似,外部对流换热系数越大,电池最大温度越小,电池间最大温差越大;不同的是,由于更大的电池间距带来更多的相变材料,更大的显热容量帮助吸收更多电池产热,各工况下系统相变发生时间整体推迟,甚至放电结束前都不发生相变。由图可知,当电池间距10mm时,只有外部对流换热系数为0、5W/m²/K时满足热管理要求,优先选择无外部能耗的方案,因此将0作为对流换热系数的单参数最优解。

[0091] (3) EG质量分数

[0092] 同样,为了使图更清晰直观,仅研究3C放电过程中的电池最大温度和电池间最大温差。分别取膨胀石墨质量分数为5%、10%、20%、30%,外部对流换热系数和电池间距分别为0、2mm,其他工况参数保持不变,3C放电过程中不同膨胀石墨质量分数下电池最大温度和电池间最大温差见附图16(a)、(b)。随着膨胀石墨质量分数变大,PCM导热系数变大,潜热变小,因此应存在一个最佳值使得PCM导热系数和潜热的作用取得最佳平衡。由图可知,膨胀石墨质量分数越大,PCM导热系数越大,系统越早发生相变,但是由于潜热总量相应减小,相变发生后不同工况下的电池最大温度之间的差距缩小,甚至导致最大温度在放电末期出现加速上升,两个因素共同作用使得不同工况下电池最大温度的最大值差距并不大。类似的,PCM发生相变前,膨胀石墨质量分数越大,PCM导热系数越大,电池间最大温差越小;PCM相变后,各曲线均出现先下降后上升的趋势,但膨胀石墨质量分数过大时,由于潜热过小,电池间最大温差出现快速上升。由图可知,当外部对流换热系数和电池间距分别为0、2mm时,所取任何膨胀石墨质量分数数值均无法保证系统满足热管理目标。将电池间距重新设置为10mm,其他参数保持不变,3C放电过程中不同膨胀石墨质量分数下电池最大温度和电

池间最大温差见附图16(c)、(d),由图可知,当电池间距10mm时,各膨胀石墨质量分数取值均满足热管理要求,当膨胀石墨质量分数为10%时明显优于1%和5%,综合电池间距2mm时的研究结果,选择10%作为膨胀石墨的单参数最优解。

[0093] 步骤五,在一维电化学-三维热耦合模型中添加优化模块,选择COBYLA算法作为优化算法,优化容差0.001,最大迭代次数1000次;优化目标是电池体积占模组总体积最大,即使得相变材料体积占模组总体积最小,用量最少;优化约束是单个电池放电过程中温度不超过50℃且电池间温差不超过5℃;优化参数为电池间距、膨胀石墨质量分数、外部对流换热系数,具体设置见表7。将表7中初始值代入一维电化学-三维热耦合模型,选择3C放电过程,计算目标函数值,基于COBYLA算法选择下一组变量组合的值,并代入一维电化学-三维热耦合模型计算目标函数值,如果不满足约束条件则重新选择变量组合,不断进行迭代,直到目标函数最大,从而得到优化后的参数组合。

[0094] 最终得到的参数优化结果见表8,目标函数值相比初始参数组合时的目标函数值提高18.4%,即在保证各放电倍率满足电池热管理条件的前提下,相变材料所占体积分数减小18.4%,证明本发明提出的热管理系统优化方法有效。

[0095] 表7优化参数设置

[0096]

参数名称	符号(单位)	初始值	上界	下界
电池间距	d_{batt} (mm)	10	2	10
EG质量分数	b (%)	10	1	30
对流换热系数	h ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)	0	0	40

[0097] 表8优化结果对比

[0098]

	d_{batt} (mm)	b (%)	h ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)	目标函数值 (%)	最高温 ($^{\circ}\text{C}$)	最大温 差 ($^{\circ}\text{C}$)
优化前	10	10	0	27.3	49.8	2.5
优化后	4.4	10.9	0.8	45.7	47.6	2.6

[0099] 尽管上面对本发明说明性的具体实施方式进行了描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,且应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

