

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.005

基于相变微胶囊悬浮液的电池液冷性能实验研究

李雪淳, 杨磊

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章搭建了电池液冷散热系统实验平台,分别采用纯水、相变微胶囊悬浮液(microencapsulated phase change material suspension, MEPCMS)及单组分/双组分四氧化三铁纳米强化 MEPCMS 作为冷却液,在不同入口流量及悬浮液质量分数下,冷却液对模拟电池的冷却效果进行对比分析。结果表明:质量分数为 20% 的相变微胶囊悬浮液相比纯水冷却效果更好,将 2.0C 放电倍率下电池温度降低 8.34%;相变微胶囊悬浮液的温降性能随入口流量和质量分数的增大而增大,对电池降温效果最佳的质量分数和入口流量进行匹配时,需保持流动时内部相变材料始终处于融化状态。此外,经纳米颗粒强化后的悬浮液冷却效果更佳,综合考虑电池平均温度和流动压降 2 个参数指标,发现壳体内添加纳米颗粒的单组分悬浮液是一种更为合适的汽车电池散热冷却介质。

关键词:相变微胶囊;悬浮液;电池冷却;对流换热;纳米颗粒

中图分类号:TK124 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0036-07

Experimental study on liquid cooling performance of batteries with microencapsulated phase change material suspension

LI Xuechun, YANG Lei

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper builds an experimental platform for battery liquid-cooled plate heat dissipation system. Pure water, microencapsulated phase change material suspension (MEPCMS) and one-component/two-component Fe_3O_4 nanoparticle-reinforced MEPCMS were used as cooling fluids, respectively. Comparative analysis of the cooling effect of coolants on simulated batteries at different inlet flow rates and suspension mass fractions was conducted. The results show that MEPCMS with a mass fraction of 20% is more effective in cooling compared to pure water, reducing the battery temperature by 8.34% at 2.0C discharge multiplier. The temperature drop performance of MEPCMS increases with increasing inlet flow rate and mass fraction. Matching the mass fraction and inlet flow rate for optimal battery cooling requires that the internal phase change material is always in a molten state during flow. In addition, the nanoparticle-enhanced suspension is cooled more effectively. Considering the two parameter indicators of average battery temperature and flow pressure drop, the one-component suspension with nanoparticles added in the shell is a more suitable cooling medium for heat dissipation in automotive batteries.

Key words: phase change microcapsule; suspension; battery cooling; convective heat transfer; nanoparticle

收稿日期:2024-01-18;修回日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52306194)

作者简介:李雪淳(2000—),女,安徽六安人,合肥工业大学硕士生;

杨磊(1983—),男,安徽六安人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: yanglei-seu@hfut.edu.cn.

0 引 言

为缓解能源紧缺压力,传统燃油汽车的市场正逐步被零排放的新能源动力汽车所占据。锂电池具有能量密度高、质量小、比功率大、循环寿命长、生产成本低等优点^[1],已成为现代新能源电动汽车供能来源的首要选择。锂离子电池内部在工作过程中会发生一系列电化学反应^[2],产生大量的热量和明显的温升,影响电池容量及使用寿命。为了控制锂电池的理想工作温度范围在 25~40 °C 内^[3],电池表面最大温差在 5 °C 以内,避免锂电池因温度过高、热不均匀而导致其安全性能降低及热失控等事故发生,需要设计合理的电池冷却系统。

电池冷却策略目前主要包括空气冷却、液体冷却、相变材料冷却^[4-5]。其中空气导热系数低,冷却效果较差^[6]。液体的导热系数较高,采用泵送冷却液对电池组进行冷却的液冷方式是一种更好的方法。为了进一步强化液冷管路与电池组之间的换热效果,研究人员对流线型^[7]、蛇形^[8]、斜鳍形^[9]、树枝型^[10-11]等多种通道设计方案进行了研究。

