

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-278-07

PCM 热物性对锂离子电池热失控蔓延的影响

张陆叶 谢永亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对大型锂离子电池的热失控蔓延问题, 以相变材料为电池模组隔热材料, 建立了电池组热失控防护三维数值计算模型。通过改变 PCM 隔板的潜热、厚度和导热系数, 分析相变材料的热物性参数对锂离子电池热失控蔓延的影响特性。计算结果表明, 单纯改变 PCM 隔板的潜热对热失控蔓延时间的影响很小, 而增加隔板厚度可以有效延长, 且厚度为 8mm 时可以达到规范要求的防护效果; 隔板潜热为 226kJ/kg, 厚度在 6mm 以上时, 导热系数为 0.02W/m·K 和 2W/m·K 模组平均热失控蔓延时间基本相同。

【关键词】 锂离子电池; 热失控; 相变材料; 热失控蔓延

中图分类号 TM912 文献标志码 A

Influence of PCM Thermophysical Properties on Thermal Runaway Spreading of Lithium-ion Batteries

Zhang Luye Xie Yongliang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Aiming at the thermal runaway spreading problem of large lithium-ion batteries, a three-dimensional numerical calculation model for thermal runaway protection of battery packs was established by using phase change materials (PCMs) as the insulating materials of battery modules. By changing the latent heat, thickness and thermal conductivity of the PCM separator, the physical parameters of the phase change material are analysed for their influence on the thermal runaway spread of lithium-ion batteries. Calculation results show that simply changing the latent heat of the PCM spacer has little effect on the thermal runaway spreading time, while increasing the thickness of the spacer can be effectively prolonged, and when the thickness is 8mm, the protection effect required by the specification can be achieved; the latent heat of the spacer is 226kJ/kg, and the thickness of the spacer is more than 6mm, and the thermal conductivity of the thermal runaway spreading time of the module is basically the same as that of the average of the thermal runaway spreading time of the module of 0.02W/m·K and 2W/m·K.

【Keywords】 Lithium-ion battery; Thermal runaway; Phase change material; Thermal runaway propagation

0 引言

随着世界能源的紧缺和环境污染等问题越来越受到人们的关注, 新能源汽车得到了飞速发展^[1], 其动力源逐渐从化石能源转为电化学储能系统^[2]。现有的动力电池主要有铅酸电池、燃料电池、镍镉电池和锂离子电池^[3]。其中锂离子电池具有能

量密度高、循环寿命长、无记忆效应和污染小等特点, 在新能源汽车中应用广泛^[4]。由于锂离子电池的隔膜、电解液等都具有可燃性, 使得锂离子电池在滥用条件下会触发某单个电池的热失控, 进而蔓延至整个模组, 引起爆炸或火灾, 造成极大的经济损失和人员伤亡^[5]。

作者简介: 张陆叶 (1999.10-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 15756275359@163.com

通讯作者: 谢永亮 (1986.09-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yongliangxie17@163.com

收稿日期: 2023-10-28

为了抑制电池模组内热失控的蔓延, 国内外学者进行了一系列的研究。Li 等^[6]比较了两个 18650 型锂电池之间的间隔距离对热失控传播的影响, 他们发现增加间隔距离有助于减缓热失控的传播。Feng^[7,8]等在相邻电池之间增加了耐热层进行模拟计算, 成功阻止了热失控的传播, 并通过实验验证了该结果。Wu^[9]等设计了一种新型热解石墨片来增强石蜡/膨胀石墨复合材料基电池热管理系统, 通过石墨片的高导热性将热失控热量散发到 PCM 模块, 并增加电池之间的距离可以有效防止热失控发生。Kshetrimayum^[10]等将 PCM 和微通道板系统集成, 结果表明将流速提高至 3.9L/min 时可以防止热失控传播。

目前大多数针对锂离子电池热失控的阻隔技术主要集中于小型的 18650 电池上, 对于大尺寸的方形锂离子电池的研究较少。因此, 本文建立了方形锂离子电池组模型, 并在相邻电池间加入相变材料隔热板, 研究相变材料的潜热和导热系数对电池热失控阻隔的效果, 找到能够有效阻止热失控蔓延的特性参数, 为锂离子电池的热失控防护设计提供一定参考。

