CPCM/液冷复合电池散热系统均匀性研究

方 强,赵 明,姚 莉,叶文兰

上海理工大学能源与动力工程学院,上海

收稿日期: 2023年2月20日; 录用日期: 2023年3月23日; 发布日期: 2023年3月30日

摘要

为了缓解CPCM散热系统复合液冷模块后导致温度均匀性变差的问题,构建一种CPCM/液冷复合的电池 散热系统仿真模型,将CPCM模块划分为蓄热区和导热区,填充不同EG分数的CPCM,同时研究了分区处 理对CPCM潜热回收的效率及均匀性影响。仿真结果表明,引入液冷模块后,能够很好的控制电池最高 温度,但电池温差明显增大,主要表现在单体电池径向温差较大;通过增大CPCM模块划分距离d调整分 区位置可以在保证电池散热要求的同时改善温度均匀性,但划分距离的增大不利于潜热回收的效率和均 匀性;通过提高导热区CPCM的EG填充分数,可以提高潜热回收的效率和均匀性,但同时牺牲了大量的 相变潜热。

关键词

电池热管理,温度均匀性,复合散热,复合相变材料

Study on the Uniformity of the Cooling System of the CPCM/Liquid-Cooled Composite Battery

Qiang Fang, Ming Zhao, Li Yao, Wenlan Ye

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 20th, 2023; accepted: Mar. 23rd, 2023; published: Mar. 30th, 2023

Abstract

In order to alleviate the problem of poor temperature uniformity caused by the combination of liquid cooling and CPCM heat dissipation system, a CPCM/liquid cooling composite battery heat dissipation system simulation model is constructed. The CPCM module is divided into heat storage

zone and heat conduction zone, and filled with CPCM with different EG fractions. At the same time, the effect of zoning treatment on the efficiency and uniformity of CPCM latent heat recovery is studied. The simulation results show that the maximum temperature of the battery can be well controlled after the introduction of the liquid cooling module, but the temperature difference of the battery is significantly increased, mainly in the large radial temperature difference of the single cell; Adjusting the partition position by increasing the partition distance d of the CPCM module can improve the temperature uniformity while ensuring the heat dissipation requirements of the battery, but the increase of the partition distance is not conducive to the efficiency and uniformity of the latent heat recovery; The efficiency and uniformity of latent heat recovery can be improved by increasing the EG filling fraction of CPCM in the heat conduction zone, but a large amount of latent heat of phase change is sacrificed at the same time.

Keywords

Battery Thermal Management, Temperature Uniformity, Composite Heat Dissipation, Composite Phase Change Material

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

随着动力锂离子电池技术的发展,单体电池能量密度不断提升,但锂离子电池对温度极为敏感的缺 点一直难以攻克[1],其最佳工作温度在 20℃至 50℃之间,且模组内电池温差应保持在 5℃以下[2]。否则 会造成电池的循环寿命衰减,安全性降低。并且在持续高温的工作状态下,电池甚至可能会发生热失控, 导致新能源汽车起火爆炸[3]。因此,高效稳定的冷却系统是保证电池安全运行的必要条件。

目前,液冷和风冷技术被广泛的运用于电池冷却系统。风冷结构简单,但冷却效率低。液冷冷却效率高,但是易造成模组内电池温度不均匀。相比于前两者,相变材料(Phase Change Material, PCM)有着巨大的潜热,并且相变时温度处于一定范围内[4],契合电池的散热要求,使得 PCM 被运用到电池散热系统中。

