

对流换热系数考虑温度影响时对锂电池热扩散影响的数值分析

韩润利^{1,2}, 唐明云^{1,2*}, 王冬^{1,2}, 张少杰^{1,2}

1. 安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 淮南 232001

2. 安徽理工大学安全科学与工程学院, 淮南 232001

摘要 基于电化学-热耦合模型,以4节18650锂离子电池为研究对象,分析考虑温度效应时的对流换热系数对锂电池热扩散的影响及其程度。首先基于传热理论中的流体横掠顺排管束平均表面换热系数计算方法,计算得到不同温度和流速下锂离子电池表面对流换热系数,通过曲线拟合得到空气流速分别为0.05、0.1、0.2和0.3 m/s时对流换热系数与温度的函数关系,得出对流换热系数与温度不完全呈线性变化;其次基于以上函数关系,通过数值模拟分析了考虑温度效应时的对流换热系数对锂电池热扩散的影响。结论表明,考虑温度效应时的对流换热系数对锂电池温度场影响的程度不同。当空气流速分别为0.05、0.2、0.3 m/s时,锂电池的温度函数使锂电池放电过程中的温差变化均小于1%;但是当空气流速为0.1 m/s、锂电池放电至729 s时,考虑温度因素的对流换热系数的温度场比常数时的温度场下降了21.71%。该影响规律与不同流速下对流换热系数随温度变化相一致,也表明对流换热系数与流速、温度均有关,而且对流换热系数越大,锂电池越容易与外界空气发生热交换,锂电池放电过程中温差越小。

关键词 电化学-热耦合模型;热管理;空气流速;对流换热系数

锂离子电池因具有高能量密度且循环寿命较长等优点给生活带来极大便利,但近几年新能源汽车因锂离子电池屡次发生火灾甚至爆炸事件,众多研究人员对锂离子电池进行实验和仿真研究并分析热量来源与锂离子电池热失控的热特性^[1]。

Wang等^[2]利用加速绝热量热仪和电池循环仪研究锂电池的热响应,结果表明热量主要来源于放电和热失控,电池容量越大存在的风险越大;锂电池在高温的环境下工作,热稳定性明显降低。为降低锂电池热失控的发生概率,科研人员研究了锂电池热

收稿日期:2022-07-07;修回日期:2022-11-10

作者简介:韩润利,硕士研究生,研究方向为锂电池热管理系统,电子信箱:hr113844639468@163.com;唐明云(通信作者),教授,研究方向为火灾防治,电子信箱:mytang@aust.edu.cn

引用格式:韩润利,唐明云,王冬,等. 对流换热系数考虑温度影响时对锂电池热扩散影响的数值分析[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 104-112; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.011

管理系统(BTMS),使锂电池的工作温度始终稳定在最佳温度范围内^[3-11]。刘晓东^[12]分别建立了集总模型和电-热耦合模型研究锂离子电池热管理系统,模拟结果表明集总热模型的优点在于模拟温度精度较高,而电-热耦合模型在模拟外部电压方面有优势。刘晓东基于集总模型设计冷板通道结构,选择效果较好的蛇形冷板通道并对其进行优化。王晓慧等^[13]建立强制风冷工况和自然冷却工况下的仿真模型,发现强制风冷下1 C放电结束时温升约12.5℃,比自然冷却工况降低3℃,模型结果表明使用环境温度、0.5 m/s的冷却空气时就可满足散热的需求并且单体电池温度能达到较好的一致性。大多研究在假设锂电池对流换热系数定值的前提下改变锂电池充放电倍率、不同荷电状态(state of charge, SOC)等参数研究锂电池热特性参数^[14-18],而很少考虑对流换热系数的具体计算方法以及在受温度影响时对锂电池放电过程中温度场的影响。