1 数值模型建立与验证

1.1 模型建立

本文为了简化模型, 在计算分析中对电池和相变材料做以下假设^[11,12]:

- (1) 电池和 PCM 都为均质各向同性;
- (2) 电池和 PCM 的比热和导热率是恒定的;
- (3) 忽略电池内部的对流传热和辐射传热;
- (4) PCM 固-液相变引起的密度变化忽略不计, 且熔点恒定。

基于上述假设可以得到相变传热的连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程分别为^[13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta_a \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + S_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j H) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) S_E \quad (3)$$

其中, v_j 为流体速度, m/s; k 为导热系数, W/m·K; H 为相变材料总焓值, J/kg; S_p 为由于相

变产生的动力源项, 是动量方程中的相变附加项; S_E 为由于相变产生的能量源项, 是能量方程中的相变附加项; η_a 为液相 PCM 的表观粘度, mPa·s。

固相材料不发生相对运动, 可由 Darcy 定律和 Carman-Koseny 方程导出相变附加项, 物理意义为由渗透率决定的压力项, 公式及方程如下^[14]:

Darcy 定律变形公式:

$$-\text{grad}P = v_j \left(\frac{\mu}{K} \right) \quad (4)$$

Carman-Koseny 方程:

$$-\text{grad}P = v_j A_{mush} \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} \quad (5)$$

其中, K 为渗透率, 是两相模糊区中液相相变材料质量分数的函数, 在液态区减小为 0; A_{mush} 为模糊区常数, 通常取 $10^4 \sim 10^9$, 本文取 10^5 ; ε 为小于 10^{-4} 的数, 使方程中分母不为 0; β 为液相率, 可由式 (6) 表示^[13]:

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{(T-T_s)}{(T_l-T_s)} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (6)$$

其中, T_s 为相变材料固相温度点, K; T_l 为相变材料液相温度点, K。

忽略 PCM 与电池界面处的辐射传热, PCM 与电池的能量守恒方程可表述为^[13]:

$$\dot{q} = \rho c_p \frac{dT}{dt} + \frac{1}{V_b} \left[hA(T_c - T_m) + m_{PCM} \left(c_p^{PCM} \frac{dT}{dt} + H \right) \right] \quad (7)$$

根据假设, 设置电池模组相变防护结构边界条件为^[13,15]:

$$t = 0, \quad T(x, y, z) = T_m \quad (8)$$

$$-\lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_w = -\lambda_{PCM} \left(\frac{\partial T_{PCM}}{\partial n} \right)_w \quad (9)$$

$$-\lambda_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial n} \right)_w = h(T_c - T_m) \quad (10)$$

其中, \dot{q} 为单位体积电池的生热功率, W/m³; ρ 为电池平均密度; c_p 为电池平均比热容, J/kg·K; V_b 为电池的体积, m³; h 为电池表面自然对流换热

系数, $W/m^2 \cdot K$, 本文取 10; A 为电池与环境的自然对流换热面积, m^2 ; T_c 为电池表面温度, K ; T_m 为环境温度, K ; m_{PCM} 为形变材料的质量, kg ; λ_c 为电池表面法向导热系数, $W/m \cdot K$; λ_{PCM} 为相变材料导热系数, $W/m \cdot K$; T_{PCM} 为相变材料表面温度, K 。

根据上述分析,使用 SpaceClaim 建立了如图 1 所示的锂离子电池电池热失控防护物理模型。模组由 6 个单体锂离子电池和 5 个 PCM 隔热板组成,单体电池尺寸为 $148mm \times 92mm \times 27mm$ ^[16]。将 PCM 隔热板夹合在电池组相邻单体电池之间,图中所示厚度为 4mm,电池外侧表面与环境自然对流冷却。电池模组中各块单体电池编号如图 2 所示,隔热板 1—5 按电池 B1 至电池 B6 的方向依次编号。锂离子电池的热物性参数如表 1 所示。石蜡是一种无毒、性质稳定且价格低廉易得的相变材料,相变温度范围在 $20-60^\circ C$,与锂离子电池热管理系统需求能够较好地对应,因此以纯石蜡 (RT44HC) 为相变材料,物性参数如表 2 所示。考虑到电池与相变材料之间接触界面存在间隙,且在热失控发生时二者之间温差极大,接触热阻对传热不可忽略^[17]。因此本文采用薄边界层模拟电池与相变材料之间的接触热阻,参数如表 3 所示。