由于,PCM 的导热系数较低,在电池高倍率充放电的情况下,往往不能够快速的转移热量,导致热量在电池周围集聚[5]。因此,一些研究者便通过填充膨胀石墨(EG)构建复合相变材料(composite phase change material, CPCM)以提高导热系数[6] [7]。但导热系数的增加是有限的,并且随着 EG 填充数量的增加,CPCM 的潜热也会变低。Jiang 等[8]研究了 EG 填充分数对散热系统性能的影响,结果表明 EG 分数在 9%至 20%之间的 CPCM 散热性能最佳。然而,当电池处于高倍率或循环充放电工况时,发热量过大,PCM 潜热耗尽完全熔化后,冷却系统将失效[9]。一些研究者通过引入液冷构建复合散热系统来回收 PCM 潜热。而 Cao 等[10]发现通过在 CPCM 系统中复合液冷,能够延长 CPCM 的相变时间,降低电池最大温度,但是会使得温差增大,破坏了 PCM 散热系统温度均匀性较好的优势。因此,众多学者开始考虑如何有效地结合 PCM 和液体冷却,在保证散热要求同时提高系统温度均匀性。Song 等[11]提出了一种含有导热柱和散热板的 PCM 复合液冷散热结构,PCM 填充在电池缝隙中,散热板紧贴电池用来提高温度均匀性,导热柱埋在 CPCM 中并与底部冷板相连用来回收 PCM 潜热。Cao 等[10]人提出了一种 PCM 与延迟液体冷却相结合的复合冷却模式,发现冷却液的延迟介入能够很好的控制电池温差。Zhang 等[12]提出了

一种在液冷流道与 PCM 间添加翅片的方法,发现合理的翅片布局能够降低最高温度的同时减小温差。

如上述方法相同,大部分学者提出的改善温度均匀性方法均是从液冷侧出发的,很少考虑通过对 PCM 进行优化改善温度均匀性的。本文构建一种 CPCM 复合液冷的电池散热系统,在保证电池散热要求 的前提下,通过将 CPCM 模块划分为蓄热区和导热区,填充不同 EG 分数的 CPCM,来改善电池温度均 匀性,同时研究了分区处理对 CPCM 潜热回收的效率及均匀性影响。

2. 模型与方法

2.1. 几何模型

图 1 为本文构建的 CPCM/液冷复合的电池散热系统,以 21,700 电池作为研究对象,每两列电池中间 放置液冷板,CPCM 填充在液冷板和电池的间隙中,模组上下部由 10 mm 的结构胶密封。同列两电池间 距为 2 mm,电池与液冷板间距为 1 mm。选用孔隙式液冷板,增加 CPCM 填充量,流道截面宽 2 mm、 长 4 mm,壁厚为 0.5 mm,流道间由多条宽 4 mm 起到均热作用的支撑柱连接。冷却液为 50%水 50%乙 二醇,相邻流道内冷却介质错流流动。根据电池外壁面到液冷板距离 *d* 将 CPCM 划分为不同功能区,电 池与冷板间为蓄热区,其余为导热区。表 1 为系统内各部件相关参数。初始模型填充 EG 分数为 9%的 CPCM,根据 Ling 等[13]提出的计算公式,得到的不同 EG 分数 CPCM 的导热系数、比热容和潜热,见 表 2。在电池充放电时,CPCM 模块与液冷模块协同散热,热量首先由 CPCM 模块相变吸收,当 CPCM 模块液相分数达到 0.9 时,启动液冷模块对电池降温并回收 CPCM 潜热。



Figure 1. CPCM/liquid cooling composite cooling system model 图 1. CPCM/液冷复合散热系统模型

表 I. 材科梦致			
材料	密度 kg/m ³	导热系数 w/(m·K)	比热容 J/(kg·K)
电池	2631	$\lambda_r = 1.13, \lambda_{z,\varphi} = 19.25$	797
结构胶	2750	2	1500
50%水 50%乙二醇	1068.8	0.387	3319
液冷板	2719	202.4	871

Table 1. Material parameters

填充分数	密度 kg/m ³	导热系数 w/(m·K)	比热容 J/(kg·K)	相变温度℃	熔化潜热 J/kg
0	714	0.22	2500	41~44	226,100
9%		3.55	2350		205,830
20%		7.9	2170		181,050
30%		11.84	2010		158,530
40%		15.79	1840		135,860
50%		19.73	1675		113,300

Table 2. CPCM parameters of different EG filling fractions 表 2. 不同 EG 填充分数 CPCM 参数

2.2. 数学模型

在数值计算时,考虑冷却介质与液冷板间的对流传热以及电池模组内部各模块间的导热。将 CPCM 熔化后视作黏度无限大流体,不考虑流动,忽略自然对流对内部传热的影响。且将 CPCM 物理参数设为 定值,不考虑相变后物理参数的变化。

