

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260201001

水合盐过冷特性应用于冬冷地区宽温区电池热管理的研究

肖鑫^{1,2} 张志伟² 姚梦婷² 王云峰¹

(1 云南师范大学 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室 昆明 650500;
2 东华大学环境学院 空气环境与建筑节能研究所 上海 201620)

摘要 冬冷地区的锂电池热管理是提高动力电池组在低温环境下性能的必要途径。本文以十水合硫酸钠(SSD)为基体,添加质量分数为2%~12%的膨胀石墨(EG),用于改善材料泄漏、相分离和热导率低的问题。在考虑泄漏、相变材料沉降和相分离、热导率和潜热值后,选取10% EG填充入SSD的复合相变材料,并通过低温实验台进行模拟冬冷地区电池热管理测试。结果表明:10% EG-SSD复合物热导率为2.093 W/(m·K),过冷度为17.01 °C,满足15 °C以下低温环境。在5 °C和8 °C填充复合物的电池温度维持在15 °C以上的时长分别为未填充复合物的2.77倍和3.76倍,充电效率分别提高7.55%和13.65%。5 °C时电池放电功率提高7.53%,放电时间延长28%。模拟夏季汽车振动工况下,10% EG-SSD可实现触发低过冷放热,保证相变循环的正常进行。

关键词 水合盐;过冷度;宽温区;电池热管理

中图分类号:TB34;TK02;TM912

文献标识码:A

Study on Application of Hydrate Salt Supercooling Characteristics in Wide-Temperature-Range Battery Thermal Management for Cold Regions

Xiao Xin^{1,2} Zhang Zhiwei² Yao Mengting² Wang Yunfeng¹

(1. Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials, Ministry of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Institute of Air Environment and Building Energy Conservation, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract Effective thermal management is essential for improving the performance of lithium battery packs operating under low-temperature conditions in cold environments. In the present study, sodium sulfate decahydrate (SSD) was used as the base material, and expanded graphite (EG) with a mass fraction of 2%–12% was incorporated to address issues such as material leakage, phase separation, and low thermal conductivity. After considering the leakage, phase-change material sedimentation, thermal conductivity, and latent heat, a composite phase change material with 10% EG filled into the SSD was selected. A low-temperature experimental platform was employed to simulate the thermal management performance of batteries in cold regions. The results show that the thermal conductivity of the 10% EG-SSD composite is 2.093 W/(m·K), with a supercooling degree of 17.01 °C, meeting the requirements for temperatures below 15 °C. System tests reveal that when the rig filled with the composite is at 5 °C, the battery temperature remains above 15 °C for 2.77 times longer than that without the composite, while the battery discharge power increases by 7.53%, and the discharge time extends by 28%. Furthermore, the charging efficiency is improved by 7.55% and 13.65%, respectively. Under simulated summer car vibration conditions, the 10% EG-SSD can retrieve low subcooling heat release to ensure normal operation of the phase-change cycles.

Keywords hydrated salt; supercooling; wide temperature range; battery thermal management

新能源汽车具有环保、节能等优势,能够带动科技创新并对改善空气质量和应对气候变化具有积极作用,是推进“双碳”目标的得力助手和可持续发展的重要组成部分。相变材料(phase change materials,

PCM)因其独特的优势可作为电池热管理的解决方案,包括较高的热容量、多样的相变温度和灵活的气候适应性等^[1-3],但在实际应用过程中需要面对循环稳定性、成本等方面的挑战,应用研究仍面临挑战。

收稿日期:2026-02-01;修回日期:2026-03-23;录用日期:2026-03-27

责任编辑:王亚薇



移动阅读

然而,有机PCM对电池存在潜在的可燃性、易泄漏、较高的价格以及对广泛使用的不利影响,使其不具备商业化优势,相比之下,无机PCM无可燃性、成本较低,且其相变潜热和热导率均高于有机PCM,因此更适用于电池热管理^[4-6]。

以水合盐为代表的无机PCM,不仅可以满足电池的热管理需求,还能提供热失控防护功能。此外,利用水合盐PCM的大过冷度特性,可以选择适当的相变温度和过冷度,使得在电池运行时材料熔化吸热,而在电池停止运行时材料凝固释放热量。这样不仅能吸收并储存电池在运行中散发的热量,还能利用这些储存的热量提升电池在启动时的温度。因此,无机水合盐应用于电池热管理系统中有很好的价值^[7-9]。

然而,纯水合盐材料存在相分离和热导率偏低的问题^[10-11],可通过添加成核剂、增稠剂等进行物性改良,从而提高其应用和商业化潜力。Lin Shao等^[12]制备的醋酸钠三水合物-尿素/膨胀石墨(expanded graphite, EG)新型蓄热材料集成了潜热和热化学储热,潜热值为181 kJ/kg,可以确保在发生外部短路等轻微事故时保持电池低温,且双级蓄热可有效抑制因电池热滥用等严重事故而导致的热失控传播。陈文超^[13]制备了十二水合磷酸氢二钠/改性氮化铝/碳纤维无机复合PCM,采用18650锂电池组在30℃下进行3 C放电冷却测试。结果表明,改性后的复合PCM相较纯水合盐具有更优异的冷却效果,可将电池放电末期平均温度峰值降低5.2℃,电池组内最大温差也降低3.02℃。孙鸣洋^[14]制备了以三水醋酸钠-五水硫代硫酸钠-去离子水为代表的大过冷三元低共熔PCM,并通过铝棒触发结晶相变,通过对