除液体冷却外,相变材料冷却也是当今研究较为丰富的一种冷却方式,其优势在于相变期间具有良好的储热性能,能够通过有限的材料吸收更多的热量,且相变过程的恒温特性可以使电池组间的温度均匀性得到提高。使用优化改进的复合相变材料可以达到更好的电池冷却效果^[12]。但使用相变材料进行电池被动冷却具有结构复杂、重量增大、热量堆积、泄露等诸多隐患。采用相变微胶囊悬浮液(microencapsulated phase change material suspension, MEPCMS)作为微通道冷却液是一种更加有效的方法。MEPCMS 是指将具有核壳结构的相变微胶囊按一定比例分散在单相流体中形成的悬浮液^[13-14],结合了相变材料冷却和液冷的优点,在特定的温度范围内可以吸收大量的热量,同时具有良好的流动性和传热能力,不占用额外的设计空间。因此,MEPCMS 在储能和传热领域得到了广泛的研究及应用。文献^[15]使用超声法制备体积分数为 10% 和 20% 的 OP28E(熔点为 25~27 °C 的相变材料)纳米乳液,并将其作为冷却液应用于不同放电倍率下的电池组冷却系统;文献^[16]表明 MEPCMS 作为冷却液比水具有更好的性能;文献^[17]发现在 3C 放电速率下,10% 的 MEPCMS 以 0.1 m/s 的入

口速度进行散热即可满足电池组的要求,且压降最小。当放电速率提高到 5C 时,该参数组合为体积分数 20%,入口速度为 0.2 m/s。

相变微胶囊由内部相变材料芯材和外壁两部分组成,其芯材导热系数较低,在一定程度上削弱了 MEPCMS 的传热能力。纳米颗粒具有较高的导热性能^[18],在 MEPCMS 中添加一定比例的纳米颗粒可以使其获得更好的电池冷却效果。在相变微胶囊的壳层中添加一定的三氧化二铁纳米强化材料,使用该相变微胶囊制备的单组分三氧化二铁纳米强化相变微胶囊悬浮液弥补了 MEPCMS 低导热率的缺陷,增强了相变微胶囊的导热性能。除在相变微胶囊中添加纳米颗粒外,在基液中添加一定的纳米粒子,制备成的双组分悬浮液,同样可以结合纳米粒子的高导热系数和相变材料的高潜热吸收能力这 2 种优势。文献^[19]制备了石墨烯、二氧化钛等纳米粒子的双组分悬浮液,研究结果表明,与单一悬浮液相比,双组分悬浮液在稳定性和导热性方面得到显著改善,冷却性能有所增强。

综上所述,MEPCMS 具有较好的传热性能,能够较好地匹配当今电动汽车电池散热需求。本文针对采用液冷板冷却的模拟电池冷却系统,实验测试了 MEPCMS、单组分和双组分三氧化二铁纳米强化相变微胶囊悬浮液的流动及传热特性,据此研究分析了入口流量、质量分数等参数对其影响,根据结果评估模拟电池组平均温度和流体压降等冷却性能指标,旨在为相变微胶囊悬浮液在新能源汽车电池热管理中的应用提供参考。

1 实验平台搭建及实验设计

1.1 模拟电池冷却系统

本文搭建了基于液冷板的模拟电池冷却实验系统台架,系统由模拟电池冷却模块、数据采集模块及循环系统模块组成,如图 1 所示。

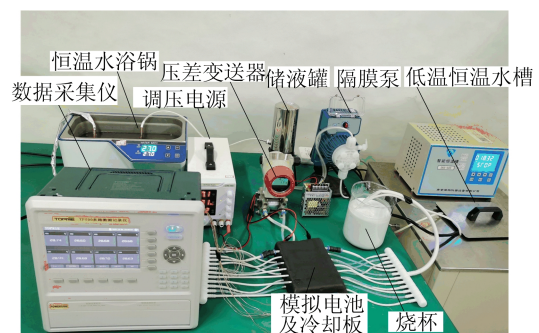


图 1 实验系统

液冷板冷却模块部分主要由模拟电池和微通道液冷板组成,模块结构如图 2 所示。电池冷却模块中电池与液冷板交叉叠放,通过导热硅胶粘连。液冷板内置 6 个半径为 1 mm 的平行流道。整个模块置于保温棉中进行隔热,减少与环境的热交换。