正确的电池产热模型是仿真计算的前提,本文采用 Bernardi [14]电池产热模型,根据刘等[15]提供的 21,700 电池参数进行生热计算。

$$Q = I^2 R + IT \frac{\partial U}{\partial T} \tag{1}$$

式中, I为工作电流, R为内阻, $\frac{\partial U}{\partial T}$ 为温熵系数。

CPCM 模块传热方程:

$$\rho_{PCM} \frac{\partial H_{PCM}}{\partial t} = \nabla \left(k_{PCM} \nabla T_{PCM} \right)$$
⁽²⁾

$$H_{PCM} = \int_{T_i}^T c_{PCM} \mathrm{d}T + \beta L \tag{3}$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_{s} \\ \frac{T - T_{s}}{T_{L} - T_{s}} & T_{s} < T < T_{L} \\ 1 & T < T_{L} \end{cases}$$
(4)

式中, ρ_{PCM} 和 k_{PCM} 表示 PCM 密度和导热系数, H 为 PCM 焓值, L 为相变潜热; T_S 和 T_L 分别为 PCM 凝固温度和熔化温度。

本文冷却介质为 50%水 50%乙二醇,冷却模块的能量、动量及连续性方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_c c_{p,c} T_c \right) + \nabla \cdot \left(\rho_c c_{p,c} v T_c \right) = -\nabla \cdot \left(k_c \nabla T_c \right)$$
(5)

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_c \cdot v \cdot v\right) = -\nabla P \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_c \cdot v \right) = 0 \tag{7}$$

式中, ρ_c 、 $c_{p,c}$ 和 k_c 分别为冷却介质的密度、比热容和导热系数, v 为冷却介质流速, P 为压力。

2.3. 数值方法及模型验证

采用 ANSYS FLUENT 对模型进行网格划分及仿真分析,为减少计算量,将模型对称处理。主要考虑 CPCM 及液冷板对电池圆柱面的散热,忽略电池正负极处的自然对流。本文主要考察电池在 35℃、3C 放电工况下,冷却系统运行情况。冷却液流速为 0.2 m/s,入口温度为 35℃。

为确保电池生热率模型的正确,参考刘等[15]文献中 21,700 电池相关参数,在环境温度 25℃、单体 电池 1C 放电工况下进行仿真计算,与文献中实验数据对比,如图 2。图中仿真结果和实验结果相差较少, 最大误差为 2.9%,在可接受范围内。表明本文使用的生热率模型及数值仿真方法是可行的。



Figure 2. Comparison of simulation and experimental results 图 2. 仿真与实验结果对比

本文采用 FLUENT meshing 划分多面体网格,图 3 为复合散热系统局部网格图。为了考虑计算经济性,对网格进行无关性验证。在环境温度 35℃,入口速度 0.2 m/s 条件下,对 CPCM/液冷复合散热系统 仿真计算。图 4 为网格无关性验证结果,网格数量增加到 420 万时,继续加密网格对结果的影响很小。因此,本文选用 420 万网格进行后续计算,最大网格尺寸为 2 mm,局部最小尺寸 0.2 mm。



Figure 3. CPCM/liquid cooling model grid diagram 图 3. CPCM/液冷模型网格图



Figure 4. Grid independence verification 图 4. 网格无关性验证

3. 结果与讨论

3.1. CPCM/液冷复合散热系统仿真结果

为了验证 CPCM/液冷复合电池散热系统的性能,在环境温度 35℃、3C 放电工况对电池模组进行仿 真分析。图 5 为单一 CPCM 散热系统及 CPCM/液冷复合散热系统在放电过程中,模组内最高温度、最大 温差及液相分数的变化情况。从图中看出,单一 CPCM 散热系统仅依靠有限的相变潜热不能够抑制电池 温升,在 900 s 左右液相分数达到 1,CPCM 散热模块失效。放电结束时,模组内电池最高温度攀升至 57.6℃。 而 CPCM/液冷复合电池散热系统在放电全程模组内电池最高温度为 47.5℃;放电结束时最高温度为 46.03℃,CPCM 模块液相分数也从 0.9 降低到 0.2。表明本文构建的相变/液冷复合散热系统基本能够完 成电池散热任务,将模组内电池最高温度保持在 50℃以下,且液冷启动后能够快速对电池降温并回收 CPCM 潜热能力。但观察图 5 中温差变化情况,相比于单一的 CPCM 散热系统,复合系统的温差相对较 大,电池放电结束时最大温差达 5.9℃,不能够满足电池温度均匀性要求。从图 5 中看出,复合冷却系统 内电池最大温差变化主要由 3 阶段组成。第一阶段 CPCM 未熔化,第二阶段 CPCM 开始相变,第三阶段 液冷开启后。很显然电池温差较大的问题主要出现在液冷开启后,未开启液冷前最大温差仅为 3℃。