18650型动力锂电池组进行不同温度下恒流恒压充/放电测试。结果表明,相变后电池组的最大温升速度为2℃/min,并能够提升电池放电功率6.8%。

在冬季环境中,新能源汽车动力电池的工作温度可能低于理想温度范围,导致电池性能下降、启动困难甚至无法正常工作。与传统降低水合盐材料过冷度的研究不同,本文基于水合盐的过冷理论,实现热量低温触发、延后释放的效果。该复合PCM无需消耗外界能量,仅通过吸收电池放电过程的余热便能明显改善电池组在低温环境下的温度,使其长时间保持在理想工作温度范围,从而提高电池组的放电性能。首先以十水合硫酸钠(sodium sulfate decahydrate, SSD)为母体,EG为强化材料,制备了质量分数分别为2%~12%的复合PCM并测试了其热物性,选取合适的配比。基于合适的并联电池组装的动力电池组,通过自搭建的模拟低温环境实验台,进行仿真冬冷地区电池热管理测试,同时进行夏季振动测试,将为冬冷地区电动汽车的电池热管理提供参考。

1 材料制备及物性

1.1 制备及泄漏测试

采用熔融浸渍法将SSD和EG分别按照98:2、96:4、94:6、92:8、90:10、88:12的比例进行混合,复合PCM的制备流程如图1所示。为研究羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)对材料热性能的影响,同样利用熔融浸渍法配置了各20 g的质量分数6% CMC-10% EG-SSD以及质量分数6% CMC-SSD复合PCM。

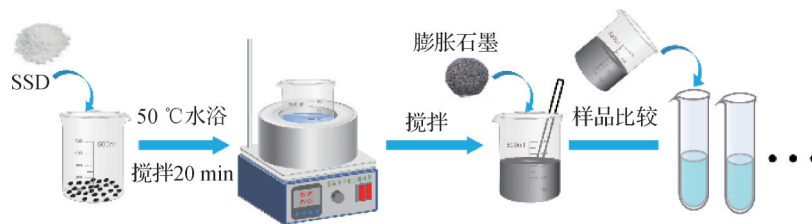


图1 材料制备流程

Fig.1 Process of material preparation

为了防止水合盐材料泄漏,将不同EG含量的EG-SSD复合PCM各称取8 g放置于滤纸上,并用黑笔做好各个样品的标记,将其放入鼓风干燥机中进行干燥。设置干燥温度为50℃,加热时间为90 min。测试结束后取出样品,通过观察滤纸上各样品是否有残留痕迹,判断不同EG含量对于复合PCM泄漏的

改善效果。

1.2 热物性测试

1.2.1 热导率

基于前述研究的稳态法热导率测试装置^[15],根据式(1)计算热导率。

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中: Q 为热流量, W ; λ 为热导率, $W/(m \cdot K)$; A 为面积, m^2 ; dT/dx 为温度梯度。

本文采用的稳态法热导率测试系统主要由实验腔体、低温恒温槽、真空泵、数据采集仪4部分组成^[15]。通过2台恒温槽来控制实验腔体内的热源和冷源的温度,形成腔体内部的上下温差。确保腔体的真空状态,以最大程度减少内部的对流传热,在样品和热流柱表面包裹防辐射材料,以减少辐射传热的影响。

1.2.2 步冷实验和相变特性

将各样品称取20 g装入试管中,将热电偶缠绕固定在铁丝上,并保持其测温点始终位于试管中央。首先将各试管放入50 °C水浴中,加热至样品完全熔化。加热完成后,为防止试管内外温差过大导致试管破裂,将试管置于室温20 s。然后将各试管放入13 °C水浴中,冷却至各样品温度稳定。安捷伦数据采集仪的时间间隔设置为1 s,实验重复进行3次,并将3次结果的平均值作为凝固温度。

采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)进行相变特性分析,氮气保护气体流量为50 mL/min,测试温度范围为0~60 °C,升/降温速率为5 °C/min。

1.2.3 热稳定性

采用热重分析法(thermogravimetric analysis, TGA)测定样品在特定温度范围内的质量损失,评估复合PCM的热稳定性。本文热重测试的加热速率为10 °C/min,测量温度范围为50~600 °C。

2 模拟系统装置

2.1 电池组设计

实验选用特斯拉新能源汽车的电池组——NX18650型圆柱三元锂离子电池,研究不同放电倍率对实验效果的影响。为增大电池容量并延长放电时间,以保证相变材料完全熔化,电池采取四并联方式连接,使用储能点焊机(AL-208)将电池正负极与镍片连接,以降低电池间连接电阻。通过单电池充/放电倍率温度测试,确定电池放电倍率为2 C。

为更直观地对排除环境温度外不同工况对实验的影响,实验将不同条件的测试进行了分组,未填充相变材料的电池为A组,填充相变材料且电池间距为4 cm的为B组,填充相变材料且电池间距为2 cm的为C组,如图2(a)和(b)所示。