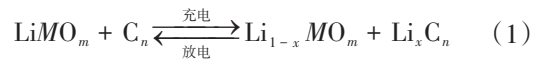
对流换热系数和导热系数均是研究锂电池热力学仿真不可或缺的热物性参数。冯旭宁等^[19]将锂电池简化为各向异性的长方体,建立锂离子电池热模型,利用“三线共点”图解法得出垂直于锂电池内部层叠方向的导热系数小于平行方向的导热系数。王翔等^[20]利用变对流换热系数(variable convective heat transfer coefficient, VCHTC)建立锂电池的生热优化模型研究不同环境温度和放电倍率下单体锂电池的温升特性,结果表明该模型结果与恒定对流传热系数模型在不同工况下的平均绝对百分误差分别为1.1%和6.9%。黄文才^[21]在高温热失控仿真模拟中通过设置不同对流换热系数研究该参数对锂电池热行为的影响,结果显示传热系数越大,锂电池发生热失控所需时间越短。以上研究表明了不同换热系数对锂电池散热的影响,但未定量给出对流换热系数考虑温度时对锂电池热扩散影响程度。选取某大型电池包中的4节18650锂电池作为研究对象,基于传热理论中的流体横掠顺排管束平均表面换热系数计算方法,模拟在强制风冷状况下锂电池4 C放电的过程,研究对流换热系数考虑温度时对锂电池热扩散影响及其程度。

1 锂离子电池工作及产热原理

1.1 锂离子电池工作原理

锂离子电池充放电过程是锂离子在正负极的脱嵌过程。放电时,锂离子从负极脱出穿过隔膜嵌入正极,电子通过外电路从负极到达正极;充电时,则反之。

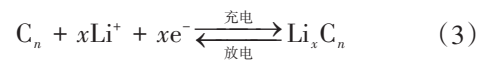
通过下列反应式表示锂离子电池的工作原理:总反应



正极反应



负极反应



式中, M 表示Ni、Mn、CO等。

1.2 锂离子电池产热模型

锂离子电池在正常工作中的产热主要包括电化学反应热 Q_R 、焦耳热 Q_J 、极化热 Q_P 和副反应热 Q_s ^[22]。

$$Q_{\text{总}} = Q_R + Q_P + Q_J + Q_s \quad (4)$$

电化学反应热是锂电池在充放电过程中内部发生化学反应所吸收或释放的热量,充电过程中锂离子电池吸热, $Q_R < 0$;反之锂电池放电时, $Q_R > 0$ 。焦耳热是电流通过锂电池电阻所产生的热量,焦耳热在锂电池产热中具有较高的占比。极化热是电流通过极化内阻时由于焦耳效应所产生的热量,其产热方式与焦耳热相同。锂离子电池在正常工作时可忽略副反应热。

2 建模

2.1 物理模型

仿真软件Comsol Multiphysics具有多物理场耦合的优点,本研究选用Comsol软件耦合集总电池接口、传热接口和流体流动接口来建立瞬态模型。

张晓光等^[23]建立相变冷却耦合空气冷却散热

模型,通过模拟在不同单体间距下电池组的温度场来研究电池单体排布。结果表明,电池组内的温差随着单体电池间距的增大出现先减小后增大的变化趋势,单体电池的间距并非越大越好,在5 mm时电池热管理性能最佳。本研究选取车载电池中的4节单体电池作为研究对象,间距均设为5 mm,模拟在4 C放电过程中锂电池温度等参数的变化。

实际应用中往往只能监测到锂电池表面温度,锂电池内部温度无法及时测量,这给锂电池的热管理增加了一定难度,且锂电池内部温度比表面温度高,因此监测锂电池的内部温度更具有研究价值。本研究在锂电池内部选取了6个点,研究其热物性参数的变化。图1中A、B、C、D、E、F的位置坐标为(0.000, 0.000, 0.0325)、(0.023, 0.000, 0.0325)、(0.009, 0.000, 0.0325)、(0.000, 0.009, 0.0325)、(0.0115, 0.0115, 0.0325)、(0.032, 0.000, 0.0325),位置坐标单位为m。该6点的位置坐标按照温度高低排列。后续分析均用1、2、3、4分别表示该模型中具体的锂电池,A、B、C、D、E、F分别表示其坐标位置。

