

储热储冷多场景应用专刊



相变材料结合空气射流混合式电池热管理系统性能研究

袁长顺¹, 赵彦琦^{1,2}, 丁玉龙³

(¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ²南京工业大学能源科学与工程学院, 江苏 南京 211816; ³伯明翰大学化学工程学院, 英国 伯明翰 B15 2TT)

摘 要: 相变材料(phase change material, PCM)冷却是电池热管理中常用的方式, 能够在维持电池模组温度场均匀性的同时保障系统安全。然而, 由于锂离子电池正负极材料本身在结构和热特性上的差异, 其两端往往存在明显的温度不均, 仅依靠 PCM 冷却难以有效消除此类局部热隐患。为此, 本研究提出一种结合 PCM 冷却与空气射流风冷的混合热管理策略。该方案在电池正极一侧施加空气射流强化冷却, 同时将整个模组包覆于石蜡中, 通过调节射流阵列布置与空气质量流量, 系统分析其在车辆能耗与续航里程测试中对电池温度场的影响。研究结果表明, 在控制空气质量流量的条件下, 在完成一个 NEDC(新欧洲行驶循环)测试工况后, 4×4 阵列射流最低温度达到了 290.51 K, 2×2 阵列射流下的最低温度达到了 293.34 K, 比前者高了 2.83 K, 并且通过改变射流冷却系统的结构参数, 观察到电池模组的平均温度呈现显著下降趋势。具体而言, 当采用 2×2 射流阵列时, 将射流孔的直径从 1 mm 增加至 3 mm, 可使电池模组的平均温度降低 2.06 K; 采用 3×3 射流阵列, 在同样的孔径变化下(即从 1 mm 增至 3 mm), 平均温度的降幅进一步扩大至 2.96 K; 而当阵列配置达到 4×4 时, 平均温度降低 3.01 K, 显示出最佳的冷却性能提升。

关键词: 电池热管理; 空气射流冷却; 相变材料; 数值模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1173

中图分类号: TM 911; X 932

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-838-10

Performance study on a hybrid battery thermal management system combining phase change materials with air jet impingement

YUAN Changshun¹, ZHAO Yanqi^{1,2}, DING Yulong³

(¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China; ²School of Energy Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; ³School of Chemical Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom)

Abstract: Phase change material (PCM) cooling is a widely used method for managing battery thermal conditions, where the temperature uniformity across battery modules can be maintained while ensuring system safety. However, due to the inherent differences in structural and thermal properties between the positive and negative electrodes of lithium-ion batteries, significant temperature disparities often arise at either end. Solely relying on PCM cooling proves challenging in effectively mitigating these localized thermal risks. This study

收稿日期: 2025-12-30; 修改稿日期: 2026-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (52206253, 52311530083)。

第一作者: 袁长顺 (2001—), 男, 硕士研究生, 从事热能存储技术研究, E-mail: 2222303113@stmail.ujs.edu.cn; 通信作者: 赵彦琦, 博士、教授, 从事热能存储技术研究, E-mail: hazhaoyq@126.com。

引用本文: 袁长顺, 赵彦琦, 丁玉龙. 相变材料结合空气射流混合式电池热管理系统性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 838-847.

Citation: YUAN Changshun, ZHAO Yanqi, DING Yulong. Performance study on a hybrid battery thermal management system combining phase change materials with air jet impingement[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 838-847.

proposes a hybrid thermal management strategy that combines PCM cooling with air-jet forced cooling. Specifically, enhanced air-jet cooling is applied to the positive electrode side, with the entire module being encapsulated in paraffin. By varying the arrangement of the jet array and the air mass flow rate, this study systematically analyzes their effects on the battery's temperature during vehicle energy consumption and driving range tests. The results show that under controlled air mass flow conditions, after one New European Driving Cycle (NEDC) test cycle is completed, the minimum temperature recorded was 290.51 K with a 4×4 jet array, compared to 293.34 K with a 2×2 array, which is 2.83 K higher. In addition, modifying the structural parameters of the jet cooling system resulted in a significant decrease in the average temperature of the battery module. For example, when a 2×2 jet array was used, increasing the jet orifice diameter from 1 to 3 mm reduced the average temperature by 2.06 K. Similarly, with a 3×3 jet array, the same increase in orifice diameter led to a larger reduction of 2.96 K. When the configuration was upgraded to a 4×4 array, the average temperature dropped by 3.01 K, indicating the most significant enhancement in cooling performance.

Keywords: battery thermal management; air jet cooling; phase change material; numerical simulation

随着国家政策向新能源汽车研发领域倾斜资源, 市场需求逐步攀升^[1]。截至2025年10月, 新能源汽车销量已占新车总销量的50%, 创下近年来的月度销售纪录^[2]。在这一快速普及的背景下, 其安全性问题日益凸显。锂离子电池因能量密度高、循环寿命长、充放电稳定等优势, 成为新能源汽车的主要动力来源, 因此其运行安全不容忽视^[3-4]。其中, 热管理是确保电池安全的核心环节, 温度直接关系电池的安全性、性能与寿命。高温环境下, 电池可能触发发热失控, 引发连锁放热反应, 导致起火或爆炸; 而在低温条件下, 电池放电容量可能下降约25%, 充电时间也会显著延长。高效的热管理系统可通过散热或加热手段, 将电池温度维持在理想工作区间(通常为 $10 \sim 35^\circ\text{C}$), 从而有效预防热失控、保障续航里程、提升充电效率并延缓电池衰减^[5]。随着快充技术普及与能量密度持续提升, 电池产热强度进一步增加, 这使得精准高效的热管理变得尤为关键。