2.2 低温环境下电池热管理

研究表明,0~10 °C是锂离子电池性能开始显著

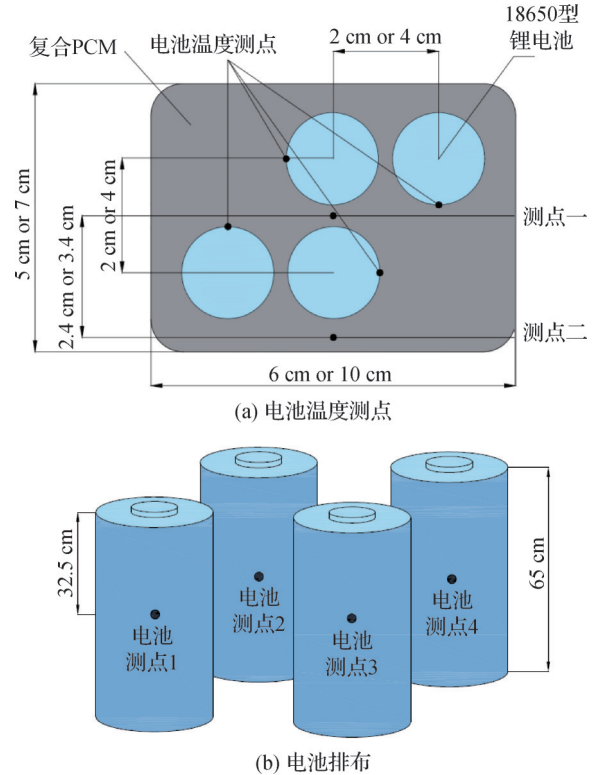


图2 电池排布示意图

Fig.2 Schematic diagram of battery arrangement

下降的温区,在5 °C时,电池可用容量仅为25 °C时的60%~80%,低温下充电接受能力下降,5 °C以下充电易引发析锂风险^[16]。我国冬冷夏热地区冬季最冷月平均气温为0~10 °C,因此本文选取5 °C和8 °C的低温环境进行测试。

为真实模拟低温环境,如图3所示,本文通过将电池组装入容器,其中电池、相变材料与容器间留有缝隙,再将容器固定在恒温槽中进行低温电池放电实验。其中电池组与环境的换热方式为空气自然对流,真实还原汽车电池的热交换方式。通过控制恒温槽的水温改变低温工况,电池周围空气温度由热电偶测量得到。实验时先调节恒温槽水温即模拟冬冷地区低温环境,将电池组温度冷却至稳定,将电池正负极接入直流电子负载以2 C倍率进行放电至截止电压为2.7 V,观察电池和相变材料温度是否有明显的相变区间及过冷度,待电池温度再次冷却至稳定时记为一次实验,放电结束后利用直流稳压电源对电池进行充电以准备下一次实验。

3 结果与讨论

3.1 样品和泄漏

将制备完成的样品置于恒温槽中进行3次固-液相变循环并观察相分离情况,与原材料SSD相比,不

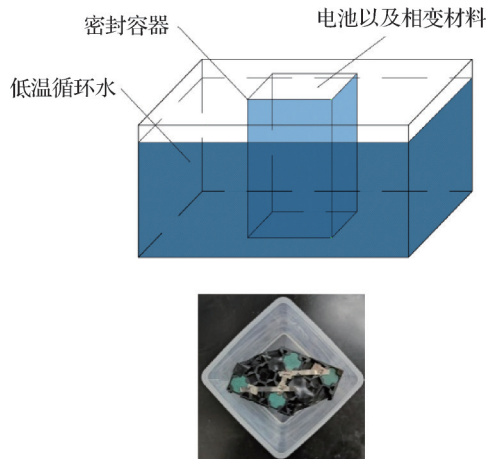


图3 低温模拟实验台

Fig.3 Test rig for low-temperature experiments

同EG含量的复合相变材料相分离问题均得到改善。通过观察对比发现,添加质量分数2% EG的复合PCM仍存在明显的相分离。随着EG质量分数的增加,复合PCM相分离现象逐渐减少甚至消失,添加质量分数10% EG、12% EG的复合相变材料几乎不存在相分离现象,各样品相分离现象如图4(a)所示。

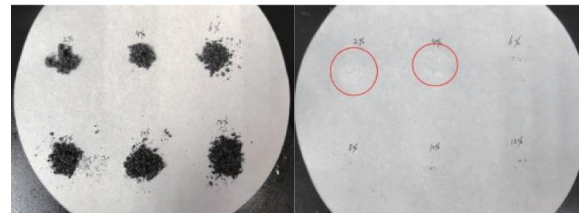
对制备的EG-SSD复合PCM,评估了不同质量分数的EG对材料泄漏性能的影响。图4(b)中的红色区域标示了相变材料的泄漏部位。结果表明,随着EG含量的增加,PCM的泄漏明显减少。该现象归因于EG的多孔结构和较大的比表面积,能够有效吸附和固定相变材料,从而防止其泄漏。特别是当EG质量分数达到6%时,相变材料完全被EG的多孔结构吸附,未观察到任何泄漏现象。当EG添加量达到10%时,可以有效阻碍 Na_2SO_4 的沉降,材料几乎不存在相分离现象。