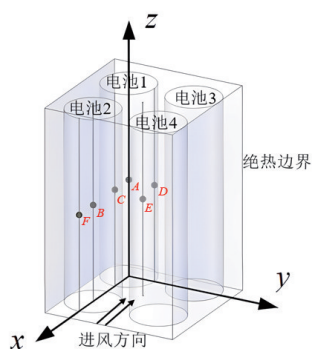


图1 锂电池几何模型立体图

2.2 传热模型

2.2.1 电化学-热耦合模型

考虑到锂电池内部实际结构的复杂性,进行如下假设^[14,24]:(1) 锂电池的密度、比热容不随时间、温度变化而变化,忽略辐射散热;(2) 锂电池内部受热均匀;(3) 因锂电池组内各电池呈对称性分布,所以可将电池组四周视为绝热环境;(4) 锂电池周围的空气假设为理想气体。

在多物理场耦合中选择电化学热接口即添加

热源。电化学热接口基于上述假设,其锂电池导热能量守恒方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(r \lambda_\varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (5)$$

式中, ρ 为锂电池平均密度^[25], $\rho=2523 \text{ kg/m}^3$; C_p 为锂电池的平均比热容, $C_p=1145 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; T 为微元体温度,K; t 为时间,s; λ_r 、 λ_φ 、 λ_z 为锂电池不同方向的导热系数, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; q 为内热源, W/m^3 , r 为单体锂电池的半径,m。

2.2.2 边界条件

本研究主要探究考虑温度效应时的对流换热系数对锂电池温度场的影响,因此选择传热学3类边界条件中的第三类边界条件^[26],即选择 Comsol Multiphysics 热通量中的对流热通量^[27],如下式:

$$q_0 = h(T_{\text{ex}} - T) \quad (6)$$

式中, q_0 为热通量, W/m^2 , T_{ex} 为锂电池外部空气的温度,℃。 h 采取流体横掠顺排管束平均表面换热系数计算方法。影响管束平均传热系数的影响因素主要有雷诺数 Re 、流体的普朗特数 Pr 。由于空气沿着进风方向的平均流速会发生变化,选定一个特征流速以计算 Re 。本研究分别选择 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 m/s 作为平均流速。

100≤ Re <1000 时

$$Nu = 0.52 Re^{0.5} Pr^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \quad (7)$$

1000≤ Re <10000 时

$$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \quad (8)$$

$$h = Nu \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

式中, $Pr = \frac{v}{\alpha}$,表示动量扩散能力与热量扩散能力的一种量度; Nu 为努塞尔数, $Nu = \frac{hd}{\lambda}$,表示壁面上流体的无量纲温度梯度; Re 为雷诺数, $Re = \frac{ud}{v}$,表示惯性力与黏性力之比的一种量度; v 为运动黏度,表示重力作用下流体内部流动阻力的量度, m^2/s ; α 为热扩散系数, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$,表示物体中某一点的温度

的扰动传递到另一点的速率的量度, m^2/s ; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; d 为单体锂电池直径, m ; λ 为流体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; u 为流体的流速(本文为空气流速), m/s , $\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25}$ 为物性修正因子, 本研究 $\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.25} = 1$ 。具体计算结果如表1所示。

表1 对流换热系数计算结果

温度/ $^{\circ}\text{C}$	入口流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Re	Pr	对流换热系数 $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
20	0.1	119.522	0.703	7.21
	0.3	358.566	0.703	12.48
	0.5	597.610	0.703	16.11
	0.7	836.653	0.703	19.06
	0.9	1075.697	0.703	27.81
30	0.1	112.500	0.701	7.20
	0.3	337.500	0.701	12.47
	0.5	562.500	0.701	16.10
	0.7	787.500	0.701	19.05
	0.9	1012.500	0.701	27.57
40	0.1	106.132	0.699	7.22
	0.3	318.396	0.699	12.51
	0.5	530.660	0.699	16.15
	0.7	742.925	0.699	19.10
	0.9	955.189	0.699	21.66
50	0.1	100.279	0.698	7.19
	0.3	300.836	0.698	12.46
	0.5	501.393	0.698	16.08
	0.7	701.950	0.698	19.03
	0.9	902.507	0.698	21.58