图 6 为 CPCM/液冷复合电池散热系统放电结束时电池温度云图,从图中看出由于冷却液错流流动, 模组内各电池间温度相对一致,温度不均匀性主要由单体电池径向温差导致。单体电池温度呈环状由外 向内增大,2号电池径向温差达5.6℃。主要有两个原因,一方面,圆柱形电池卷绕式结构导致径向热阻 较大;另一方面电池外壁面与液冷板距离较近,传热热阻较小,受液冷影响较大。内外部换热条件的差 异导致了电池径向温差较大。图 7 为不同位置单体电池最大温差变化图,从图中看出,各单体电池温差 呈对称分布。靠近入口处的1、2、11、12 号电池温差最大,中部电池温差小。下文便以温度均匀性最差 的2号电池作为优化对象,通过调整散热结构减小电池温差。

图 8 为复合散热系统放电结束时 CPCM 液相分数云图,结合图 5 中液相分数曲线图发现,在放电结束时, CPCM 模块整体液相分数下降到 0.2 左右,与液冷板距离较近的 CPCM 已完全凝固,但位于两单体电池间的 CPCM 依然处于液相状态。这表明 CPCM 潜热回收也存在着不均匀性。实际上, CPCM 的液



Figure 5. Change curve of battery temperature, temperature difference and liquid fraction in single CPCM and CPCM/liquid cooling composite cooling system







图 6. CPCM/液冷复合散热系统放电结束时电池温度云图



Figure 7. Maximum temperature difference change of single cell at different positions 图 7. 不同位置单体电池最大温差变化



Figure 8. CPCM liquid phase diagram at the end of discharge of CPCM/liquid cooling composite cooling system 图 8. CPCM/液冷复合散热系统放电结束时 CPCM 液相云图

相分数主要由其温度决定,温度低于固相线温度时,液相分数为 0;温度高于液相线温度时,液相分数 为 1。根据液相图可以看出,靠近液冷板处 CPCM 温度必定低于 41℃,而两相邻电池间 CPCM 温度必定高于 41℃,甚至局部温度超过 44℃。所以,液相分数的不均匀性本质上就是 CPCM 内部的温度不均匀性。和上文中单体电池温度不均匀的原因相同,CPCM 模块内部的温度不均匀性也是由于不同位置 CPCM 与液冷板间传热距离不同导致的。靠近液冷板处 CPCM 与液冷板传热距离较小,传热热阻较小,换热量较大,此处潜热被快速回收并由液态转变为固态。而两相邻电池间的 CPCM 与液冷板传热距离较远,散热缓慢,导致在放电结束时依然处于液态。这或许也是导致单体电池温差较大的一个原因,单体电池两侧壁面接触的 CPCM 处于液态,温度高于 41℃;而单体电池中部壁面接触的 CPCM 为固态,温度低于 41℃。电池外壁 CPCM 液相分数的不均匀必定会加剧单体电池内部的温度不均匀性,因此对 CPCM 模块的结构优化是有必要的。

3.2. CPCM 分区填充

从上文分析可知,单体电池温度分布及 CPCM 潜热回收的不均匀性都与传热热阻相关。因此,本节

通过改变不同区域热阻值大小来优化系统内的温度均匀性。根据电池外壁面到液冷板的传热距离,将 CPCM 模块进行功能分区,定义 *d* 为分区距离。传热距离小于 *d*,即电池与液冷板之间的 CPCM 划分为 蓄热区,填充纯 PCM,利用其高潜热、低导热的特性来缓冲液冷板与电池间换热。传热距离大于 *d*,即 两相邻电池间划分为导热区,填充 EG 分数为 20%的膨胀石墨,提高导热系数来减小传热热阻。通过改 变分区距离 *d* 的大小观察分区位置的变化对复合散热系统温度及液相回收均匀性的影响。