3.2 步冷特性和相变行为

相较于原材料SSD和EG-SSD,加入CMC的复合PCM由于稳定性不高,在约18℃便已开始凝固,放热所达到的最高温度仅约为20℃,与预期效果不相符,故后续不加入CMC。图5(a)所示为步冷实验的温度曲线,由于水合盐材料凝固过程会释放热量,所以会观察到温度曲线出现先升温再降温的现象,根据升温开始的温度可以确定复合PCM的凝固温度。通过数据对比可知,随着EG质量分数的增加,EG-SSD复合PCM的凝固温度呈现上升后下降的趋势,其上升的原因是EG为SSD成核提供了更多的结晶位点,从而导致SSD提前结晶凝固;下降的原因是随着EG质量分数的增加,复合PCM热导率变大,温度下降得更加迅速,导致过冷度增大,同时更多的SSD渗透进EG微孔中,结晶成核受到了空间限制。步冷实验结果



(a) 实验测试样品



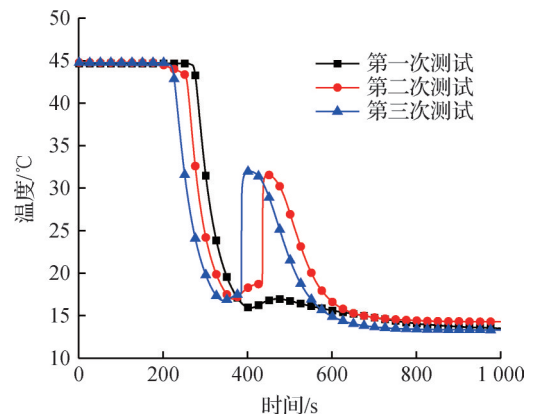
(b) 泄漏测试照片

图4 样品制备和泄漏测试

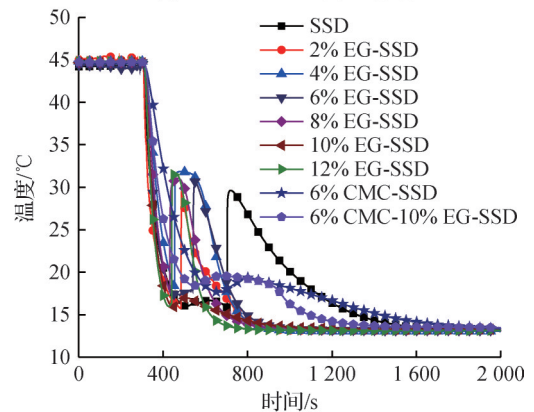
Fig.4 Sample preparation and leak tests

如图5(b)所示,由于本文要求材料具有较大的过冷度,可知凝固温度为15.90℃的10% EG-SSD和15.99℃的12% EG-SSD更加符合标准。

DSC测试结果如图6(a)所示,SSD和复合PCM的约33℃的熔点与锂电池放电达到的温度相匹配,可



(a) 10%EG-SSD三次步冷实验



(b) 不同材料步冷实验

图5 步冷实验冷却温度曲线

Fig.5 Cooling temperature curve of step-cooling experiments

以保证电池工作时所释放的热量使相变材料完全熔化。含质量分数10% EG的SSD复合PCM,其潜热值为177.44 kJ/kg,熔化温度为32.91 °C,过冷度为17.01 °C,且经过50次熔化/凝固循环后,潜热值为165.09 kJ/kg,熔化温度为31.95 °C,下降0.96 °C,具有较好的循环稳定性。而质量分数12% EG-SSD与10% EG-SSD的潜热值相差较大,经综合考虑过冷度、防泄漏性能因素,后续决定将10% EG-SSD复合PCM作为电池热管理的填充材料。