3 模拟结果及分析

3.1 流速和环境温度对对流换热系数的影响

根据流体横掠管束的相关理论分别计算出空气流速为0.05、0.1、0.2、0.3 m/s时各温度对应的对流换热系数,将计算结果与温度进行曲线拟合。影响对流换热的因素有很多,表征对流换热强弱的表面传热系数取决于流体速度 v 、黏度 η 、密度 ρ 、比热 c 、导热系数 λ 等多种因素的复杂函数,为方便数值模拟求解,需要对对流换热系数与温度进行曲线拟合,下列公式(10)~(13)分别是在不同空气流速下,对流换热系数与温度的拟合函数。图2~图5分别是在不同空气流速下对流换热系数与温度的拟合曲线图。

空气流速为0.05 m/s时对流换热系数拟合多项式

$$h = 9.53 \times 10^{-13}T^5 - 9.47 \times 10^{-10}T^4 + 3.25 \times 10^{-7}T^3 - 4.65 \times 10^{-5}T^2 - 4.83 \times 10^{-3}T + 5.78 \quad (10)$$

空气流速为0.1 m/s时对流换热系数拟合多项式

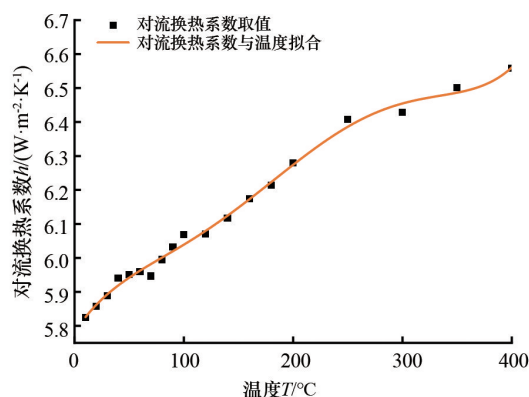
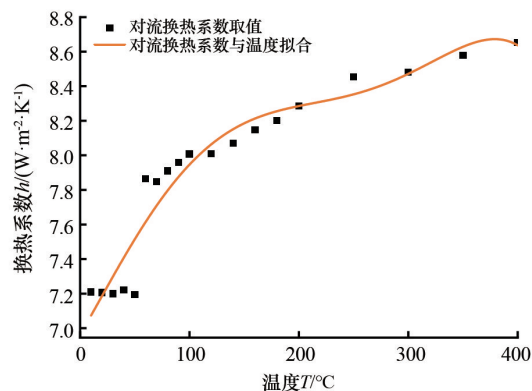
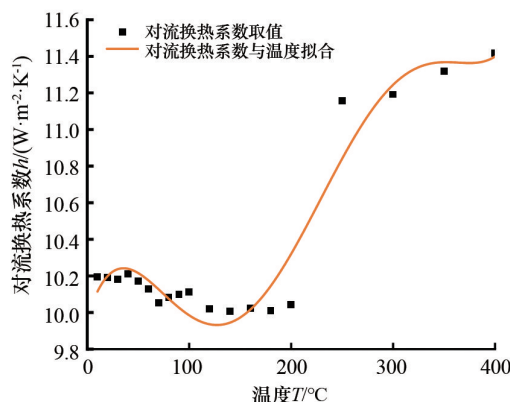
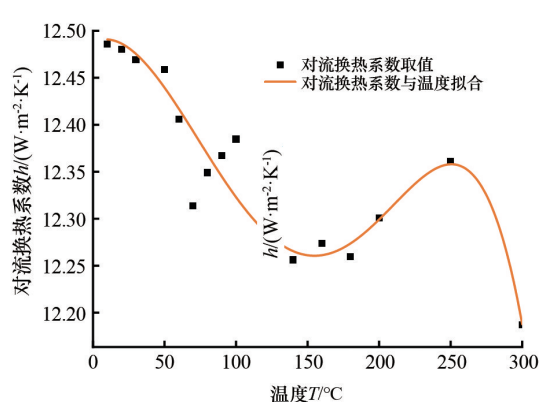
$$h = -1.99 \times 10^{-12}T^5 + 1.84 \times 10^{-9}T^4 - 5.24 \times 10^{-7}T^3 + 2.61 \times 10^{-5}T^2 + 1.08 \times 10^{-2}T + 6.96 \quad (11)$$

空气流速为0.2 m/s时对流换热系数拟合多项式

$$h = 6.04 \times 10^{-12}T^5 - 6.72 \times 10^{-9}T^4 + 2.57 \times 10^{-6}T^3 - 3.74 \times 10^{-4}T^2 + 1.08 \times 10^{-2}T + 9.97 \quad (12)$$