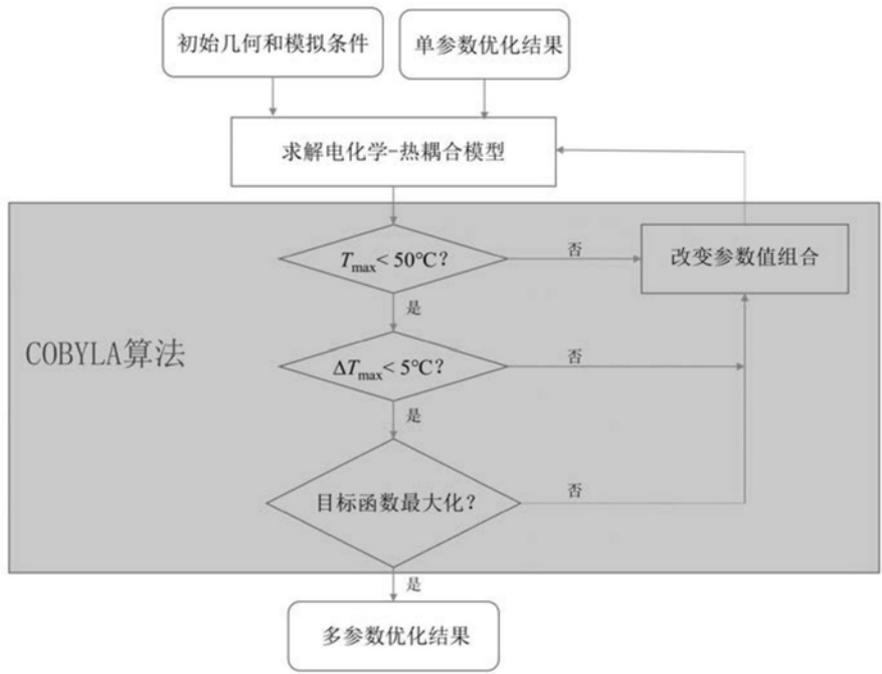


图1



图2

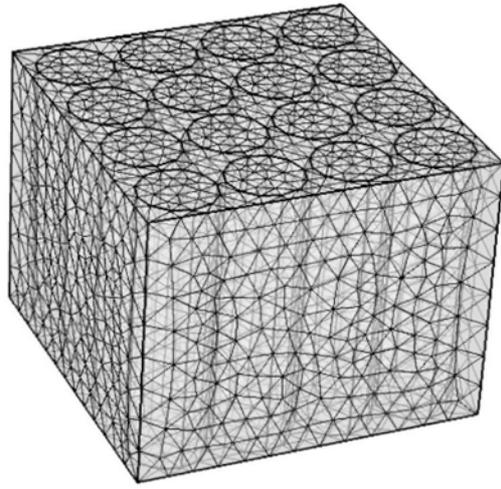


图3

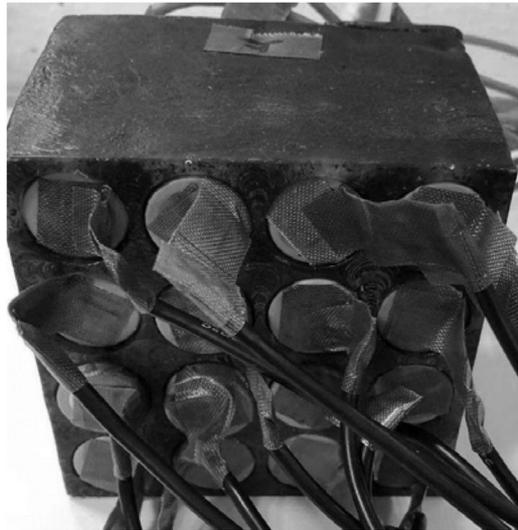


图4

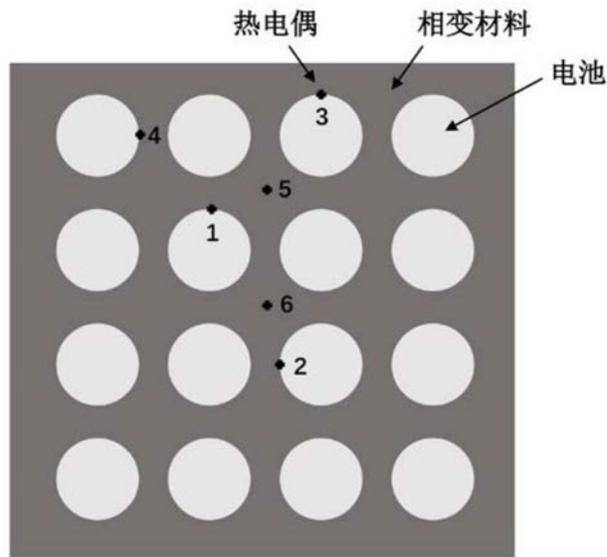