图 9 为 d 取不同值,模组 3C 放电结束时 2 号电池的温度云图。与上文图 6 中 2 号电池温度云图对比, 电池最低温度所处的位置由原本的蓄热区向两侧导热区移动。随着分区距离 d 的增大,蓄热区的长度和 厚度在增加,最低温度也不断向电池两侧移动。从图 9 中发现,不论 d 取何值,最低温度均移动至蓄热 区和导热区交界处。主要是对 CPCM 模块进行分区处理后,蓄热区导热系数较小,传热热阻大,电池外 壁面受液冷板的影响变小;而交界处虽与液冷板距离较远,但导热区填充的是 20% EG 的 CPCM,导热 系数为纯 PCM 的 36 倍,传热热阻较小,受液冷板的影响较大。因此,在导热区与蓄热区交界处,电池 外壁面与液冷板传热热阻最小,使得此处成为最低温度区。



Figure 9. Temperature nephogram of No. 2 battery under different *d* values **图 9.** 不同 *d* 取值下 2 号电池温度云图

图 10 为 2 号电池在不同分区位置时温差、最高及最低温度变化曲线图,随着 d 的增大,蓄热区厚度 增大,电池内外温差逐渐减小。当厚度达到 3 mm 时,2 号电池温差降到 5℃以下,4 mm 厚度时温差为 4.63℃,继续增加蓄热区厚度时温差减少较小。从右侧温度变化图看出,随着 d 的增大,2 号电池的最低 温度和最高温度均在增加,但最低温度增加的速率高于最高温度,这便是 2 号电池内外温差减小的原因。 通过在蓄热区填充导热系数低的 PCM 减少传热,使得电池最低温度上升的同时也导致了整个单体电池与 液冷板间换热变弱,电池最高温度上升;但在导热区又填充了高导热系数的 CPCM,增加传热,因此在 一定程度上抑制了电池最高温度的增长,使得温升速率下降。

图 11 为整个电池模组在 *d* 取不同值时最高温度及温差的变化情况,可发现当 *d* 为 4 mm 时电池模组 内最大温差为 4.93℃,低于 5℃,最高温度为 46.52,低于 50℃。与未进行 CPCM 分区的模型相比,最 大温差降低了 0.98℃,降幅为 17%,最高温度增加了 0.55℃,增幅为 1%。虽然,将复合散热系统分区后 牺牲了一定的散热能力,使得电池最高温度上升,但模组内温度均匀性却获得了较大的提高。表明通过 将 CPCM 划分为蓄热区和导热区,填充不同 EG 分数的 CPCM 可以改善模组内的温度均匀性。

图 12 为分区距离 *d* 不同取值下放电结束后 CPCM 模块液相分数云图,用以分析分区填充对潜热回 收均匀性的影响。相比于图 8 中未分区模型的液相分数图,显然当 *d* 取值为 2 时,CPCM 模块液相分数 分布更加均匀,局部最大液相分数为 0.5 左右。但随着 *d* 值的增大,蓄热区厚度增加,导热区液相分数

逐渐增大。*d*值为4mm时,局部最大液相分数为1。很显然,随着蓄热区厚度的增加,潜热回收的均匀性再次变差。图13为不同*d*取值下 CPCM 模块整体液相分数变化曲线,当*d*大于2mm后,CPCM 模块整体液相分数反而增大,*d*为4mm时液相分数甚至高于 CPCM 未分区的模型。这些主要由于蓄热区厚度的增加使得导热区与液冷板间传热面积减少,换热能力下降,CPCM 中热量不能及时被液冷板带走。显然,通过划分蓄热区和导热区可以提高 CPCM 模块潜热回收的效率和均匀性,但*d*值大于2mm时,潜热回收的效率和均匀性反而变差。这和提高温度均匀性所需的*d*值冲突,*d*值为2mm,CPCM 潜热回收效率及均匀性最佳,但电池模组内最大温差为5.41℃,不满足温度均匀性要求;*d*值为4mm时,模组最大温差为4.93℃,满足温度均匀性要求,但潜热回收的效率及均匀性又变差。在电池散热系统中,模组温度均匀性的重要性高于潜热回收均匀性,因此下文选用*d*值为4mm的分区模型,在保证温度均匀性的前提下优化潜热回收均匀性。



