

动力电池组喷雾通风复合冷却系统性能分析

常奕芑, 陈观生, 宋禹昕, 邓明炜, 卢毅康

(广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 动力电池风冷系统虽结构简单, 但存在电池模组内部温度过高、温度均匀性差等问题。本文在现有风冷结构基础上增设喷雾装置, 利用水雾在电池模组气流通道内的蒸发吸热特性提升冷却效率, 建立了动力电池喷雾通风冷却的数学模型, 重点研究喷嘴布置方式、喷雾量、雾滴粒径、风速及环境温度对冷却性能的影响。结果表明, 与传统风冷相比, 喷雾通风冷却能显著降低电池模组的最高温度与平均温度, 同时提升模组内部温度的均匀性; 随着喷雾量的增大虽然可以降低电池模组温度, 但会对温度均匀性产生不利影响; 雾滴粒径对冷却效率影响显著, 不同风速与雾滴粒径组合会对电池温度有影响。综合冷却效果与最大温差考虑, 40 μm 的雾滴粒径最符合电池组冷却需求; 当环境温度低于 305 K 时 3.72 g/(Ah·h) 的喷雾量可实现高效冷却。该研究成果为喷雾辅助强制风冷系统的设计提供了重要参考, 对电动汽车高效热管理方案的研发具有积极意义。

关键词: 电池热管理; 热力学; 喷雾冷却; 数值模拟; 传热

中图分类号: U 469.72; TK 124 文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Performance analysis of spray-ventilation hybrid cooling system for power battery packs

CHANG Yipeng, CHEN Guansheng, SONG Yuxin, DENG Mingwei, LU Yikang

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: The air-cooling system for power batteries, characterized by its simplicity, faces challenges with high temperatures and poor uniformity within the battery module. This paper enhances the existing air-cooling framework by incorporating a spray device, leveraging the evaporation and heat absorption of water mist in the airflow channel of the battery module to improve cooling efficiency. A mathematical model for spray ventilation cooling of power batteries has been developed, focusing on the effect of nozzle arrangement, spray flow rate, droplet size, air velocity, and ambient temperature on the cooling performance. The results show that spray ventilation cooling significantly reduces both the maximum and average temperatures of the battery module compared to conventional air cooling, also enhancing temperature uniformity across the module. However, an increase in spray flow rate can lower the temperature of the battery module but may adversely affect temperature uniformity. The effect of droplet size on cooling efficiency is significant, with different air velocities and droplet sizes impacting battery temperatures. Considering both the cooling performance and the maximum temperature difference, a droplet

收稿日期: 2025-12-15 修回日期: 2026-04-26

通信作者: 陈观生(1970—), 男, 博士, 副教授, chengs@gdut.edu.cn

第一作者: 常奕芑(2003—), 女, 硕士研究生, 18187766220@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52576198)

引用本文: 常奕芑, 陈观生, 宋禹昕, 邓明炜, 卢毅康. 动力电池组喷雾通风复合冷却系统性能分析[J]. 化工学报, DOI: 10.11949/0438-1157.20251412

Citation: CHANG Yipeng, CHEN Guansheng, SONG Yuxin, DENG Mingwei, LU Yikang. Performance analysis of spray-ventilation hybrid cooling system for power battery packs[J]. CIESC Journal, DOI: 10.11949/0438-1157.20251412

size of 40 μm best meets the cooling requirements of the battery pack. For ambient temperatures below 305 K, a spray flow rate of 3.72 g/(Ah·h) achieves an effective cooling effect. These insights provide valuable guidance for the design of spray-assisted forced air cooling systems and contribute to the development of efficient thermal management solutions for electric vehicles.