图5

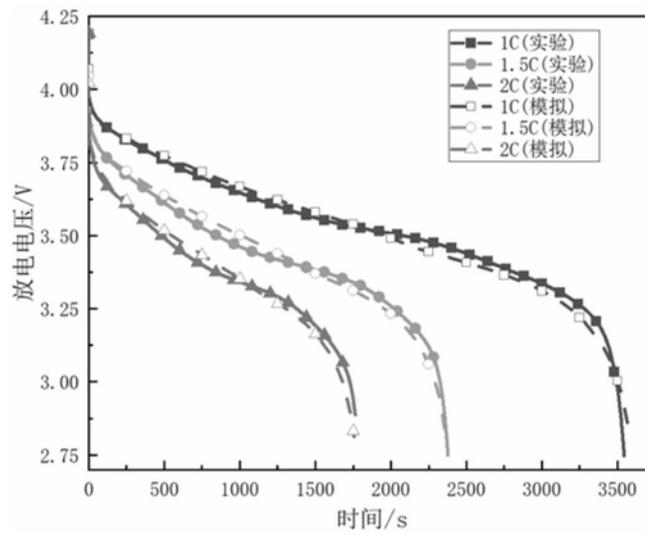


图6

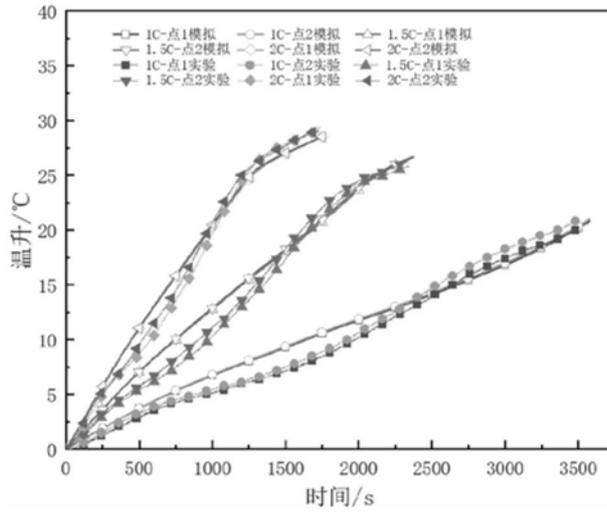


图7

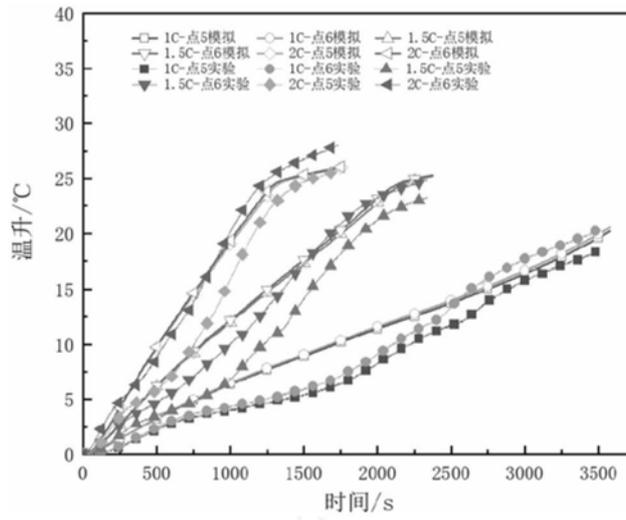


图8

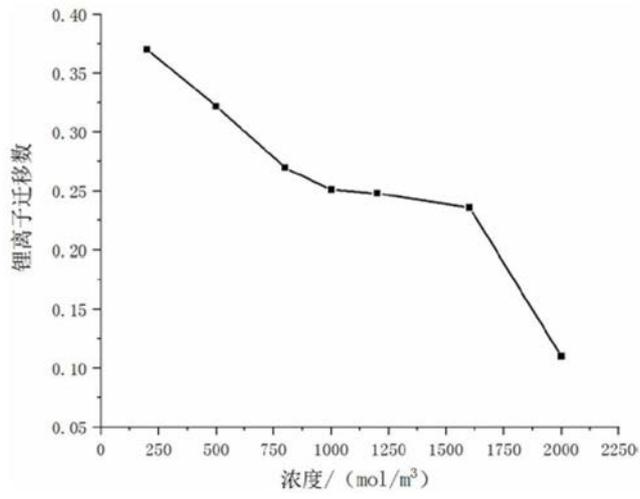