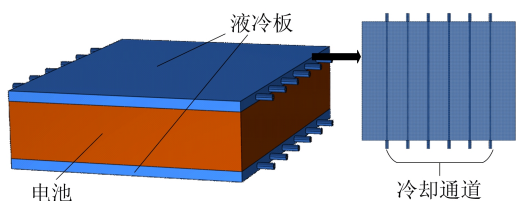


图 2 液冷板冷却模块结构

本文采用与真实电池尺寸相同的定制模拟电池(120 mm×66 mm×18 mm)作为冷却对象,在模拟电池中类似锂电池的正、负极处插入发热棒,通过直流稳压电源向发热棒供电,通过调整电压和电流,控制模拟电池产热功率,用以模拟真实电池在 27 °C 环境温度中不同放电倍率下的产热状态。通过 Bernardi 经验方程^[20]计算得到不同放电倍率下锂电池生热率的估计值,具体经验方程式为:

$$Q = I(U - V) - I\left(T \frac{dU}{dT}\right) \quad (1)$$

其中:Q、I、U 和 V 分别为锂离子电池的发热率、通过电池的电流、开路电压和电池电压;T 为温度。

将电池生热率等价换算成模拟电池发热功率值,结果见表 1 所列。

表 1 放电倍率、发热功率及放电时间

放电倍率	发热功率/W	放电时间/s
1.0C	13.8	3 600
1.5C	40.7	2 400
2.0C	86.2	1 800

循环系统模块组成部分包括储液罐、橡胶软管、隔膜泵、恒温槽、换热盘管、压差变送器。冷却液流经恒温槽,以 27 °C 的入口温度流入液冷板流道,对模拟电池进行散热冷却。流出液冷板的冷却液经放置在低温恒温水槽中的换热螺旋管降温,以确保相变微胶囊悬浮液中的相变材料完全凝固,再次参与循环。隔膜泵用以调节冷却板通道的入口流量。数据采集模块对电池温度及压降进行采集与记录,主要包括数据采集仪、计算机、

热电偶及压差传感器。8 个 K 型热电偶均匀布置在电池表面两侧,通过数据采集仪实时记录温度信息,各测点的平均温度定义为电池表面平均温度。液冷板进出口压差由数字压差变送器进行测量并记录,采用所有流道的压差平均值作为冷却液的流动压降。

1.2 实验测试设备参数

上述实验平台的搭建过程中所使用的实验仪器设备参数见表 2 所列。

表 2 实验仪器参数

仪器	型号	精度
实验室去离子水系统	TS-S20	
超声波清洗机	CR-020S	
调压电源	eTM-1502	±0.1%
隔膜泵	AKS-800	±1%
数据记录仪	TP700	
恒温槽	DHX-020	±0.1 °C
恒温水浴锅	WB-2PYO	±0.1 °C
压差变送器	MIK-2051	±0.075%
K 型热电偶	TT-K-30	±0.1 °C

2 冷却剂制备及物性

本实验所用常规相变微胶囊使用质量分数为 70% 的正十八烷作为相变芯材,质量分数为 30% 的密胺树脂作为壳层。在常规相变微胶囊的基础上,在壳层中添加质量分数为 1% 的四氧化三铁纳米颗粒,制备成纳米强化相变微胶囊。各组分物性参数见表 3 所列。

表 3 相变微胶囊材料物性参数

材质	密度/ (kg/m ³)	比热容/ [J/(kg·K)]	导热系数/ [W/(m·K)]
正十八烷	814	2 160	0.14
密胺树脂	1 500	1 680	0.30
四氧化三铁	5 180	460	11.00