空气流速为0.3 m/s时对流换热系数拟合多项式

$$h = -1.23 \times 10^{-12}T^5 + 9.54 \times 10^{-11}T^4 + 2.13 \times 10^{-7}T^3 - 4.50 \times 10^{-5}T^2 + 7.51 \times 10^{-4}T + 12.49 \quad (13)$$

图2 空气流速 0.05 m/s 时 h 与 T 的拟合曲线图3 空气流速 0.1 m/s 时 h 与 T 的拟合曲线图4 空气流速 0.2 m/s 时 h 与 T 的拟合曲线图5 空气流速 0.3 m/s 时 h 与 T 的拟合曲线

锂电池第一次充放电会在负极表面生成固体电解质界面(膜)(solid electrolyte interphase, SEI膜), SEI膜在 80~100℃时会发生分解,失去保护负极的作用,本研究主要分析 100℃以内对流换热系数随温度的变化。

图2、图3显示,空气流速为 0.05、0.1 m/s 时的对流换热系数随着温度的升高而增大。温度在 100℃内时,空气流速为 0.05 m/s 时的对流换热系数随温度变化幅度较小,100℃时的对流换热系数与 20℃的对流换热系数相比增长了 3.60%。空气流速为 0.1 m/s 时的对流换热系数随温度变化幅度较大,100℃时的对流换热系数与 20℃的对流换热系数相比增长了 11.11%。对流换热系数随着 Nu 、导热系数 λ 的升高呈增长趋势, Nu 随着温度的升高而减小,空气的导热系数随着温度的升高而增大,对流换热系数与温度呈非线性相关(图4、图5)。空气流速为 0.2 m/s 时的对流换热系数随着温

度的升高呈现增—减—增的趋势。空气流速为 0.2 m/s 时,100℃时的对流换热系数与 20℃时的对流换热系数相比变化了 0.79%。随着流速的增大, Nu 数对对流换热系数的影响大于空气的导热系数,空气流速为 0.3 m/s 时对流换热系数呈现出减—增—减的趋势。在该空气流速下,100℃时的对流换热系数与 20℃时的对流换热系数相比变化了 0.80%。

3.2 对流换热系数对锂电池温度场的影响

将上述计算出的各空气流速对应下的对流换热系数温度函数应用在模型仿真中,空气温度、环境温度均为 50℃,分别模拟计算出空气流速为 0.05、0.1、0.2、0.3 m/s,考虑温度效应时的对流换热系数对锂电池温度场的影响。图6~图9分别是空气流速为 0.05、0.1、0.2、0.3 m/s 时,锂电池放电过程中对流换热系数考虑温度效应时对温度场的影响模拟结果。