图9

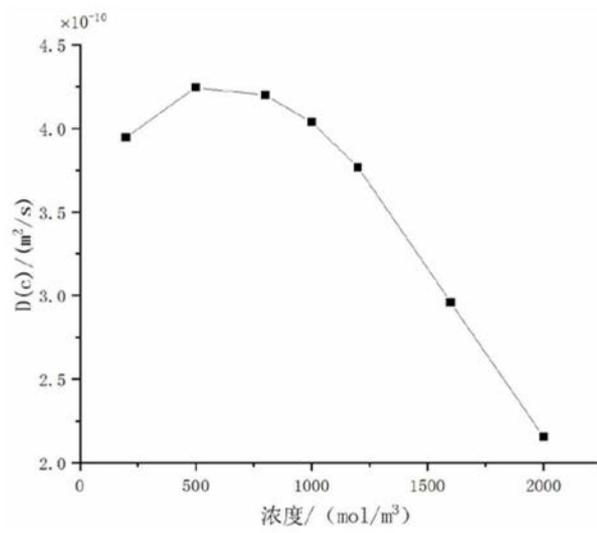


图10

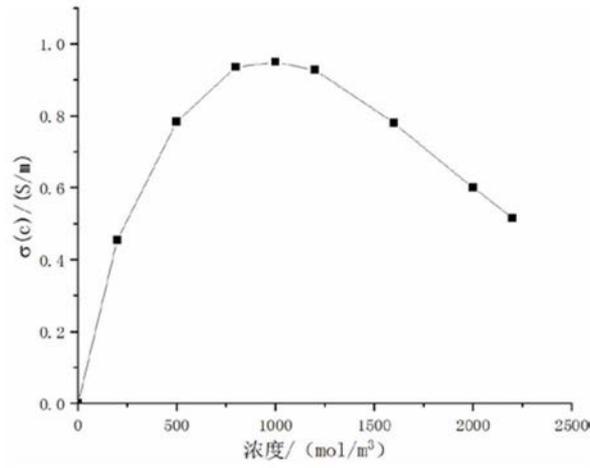


图11

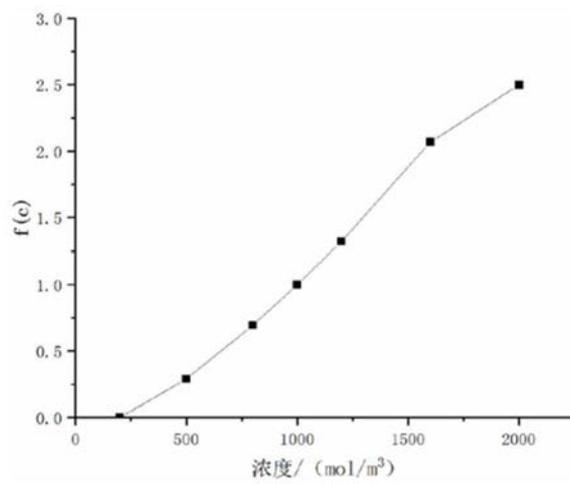


图12