本文以相变微胶囊颗粒为核心,分别制备了常规 MEPCMS、单组分及双组分纳米强化悬浮液作为冷却液。以去离子水作为基液,分别配置了相变微胶囊颗粒质量分数为 5%、10%、15%、20% 的 MEPCMS;将质量分数为 20% 的四氧化三铁纳米强化相变微胶囊分散在去离子水中制备单组分纳米强化相变微胶囊悬浮液;将质量分数为 19% 的相变微胶囊颗粒和质量分数为 1% 的四氧化三铁纳米颗粒分散在去离子水中并进行充分搅拌,制备双组分纳米强化相变微胶囊悬浮液。

不同冷却液在液冷板流道内的流动情况如图 3 所示。

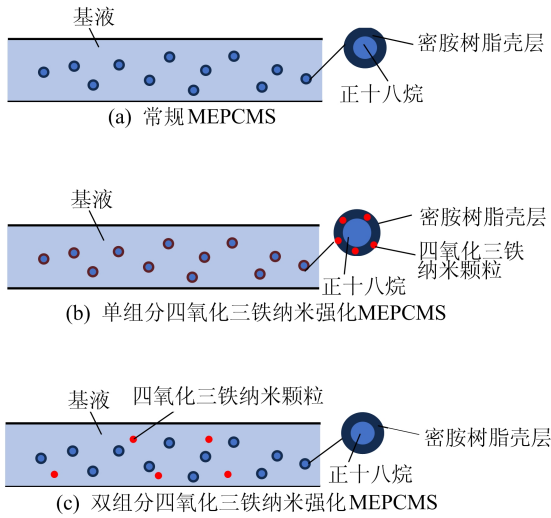


图 3 冷却液在通道内流动示意图

3 结果与讨论

3.1 纯水和 MEPCMS 对电池冷却特性比较

为研究 MEPCMS 和纯水在电池液冷系统液冷板通道中冷却性能的差异,在 27 °C 环境温度下分别对 1.0C、1.5C、2.0C 放电倍率下的模拟电池,使用 MEPCMS 和纯水进行冷却实验。实验中采用的 MEPCMS 由质量分数为 20% 的相变微胶囊颗粒制备而成,冷却液的流量恒定控制在 120 mL/min。

不同放电倍率下 MEPCMS 和纯水对电池进行冷却时电池表面温升曲线如图 4 所示。

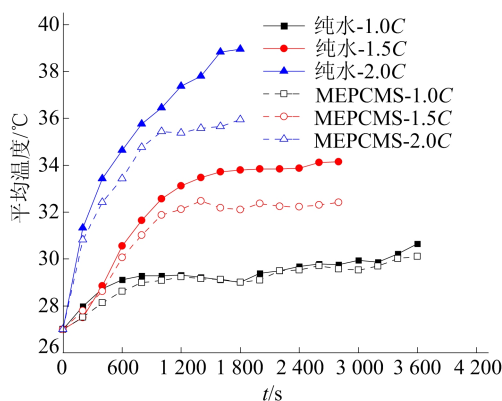


图 4 电池温升曲线

从图 4 可以看出:随着放电进行,电池温度逐步升高,并最终达到较为稳定的温度值;随着放电倍率的增加,电池在放电末状态下达到基本稳定

时的表面平均温度也在增大。对比 2 种冷却液,MEPCMS 在 3 种放电倍率下均表现出比纯水更好的冷却效果。具体来看,在 1.0C、1.5C、2.0C 放电倍率下,经纯水冷却后电池表面最终平均温度分别为 30.65、34.14、38.95 °C,而经 MEPCMS 冷却后电池表面最终温度分别为 30.11、32.42、35.95 °C,与前者相比,分别降低 1.80%、5.30%、8.34%。说明在低放电倍率下,MEPCMS 和纯水的冷却效果相差不多,但随着放电倍率的增加,MEPCMS 相较于纯水的冷却效果逐渐增强。