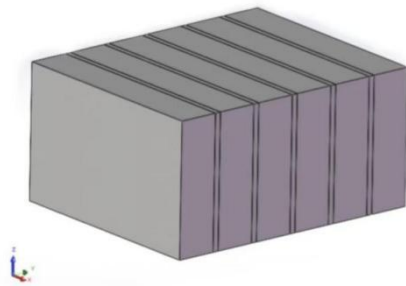


图 1 物理模型结构图

Fig.1 Structure of the physical model

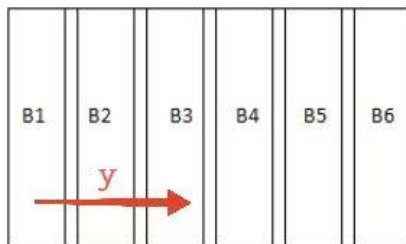


图 2 各单体电池编号示意图

Fig.2 Schematic diagram of battery number

表 1 电池热物性参数^[16]

| Table 1 Thermal physical parameters of batteries | | | |
|--|--------------------------|--|--|
| 材料 | 密度/ $kg \cdot m^{-3}$ | 比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | 导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| 电芯 | 2680 | 1100 | $\lambda_x=0.86$ $\lambda_y=\lambda_z=0.86$ |
| 正极极柱 | 2719 | 871 | 202 |
| 负极极柱 | 8978 | 381 | 387.6 |

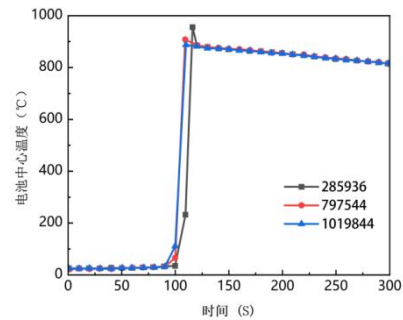
表 2 PCM 物性参数^[18]

| Table 2 physical parameters of PCM | | | | |
|------------------------------------|--|--|----------------------------|---------------------|
| 密度/ $kg \cdot m^{-3}$ | 导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ | 比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | 相变潜热/ $J \cdot kg^{-1}$ | 相变温度/ $^\circ C$ |
| 920 | 0.22 | 2500 | 226e3 | 43 |

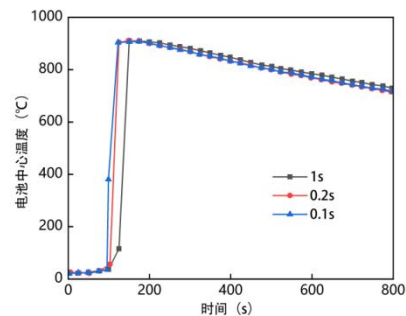
表 3 接触热阻参数^[19]

| Table 3 Contact thermal resistance parameter | | | |
|--|--|--|-----------|
| 密度/ $kg \cdot m^{-3}$ | 导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ | 比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | 厚度/ mm |
| 1.3 | 0.04 | 1000 | 0.39 |

1.2 网格划分与无关性验证



(a) 网格无关性分析



(b) 时间步长无关性分析

图 3 电池防护模组无关性分析

Fig.3 Independent analysis of battery protection module

考虑到 PCM 隔热板厚度较小且相邻电池间的传热主要沿隔热板厚度方向 (y 轴),在划分网格时,沿隔热板厚度方向进行了网格局部加密,以保

证计算精度。为了确定最优的网格数量和时间步长, 根据电池中心测点温度进行了无关性验证。首先选择了 285936、797544 和 1019844 三种数量的网格进行网格无关性分析, 计算结果如图 3 (a) 所示。由图可以看出, 网格数量由 797544 增加至 1019844 时, 电池中心测点温度变化趋势基本不变, 而网格数量为 285936 时中心测点温度变化趋势则明显不同。为了节约计算资源, 选择网格数量为 797544, 网格划分示意图如图 4 所示。