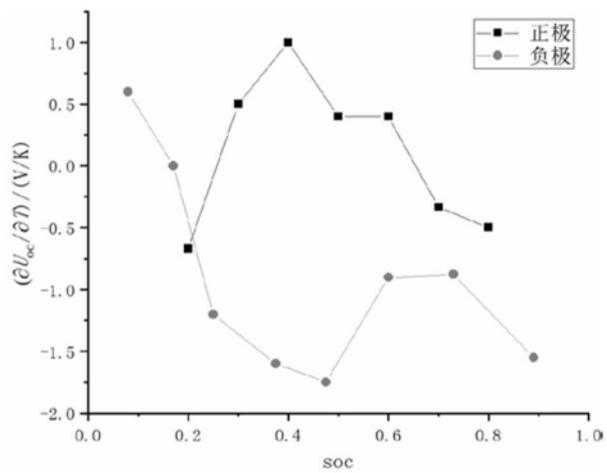


图13

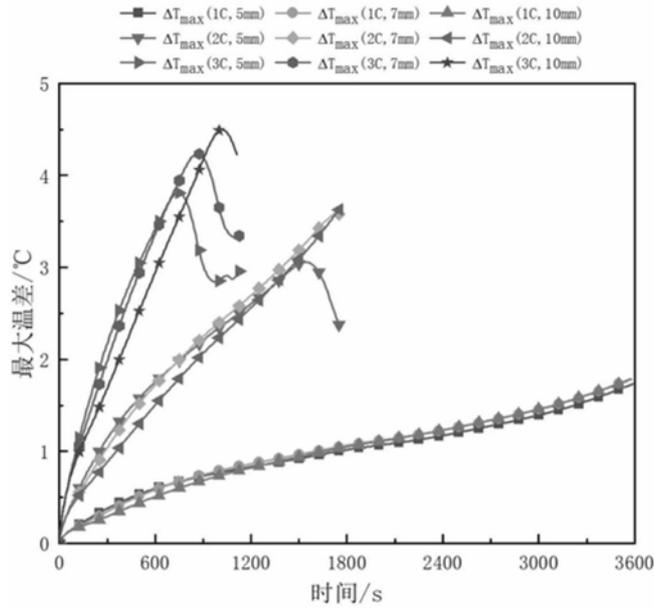


图14 (a)

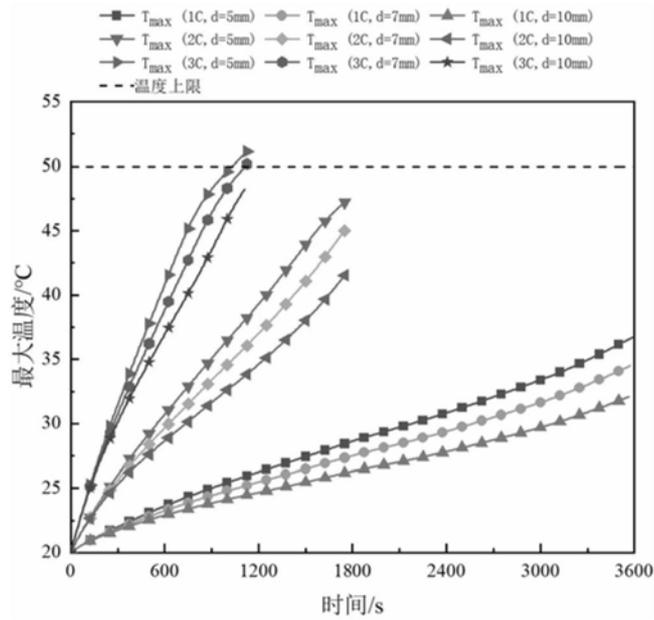


图14 (b)

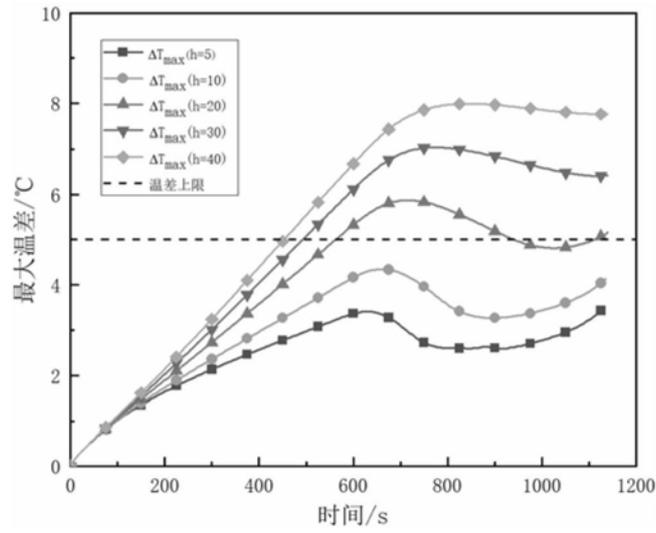


图15 (a)