驱动冷却液在动力系统中循环流通的能量来源是泵,泵消耗的能量也是电池散热系统的重要控制指标。水和 MEPCMS 冷却时通道的流动压降随时间的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,冷却液在通道中的压降随着时间的变化基本呈现稳定状态。由于基液中相变微胶囊的加入导致流体黏度增大,且微胶囊颗粒在通道中流动时彼此碰撞、摩擦也会产生大量能量损失,因此 MEPCMS 的压降明显高于纯水。具体表现为:在 1.0C、1.5C、2.0C 放电过程中,纯水冷却下通道压降平均值分别约为 194、183、70 Pa,而使用 MEPCMS 冷却时,压降增大至 321、314、301 Pa。值得注意的是,随着电池放电倍率逐渐增加,同种冷却液的压降逐渐降低,这是由于随着电池放电倍率变大,电池体与冷板贴面的热流密度增加,流体温度升高导致黏度下降、摩擦阻力损失减小、流动性增强,从而表现出压降有所降低的特性。

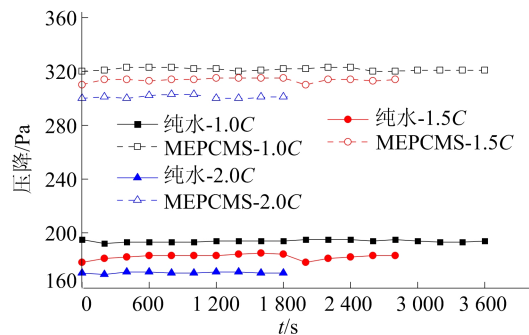


图 5 通道压降变化曲线

3.2 质量分数和入口流量对冷却性能的影响

由 3.1 节研究可知,MEPCMS 代替纯水作为冷却液对电池温度的降低具有积极影响,且放电倍率越大,改善效果越显著。而其作为电池散热系统冷却液时,入口流量和质量分数是影响冷却

性能的重要因素。为探究入口流量和微胶囊质量分数 2 个因素对液冷系统散热性能及能量损耗的综合影响,实验测试当入口流量从 120 mL/min 变化到 360 mL/min、质量分数从 5% 变化到 20% 时,MEPCMS 作为散热系统冷却液对 2.0C 下放电时的电池进行冷却时电池温度及冷却板压降变化。

电池温度随质量分数和入口流量的变化规律如图 6 所示。随着入口流量的增大,电池温度持续降低,但下降速率逐渐趋于平缓,当入口流量达到一定值时,电池温度基本不再降低。而 MEPCMS 质量分数越高,电池表面温度越低,在入口流量相同时,质量分数的增大有助于提高悬浮液的等效热容值,MEPCMS 可以通过相变材料的熔化吸收更多的潜热热量;随着质量分数的增大,不同质量分数下的电池温度差距开始变小,表明质量分数的增加对冷却性能的提升效果逐渐减弱。值得注意的是,当入口流量较低或较高时,MEPCMS 和纯水相比的冷却优势并不明显,在本文的实验条件下,当入口流量的范围在 120~360 mL/min 时,MEPCMS 表现出更好的冷却优势。可见,不同质量分数 MEPCMS 的最佳冷却特性并不适用于相同入口流量,这是由于相变材料吸收潜热是 MEPCMS 展现冷却优势的主要原因,当流量工况使相变材料在液冷板通道内全程处于融化状态时,冷却效果最好。

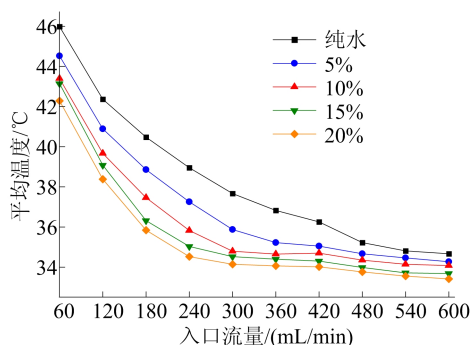


图 6 不同质量分数 MEPCMS 冷却后电池温度随入口流量的变化

不同质量分数 MEPCMS 冷却后的电池平均温度与相同入口流量工况下纯水冷却后的电池平均温度差值随入口流量的变化如图 7 所示。从图 7 可以看出,当入口流量在一定范围内时,二者的冷却效果差别更大。可以认为温度差值最大时对应的入口流量即为该质量分数时的最佳入口流量。在本文的实验条件下,当质量分数分别为 5%、10%、15%、20% 时,对应的最佳入口流量分