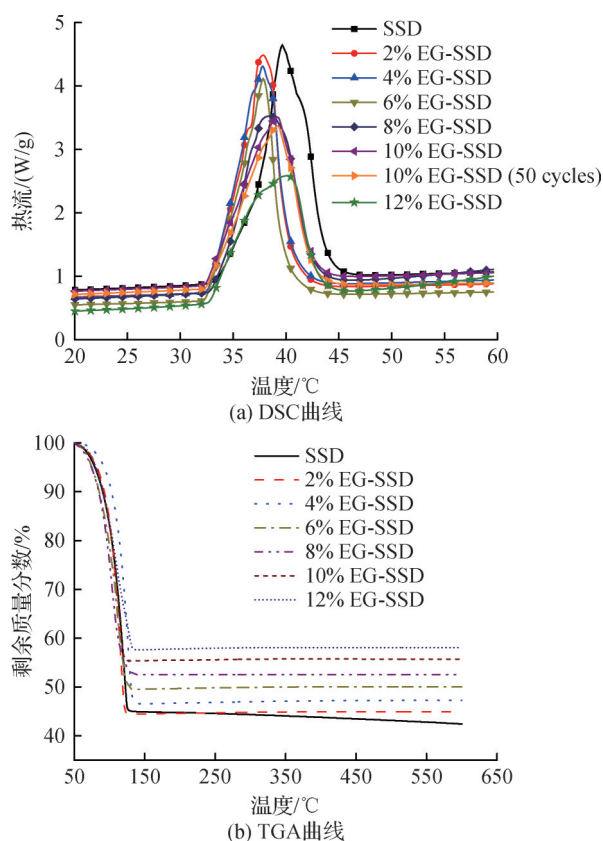


图6 相变特性和热稳定性

Fig.6 Phase transition characteristics and thermal stability

各样品热重分析结果如图6(b)所示,由曲线可知,在50~600 °C的升温范围内SSD及其复合物仅存在一个失重阶段,出现失重的原因是 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 逐渐失去10个结晶水,最后只剩下 Na_2SO_4 晶体。根据相对分子质量计算,最后的残留质量约为44.01%,与TGA测试结果相吻合。根据SSD与EG-SSD复合材料的TGA结果对比可知,随着EG质量分数的增加,材料最终质量也随之增加。

3.3 热导率

热导率测试过程中,为防止材料表面失水,本文采用模具密封和聚乙烯(polyethylene, PE)膜密封措施,其中,PE膜密封的防失水效果更优,可有效封锁材料中的水分。由于PE膜的厚度很薄,且在材料与

膜、膜与不锈钢柱间涂抹了导热硅脂,因此添加PE膜对实验结果几乎无影响。

图7(a)所示为本文的稳态法热导率测试曲线^[15],A1~A8表示8根铂电阻的温度曲线。其中a-b、c-d、e-f段表示稳态过程,这些部分铂电阻的温度平均值用来推算热流柱的温度分布,利用得到的温度梯度来计算热流量和总的热阻。将不同厚度材料的热阻与其厚度进行线性拟合,所得线段的斜率倒数即为复合PCM的热导率,而线段的截距即为材料与钢柱之间的接触热阻,如图7(b)所示。

经计算,10% EG-SSD复合PCM的热导率为2.093 W/(m·K),比相同方法测得的原材料热导率0.554 W/(m·K)提高了近4倍,由此可知复合PCM可以更加迅速、有效地进行蓄/放热,在电池热管理应用中更具优势。

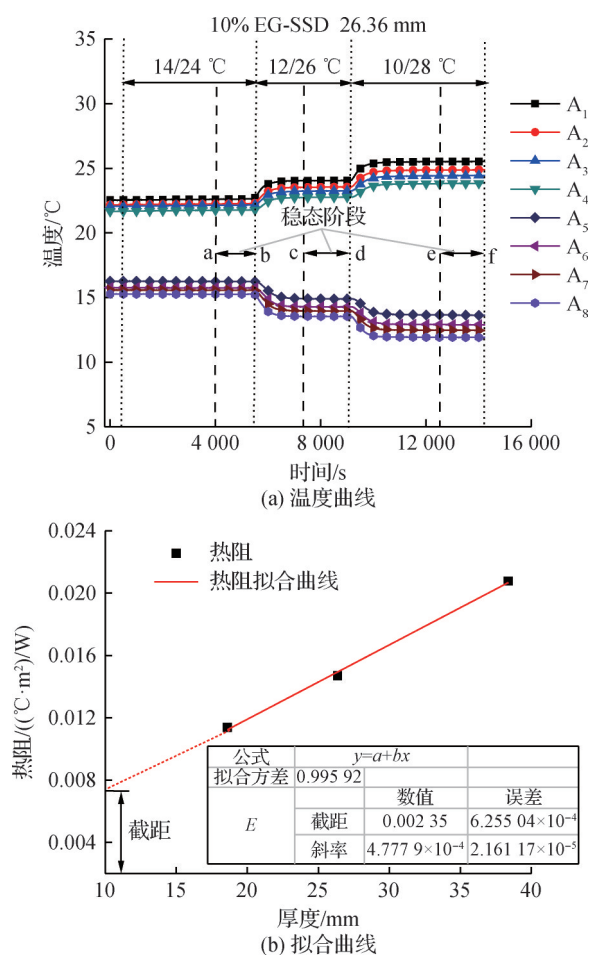


图7 稳态法热导率测试

Fig.7 Thermal conductivity with steady-state method

3.4 低温热管理

3.4.1 不同排列方式对比

将A、B、C这三组分别在5 °C的低温环境中进行电池2 C放电,将A组电池温度测点1命名为A1,并

以此类推,由于不同电池测点位置温度相差较小,为便于观察对比,图8电池放电阶段的温度曲线仅列出2个电池温度测点。

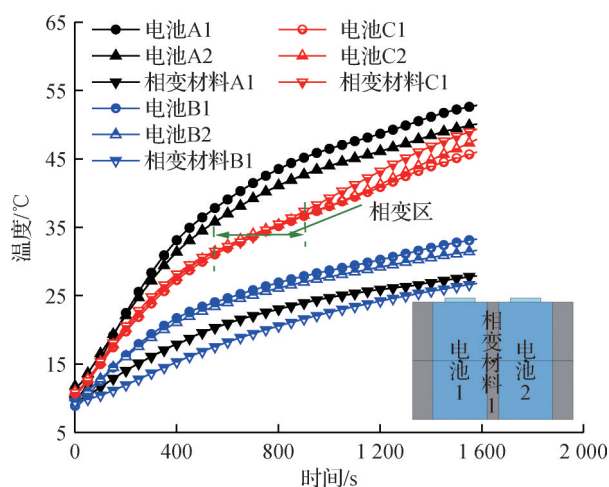


图8 不同排列方式下电池2 C放电升温

Fig.8 Temperature increase of different arrangement configurations under 2 C discharging