Keywords: battery thermal management; thermodynamics; spray cooling; numerical simulation; heat transfer

引 言

近年来,由于石油资源的大量消耗以及由此引发的大量环境问题,限制并淘汰燃油汽车已逐渐成为全球共识。随着太阳能、风能和核能等新能源发电技术的广泛应用,使用清洁能源发电取得了前所未有的进步。因此,电动汽车已成为传统燃油汽车的可行替代品^[1]。锂离子电池具有能量密度高、输出功率大、循环寿命长、稳定性好等优点,是当前电动汽车动力电池的首选^[2-3]。然而,随着锂离子电池能量密度和输出功率的提升,电池工作温度升高而产生的热管理问题也日益突出。

锂离子电池的理想工作温度范围在 298.15 K 和 313.15 K 之间^[4]。电池温度过高会导致能量损失增加、使用寿命缩短以及火灾和爆炸的风险升高等问题的发生。因此,电池热管理系统,尤其是冷却系统,对于确保电池组在安全温度范围内运行至关重要。

目前,电池热管理系统主要采用空气冷却^[5]、液冷^[6]、相变材料冷却^[7]及其组合方式的冷却方法^[8-9]。每种冷却方法都有其自身的优势和局限性,在实际应用中,这些方法的选择和组合取决于电池类型、运行条件和环境要求等因素,以实现最佳的冷却效果。强制风冷是空气冷却中一种常见且简单的冷却方式,它利用风扇将环境中的空气引入电池组通道以实现散热。空气冷却具有结构简单、成本低的优点,空气通常不能及时带走电池产生的热量,容易造成电池包温度过高、温差过大的情况^[10]。Zhang 等^[11]对多通风口空气冷却模块进行了数值模拟研究,旨在通过改变通风口的数量、大小和位置来改善电池温度过高和温度不均匀的问题。然而,由于空气的热导率和对流换热系数较低,空气冷却无法满足高功率密度电池系统的散热要求。Fan 等^[12]设计了一个由 32 个圆柱形电池组成的电池组,并对三种典型的阵列式空气冷却模块进行了实验研究。通过一系列实验,研究了电池排列、进气速度、排气率和进气温度的影响,并对其进行了评估。研究表

明,空气冷却的冷却效果不佳,在极端环境条件或高负载条件下无法满足电池的冷却要求。相比之下,液体冷却由于其热导率、对流换热系数和比热容均高于空气冷却,已成为高功率密度电池中更常用且研究更广泛的一种冷却方法^[13-16]。

除了风冷和液冷之外,相变材料冷却作为一种新型的热管理方法也受到了广泛关注^[17]。El Idi 等^[18]制备了石蜡/泡沫铝复合相变材料,以改善锂离子电池的热管理。岳珊等^[19]提出了一种聚乙二醇基相变材料电池热管理系统,并对其热性能进行了实验分析。相变材料在特定的相变温度范围内能够吸收或释放大量的潜热。通过调整相变材料的类型和排列,可以实现电池系统的温度控制。相变材料冷却系统的结构简单,无需外部能量输入,能够有效缓解电池系统在瞬态运行条件下的温度波动。然而,现有技术虽在性能上有所提升,但受限于相变材料泄露、成本过高等实际问题,距离真正的实际应用仍有差距^[20]。

液体蒸发冷却已成为当前热管理领域中一种新兴的冷却技术。由于其能够在相对合理成本下消散高热流,因此在电池热管理系统中得到应用^[21-22]。液体蒸发冷却中液态到气态的相变所涉及的潜热比固态到液态相变所涉及的潜热大得多。水的汽化潜热约为 2400 kJ/kg,是石蜡^[23]熔化潜热的 9-11 倍。自蒸发冷却技术提出以来,由于其出色的性能,已在大型工业设备冷却^[24]和电子芯片冷却^[25]等多个领域得到广泛应用。喷雾冷却是一种液体蒸发冷却的特定应用形式,它通过喷嘴喷出极细的雾化水滴,以促进喷出水滴快速蒸发和吸热。尽管对喷雾冷却进行了大量研究,但其在电池冷却方面的应用报道却很少。黄金佐等^[26]研究了振动工况下的喷雾冷却传热性能,为开发适用于电动汽车等振动环境的高效喷雾冷却电池热管理系统提供了重要的实验数据和理论指导。Saw 和 Yang 等^[27-28]在电池组的热管理系统中采用了喷雾冷却技术,并证明了喷雾冷却用于锂离子电池组热管理的可行性。他们的研究表明,与空气冷却相比,喷雾冷却能

够提供更均匀的温度分布。上述喷雾冷却方法仅考虑了液滴与空气的混合以及液滴在进入电池前对空气的预蒸发冷却作用,而未考虑液滴穿透电池的热表面并在其附近蒸发所带来的强化热交换效果。