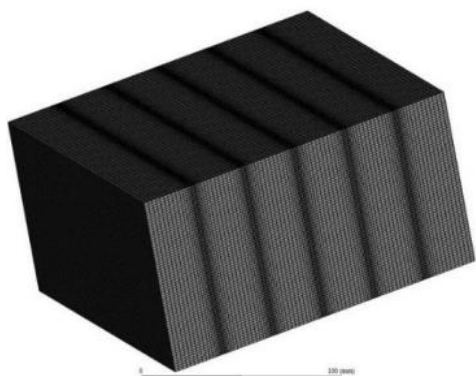


图 4 网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of grid division

再用网格数量为 797544 的网格进行时间步长无关性验证。时间步长分别为 0.1s、0.2s 和 1s 时电池中心温度变化曲线如图 3 (b) 所示。由计算结果可知, 时间步长从 0.2s 再减少时, 中心测点温度曲线基本一致, 因此选择时间步长为 0.2s。

触发电池热失控的方式主要有针刺和加热等方式, 而本文以研究热失控蔓延的控制过程为主, 因此选择较为简单的局部热源触发热失控的方法。经过试验分析后, 选择在首节电池的前表面添加面热流, 大小为 35000W/m²。

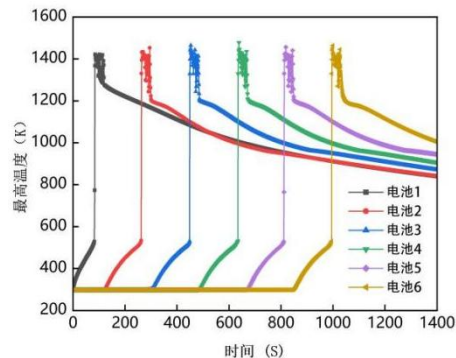
2 计算结果与讨论

2.1 PCM 隔板不同潜热对热失控蔓延的影响

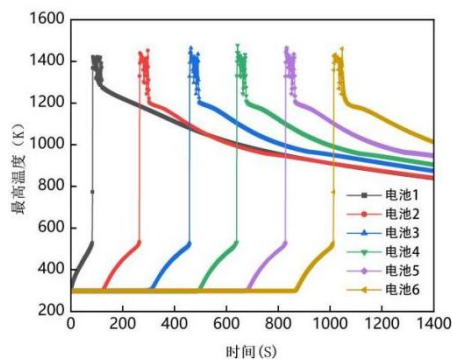
首先以纯石蜡作为隔热板材料, 研究热失控蔓延情况, 之后仅改变隔热板的相变潜热, 查阅文献 [18,20] 中相变材料的物性参数, 本文将潜热值选择为 174kJ/kg、226kJ/kg 和 300kJ/kg。计算所得的电池模组内各节电池最高温度随时间变化如图 5 所示。

电池内部最高温度高于 533K 时会触发电池的不可逆热失控, 定义电池 2 发生不可逆热失控时间与电池 1 发生不可逆热失控时间之差为热失控蔓

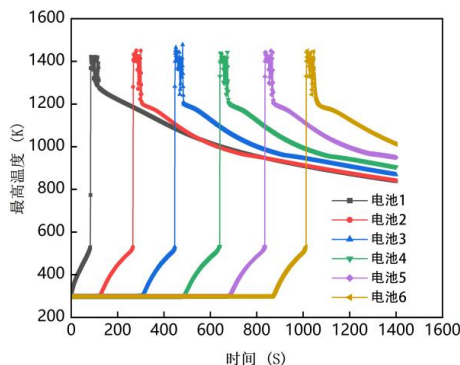
延时间 t_{12} ; 定义电池 6 与电池 1 发生不可逆热失控时间之差的五分之一为模组平均热失控蔓延时间为 t_{ave} 。