由图8可知,与A组相比,B组和C组的3条温度曲线差异较小,表明PCM显著改善了电池组内部的温度均匀性,同时由于PCM吸收了热量,因此也降低了电池组所能达到的最高温度,对避免热失控有一定效果。对比B组和C组温度曲线可知,虽然两组均有明显的相变区间,但电池间距不同导致PCM填充量不同,进而材料储热量与电池发热量的匹配程度不同。B组在电池放热完成时PCM内部温度仅约为27 °C,表明储热量超过发热量,导致相变材料无法完全熔化;C组在电池放热完成时PCM内部温度达到约46 °C,温度曲线的斜率变化表明材料已完全熔化,因此C组的材料储热量与电池发热量匹配程度优于B组。

3.4.2 低温环境电池特性

将C组置于低温环境中进行电池2 C放电,以8 °C为例的温度曲线如图9所示。首先,电池和PCM温度通过空气自然对流传热降至稳定,电池开始工作后温度逐渐上升,且材料在32 °C附近开始熔化吸热,其中外部的PCM温度最终可到达40 °C,表明PCM已完全熔化。电池停止工作后各测点温度逐渐降低,且在冷却至约16 °C时PCM开始凝固放热,最终再次冷却至稳定温度。

由图9电池放电阶段可知,内部PCM升温最快,这是因为内部测点的PCM被4个电池包围,在电池放电时会吸收4个方向的热量,相比之下,外部的PCM升温较慢,这是因为外部PCM主要吸收距离其最近

的电池热量,且由于空气自然对流,会向外界传递更多的热量。4个电池的升温情况差异较小,细微的温差主要因电池与空气间PCM的厚度不同导致。在电池放电结束时,内部PCM测点及电池测点的温度开始下降,而外部PCM温度继续上升一段时间,表明其与外界热交换中,热传导所吸收的热量大于空气自然对流所释放的热量,表明复合PCM具有较好的热导率。

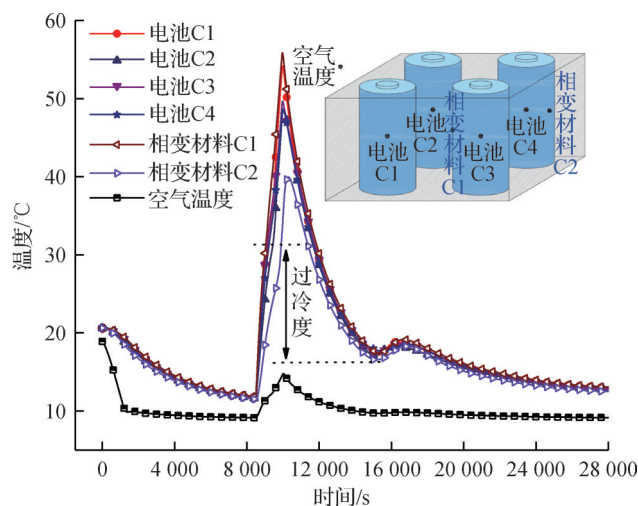


图9 低温环境电池温度曲线

Fig.9 Battery temperature curve in low-temperature environment

将A、C组置于低温环境中(5 °C、8 °C)进行电池2 C放电,并对比其电池冷却阶段的电池温度。由图10(a)可知,相较于A组,填充PCM的C组电池温度维持在15 °C以上的时间大幅增长,可见,5 °C低温环境下C1的保温时长是A1的2.77倍;8 °C低温环境下C1的保温时长是A1的3.76倍。低温下电池放电电压会降低并导致放电时间缩短,实验测量了电池在5 °C和15 °C时2 C放电的功率,由图10(b)可知在5 °C低温环境下填充复合PCM电池组由于保温作用可将功率提高7.53%,放电时间延长28%。

在相变材料的保温作用下,电池的充电效率也有所提升。为模拟冬冷地区车辆停运后的充电情况,实验进行了不同工况下不同组电池放电结束后充电至50%电量(电压达3.7 V)所需时间的对比,结果如图11所示。可以看到填充相变材料的C组由于充电时电池平均温度较高,其充电至50%电量所需时间在不同工况下均少于A组,并在5 °C环境下充电效率提高了7.55%,在8 °C环境下充电效率提高了13.65%。