本文在动力电池的风冷系统中引入了喷雾装置,该装置直接针对电池模块的气流通道进行大流量喷雾。通过利用电池模块气流通道内水雾的蒸发吸热作用,提高动力电池的冷却效果。建立了动力电池喷雾通风冷却的数学模型,研究了喷嘴布置、喷雾量、液滴大小、环境温度和空气流速对电池冷却效率的影响,为动力电池的高效节能和安全运行提供了参考。

1 建模与解决方案

1.1 物理模型

电池模块由九个电池单元组成,这些电池单元置于通风通道内,每个电池单元的尺寸为140mm(z)×100mm(x)×20mm(y),如图1(a)所示。在电池模块入口的一侧安装喷雾装置如图1(b)和(c)所示。安装喷雾装置以增强整个系统的冷却性能。假设电池的发热是均匀的,但热导率是各向异性的,而电池的其他物理性质则视为均匀的。喷雾冷却运用于电池热管理时需考虑安全问题,如液滴引起的电池短路风险、材料腐蚀以及电池组内部湿度控制等问题。因此,在电池表面涂覆氮化硼(BN)涂层,涂层厚度为0.1 mm,该厚度通过权衡导热性能与工艺成本确定:厚度小于0.05 mm时难以形成连续均匀的绝缘层,而厚度超过0.2 mm时会显著增加界面热阻,降低散热效率。所以该涂层不仅具有优异的导热性能,还能有效阻隔液滴与电池外壳的直接接触,避免短路和腐蚀问题^[29]。同时,通过优化喷雾量和通风风速,确保液滴在电池表面完全蒸发并及时排出湿空气,使电池组内部相对湿度维持在安全范围内(<85%),满足电池工作环境的湿度要求。从经济角度出发,氮化硼涂层虽增加初期投入,但厚度仅需0.1 mm,单位面积材料成本增加有限,相比液冷系统的复杂管路和泵阀组件,本系统在整体成本上仍具竞争优势。材料参数见表1。

1.2 数学模型

鉴于冷却系统中复杂的传输过程,做出以下假设:

(1)自然对流和辐射可以忽略不计;

(2)流体流动是不可压缩的,并且具有恒定的热物理性质。

1.2.1 控制方程 对于喷雾冷却中的两相流,采用欧拉-拉格朗日方法来表征液滴蒸发的传热特性。欧拉法将气流视为连续相,将水滴视为离散相。通过在空气控制方程中引入源项,来考虑水滴对气流的影响。喷雾通风冷却中使用的连续性、动量和能量方程如下:

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

S_m 是质量源项,用于解释连续流体和分散流体之间的相互作用,可以用下式表示:

$$S_m = \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \frac{\dot{m}_{p0}}{dV} \quad (2)$$

m_{p0} 是喷雾质量流量,通过调节喷雾质量流量研究喷雾对冷却性能的影响。

(2)动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (3)$$

u_i 是空气流速(单位m/s)研究风速时通过改变 u_i 来实现, p 是压力, τ 是额外的应力张量, F_i 是动量源项,它解释了连续流体和分散流体之间的相互作用,形式如下:

$$F_i = \sum \frac{18\mu C_p Re_p}{24\rho_p D_p^2} (u_{pi} - u_i) m_p \Delta t \quad (4)$$

(3)能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_p u_i t) = \frac{\partial P}{\partial x_i} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_e \quad (5)$$

其中 S_e 定义为:

$$S_e = \left[\frac{\bar{m}_p}{m_{p0}} C_p P \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p0}} \left(\int_{T_{ref}}^{-L_p} C_{p,v} dT \right) \right] \frac{\dot{m}_{p0}}{dV} \quad (6)$$

(4)水蒸气输运方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_v) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial Y_v}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (7)$$