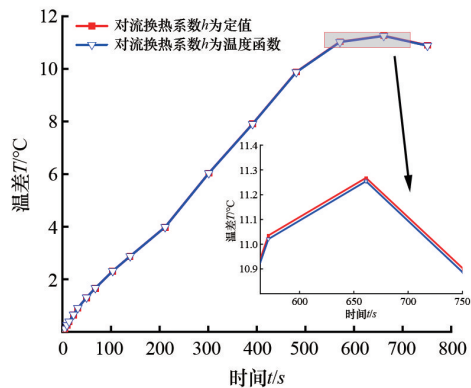


图6 空气流速0.05 m/s、考虑温度效应时
锂电池温差变化

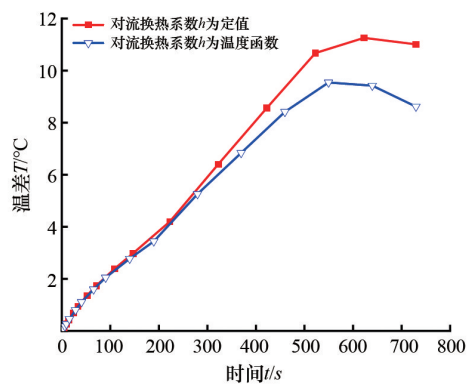


图7 空气流速0.1 m/s、考虑温度效应时
锂电池温差变化

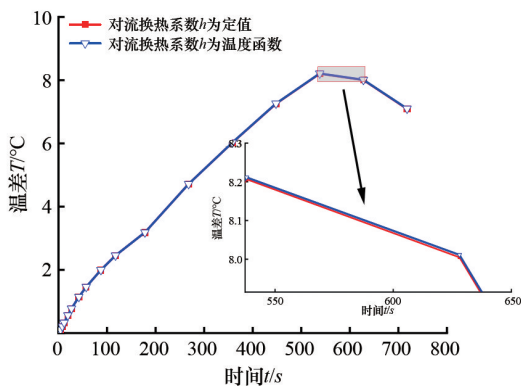


图8 空气流速0.2 m/s、考虑温度效应时
锂电池温差变化

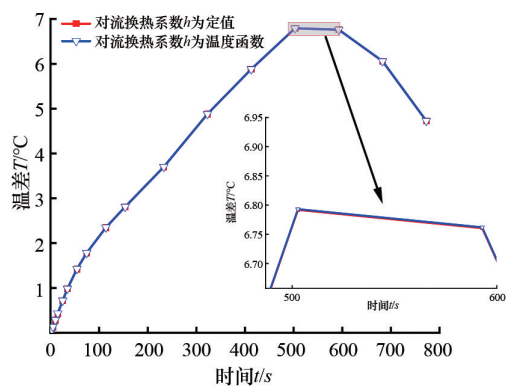


图9 空气流速0.3 m/s、考虑温度效应时
锂电池温差变化

空气流速为0.1 m/s、锂电池放电至729 s时,考虑温度效应时的对流换热系数的温差比对流换热系数为定值时降低了21.71%。图6~图9显示空气流速为0.1 m/s时考虑温度效应的对流换热系数对锂电池温度场的影响较大,锂电池的温差随着对流换热系数的增大而减小,增大了模拟研究的准确性。空气流速为0.05、0.2、0.3 m/s时考虑温度效应的对流换热系数使锂电池温差变化值均小于1.00%,对锂电池温度场影响较小。空气流速为0.05 m/s时,温度对对流换热系数影响程度较小,在该流速下考虑温度效应的对流换热系数对锂电池温度场的影响可以忽略不计。随着空气流速的增大,强制对流散热效果远高于自然对流散热,因此,空气流速为0.2、0.3 m/s时,考虑温度效应的对流换热系数对锂电池温度场影响也可以忽略。

由以上分析可知,不同流速下对流换热系数受

温度的影响程度不同,为了减少误差,建议在数值模拟锂电池散热时考虑温度对对流换热系数的影响,若不同温度对流换热系数影响较大,则需要考虑温度对对流换热系数的影响,反之则可以忽略。

3.3 锂电池内部不同点的温度分布

通过研究得到,空气流速为0.1 m/s时,对流换热系数受温度影响最大。在此研究基础上,研究流速为0.1 m/s时,对流换热系数考虑温度效应时锂电池内部温度的变化情况。根据模拟结果,得到锂电池1内部6个点放电过程中的温度变化(图10),同时还得到锂电池1、2放电至550 s时在zx截面的温度云图(图11)。

图10中显示,A点温度一直最高,A点是1号电池的轴心位置,B点是2号电池的轴心位置。锂电池内外温差最大为2.4°C。根据相关文献得知^[28],锂电池热量积聚发生热失控时会呈现出迅速且不易