目前, 新能源汽车的锂离子电池热管理技术已趋于成熟, 主要分为主动冷却和被动冷却。其中, 相变材料冷却^[6-8]属于被动冷却, 而射流冷却作为风冷的一种形式^[9-12], 归类于主动冷却。为满足当前锂离子电池日益增长的散热需求, 研究人员通常采用主被动冷却相结合的方式。例如, 屠楠等^[13]提出一种复合相变材料耦合风冷的H型复合电池热管理

系统, 通过改变空气进出口方式并采用正交实验进行优化, 使系统最大温差和功耗分别下降了约21.7%和94.3%。Jilte等^[14]的研究也表明, 将风冷与相变材料冷却相结合, 相较于单一冷却方式, 能显著提升散热效率并改善温度均匀性, 该结论在2 C、4 C放电倍率及 27°C 、 35°C 、 40°C 等多种环境条件下均得到验证。此外, 为应对电动飞行器机载动力电池在滥用条件下的热失控风险, 潘治衡^[15]采用了风冷与水/盐相变材料相结合的冷却策略, 实验数据显示, 该耦合系统在1 C和4 C放电倍率下, 电池组最高温度分别降低了 6.8°C 和 15.1°C 。基于上述研究可见, 混合式冷却在锂离子电池热管理中展现出显著优势。特别地, 射流冲击冷却相较传统风冷强制对流, 在换热系数上实现了指数级提升, 对于高热流密度工况具有突出潜力^[16]。张鹏等^[17]为探究射流冷却的极限散热性能, 通过优化射流流量与入口温度, 发现其极限热流密度最高可达 1042 W/cm^2 。Zhou等^[18]则设计了半螺旋线圈与空气射流冲击集成的热管理方案, 与传统液冷方式相比, 使锂离子电池的最大温差从 5.7°C 降至 4.0°C 。射流冷却凭借其极高的换热系数, 为热管理设计提供了新的可能。同时, 其风险远低于液冷系统, 且避免了液冷复杂的管路布置问题。基于此, 本研究在传统相变材料冷却的基础上, 引入射流冷却, 以

进一步探索高效、紧凑的电池热管理解决方案。

在现实生活中,电动汽车并不是始终保持恒定倍率放电来进行实际路况行驶的,针对不同的应用场景,会有相对应的动态工况产生,例如加速、减速、怠速、爬坡、泊车等,且对于复杂的路况电动汽车会出现上述行驶行为的组合,而在这一过程中电池作为电动汽车的动力源头所提供的电流也是在实时变化的,即电池的放电倍率是根据实际驾驶场景而调整的,因此电池产热速率也会随之发生变化^[19],无法通过某单一的静态工况来对实际行车时散热结构的热管理性能进行说明,故需要对动态工况下电池模组的温度表现展开研究。本研究将选取新欧洲驾驶循环工况(NEDC)^[20]作为测试工况对电池模组的发热情况进行模拟仿真,以此考察所设计以射流冷却为主配合石蜡的散热结构在电动汽车实际测试工况下的散热能力。

1 锂离子电池产热模型建立以及实验验证

1.1 锂离子电池产热模型

本研究主要针对松下21700圆柱形锂离子电池

进行研究,由于需要研究动力锂离子电池在工作过程中的温度特性及温度场分布,一般采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真分析方法,本研究采用Fluent软件分析动力锂离子电池的热特性,实验模型如图1(a)所示。由于电池的内部结构非常复杂,各部分的材料成分众多,按照电池的具体特征建立三维热模型比较困难,同时不利于后期的解算,因此需要对电池模型作如下合理的假设:

(1) 将电池内部多层结构,多组分材料,以集总热物性参数表示,将电池定义为内部结构一致,密度均匀,固定比热容,导热系数分为径向和轴向导热系数,且在同一个方向相等且不随温度变化;

(2) 电池的集总热物性参数不受充放电状态及SOC的影响;

(3) 电池在工作中,通过电池内部的电流密度均匀分布,即电池三维热模型均匀生热;

(4) 电池正极端实际升温大于总体部分,在本研究中通过对电池正极以及其余部分设置不同的UDF来模拟实际电池升温情况^[21],UDF设置方式如图1(b)所示,其数据曲线如图1(c)所示。