Figure 10. Temperature difference, maximum and minimum temperature variation diagram of No. 2 battery under different *d* values
图 10. 不同 *d* 取值下 2 号电池温差及最高、最低温度变化图



Figure 11. Overall temperature difference and temperature change diagram of module under different *d* values
图 11. 不同 *d* 取值下模组整体温差及温度变化图



Figure 12. Liquid phase nephogram of CPCM module under different *d* values 图 12. 不同 *d* 取值下 CPCM 模块液相云图





图 13. 不同 d 取值下 CPCM 模块液相分数变化曲线

3.3. 导热区不同 EG 分数 CPCM 填充

根据上节分析,当 *d* 大于 2 时,潜热回收的均匀性随 *d* 值增大而变差,主要由于传热面积的减小导致的换热减弱。因此本节在接触面积不变的前提下,继续提高 CPCM 中 EG 填充分数以增加导热区的导热系数,增强导热区与液冷板间的传热。以 CPCM 蓄热区厚度为 4 mm 为基础模型,分别向导热区中填充 EG 分数为 20%、30%、40%和 50%的 CPCM,观察对潜热回收均匀性的影响。

图 14 为不同 EG 分数 CPCM 填充下, 放电结束时 CPCM 模块液相分数云图。从图中可以看出, 随着 EG 填充分数的增加, CPCM 模块液相分数显著下降, 当 EG 填充分数达到 50%时, CPCM 基本全部

凝固,液相分数分布也比较均匀。图 15 为 CPCM 模块整体液相分数随 EG 填充分数增加的变化情况。随着 EG 填充分数的增加,CPCM 模块整体的液相分数逐渐降低。EG 填充分数大于 50%时,放电结束后 CPCM 模块液相分数仅为 0.02,相变潜热基本全部回收。随着 EG 填充分数的增大,导热区 CPCM 的导 热系数不断增加,使得热量快速的传递到液冷板中,被冷却液带走。这表明在导热区填充导热系数更高的 CPCM 能够起到提高潜热回收能力及回收均匀性。



Figure 14. Liquid phase nephogram of CPCM module under different EG filling fraction 图 14. 不同 EG 填充分数下 CPCM 模块液相云图



Figure 15. Liquid phase change curve of CPCM module under different EG filling fraction 图 15. 不同 EG 填充分数下 CPCM 模块液相变化曲线图

但根据表 2 中不同 EG 分数填充下 CPCM 的潜热值,可以发现随着 EG 填充分数的增大 CPCM 的潜 热值大小显著下降,相比于 EG 填充分数为 20%的膨胀石墨,EG 填充分数为 50%的 CPCM 潜热值为 113,300 J/kg,降低了约 37%,即潜热模块的散热量上限降低了 37%左右。仅仅为了提高潜热回收的均匀性而提高 EG 填充分数,导致潜热模块散热能力减弱是不经济的。因此,针对潜热回收不均匀性问题, 需考虑其他方法解决,后续工作中将会继续对此研究。

4. 结论

本文通过将 CPCM 模块划分为蓄热区和导热区,分别向其中填充不同 EG 分数的膨胀石墨,用来提高复合冷却系统模组内部温度均匀性,并研究分区后对潜热回收均匀性和效率的影响,得出以下结论:

1) 相比于单一的 CPCM 散热,复合液冷的 CPCM 散热系统能够对电池快速降温并回收 CPCM 的潜 热,但引入液冷会导致单体电池径向温差较大,温度均匀性较差,且存在潜热回收不均匀的问题。

2) 通过对 CPCM 模块分区后,随着分区位置的变化,当*d*为4mm时,单体电池径向温差及模组整体温差分别下降到4.63℃、4.93℃。当*d*为2mm时,CPCM 模块潜热回收效率和均匀性都有所提升,但随着*d*值增大,潜热回收效率和均匀性再次变差。提高温度均匀性所需的*d*值与提高潜热回收均匀性所需的*d*值冲突。