别为 100、100、120、140 mL/min。可见随着质量分数的增加,最佳入口流量也随之增大。

这是由于 MEPCMS 的冷却优势主要是由相变材料的熔化体现的,在通道中保持熔化相变的区域越长,降温效果越显著。流量不同通道内的对流换热系数也不同,相变材料在流动过程中的熔化情况也不相同。质量分数更高的 MEPCMS 含有更多待熔化的相变材料,需要吸收更多热量才能完全熔化,而入口流量增大对流换热系数更高,相同条件下的吸热量更高,更有利于相变材料的吸热熔化,此时相变潜热带走了大量的电池发热量,相比纯水的冷却效果提升更明显。

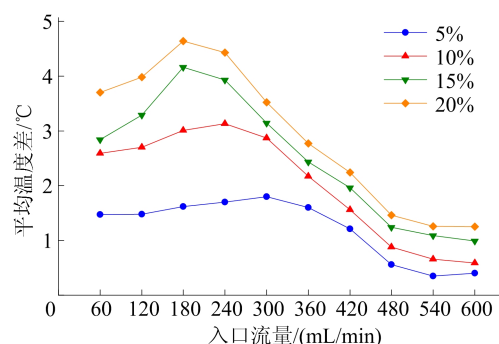


图 7 MEPCMS 冷却和水冷却后的温度差值随入口流量的变化

不同质量分数 MEPCMS 和纯水在通道中流动压降随着入口流量的变化如图 8 所示。虽然增加入口流量可以增强传热和冷却效果,但液冷板中的压降也会增加,意味着更高的循环能耗。在保持入口流量不变的情况下,质量分数的增加会导致 MEPCMS 黏度增大,流动压降也随之增加。因此有必要进一步设计综合评价指标。

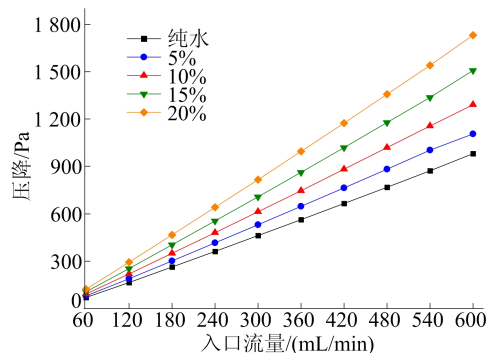


图 8 不同质量分数 MEPCMS 压降随入口流量的变化

3.3 纳米强化材对冷却性能的影响

金属纳米颗粒具有高导热系数,在常规相变微胶囊颗粒中添加纳米强化材料可以提升其导热

系数。此外,将纳米强化材料作为第 2 组分添加至基液中也是一种有效方法。本节对单组分纳米强化相变微胶囊悬浮液和双组分纳米强化相变微胶囊悬浮液的电池冷却效果进行对比分析。

根据实验结果,对比分析不同冷却液对电池模块的冷却性能。1.0C、1.5C、2.0C 放电倍率下常规 MEPCMS、单组分纳米强化悬浮液和双组分纳米强化悬浮液冷却时电池平均温度变化如图 9 所示。