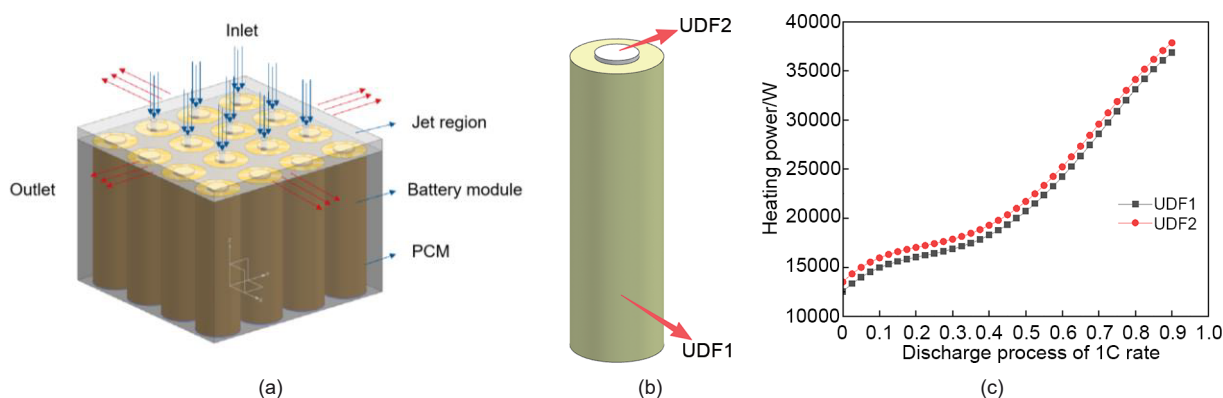


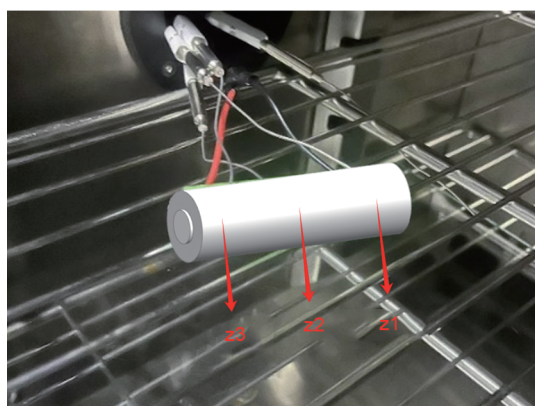
图1 (a) 电池和喷射冲击模型; (b) 仿真UDF分块布置方式; (c) UDF数据曲线

Fig. 1 (a) Battery and jet impingement model; (b) The block arrangement method of simulation UDF; (c) UDF data curve

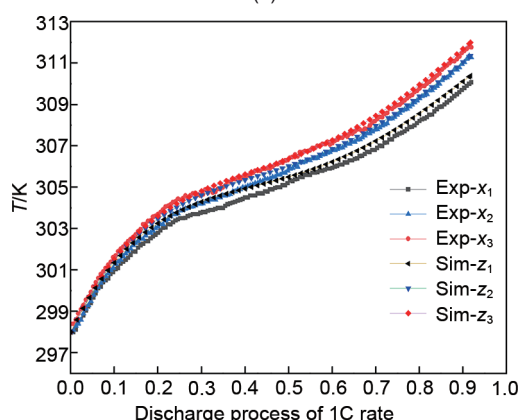
1.2 实验与仿真结果对比验证

本次实验对象为圆柱形21700锂离子电池,实验装置包括单体21700锂离子电池、一台可调直流稳压电源、一个高低温试验箱程式恒温恒湿箱、一台可编程直流电子负载仪、3根K型热电偶、1个RS20K-C热电偶温度变送器、1个USB转485数据采集器以及1台笔记本电脑。高低温试验箱可

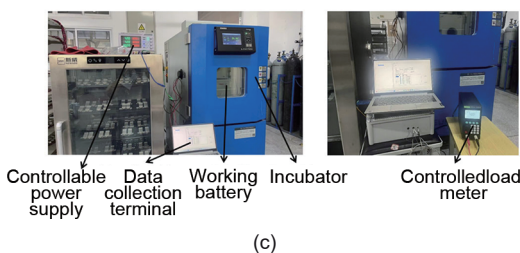
程式恒温恒湿箱用于模拟电池恒温工作环境;可编程直流电子负载仪用于对锂电池以不同放电倍率进行恒流放电,模拟锂离子电池工作情况;3根K型热电偶分别布置在锂离子电池的上中下端,如图2(a)所示,监测锂离子电池在工作时的不同部位发热情况。图2(b)展示了实验和仿真数据结果的对比,实验布置图如图2(c)所示。



(a)



(b)



(c)

图2 (a) 热电偶布置方式；(b) 数值结果与实验结果的对比；(c) 实验装置的连接方法

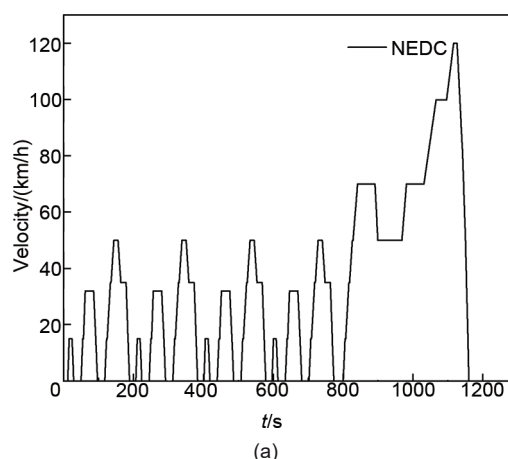
Fig. 2 (a) Thermocouple arrangement method; (b) Comparison between numerical results and experimental results; (c) Connection method of the experimental device

2 散热结构在测试工况下的冷却性能分析

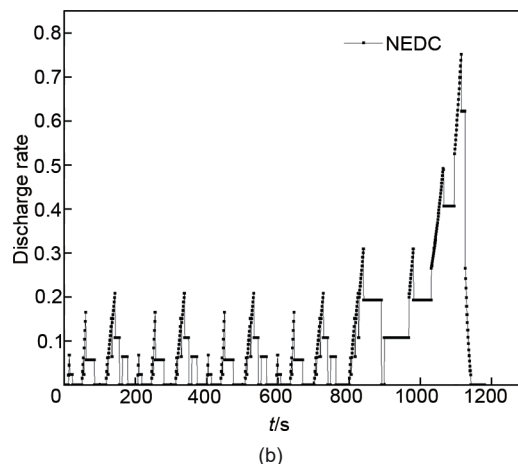
2.1 NEDC 工况

NEDC(新欧洲驾驶循环)是一种源自欧洲车辆能耗和续航里程测试标准,主要在实验室的台架上进行。其测试循环包含模拟市区(重复4次,最高车速 50 km/h)与市郊(最高车速 120 km/h)两部分,总时长约 20 分钟,过程中会关闭空调等车载用电器,