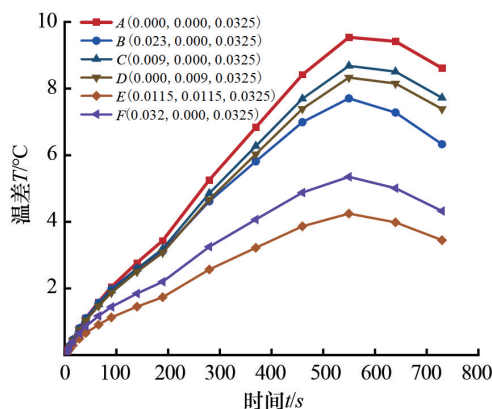


图10 电池内部点的温度变化

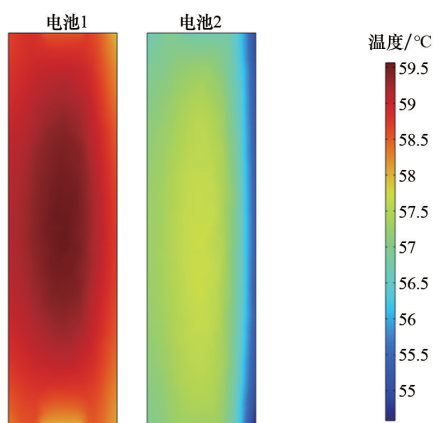


图11 550 s时电池1、2的zx截面温度云图

被察觉的特点,内部最高温度要比表面温度高200℃,因而锂电池内部温度比锂电池表面温度更具有研究价值,掌握锂电池内部温度能更好地对锂电池建立预警体系,便于在发生热失控之前及时将锂电池温度控制在安全范围内或者对锂电池采取紧急降温措施。

4 结论

在COMSOL软件中建立了电化学-热耦合模型,并在该模型中添加了空冷散热模型,模拟对流换热系数考虑温度时对锂电池热扩散影响及其程度,得到以下主要结论。

1) 空气流速和温度均对对流换热系数有影响,不同流速下对流换热系数与温度并不完全呈线性变化,分别模拟了空气流速为0.05、0.1、0.2、0.3 m/s的锂电池放电过程,其中空气流速为0.1 m/s时

对流换热系数随温度变化幅度最大,100℃时的对流换热系数相比与20℃的对流换热系数增长了11.11%。

2) 空气流速为0.1 m/s、在729 s时对流换热系数考虑温度影响比设为常数时锂电池最大温差降低了21.71%;但空气流速为0.05、0.2、0.3 m/s时对流换热系数的温度函数使锂电池的温差变化量均小于1.00%,在此流速下,对流换热系数受温度影响可忽略。

3) 空气流速为0.1 m/s、环境温度和空冷温度均为50℃、放电倍率为4 C时锂电池内部温度比锂电池表面最大温度高2.4℃。

以上数值模拟研究发现,对流换热系数与温度并不完全呈线性变化,需要先计算温度对对流换热系数的影响,若计算得出温度对对流换热系数的影响小于3%时,则可以忽略因温度对对流换热系数影响所带来的模拟误差,否则需要考虑温度对对流换热系数所带来的模拟误差。

参考文献 (References)

- [1] Hong J C, Wang Z P, Qu C H, et al. Investigation on overcharge-caused thermal runaway of lithium-ion batteries in real-world electric vehicles[J]. Applied Energy, 2022, 321: 119229.
- [2] Wang Q S, Zhao X J, Ye J N, et al. Thermal response of lithium-ion battery during charging and discharging under adiabatic conditions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 124(1): 417-428.
- [3] Murali G, Sravya G S N, Jaya J, et al. A review on hybrid thermal management of battery packs and it's cooling performance by enhanced PCM[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111513.
- [4] Luo J, Zou D Q, Wang Y S, et al. Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 132741.
- [5] Prajapati S, Upadhyay Y, Kumar Y, et al. Investigation of thermal management system of a lithium-ion battery in electric vehicle[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 54: 457-462.
- [6] Ling Z Y, Li S M, Cai C Y, et al. Battery thermal manage-