3.4.3 常温环境电池热管理

冬冷地区夏季温度会明显升高,这要求相变材

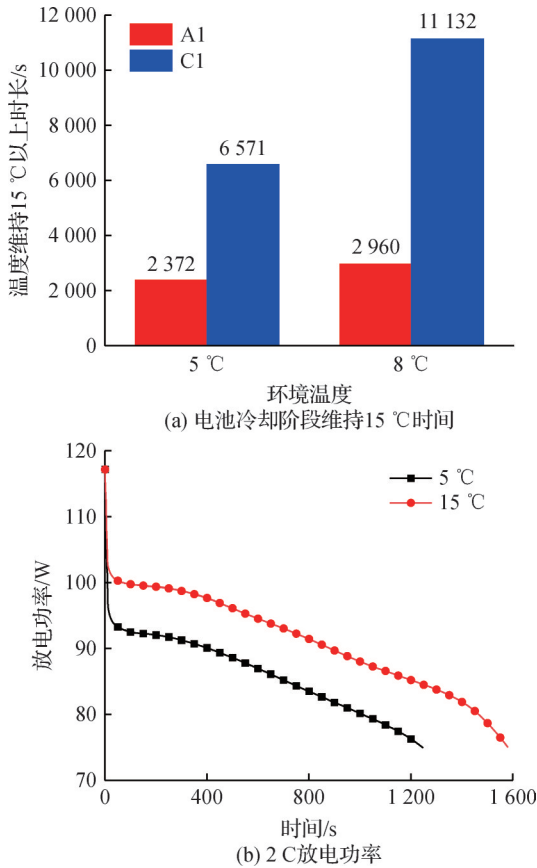


图10 低温环境下2种排列方式对比

Fig.10 Comparison of two different arrangement configurations in low-temperature environment

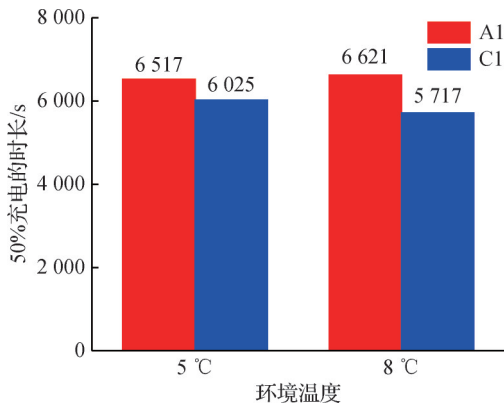


图11 电池充电情况对比

Fig.11 Comparison of different schemes for battery charging

料不仅要在低温环境下适用,也要在常温环境下可正常工作,因此本研究同样模拟了常温环境下的电池热管理。将C组置于常温20℃环境中进行电池2C放电,理论上相变材料由于过冷度会在较低温度进行放热,但考虑到一些地区夏季气温无法将材料冷却至所需温度,因此在进行模拟夏季环境电池热管理的冷却阶段中,通过模仿汽车运行中的振动可促进结晶,实现相变材料提前放热。

常温振荡环境电池热管理温度曲线如图12所示,在电池放热过程结束后,温度冷却至30℃时,可通过振荡法减小材料过冷度,在29℃时便开始凝固放热。因此本材料的凝固放热可通过环境低温和汽车振动2种方式进行触发,既可保证汽车在停车静止状态时电池温度长时间不低于15℃,也可在汽车发动时提前放热以进行下一次相变循环。

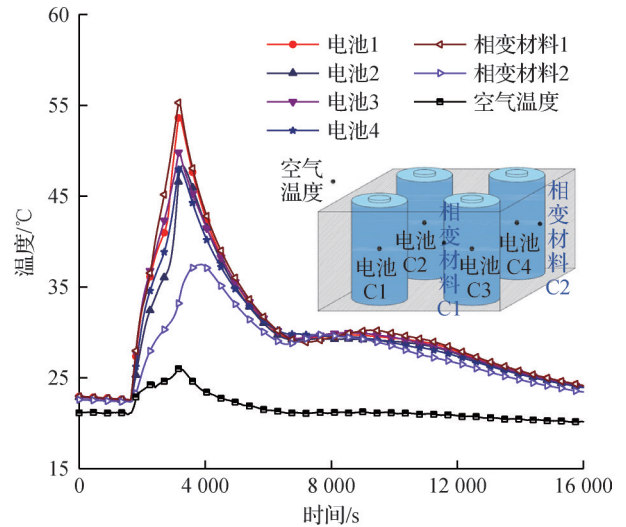


图12 常温振荡环境电池热管理温度曲线

Fig.12 Temperature curve of battery thermal management at ambient conditions with vibration

4 结论

本文制备了SSD/EG复合PCM,研究了其热物性并应用于并联电池组,通过低温实验台进行了冬冷地区汽车电池热管理的模拟测试,得出结论如下:

1)经过泄漏、过冷和相变测试后,选取的质量分数10% SSD/EG复合PCM无泄漏和相分离问题,同时具有17℃的大过冷度。此外,复合PCM还具有177.44 kJ/kg相变潜热及良好的循环热稳定性,其热导率相较于原材料提升了377.8%,可保证其在电池热管理系统中具有较大的储能容量、较高的热交换效率及良好的热均匀性。

2)通过对比不同排列方式电池放电时的温升情况,发现电池间距2cm、PCM填充量65g的电池组在储热量与发热量间具有更好的匹配度,可以保证大部分电池发热量被吸收的同时复合PCM能够实现完全熔化。

3)通过模拟不同低温工况的冬冷地区电池充/放电实验,发现复合材料在5℃低温环境下可将电池充电效率提高7.55%;放电功率提高7.53%、放电时间延长28%。而20℃常温工况下的电池放电实验表

明,汽车振荡可有效触发该复合PCM的低过冷放热。

本文受可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室(云南师范大学)开放课题(MERE2024002)资助。(The project was supported by Key Laboratory of Advanced Technique & Preparation for Renewable Energy Materials (Yunnan Normal University), Ministry of Education (No. MERE2024002).)