且测试多数时间为匀速行驶。图3(a)是NEDC测试工况下的测试车辆速度变化图,按照GB/T 18386—2017《电动汽车能量消耗率和续驶里程实验方法》中的要求对车速-放电倍率的拟合进行运算得出的放电倍率随时间的变化如图3(b)所示。为了研究不同射流阵列条件下的锂离子电池热管理散热性能,以2×2、3×3和4×4阵列射流,更改射流孔径1~3 mm进行比较,为了保证空气的总质量流量一致为 1.82×10^{-4} kg/s,在不同孔径下设置不同的空气射流速度,具体配置如表1所示。



(a)



(b)

图3 (a) NEDC测试工况下的测试车辆速度变化图；(b) 放电倍率随时间的变化图

Fig. 3 (a) The speed variation of the test vehicle under the NEDC test conditions; (b) The variation of discharge rate over time

2.2 边界条件设置

本工作主要研究在室温条件下相变材料结合空气射流混合式电池热管理系统性能,因此将环境温度设置为25℃,同时在电池模组与空气射流区域

表1 在直径为1~3 mm的情况下, 相同质量流量下采用不同阵列方式下的进气速度

Table 1 The air inlet velocity under the same mass flow rate with different array methods at a diameter of 1—3 mm

直径/mm	进气速度/(m/s)		
	2×2阵列	3×3阵列	4×4阵列
1	45	20	11.25
2	11.25	5	2.81
3	5	2.22	1.25

之间建立流固耦合面, 实际应用中整个电池模组以及射流区域外壁面与环境存在热交换, 因此定义整个系统的外壁面为对流换热交界面, 换热系数设置为 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 为了使电池模组与射流介质之间存在较好的换热, 设置空气进口温度为 10°C 。仿真中设置的锂离子电池及相变材料参数如表2、表3所示。

表2 锂离子电池参数
Table 2 Parameters of lithium-ion battery

电池参数	数值
型号	NCR21700
额定容量/Ah	4.8
重量/g	23
额定电压/V	3.7
充电电压/V	4.1
放电终止电压/V	2.75
最大放电电流/A	15

表3 相变材料石蜡的热性能
Table 3 Thermal properties of PCM-paraffin wax

参数	数值
熔化温度/K	308
潜热/(kJ/kg)	210
热导率/[W/(m·K)]	0.2
液相密度/(kg/m ³)	770
固体密度/(kg/m ³)	880
比热容/[J/(kg·K)]	2000

2.3 不同阵列方式在测试工况下的热管理性能分析

图4是在不同阵列条件下经历一个NEDC工况循环后, 经散热结构冷却的电池模组的最高最低温度, 可以发现, 在固定孔径下, 增加喷口数量都能显著加速冷却过程, 表现为温度曲线更快速地下跌至更低水平。在1 mm射流孔径下, 三种阵列方式

都呈现了相同的温度变化趋势, 4×4阵列射流的最高和最低温度都要明显低于2×2、3×3阵列射流, 具体表现为在测试工况结束时, 4×4阵列射流最高温度较2×2、3×3阵列射流分别降低了0.55 K、0.35 K, 同时在一个测试工况结束后, 4×4阵列射流下的最低温度达到了290.51 K, 2×2阵列射流下的最低温度达到了293.34 K, 比前者高了2.83 K。配合图5各阵列射流条件下的电池模组温度云图可以发现, 多射流的方式增加了射流滞止域的覆盖面积, 这增强了空气与电池模组之间的换热, 具体表现为在电池模组上表面与空气直接接触的部分, 2×2阵列射流的上表面存在大面积的黄色高温区, 温度梯度明显。而当射流数增加到9个时(3×3阵列), 高温区域缩小, 主导颜色变为绿色, 表明温度分布更为均匀。同时通过分析整个温度云图, 可以发现, 在2×2阵列射流下的电池模组温度差异不是很大, 保持在2 K左右, 这主要是由于2×2阵列射流下射流冷却的优势没有很好地发挥出来, 可以观察出射流滞止区域主要集中在相变材料上端, 对电池散热不是很明显, 针对电池聚热严重的正极一端冷却效果不是很好。最佳的4×4阵列射流则几乎全部呈现均匀的蓝绿色, 意味着整个上表面温度被有效控制在较低且均衡的水平。这是因为更多射流数意味着射流滞止域覆盖更全面, 避免了局部热点的产生。

2.4 不同射流孔直径在测试工况下的热管理性能分析

为了研究阵列射流孔直径大小对电池模组温度

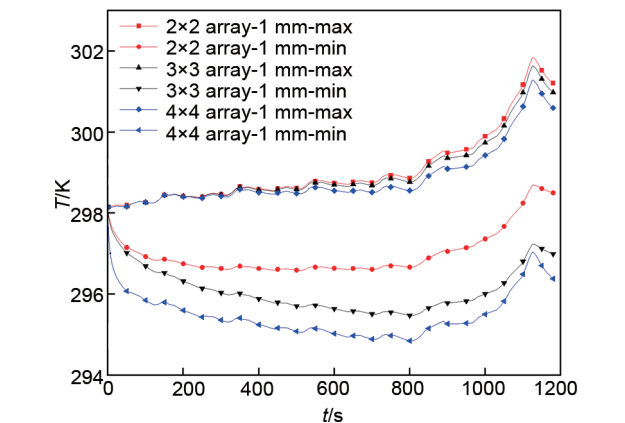


图4 2×2、3×3、4×4阵列射流下电池模组最高、最低温度
Fig. 4 The highest and lowest temperatures of the battery module under 2×2, 3×3, and 4×4 array jet streams