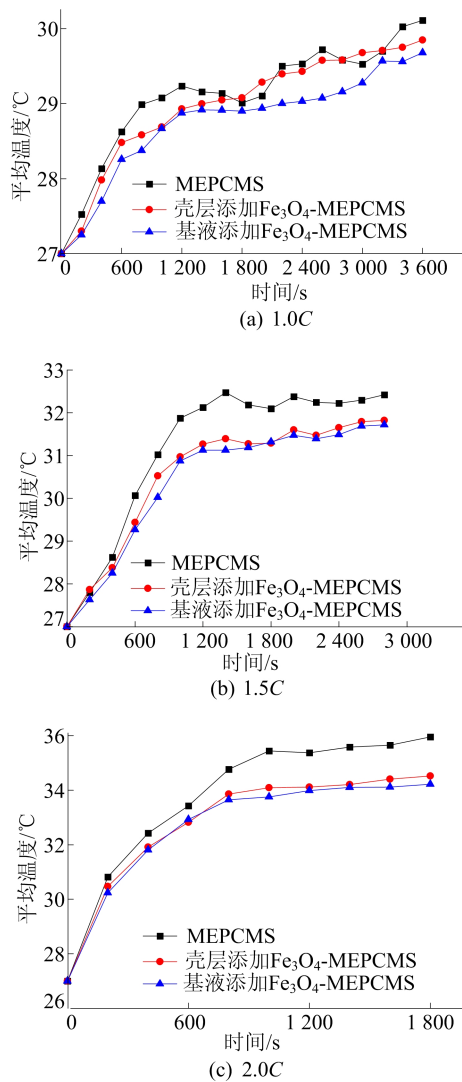


图 9 不同电池放电倍率下各冷却液冷却效果对比

从图 9 可以看出,在低放电倍率下,单组分和双组分纳米强化悬浮液对电池的降温效果略优于 MEPCMS,但 3 种冷却液的温度曲线较为接近,双组分悬浮液的温度略低于单组分悬浮液,表明在低放电倍率下采用纳米强化冷却优势并不明显。当电池放电倍率增大至 1.5C 和 2.0C 时,纳米强化效果逐渐显现,与 MEPCMS 相比,电池温

度明显降低。这可能是由于随着电池放电倍率的增大,电池表面热量增加,MEPCMS 中添加的纳米强化材料的导热性能得到了有效发挥,加剧了流体与液冷板的对流换热系数,强化了液冷板散热效果。值得注意的是,在 1.0C 和 1.5C 的低放电倍率下,常规 MEPCMS 冷却电池温升曲线存在阶段降低现象,这可能是由于低放电倍率电池发热量较小,该阶段下冷却液与液冷板的换热量大于电池表面生热热量。从温升曲线可以看出:在 1.5C 放电倍率下,MEPCMS 冷却后末状态电池温度为 32.42 °C,而单组分和双组分纳米强化微胶囊悬浮液冷却时,电池末状态温度分别为 31.82、31.72 °C,降低了约 1.9%、2.2%;而在 2.0C 放电倍率下,纳米强化微胶囊悬浮液的优势更为明显,单组分和双组分可以将电池温度降低 4.1% 和 5.1%。说明无论是单组分纳米强化悬浮液还是双组分纳米强化悬浮液,降温特性均比常规 MEPCMS 更好。

不同冷却介质在通道内的流动压降如图 10 所示。由于基液中相变微胶囊的加入导致流体黏度增大,且微胶囊颗粒在通道中流动时彼此碰撞、摩擦也会产生大量能量损失,因此 MEPCMS、单组分纳米强化悬浮液以及双组分纳米强化悬浮液的压降明显高于纯水,且双组分纳米强化悬浮液所表现出更大的压降。这是由于纳米颗粒在基液中的加入导致其黏度增大。因此,综合冷却能力及能耗需求 2 个方面,选用单组分纳米强化悬浮液作为电池冷却液较为合适。

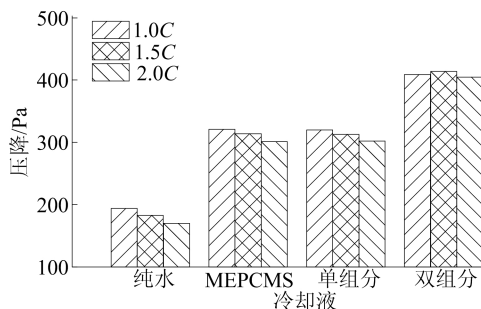


图 10 使用不同冷却液时通道压降分析

4 结 论

本文通过实验研究不同冷却液在不同冷却工况下对电池的冷却特性,得出如下结论:

1) MEPCMS 的冷却性能优于纯水,且随着电池放电倍率的增大优势更为明显,2.0C 放电倍

率下,质量分数为 20% 的 MEPCMS 相比纯水冷却,电池温度降低 8.34%。

2) 电池温度随 MEPCMS 入口流量的增加而下降,随质量分数的增加而降低。对电池的冷却效果具有相对较佳的质量分数和流量匹配,应尽量保持流动时的熔化相变状态。

3) 双组分纳米强化悬浮液可以提高冷却剂的冷却性能,但流动压降更高,单组分纳米强化悬浮液不仅可以提高降温特性,而且冷却液在通道中压降相对较低,是一种理想的汽车电池散热系统冷却介质。

[参 考 文 献]

- [1] AN Z, CHEN X, ZHAO L, et al. Numerical investigation on integrated thermal management for a lithium-ion battery module with a composite phase change material and liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114345.
- [2] WANG J, LIU X, LIN F, et al. Numerical optimization of the cooling effect of the bionic spider-web channel cold plate on a pouch lithium-ion battery[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, 26: 101124.
- [3] LING Z, LIN W, ZHANG Z, et al. Computationally efficient thermal network model and its application in optimization of battery thermal management system with phase change materials and long-term performance assessment[J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114120.
- [4] ZOU D, LIU X, HE R, et al. Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 1196-1202.
- [5] HALLAJ S A, SELMAN J R. A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2000, 147(9): 3231.
- [6] CHEN K, WU W, YUAN F, et al. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern[J]. *Energy*, 2019, 167: 781-790.
- [7] HUANG Y, MEI P, LU Y, et al. A novel approach for Lithium-ion battery thermal management with streamline shape mini channel cooling plates[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113623.
- [8] DENG T, ZHANG G, RAN Y. Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 143-152.
- [9] JIN L W, LEE P S, KONG X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1786-1794.
- [10] LIU H, SHI H, SHEN H, et al. The performance management of a Li-ion battery by using tree-like mini-channel heat sinks; experimental and numerical optimization[J]. *Energy*, 2019, 189: 116150.
- [11] ZHANG F, GOU H, XIE C, et al. A new stepped-channel liquid cooling plate thermal management system combined with composite phase change materials[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118439.
- [12] WANG Y, LUO J, WANG S, et al. Shape-stabilized phase change material with internal coolant channel coupled with phase change emulsion for power battery thermal management[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 438: 135648.
- [13] ZHU Y, LIANG S, WANG H, et al. Morphological control and thermal properties of nanoencapsulated n-octadecane phase change material with organosilica shell materials[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 119: 151-162.
- [14] PRAVEEN B, SURESH S. Thermal performance of microencapsulated PCM with LMA thermal percolation in TES based heat sink application[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 185: 75-86.
- [15] WANG F, CAO J, LING Z, et al. Experimental and simulation investigations on a phase change material nano-emulsion-based liquid cooling thermal management system for a lithium-ion battery pack[J]. *Energy*, 2020, 207: 118215.
- [16] LI H, XIAO X, WANG Y, et al. Performance investigation of a battery thermal management system with microencapsulated phase change material suspension[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115795.
- [17] BAI F, CHEN M, SONG W, et al. Investigation of thermal management for lithium-ion pouch battery module based on phase change slurry and mini channel cooling plate[J]. *Energy*, 2019, 167: 561-574.
- [18] SEFIDAN A M, SOJOUDI A, SAHA S C. Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 117: 44-58.
- [19] MO S P, YE J R, JIA L S, et al. Properties and performance of hybrid suspensions of MPCM/nanoparticles for LED thermal management[J]. *Energy*, 2022, 239: 122650.
- [20] DING Y Z, JI H C, WEI M X, et al. Effect of liquid cooling system structure on lithium-ion battery pack temperature fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122178.

(责任编辑 吴 亮)