(a) 潜热为 174kJ/kg



(b) 潜热为 226kJ/kg



(c) 潜热为 300kJ/kg

图 5 不同潜热下各节电池温度变化

Fig.5 Temperature change of each cell under different latent heat

根据计算结果, 三种潜热情况下热失控蔓延时间 t_{12} 分别为 180s、182s 和 184s, 模组平均热失控蔓延时间分别为 182.4s、186s 和 187.6s。随着隔板材料潜热值的增加, 电池热失控蔓延时间也有所增加, 但增加幅度很小。由于隔板体积小, 单个隔板潜热有限, 因此仅靠提高潜热值并不能很好地提高

阻隔效果。为了增加隔板材料的潜热蓄热能力并提高热阻,考虑增加隔板厚度来获得更好的热失控阻隔效果。

将隔板厚度增加至 6mm 和 8mm,分别计算潜热 226kJ/kg 时模组内热失控蔓延时间变化情况。不同厚度下热失控蔓延时间对比如图 6 所示。

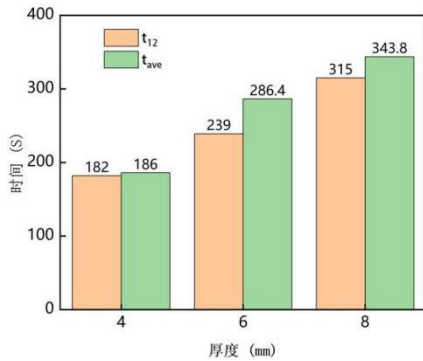


图 6 不同厚度热失控蔓延时间

Fig.6 Thermal runaway spreading time for different thicknesses

由图可知,随着隔板厚度的增加,热失控蔓延时间 t_{12} 和模组平均热失控蔓延时间 t_{ave} 均得到延长,且厚度越大,时间延长差值越大。隔板厚度增加后,不仅增加了单个 PCM 隔板自身潜热吸收的能力,在导热系数不变的情况下,还增加了相邻电池间的导热热阻,使得以导热为主的热失控蔓延得到抑制。隔板厚度为 8mm 时,热失控蔓延时间 t_{12} 和模组平均热失控蔓延时间 t_{ave} 均达到 GB 38038-2020 中规定的“电池单体发生热失控后,电池系统 5 分钟内不起火爆炸”的防护要求。

表 4 给出了电池 B2 触发热失控时,不同厚度 PCM 隔板的最高温度。随着隔板厚度的增加,在触发电池 B2 的热失控时,PCM 隔板 1 的最高温度不断降低,厚度为 8mm 时比厚度为 4mm 时最高温度降低了 54.42℃,从而进一步延长了电池热失控的蔓延时间。

表 4 PCM 隔板最高温度

Table 4 The max temperature of PCM

| 厚度/mm | 4 | 6 | 8 |
|--------|--------|--------|--------|
| 最高温度/℃ | 388.69 | 362.86 | 336.27 |

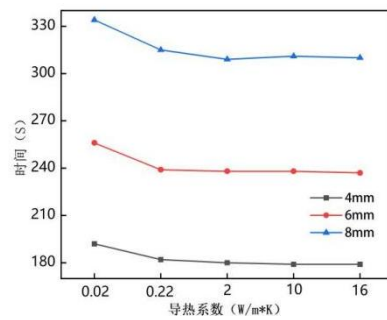
同时不同厚度下模组平均热失控蔓延时间 t_{ave} 总是高于热失控蔓延时间 t_{12} 。这是由于随着热失控的蔓延,PCM 隔板的潜热逐步被完全利用,引起下一个电池热失控时电池组内整体温度会有所