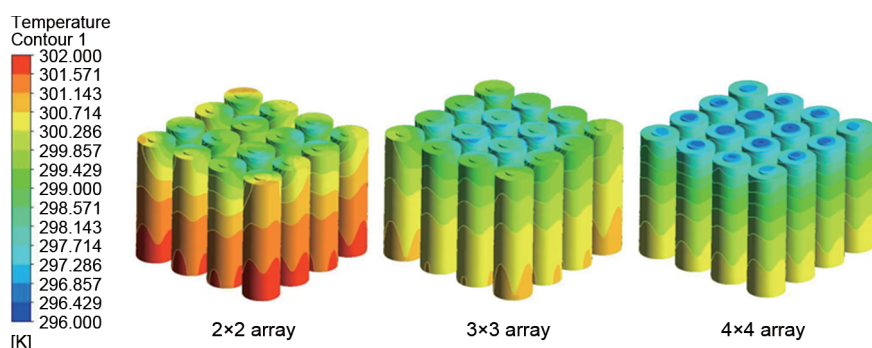


图5 各阵列射流下电池模组温度云图

Fig. 5 Temperature maps of battery modules under various array jets

场的影响, 将1 mm孔径增加至2 mm、3 mm, 图6是在不同孔径下经历一个NEDC工况循环后电池模组平均温度的变化, 从点线图中可以发现最基础的规律, 随着射流孔径的增大, 电池模组的整体平均温度在下降, 冷却效果在逐渐增强, 当一个NEDC测试结束后, 2×2阵列射流孔径从1 mm增至3 mm, 电池模组平均温度下降了2.06 K; 3×3阵列射流孔径从1 mm增至3 mm, 电池模组平均温度下降了2.96 K; 4×4阵列射流孔径从1 mm增至3 mm, 电池模组平均温度下降了3.01 K。对测试工况完成后的每个工况的温度云图进行分析, 见图7, 观察每一行(即相同阵列条件), 可以看出射流孔径的影响更为复杂。较小的射流孔径(如1 mm)通常能产生最强的冲击冷却效果, 使得喷头正下方的局部冷却效率最高, 这在4×4阵列条件下, 即16射流数下尤其明显, 这是因为在相同阵列条件下, 控制空气总的质量流量一致, 随着射流孔径的减小, 射流进口速度会呈同比增加, 越高的射流速度, 射流在单位时间内传递给目标的动量越大, 产生的总冲击力越强。同时, 在4×4阵列条件下, 随着孔径的增加, 电池模组的整体温度在下降, 冷却效果在增强, 主要原因是随着射流孔径的增大, 虽然冲击效果在减弱, 但是空气流动更加稳定, 能量损失减少, 这使得低温空气能够更稳定地到达电池模组表面, 与电池保持高效换热, 并且随着射流孔径的增大, 单个射流的滞止域面积在增大, 使得整个阵列射流中的滞止域可以充分覆盖整个电池模组上表面, 避免产生冷却盲区。然而, 当射流数不足时(即2×2阵列), 小孔径会导致冷却区域重叠不足, 反而使喷头之间的区域形成明显的高温带。随着孔径增大(2 mm, 3 mm), 单个喷头的冷却射流滞止域变大, 有助于填补空隙, 但整体冷

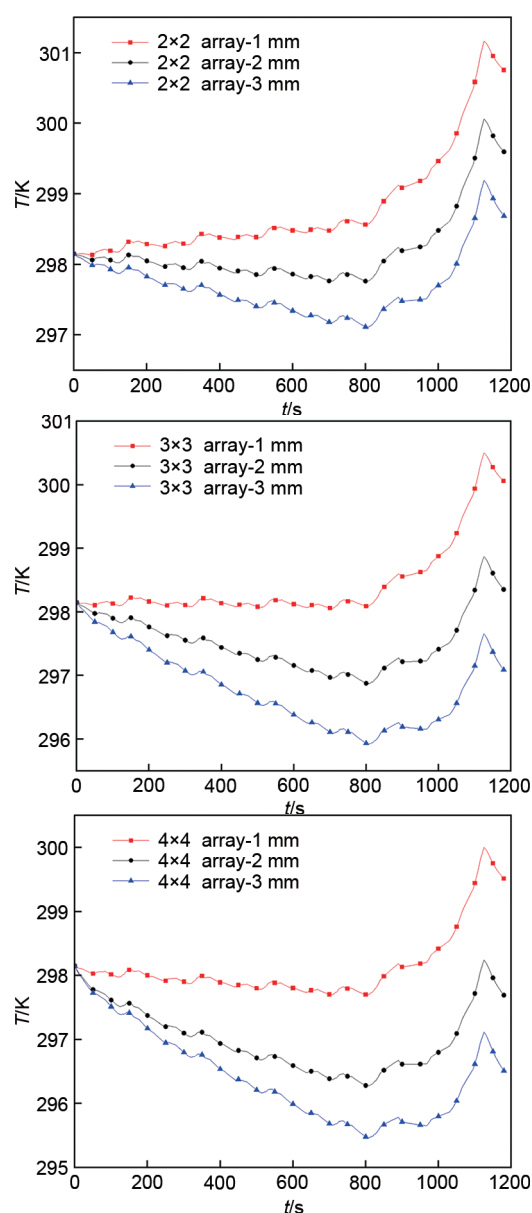


图6 各阵列射流下不同射流孔径电池模组平均温度变化图

Fig. 6 Graph showing the average temperature changes of battery modules with different jet diameters under each array of jets