参考文献

- [1] 张国庆, 饶中浩, 吴忠杰, 等. 采用相变材料冷却的动力电池组的散热性能[J]. 化工进展, 2009, 28(1): 23–26. (Zhang Guoqing, Rao Zhonghao, Wu Zhongjie, et al. Experimental investigation on the heat dissipation effect of power battery pack cooled with phase change materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(1): 23–26.)
- [2] 肖鑫, 冯泽, 王云峰, 等. 有机相变材料强化及耦合优化电池热管理系统的研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3795–3811. (Xiao Xin, Feng Ze, Wang Yunfeng, et al. Recent progress in enhancement of physical properties of organic phase change materials and optimization of coupling thermal management of batteries [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3795–3811.)
- [3] Xiao Xin, Yao Mengting, Xu Yiqi, et al. Preparation and characterization of TPEE@PEG1500/EG flexible composite phase change materials and thermal response for thermal management of batteries [J]. Energy Conversion and Management, 2026, 352: 121044.
- [4] 王铁营, 刘松松, 苏远翔, 等. 双相变温度梯度宽温域锂电池热管理实验研究[J/OL]. 制冷学报, 2025–05–20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250519.1710.002>. (Wang Tieying, Liu Songsong, Su Yuanxiang, et al. Experimental study on dual-PCM gradient thermal management for lithium-ion batteries with wide temperature adaptability[J/OL]. Journal of Refrigeration, 2025–05–20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.TB.20250519.1710.002>.)
- [5] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 52–59. (Tao Wenbo, Xie Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 52–59.)
- [6] 郑玲玲, 智茂永, 岳姗, 等. 水合盐相变材料用于锂离子电池热管理[J]. 电池, 2024, 54(2): 217–221. (Zheng Lingling, Zhi Maoyong, Yue Shan, et al. Hydrated salt phase change composite used in thermal management of Li-ion battery [J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(2): 217–221.)
- [7] Galazutdinova Y, Ushak S, Farid M, et al. Development of the inorganic composite phase change materials for passive thermal management of Li-ion batteries; Application [J]. Journal of Power Sources, 2021, 491: 229624.
- [8] Zhang Shengdi, Li Xiang, Sun Yanxia, et al. Low-cost magnesium-based eutectic salt hydrate phase change material with enhanced thermal performance for energy storage [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 238: 111620.
- [9] 戴心怡, 孔得朋, 平平. 复合无机相变材料用于锂离子电池热管理性能模拟及优化设计[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(11): 4133–4141. (Dai Xinyi, Kong Depeng, Ping Ping. Simulation and optimal design of using composite inorganic phase change materials for lithium-ion batteries thermal management [J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(11): 4133–4141.)
- [10] Zhi Maoyong, Fan Rong, Yang Xiong, et al. Phase diagram prediction and experimental verification of a binary hydrated salt mixture as phase change thermal storage materials [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61: 106731.
- [11] Liang Qianwei, Zhang Haojie, Li Yali, et al. Multifunctional response of biomass carbon/sodium sulfate decahydrate composite phase change materials [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 83: 110621.
- [12] Lin Shao, Ling Ziye, Li Suimin, et al. Mitigation of lithium-ion battery thermal runaway and inhibition of thermal runaway propagation using inorganic salt hydrate with integrated latent heat and thermochemical storage [J]. Energy, 2023, 266: 126481.
- [13] 陈文超. 水合盐/氮化铝/碳纤维复合相变材料的开发及动力电池的冷却应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022. (Chen Wenchao. Development of hydrated salt/aluminum nitride/carbon fiber composite phase change materials and cooling application of power battery [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.)
- [14] 孙鸣洋. 基于深度过冷共晶相变材料的电池热管理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022. (Sun Mingyang. Research on battery thermal management based on deeply undercooled eutectic phase change materials [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.)
- [15] Xiao Xin, Han Zhengliang, Wang Yunfeng, et al. Thermal characterization and moisture adsorption performance of calcium alginate hydrogel/silica gel/polyvinylpyrrolidone/expanded graphite composite desiccant [J]. Carbon Capture Science & Technology, 2024, 13: 100323.
- [16] Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric

vehicles at cold temperatures[J]. Applied Energy, 2016, 164: 99–114.

通信作者简介

肖鑫,男,副教授,东华大学环境科学与工程学院,18964749723,E-mail:xin.xiao@dhu.edu.cn。研究方向:相变蓄

能及柔性热管理。

About the corresponding author

Xiao Xin, male, associate professor, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, 86-18964749723, E-mail: xin.xiao@dhu.edu.cn. Research fields: latent thermal energy storage and flexible thermal management.