降低,从而使得电池模组整体的热失控蔓延时间得到延长。

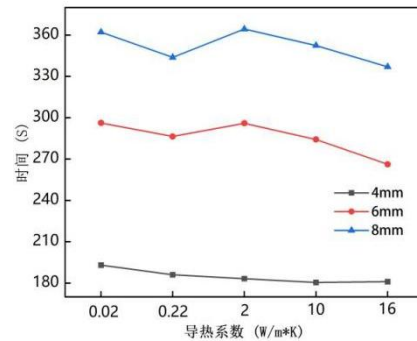
2.2 PCM 隔板导热系数对热失控蔓延的影响

为了探究电池模组中相变材料的导热系数对热失控蔓延过程的影响,选择潜热为 226kJ/kg,导热系数分别为 0.02、0.22、2、10、16 (W/m·K),计算不同厚度下电池热失控蔓延情况随导热系数的变化。

图 7 展示了不同厚度下电池模组热失控蔓延时间在不同导热系数下的变化情况。



(a) 热失控蔓延时间 t_{12}



(b) 模组平均热失控蔓延时间 t_{ave}

图 7 不同厚度热失控蔓延时间变化

Fig.7 Variation of thermal runaway spreading time for different thicknesses

由图 7 可知,随着导热系数的增加,热失控蔓延时间 t_{12} 呈现先减小后不变的趋势,导热系数在 2W/m·K 和 16W/m·K 之间,热失控蔓延时间 t_{12} 基本不变。厚度在 6mm 以上时,平均热失控蔓延时间 t_{ave} 呈现先减后增再减的趋势,导热系数在 0.02W/m·K 和 2W/m·K 时平均热失控蔓延时间 t_{ave} 数值基本相同。这是由于厚度较小时,PCM 隔板潜热蓄热能力相对较小,改变导热系数会对系统内的热量传递影响较大;而厚度增大后,潜热蓄热能力提升,适当增大导热系数可以使热失控后产生的

热量更快地传递给PCM隔板,从而提高PCM的潜热利用率,延长电池组整体热失控蔓延时间。

3 结论

本文以石蜡为隔热板基础材料,建立了电池模组热失控防护三维模型。通过改变隔板材料的潜热、厚度和导热系数,研究PCM隔板不同参数对电池模组热失控防护效果的影响,主要结论如下:

(1)以相变材料作为电池模组隔热板,由于电池热失控释放能量巨大,单纯改变PCM隔板的潜热值对锂离子电池模组的热失控蔓延阻隔效果影响很小。

(2)通过增加PCM隔板材料的厚度,可以有效延长锂离子电池模组的热失控蔓延时间。PCM隔板厚度为8mm时,模组内的热失控蔓延时间 t_{12} 和 t_{ave} 均达到规范中“5分钟内”的防护时间要求,有良好的防护效果。

(3)随着电池模组隔热板导热系数的增加,电池热失控蔓延时间 t_{12} 先减小后不变,模组平均热失控时间 t_{ave} 在0.02W/m·K和2W/m·K时所体现的热失控蔓延阻隔效果基本相同,因此PCM隔板厚度较大时,可以适当提高其导热系数以提升阻隔效果。

在实际生产中,应使锂离子电池模组的尺寸尽可能小,因此在保证电池组热失控蔓延阻隔效果的情况下,希望PCM隔板的厚度尽可能小,后续可以通过改变锂离子电池模组底部的换热系数来平衡对PCM隔板厚度的需求,从而得到效率更高且更合理的防护参数。

参考文献:

[1] FRANZÒ S, FRATTINI F, LATILLA V M, et al. The diffusion of electric vehicles in Italy as a means to tackle main environmental issues[C]. 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). IEEE, 2017:1-7.

[2] Xu-Yi Shan, Feng Li, Da-Wei Wang, et al. The smart era of electrochemical energy storage devices[J]. Energy Storage Materials, 2016,3.

[3] 刘荣芬.新能源汽车锂电池及其技术发展探讨[J].化工管理,2020,(14):94-95.