却效果远远比不上多射流,这可以通过对比每个工况的温度云图明显观察到。

为了更好地展示不同工作工况下阵列射流方式对锂离子电池模组温度场的影响,对阵列射流孔的轴切面云图进行分析,如图8所示,2×2阵列的1 mm图中存在大片的红色与黄色高温区域,温度梯度显著;而4×4阵列的1 mm图几乎全部呈现均匀的蓝绿色,意味着整个表面被冷却至较低且均衡

的温度。在固定喷口数量时,以第一行为例,减小孔径(1 mm)能增强射流冲击强度,在喷口正下方形成低温核心(绿色点),但覆盖范围有限,导致周边区域温度较高,均匀性差。增加孔径(3 mm)能扩大单股射流的覆盖面积,缓解周边过热,但冲击强度减弱,对比4×4阵列的3 mm整体温度水平升高。由此可见,4×4阵列16射流孔结合3 mm孔径的配置实现了较好的温度均匀性,是整个研究中的最优解。

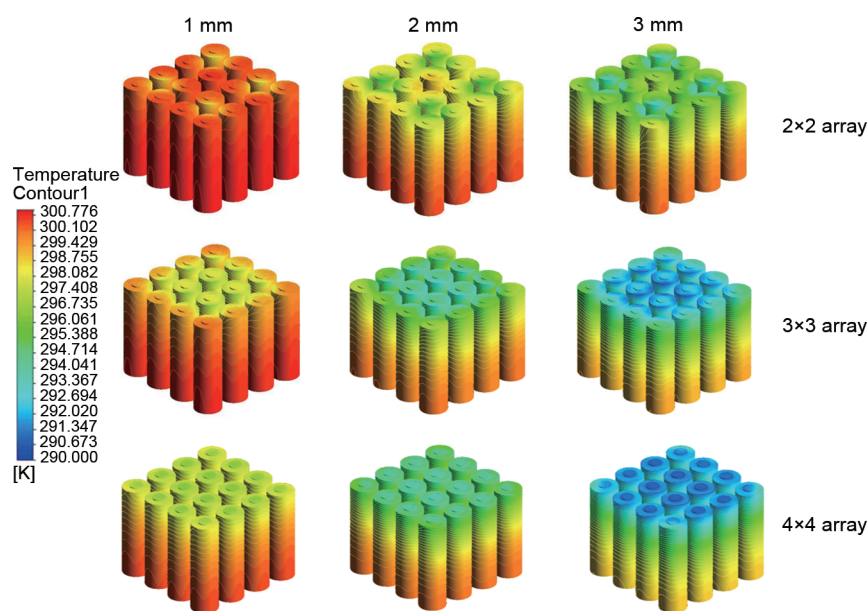


图7 各阵列射流下不同射流孔径电池模组温度云图

Fig. 7 Temperature cloud diagrams of battery modules with different jet diameters under various array jets

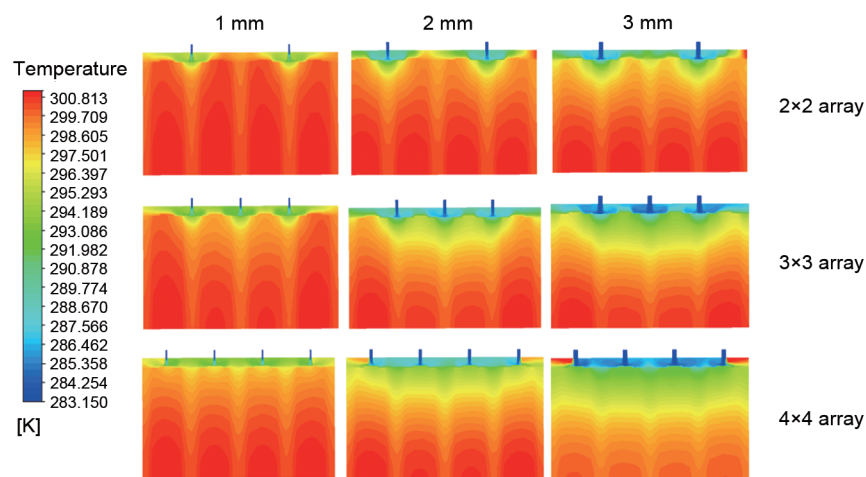


图8 各阵列射流下电池模组切面温度云图

Fig. 8 Temperature cloud map of the battery module cross-section under each array jet flow