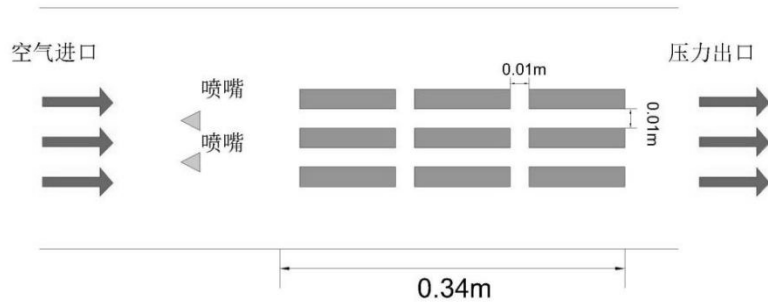
(5)液滴蒸发量计算公式

$$\frac{dm_p}{dt} = -h_m (\rho_{v,s} - \rho_v) A_p \quad (8)$$

其中 h_m 定义为:

$$Sh = \frac{h_m D_p}{D_{AB}} = 2.0 + 0.6 Re_p^{0.5} Sc^{1/3} \quad (9)$$

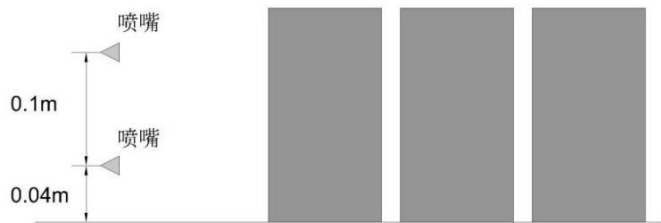
D_p 是液滴的粒径为核心参数,直接影响液滴表面积 A_p 和舍伍德数 Sh 。研究液滴大小影响时,设置不同的 D_p 初始数值(20 μm 、40 μm 、60 μm 、80 μm 、



(a) 顶视图及边界条件



(b) 两个喷嘴的侧视图



(c) 四个喷嘴的侧视图

图1 动力电池组和冷却系统的布置

Fig. 1 Arrangement of battery cells and cooling system

100 μm), 通过对比不同工况下的电池温度场分布, 分析液滴粒径对冷却性能的影响规律。

(6) 单液滴的能量平衡方程

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p) + L_p \frac{dm_p}{dt} \quad (10)$$

其中h定义为:

$$Nu = \frac{h D_p}{k} = 2.0 + 0.6 Re_p^{0.5} Pr^{1/3} \quad (11)$$

其中 D_p 通过努塞尔数Nu影响对流换热系数h, 进而决定液滴温度 T_p 的变化速率。较小粒径的液滴比表面积大、蒸发快、换热强, 但易随气流漂移; 较大粒径的液滴惯性大、穿透性强, 可在电池表面形成液膜, 但蒸发时间延长。连续相湍流流动采用

标准k-ε模型模拟, 输运方程定义如下:

$$\rho_f \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \rho_f \nabla \cdot (\mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho_f \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (12)$$

K表示湍流动能, 而ε表示湍流耗散率。K和ε的湍流普朗特数分别给定为 $\sigma_K=1.0$ 和 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。 $C_{1\varepsilon}=1.52, C_{2\varepsilon}=1.92$ 和 $C_\mu=1.92$ 是推荐的实验常数^[29-30]。 S_K 和 S_ε 分别为K和ε的源项。 μ_t 和 G_k 分别由等式(14)和等式(15)表示。

$$\mu_t = \rho_f C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (13)$$

$$G_k = \mu_t [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] / \nabla \mathbf{u} \quad (14)$$

(7) 电池的瞬态能量方程

$$m C_p \frac{dT_c}{dt} = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) + Q_{gen} \quad (15)$$

表1 材料参数^[29-30]Table 1 Material parameters^[29-30]

材料	单位	参数
电池尺寸	(mm)	100×20×140
氮化硼(BN)涂层厚度	(mm)	0.1
电池容量	(Ah)	21.5
电池比热容	$C_b(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	830
氮化硼的比热容	$C_B(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1900
电池密度	$\rho_b(\text{kg}/\text{m}^3)$	1700
氮化硼的密度	$\rho_B(\text{kg}/\text{m}^3)$	1900
电池在X/Y方向的热导率	$k_{b-X/Y}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	34
电池在Z方向上的热导率	$k_{b-Z}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	8.2
氮化硼在X/Y方向上的热导率	$k_{B-X/Y}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	30
氮化硼在Z方向上的热导率	$k_{B-Z}(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	33