[4] DAI Haiyan, WANG Yuxing. Study on thermal

characteristics of battery modules of electric vehicle based on electrochemical thermal coupling model[J]. Automotive Engineering, 2020,42(5):665-671,687

- [5] Ruiz V, Pfrang A. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2018,81:1427-1452.
- [6] H Li, H Chen, G Zhong, et al. Experimental study on thermal runaway risk of 18650 lithium ion battery under side-heating condition[J]. J. Loss Prev. Process Ind., 2019,(61):122-129.
- [7] X Feng, X He, M Ouyang, et al. Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah LiNixCoyMnzO₂ large format lithium ion battery[J]. Appl. Energy, 2015,(154):74-91.
- [8] X. Feng, L. Lu, M. Ouyang, J. Li, X. He, A 3D thermal runaway propagation model for a large format lithium ion battery module, Energy 115(2016)194-208.
- [9] W Wu, W Wu, S Wang. Thermal optimization of composite PCM based largeformat lithium-ion battery modules under extreme operating conditions[J]. Energy Convers. Manage., 2017,(153):22-33.
- [10] KS Kshetrimayum, Y-G Yoon, H.R Gye, et al. Preventing heat propagation and thermal runaway in electric vehicle battery modules using integrated PCM and micro-channel plate cooling system[j]. Appl. Therm. Eng., 2019,(159):113797.
- [11] N Javani, I Dincer, GF Naterer, et al. Heat transfer and thermal management with PCMs in a Li-ion battery cell for electric vehicles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014:72.
- [12] Rao Z H, Wang S F, Zhang G Q. Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO₄ power battery[J]. Energy Conversion and Management, 2011,52:12.
- [13] 李泽群.相变储热技术在动力电池热管理中应用的仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [14] 柯彬彬.圆管外石蜡相变传热过程数值模拟及传热强化[D].镇江:江苏大学,2016.
- [15] 李光宇.基于相变材料的锂离子电池热管理与热失控传播特性研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [16] 董远夏,张恒运,朱佳俊,等.车用电池模组热蔓延防护

- 结构的数值仿真研究[J].储能科学与技术,2022,11(5):1608-1616.
- [17] Grujicic M, Zhao C L, Dusel E C. The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging[J]. Applied Surface Science, 2005,246(1-3):290-302.
- [18] 田瑞华.相变材料热管理下锂离子动力电池热失控传播过程数值分析[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [19] Rui X, Feng X, Wang H, et al. Synergistic effect of insulation and liquid cooling on mitigating the thermal runaway propagation in lithium-ion battery module[J]. Applied Thermal Engineering, 2021,199:117521
- [20] 凌子夜.基于膨胀石墨基复合相变材料的动力电池热管理系统性能研究[D].广州:华南理工大学,2017.

(上接第 261 页)

- [3] 黄保民,朱建章.铁路动车库高大空间采暖系统方案研究[C].中国铁道学会.铁路暖通空调专业 2006 年学术交流会议论文集,2006:76-79.
- [4] 马莉莉.严寒地区地下车库采暖及通风问题[J].建材世界,2013,34(6):54-56.
- [5] 邹亚平.地铁机车库燃气辐射采暖节能研究[D].天津:天津大学,2007.
- [6] 胡贤忠,姜怡如.采用废热供暖的车库地面防结露方法[J].建筑热能通风空调,2012,31(1):89-91.
- [7] GB 50176-2016,民用建筑热工设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [8] 解勇,桑海龙,于晓明.某医院门诊医技综合楼暖通空调系统设计及实测运行数据分析[J].暖通空调,2018,48(4):42-45,56.
- [9] 李兆坚,刘鹰,张晓航,等.北京市无供暖地下车库冬季温度的测试分析[J].暖通空调,2010,40(1):4-7,25.
- [10] 米长虹,孔维一,姚晨,等.无集中供暖车库现状调查与供水安全[J].低温建筑技术,2022,44(2):63-66,71.
- [11] 米长虹,李弘,孙化文,等.严寒地区无集中供暖车库现状及防冻策略[J].低温建筑技术,2021,43(7):19-21,25.
- [12] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 马杰,孙铁柱,何沛霖.基于 Airpak 的西安地区间接蒸发冷却冷水机组排风对进风影响分析[J].制冷与空调,2023,37(2):297-304.
- [14] Ergonomics of the Thermal Environment-Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria (BS EN ISO 7730-2005)[S]. British: Authority of the Standards Policy and Strategy Committee, 2006.