2.5 不同质量流量下的电池模组热管理性能分析

通过之前的研究可以发现本研究中设计的利用空气射流配合相变材料冷却的方式对锂离子电池模

组温度控制有着卓越的优势,此前都是通过控制系统中的空气质量流量来观察不同阵列方式射流条件下的系统温度场均匀性,为了进一步探究在不同质

量流量下的变化,并控制系统中的变量,将空气射流进口的速度设置为5 m/s、10 m/s,观察在不同质量流量下的锂离子电池模组温度场的变化。如图9所示是在不同工况下的电池模组平均温度,可以明显发现在同一射流进口速度下,随着射流孔的增多,电池模组的整体温度在下降。2×2阵列图中,各曲线在测试时间内温度波动剧烈,且部分阵列方式下温度不降反升,表明冷却能力不足且不稳定,整个测试工况中2×2阵列射流最高温度可以达到301.4 K。3×3阵列图中,温度变化范围收窄,整体趋势有所改善,但不同阵列方式间仍存在明显温差与波动。而在4×4阵列图中,所有六条曲线均呈现出一致、平稳的下降趋势,最终温度均能稳定在较低水平,整个测试工况中4×4阵列射流最高温度可以达到300.65 K,相较于2×2阵列工况,最高温度下降了0.75 K。同时通过分析三种不同阵列方式下的电池模组平均温度变化可以发现,在3 mm孔径下的温度变化趋势基本一致,从而说明在3 mm孔径下增加空气质量流量的冷却手段没有得到很好的收益。这说明增加喷口数量是提升冷却效能、确保温度均匀且稳定下降的最有效手段。在相同射流进口速度的条件下,通过比较不同阵列方式下的电池模组温度变化可以发现,在追求高效、均匀且稳定的热管理方案时,优先增加喷口密度(如4×4阵列射流)比单纯优化单个射流的参数(孔径、速度)更为关键和有效。主要是因为高密度阵列通过实现全覆盖的均匀冲击,能够从根本上避免局部过热,系统可靠性高。

3 结 论

高效的锂离子电池热管理方式是新能源汽车安全性能的重要保障,本工作研究的利用射流冷却高换热系数配合相变材料冷却的方式在汽车测试工况中表现出优秀的散热性能。在电池实际产热的基础上通过数值模拟研究了在不同阵列方式射流下,等空气质量流量以及等进口流速下对测试工况下的锂离子电池的降温作用,得出以下结论:

(1) 针对4×4电池模组,4×4阵列射流的方式一致优于2×2、3×3阵列射流,等空气质量流量的基础上,在1 mm射流孔径下,4×4阵列射流在最高和最低温度都要明显低于2×2、3×3阵列射流,4×4阵列射流最高温度较2×2、3×3阵列射流分别

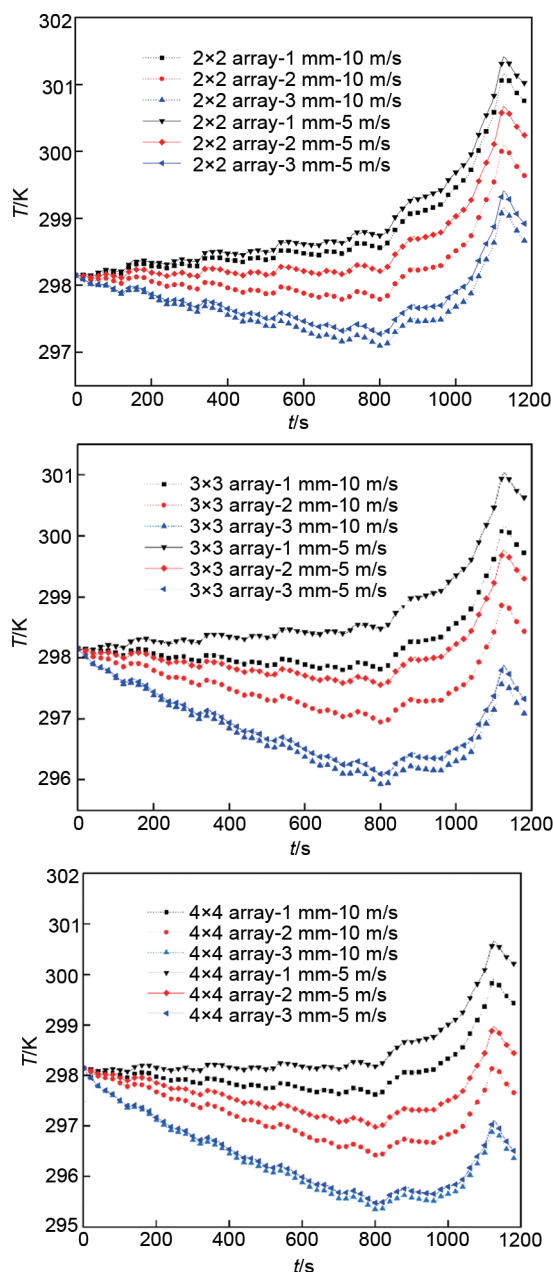


图9 不同进口速度下的2×2、3×3、4×4阵列射流下电池模组平均温度变化曲线

Fig. 9 The average temperature change curves of battery modules under 2×2, 3×3, and 4×4 array jets at different import speeds

降低了0.55 K、0.35 K,同时在一个测试工况结束后,4×4阵列射流下的最低温度达到了290.51 K,2×2阵列射流下的最低温度达到了293.34 K,比前者高了2.83 K。

(2) 当一个NEDC测试结束后,2×2阵列射流孔径从1 mm增至3 mm,电池模组平均温度下降了2.06 K;3×3阵列射流孔径从1 mm增至3 mm,

电池模组平均温度下降了2.96 K; 4×4阵列射流孔径从1 mm增至3 mm, 电池模组平均温度下降了3.01 K。

(3) 保证射流速度一致的情况下, 2×2阵列射流最高温度可以达到301.4 K, 4×4阵列射流最高温度仅达到300.65 K, 相较于2×2阵列射流, 最高温度下降了0.75 K。