- ment based on multiscale encapsulated inorganic phase change material of high stability[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117002.
- [7] Wang C, Xi H, Wang M W. Investigation on forced air-cooling strategy of battery thermal management system considering the inconsistency of battery cells[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214: 118841.
- [8] Lagnoni M, Nicolella C, Bertei A. Survey and sensitivity analysis of critical parameters in lithium-ion battery thermo-electrochemical modeling[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 394: 139098.
- [9] Babu Sanker S, Baby R. Phase change material based thermal management of lithium ion batteries: A review on thermal performance of various thermal conductivity enhancers[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104606.
- [10] Stei M, Barreras J V, Ruan H, et al. Meta-analysis of experimental results for heat capacity and thermal conductivity in lithium-ion batteries: A critical review[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 522: 230829.
- [11] Ambekar S, Rath P, Bhattacharya A. A novel PCM and TCE based thermal management of battery module[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, 29: 101196.
- [12] 刘晓东. 高倍率软包锂离子电池产热模型及热管理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [13] 王晓慧, 吴锋, 杨向前, 等. 三元锂电池模块热仿真风冷优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2021(6): 15-19.
- [14] 杨勇. 18650 锂离子电池产热模型及运用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [15] Liu J L, Wang Z R, Bai J L. Influences of multi factors on thermal runaway induced by overcharging of lithium-ion battery[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 70(7): 531-541.
- [16] Zhang Q S, Niu J H, Zhao Z H, et al. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103759.
- [17] 梅文昕, 段强领, 王青山, 等. 大型磷酸铁锂电池高温热失控模拟研究[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1): 202-209.
- [18] 林浩, 张洪信, 赵清海. 锂离子电池三维电化学-热耦合模型及生热分析[J]. *电源技术*, 2019, 43(10): 1630-1632.
- [19] 冯旭宁, 李建军, 王莉, 等. 锂离子电池各向异性导热的实验与建模[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(2): 158-164.
- [20] 王翔, 徐晶, 陈新文, 等. 基于 VCHTC 的锂电池热力学精细化仿真[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(1): 246-252.
- [21] 黄文才. 基于 COMSOL 的锂离子电池热失控模拟分析和研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [22] 宋亚豪. 某款车用锂电池生热特性与电池包仿生散热优化研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- [23] 张晓光, 潘晓楠, 李金铭, 等. 电池排布对锂电池组相变热管理性能的影响[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(1): 127-135.
- [24] 姜贵文, 黄菊花, 庄玲, 等. 圆柱形动力锂电池传热分析及升温特性[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2018, 42(5): 431-435.
- [25] 陶欢. 锂离子动力电池热失控实验与模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [26] 徐蒙, 张竹茜, 贾力, 等. 圆柱形锂离子动力电池放电过程电化学与传热特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(32): 54-61.
- [27] Yi D, Zhao X M, Guo X, et al. Evaluation of carrying capacity and spatial pattern matching on urban-rural construction land in the Poyang Lake urban agglomeration, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 627-636.
- [28] Parhizi M, Ahmed M B, Jain A. Determination of the core temperature of a Li-ion cell during thermal runaway [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 370: 27-35.

Numerical analysis of the convective heat transfer coefficient effect on lithium battery thermal diffusion when considering temperature effect

HAN Runli^{1,2}, TANG Mingyun^{1,2*}, WANG Dong^{1,2}, ZHANG Shaojie^{1,2}

1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
2. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract Based on the electrochemical-thermal coupling model, four 18650 Li-ion batteries were used as research objects to analyze the effect of convective heat transfer coefficient on the thermal diffusion of Li-ion batteries and its degree when considering the temperature effect. Firstly, the convective heat transfer coefficients on the surface of lithium-ion batteries at different temperatures and flow rates were calculated using the calculation method. Convective heat transfer coefficients as a function of temperature were obtained by curve fitting for air flow rates of 0.05, 0.1, 0.2 and 0.3 m/s, respectively, and it was concluded that the convective heat transfer coefficient did not vary completely linearly with temperature. Secondly, based on the above functional relationship, the effect of convective heat transfer coefficient on the heat diffusion of lithium battery when considering temperature was analyzed by numerical simulation. The conclusion showed that the convective heat transfer coefficient when considering temperature had a different degree of influence on the temperature field of the battery. When the air-cooling flow rate was 0.05, 0.2 and 0.3 m/s, respectively the temperature functions of the battery changed less than 1% during the discharging process. However, when the air flow rate was 0.1 m/s and the lithium battery was discharged to 729 s the temperature field of the convective heat transfer coefficient considering the temperature factor decreased by 21.71% compared to the temperature field at the constant. This effect law was consistent with the variation of convective heat transfer coefficients with temperature at different flow rates. It also showed that the convective heat transfer coefficient was related to both flow rate and temperature. Moreover, the larger the convective heat transfer coefficient, the easier the lithium battery exchanged heat with outside air, and the smaller the temperature difference during the discharging of the battery.

Keywords electrochemical-thermal coupling model; thermal management; air flow rate; convective heat transfer coefficient ●



(责任编辑 傅雪)