其中, Q_{gen} 为电池产热率由 Tang 等^[30]在单个电芯不同放电速率下工作得到, 如表2所示。

表2 21.5 Ah 锂离子电池单体在不同放电倍率下的产热率^[30]Table 2 Heat generation rate of 21.5Ah lithium-ion battery monomer at different discharge rate^[30]

放电速率	1C	2C
发热率(W)	1.66	6.66

(8) 电池侧对流换热方程

考虑液滴撞击电池表面, 形成液膜及蒸发, 电池侧的对流换热可以表示为:

$$mC_p \frac{dT_c}{dt} = A_p \left[- \left(h_f + \frac{k}{h} \right) T_c + hT_p + \frac{k}{h} T_c \right] + m_{\text{evap}} h_{fg} \quad (16)$$

1.2.2 数值方法和边界条件 本文通过稳态仿真对电池模组的温度场及其变化进行研究, 并据此对电池模组冷却系统进行优化。采用 ICEM 软件, 利用结构化网格技术对模型进行离散化。在冷却系统入口处设置速度入口边界调节, 在冷却系统出口处, 以大气压力为条件, 设定了压力出口边界条件。四周指定为无滑移的绝热边界条件。喷雾介质为 300 K 的蒸馏水。喷嘴以 60°、实心锥状喷射, 喷射出粒径均匀的液滴。对于两种不同数量的喷嘴配置, 各个配置下每个喷嘴的流量相同, 并且两种配置的总喷雾量一致。进出口壁面边界设置为“逸出”, 液滴一旦撞击壁面, 即被终止并排除在进一步计算之外。

利用商用软件 FLUENT 2022R1 对电池性能进行仿真。采用 SIMPLE 算法对压力和速度进行耦合, 采用二阶迎风差分格式对控制方程、湍流动能和耗散率方程进行离散化。

2 计算网格与验证

在进行模拟之前, 为确保生成的网格能够满足精度要求并捕捉系统的流动和热特性, 进行了网格独立性分析。通过生成不同的网格尺寸及其数量, 分析模型的网格依赖性, 结果如表3所示, 发现当网格数量达到 344 万后, 电池模块的温度趋于稳定, 因此后续模拟采用包含 344 万个网格的模型。

表3 网格独立检验

Table 3 Grid independent test

网格数	温度(K)
893,896	308.31
1,753,159	306.75
2,985,236	306.20
3,440,371	305.84
5,265,368	305.64
6,584,296	305.38

为验证模型的准确性和可靠性, 本文采用 Tang 等^[30]的实验结果对电池系统的数值解进行验证, 如图2所示, 电池单体平均温度(含 BN 涂层)的实验数据与模拟结果之间存在较高的一致性, 平均差异在可接受的 3% 以内, 此外模拟结果也准确地捕捉到了电池温度的上升趋势。基于模型验证的结果, 所提出的数学模型能够准确地对电池模块喷雾辅助强制空气冷却进行模拟仿真。

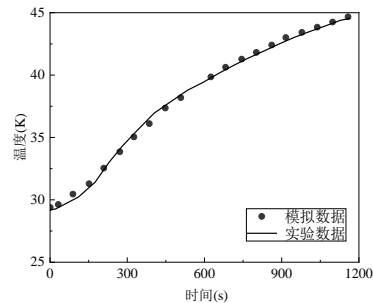


图2 电池热模型仿真验证

Fig. 2 Comparison of numerical results with experimental data

3 结果与讨论

3.1 通风冷却与喷雾通风冷却的比较

从图3(a)可以观察到, 在采用空气冷却的同时, 电池表面的最高温度上升到 312.6 K。然而, 在采用喷雾冷却的同时, 热源的温升明显降低。此外, 随着喷雾量的增大, 热源的温升也逐渐减小。与通风

冷却相比,喷雾液滴对电池的换热效果增强可以归结为几个因素:首先,当喷雾水在主流区流动时,液滴群吸收空气的显热而蒸发,降低了主流区空气的温度。其次,热边界层内喷雾流动中液滴的蒸发改变了温度分布梯度,导致热边界层厚度发生变化。最后,喷雾流中的液滴群在接触热源时直接交换热量,从热源吸收大量热量后,通过传质过程带入主流区域。