(4) 在车辆能耗和续航里程测试工况中, 本研究所设计的利用空气射流配合相变材料冷却手段, 通过增加喷口密度和减小孔径是协同提升冷却系统综合性能的有效途径。

参考文献

- [1] 冯文琳, 包红媛. 政府补贴对新能源汽车企业创新效率的影响研究[J]. 会计之友, 2025(S2): 83-92.
FENG W L, BAO H Y. Research on the influence of government subsidies on the innovation efficiency of new energy automobile enterprises[J]. Friends of Accounting, 2025(S2): 83-92.
- [2] 郑雪芹. 2025年10月国产新能源汽车销量增长20%[J]. 汽车纵横, 2025(12): 110-111. DOI:10.3969/j.issn.2095-1892.2025.12.030.
ZHENG X Q. In October 2025, the sales of domestic new energy vehicles increased by 20%[J]. Auto Review, 2025(12): 110-111. DOI:10.3969/j.issn.2095-1892.2025.12.030.
- [3] JAGUEMONT J, BARDÉ F. A critical review of lithium-ion battery safety testing and standards[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 231: 121014. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.121014.
- [4] ZHAO L Q, HOU J X, FENG X N, et al. The trade-off characteristic between battery thermal runaway and combustion[J]. Energy Storage Materials, 2024, 69: 103380. DOI:10.1016/j.ensm.2024.103380.
- [5] 张新宇, 罗声豪, 吴颖欣, 等. 复合相变材料用于锂离子电池热管理和热失控防护研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(3): 1040-1053. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0137.
ZHANG X Y, LUO S H, WU Y X, et al. Research progress of composite phase change materials for thermal management and thermal runaway protection of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(3): 1040-1053. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0137.
- [6] AL HALLAJ S, 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. DOI:10.1149/1.1393888.
- [7] JILTE R D, KUMAR R, AHMADI M H, et al. Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 161: 114199. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.114199.
- [8] 罗昭顺, 汪铭磊, 吴启超, 等. 双层相变材料结构的圆柱形锂离子电池相变冷却模块仿真分析[J]. 现代机械, 2022(2): 14-19. DOI:10.13667/j.cnki.52-1046/th.2022.02.010.
- [9] LUO Z S, WANG M L, WU Q C, et al. Simulation analysis of the phase change cooling module for cylindrical lithium-ion battery with double-layer phase change material structure[J]. Modern Machinery, 2022(2): 14-19. DOI:10.13667/j.cnki.52-1046/th.2022.02.010.
- [9] YANG N X, ZHANG X W, LI G J, et al. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 80: 55-65. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.01.049.
- [10] FAN Y Q, BAO Y, LING C, et al. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 155: 96-109. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.157.
- [11] KANG D, LEE P Y, YOO K, et al. Internal thermal network model-based inner temperature distribution of high-power lithium-ion battery packs with different shapes for thermal management[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101017. DOI:10.1016/j.est.2019.101017.
- [12] MAHAMUD R, PARK C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(13): 5685-5696. DOI:10.1016/j.jpowsour.2011.02.076.
- [13] 屠楠, 胡瑞河, 庄昆, 等. CPCM耦合风冷的储能锂电池热管理性能与结构优化研究[J/OL]. 化工学报, 1-19 [2025-12-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20250917.1419.004>.
TU N, HU R H, ZHUANG K, et al. Research on thermal management performance and structural optimization of energy storage lithium batteries coupled with CPCM and air cooling[J/OL]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1-19 [2025-12-19]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1946.TQ.20250917.1419.004>.
- [14] JILTE R, AFZAL A, PANCHAL S. A novel battery thermal management system using nano-enhanced phase change materials[J]. Energy, 2021, 219: 119564. DOI:10.1016/j.energy.2020.119564.
- [15] 潘治衡. 风冷耦合水合盐相变材料应用于锂离子电池热管理的研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2025.
PAN Z H. Study on the application of air-cooled coupled hydrated salt phase change materials to the thermal management of lithium ion batteries[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2025.
- [16] 平丽浩, 钱吉裕, 徐德好. 电子装备热控新技术综述(下)[J]. 电子机械工程, 2008, 24(2): 1-9. DOI:10.19659/j.issn.1008-5300.2008.02.001.
PING L H, QIAN J Y, XU D H. A review of the thermal control technologies for electronic systems: Part II [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2008, 24(2): 1-9. DOI:10.19659/j.issn.1008-5300.2008.02.001.
- [17] 张鹏, 许伟聪, 赵力, 等. 高热流密度射流冷却实验研究[J]. 低温工程, 2025(3): 10-17.
ZHANG P, XU W C, ZHAO L, et al. Experimental study on high heat flux jet cooling[J]. Cryogenics, 2025(3): 10-17.

- [18] ZHOU H B, NIU J G, GUO X F, et al. Thermal performance of a hybrid thermal management system based on the half helical coil coupled with air jet cooling for cylindrical Lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 225: 120231. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120231.
- [19] 高剑, 范唯, 雷利刚, 等. 驾驶行为特征对纯电动汽车续航能力影响研究[C]//中国汽车工程学会. 第三十二届中国汽车工程学会年会论文集(4). 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 2025: 284-288.
- GAO J, FAN W, LEI L G, et al. Research on the impact of driving behavior characteristics on the range capacity of pure electric vehicles[C]//China Society of Automotive Engineers. 32nd Annual Conference of China Society of Automotive Engineers (Volume 4). China Automotive Research Institute (Tianjin) Co., Ltd., 2025: 284-288.
- [20] 邱炎峰. 新能源汽车续航里程试验方法分析[J]. *汽车维修与保养*, 2025(12): 52. DOI:10.13825/j.cnki.motorchina.2025.12.003.
- QIU Y F. Analysis of test methods for driving range of new energy vehicles[J]. *Automobile Maintenance and Repair*, 2025(12): 52. DOI:10.13825/j.cnki.motorchina.2025.12.003.
- [21] 钟腾云. 基于相变材料的动力锂离子电池热管理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- ZHONG T Y. Research on thermal management of power lithium-ion battery based on phase change materials[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.