3) 随着导热区 CPCM 中 EG 填充分数的增加,潜热回收的效率及温度均匀性逐渐提升,EG 填充分数达到 50%,CPCM 整体液相分数仅为 0.02。但相比于 20% EG 填充的 CPCM,EG 填充分数为 50%的 CPCM 潜热值降低了约 37%。仅仅为了提高潜热回收效率和均匀性损失较多的潜热模块散热量明显是不 合适的。

参考文献

- Jouhara, H.K., Hordehgah, N., Serey, N., et al. (2019) Applications and Thermal Management of Rechargeable Batteries for Industrial Applications. *Energy*, 170, 849-861. <u>https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.218</u>
- [2] Ramadass, P., Haran, B. and White, R. (2002) Capacity Fade of Sony 18650 Cells Cycled at Elevated Temperatures: Part I. Cycling Performance. *Power Sources*, **112**, 606-613. <u>https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00474-3</u>
- [3] Wang, Q.S., Ping, P., Zhao, X.J., Chu, G.Q., Sun, J.H. and Chen, C.H. (2012) Thermal Runaway Caused Fire and Explosion of Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210-224. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038
- [4] Ling, Z.Y., Zhang, Z.G., Shi, G.G., et al. (2013) Review on Thermal Management Systems Using Phase Change Materials for Electronic Components, Li-Ion Batteries and Photovoltaic Modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **31**, 427-438. <u>https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.017</u>
- [5] Azizi, Y. and Sadrameli, S.M. (2016) Thermal Management of a LiFePO₄ Battery pack at High Temperature Environment Using a Composite of Phase Change Materials and Aluminum Wire Mesh Plates. *Energy Conversion and Management*, **128**, 294-302. <u>https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.081</u>
- [6] Zhang, Z.G. and Fang, X.M. (2006) Study on Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material. *Energy Conversion and Management*, 47, 303-310. <u>https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.03.004</u>
- [7] Akula, R. and Balaji, C. (2022) Thermal Management of 18650 Li-Ion Battery Using Novel Fins-PCM-EG Composite Heat Sinks. *Applied Energy*, **316**, Article ID: 119048. <u>https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119048</u>
- [8] Jiang, G.W., Huang, J.H., Fu, Y.S., Cao, M. and Liu, M.C. (2016) Thermal Optimization of Composite Phase Change Material/Expanded Graphite for Li-Ion Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, 108, 1119-1125. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.197</u>
- [9] Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., et al. (2008) Passive Control of Temperature Excursion and Uniformity in High-Energy Li-Ion Battery Packs at High Current and Ambient Temperature. Journal of Power Sources, 183, 370-375. <u>https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.04.050</u>
- [10] Cao, J.H., Ling, Z.Y., Fang, X.M. and Zhang, Z.G. (2020) Delayed Liquid Cooling Strategy with Phase Change Material to Achieve High Temperature Uniformity of Li-Ion Battery under High-Rate Discharge. *Journal of Power Sources*, 450, Article ID: 227673. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227673
- [11] Song, L.M., Zhang, H.Y. and Yang, C. (2019) Thermal Analysis of Conjugated Cooling Configurations Using Phase Change Material and Liquid Cooling Techniques for a Battery Module. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 827-841. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.157</u>

- [12] Zhang, F.R., Zhai, L., Zhang, L., *et al.* (2022) A Novel Hybrid Battery Thermal Management System with Fins Added on and between Liquid Cooling Channels in Composite Phase Change Materials. *Applied Thermal Engineering*, 207, Article ID: 118198. <u>https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118198</u>
- [13] Ling, Z.Y., Chen, J.J., Xu, T., et al. (2015) Thermal Conductivity of an Organic Phase Change Material/Expanded Graphite Composite across the Phase Change Temperature Range and a Novel Thermal Conductivity Model. Energy Conversion and Management, 102, 202-208. <u>https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.040</u>
- [14] Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J. (1984) A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of the Electrochemical Society*, 132, 5-12. <u>https://doi.org/10.1149/1.2113792</u>
- [15] 刘业凤,郑鹏飞,言锦嘉,等. 基于复合相变材料的电池组散热性能分析[J]. 电源技术, 2019, 43(11): 1792-1795.