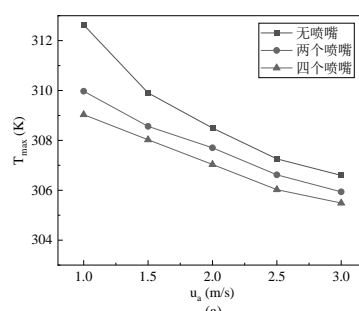
喷雾总量为 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 的情况下,采用通风冷却(无喷嘴)、喷雾通风冷却(两个喷嘴和四个喷嘴)时电池模组最高温度、平均温度及最大温度差的变化情况如图3所示。从图中可以看出,三种冷却方式下电池最高温度、平均温度及最大温差均随着空气流速的增加而降低,但当风速大于 2.5 m/s 时,降低的幅度明显趋缓。喷雾通风冷却比单一的通风冷却可以更加有效的降低电池温度。如图4所示,在喷射量为 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 、风速为 2 m/s 的情况下,电池模块的温度曲线与喷雾通风冷却相比,在没有任何喷嘴配置的情况下,温度分布显示出温度的变化更明显。

喷雾通风冷却时,随着喷嘴数量的增加使得喷雾液滴在电池表面分布更加均匀,液膜覆盖范围更大,可以有效地增强传热,电池散热效果最佳。因此喷雾通风冷却可以通过优化入口风速和喷嘴数量来提高冷却系统对电池的冷却效果。因此,喷雾通风冷却有可能通过优化进气速度和喷嘴数量来提高电池的冷却效率。

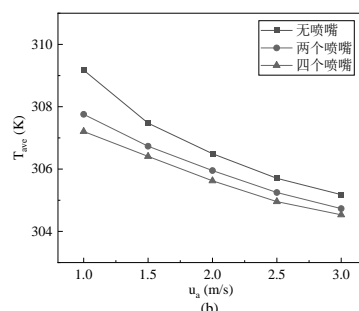
3.2 喷雾流速和喷雾量的影响

图5显示了电池之间垂直平面内流场的速度和温度轮廓。可以观察到,流道上方的气流较窄,导致上方的气流速度增大。流速增加引起的压差向上吸引液滴,使其轨迹向上弯曲。图6显示了距离进气道 0.29 m 截面处的温度等高线。从图中可以看出,随着喷水速率的增大,液滴轨迹向上弯曲的程度由于重力的作用抵消了空气速度增加所造成的向上的吸引力而减小。

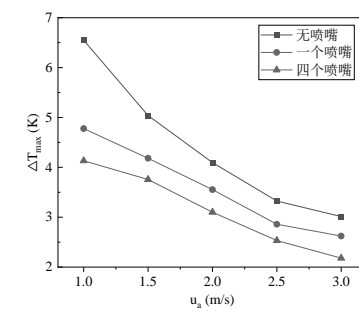
从图7中可以观察到,随着喷雾量和空气速度的增加,电池的最高温度逐渐降低。在 $1.86 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 和 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 两种不同的喷雾量下,后者的电池温度明显降低。当喷雾量超过 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 时,随着喷雾量的不断增大,电池的最大温度下降效果有限,且温度均匀性恶化,因为空气吸收水分的能力有限,过多的液滴在电池后段积聚形成局部过冷,



(a) 最高温度



(b) 平均温度



(c) 最大温差

图3 不同喷嘴下电池性能的比较

Fig. 3 Comparison of battery performances with different nozzles

增大温差;而在 $1.86\text{--}3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 范围内,温度均匀性随喷雾量增加而改善。综上所述,在低空气流速下液滴蒸发能力受限,冷却性能没有明显改善,实际冷却系统中不建议使用过多的喷雾水, $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 即可满足电池组冷却需求。

3.3 液滴大小的影响

图8显示了在喷雾量为 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 时不同空气流速和液滴尺寸对电池的最高温度、平均温度和最大温差的影响,可以看出喷雾液滴粒径对冷却性能的影响与空气流速有关。从图8(a)可以看出,随