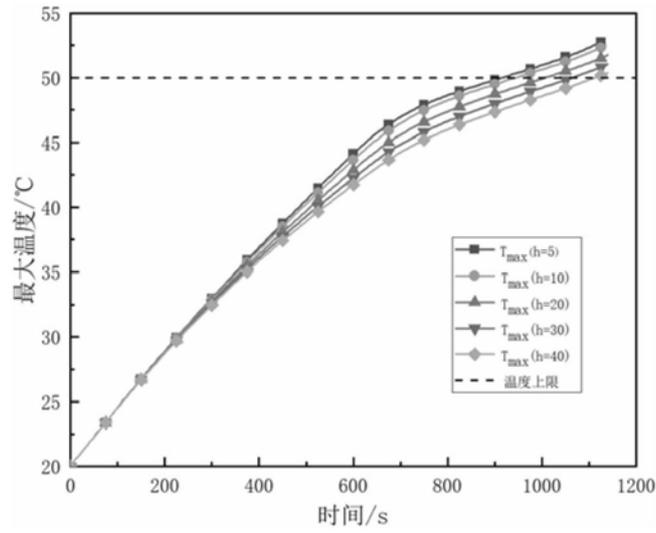


图15 (b)

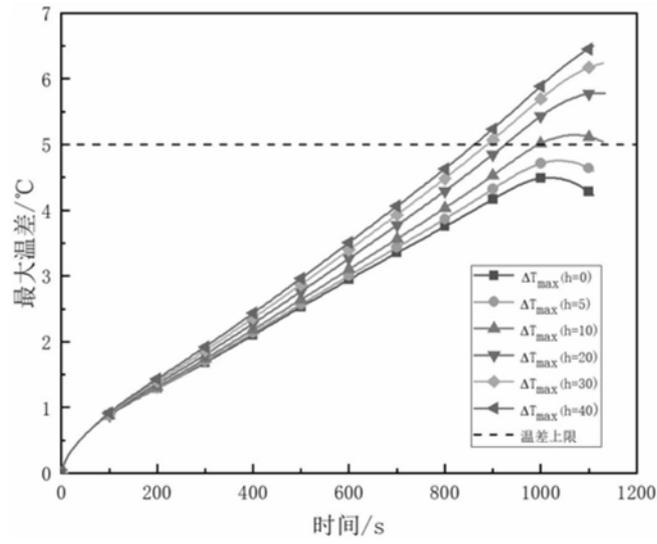


图15(c)

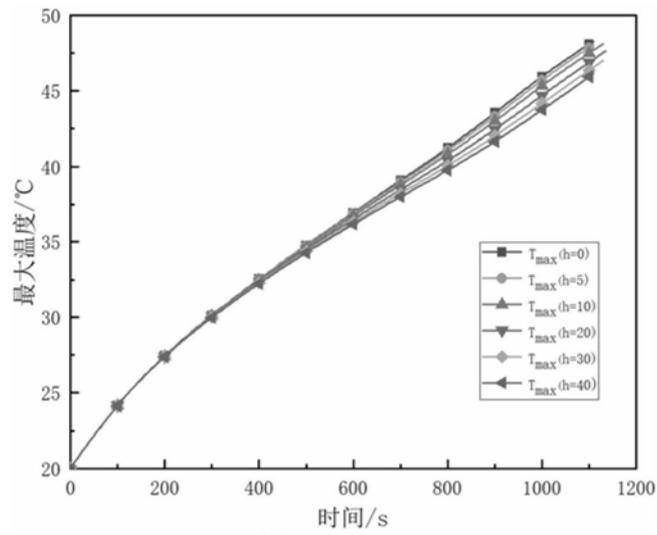


图15(d)

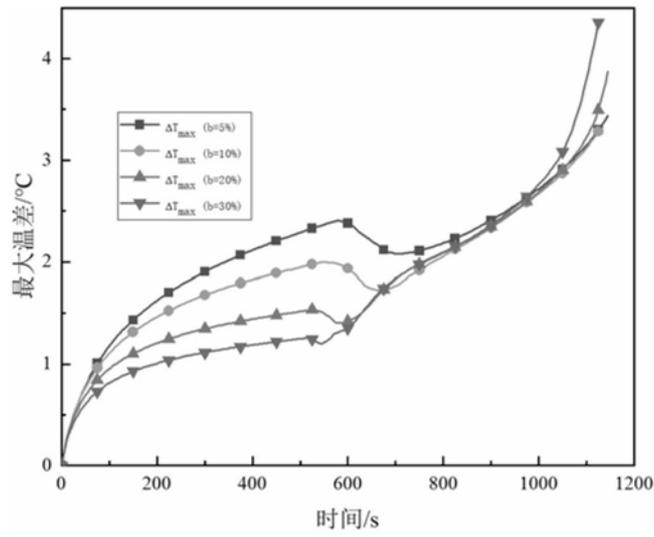


图16 (a)

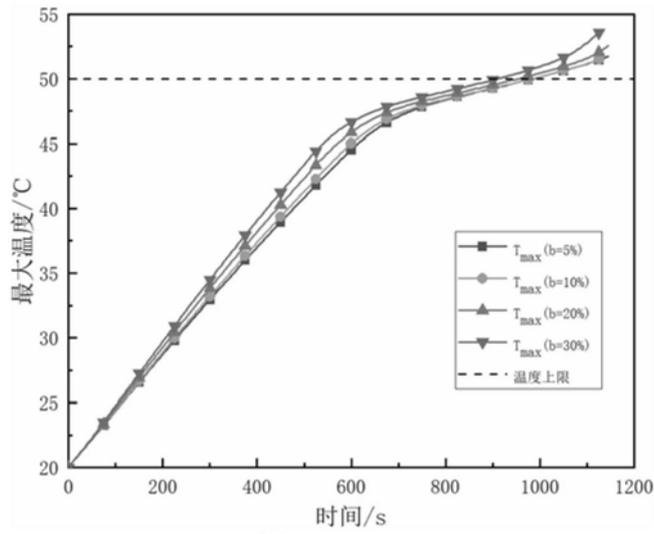


图16 (b)

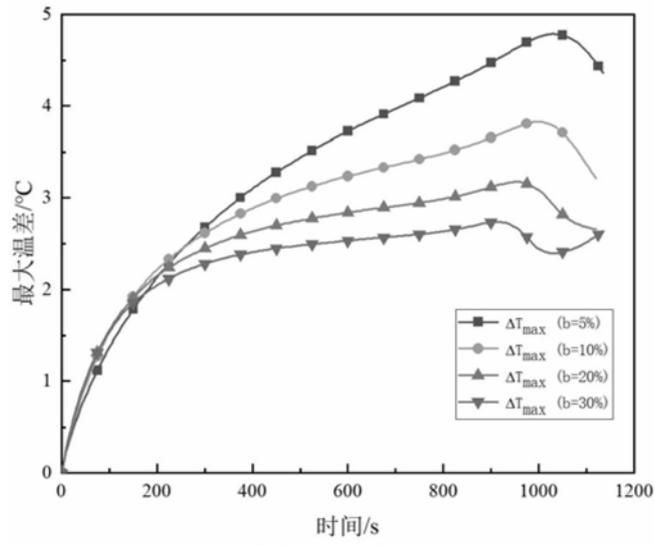


图16 (c)

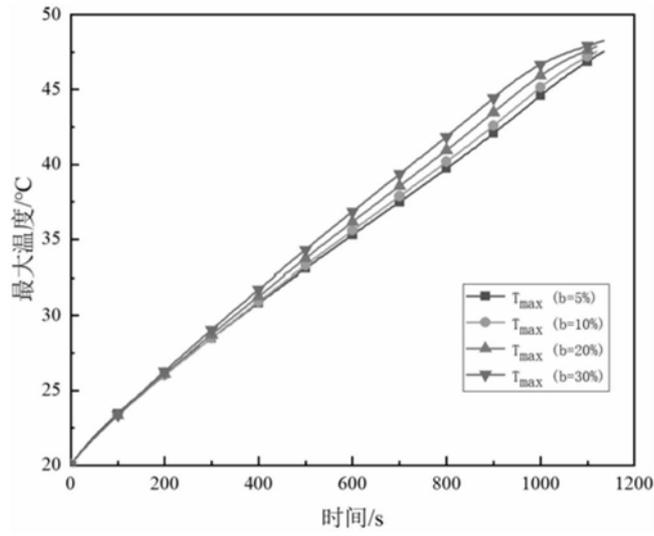


图16 (d)