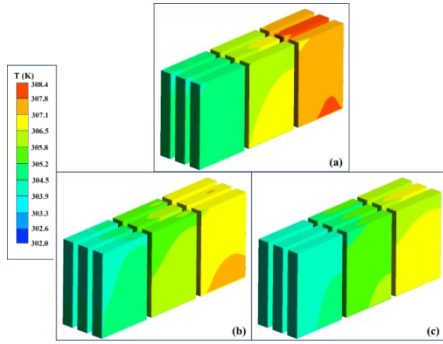


图4 喷雾量为 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 、风速为 2 m/s 时电池模块的温度等值线图:(a)无喷嘴;(b)两个喷嘴;(c)四个喷嘴

Fig. 4 Temperature contours of battery module under $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ of spray flow rate with air velocity of 2 m/s : (a) no nozzle; (b) two nozzle; (c) four nozzle

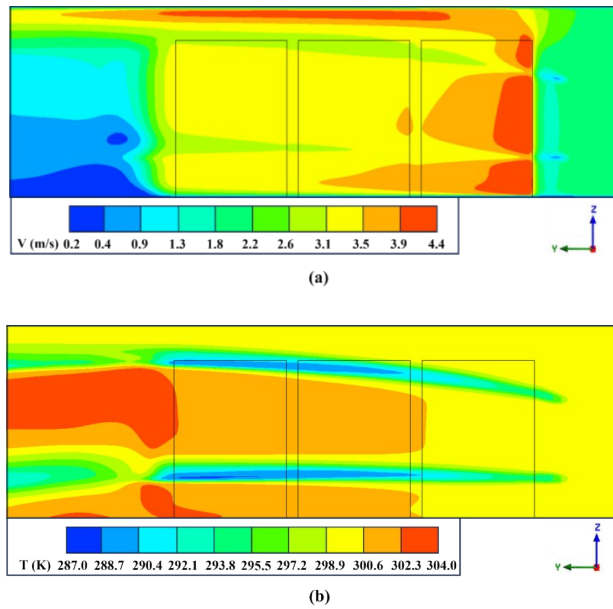


图5 垂直平面内的速度和温度等值线

Fig. 5 Velocity and temperature contours in the vertical plane

随着空气流速的增加,液滴粒径为 $20 \mu\text{m}$ – $60 \mu\text{m}$ 时,电池温度随着风速的增加而降低。这是因为在小粒径情况下,液滴在空气中蒸发,使得相对湿度增加,在电池表面上的液滴液膜不能很好的蒸发,而随着空气流速的增加,通道内的湿空气被加速排走,使通道内空气含湿量降低,液滴附着于电池表面的液膜易于蒸发,换热加强,电池最大温度下降。对于 $80 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 粒径的液滴来说,电池最大温度没有随着空气流速的增大而下降,反而略显增加,但前后差距仅在 0.5 K 之内。分析其原因,颗粒粒径较大的液滴与空气接触面积较小,相对于小粒径液滴在空气中蒸发少得多,通道内相对湿度较

低,液滴能在电池表面形成液膜后进行较好的蒸发换热。此外,空气流速的增加使得部分大粒径的液滴未完全蒸发便被带走,故电池最大温度略显上升。

图8(b)显示了不同液滴尺寸下最大温差随风速的变化。结果表明,液滴尺寸为 $100 \mu\text{m}$ 时温差最大,液滴尺寸为 $40 \mu\text{m}$ 时温差最小。较大的喷雾粒径可能出现在电池表面上局部液膜覆盖,形成局部过度冷却或者不均匀的冷却效果。相比之下,较小的喷雾粒径在电池表面上成膜更均匀,使得电池表面温差较小。综上所述,较大的喷雾粒径在协同风冷对动力电池冷却过程中能够产生更显著的降温效果,但对电池温差有不利影响。

3.4 环境温度的影响

以喷雾量为 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 、液滴尺寸为 $40 \mu\text{m}$ 为例,不同风速下电池的最高温度和最大温差随环境温度的变化如图9所示。从图9(a)和图9(b)可以看出,随着环境温度的升高和风速的减小,最高温度也随之升高。当喷雾冷却在较高的风速下运行时,最大温度下降更加明显。如图9(c)所示,风速为 1 m/s 时的最大温差大于其他风速下的最大温差。但随着环境温度的升高,电池与空气之间的温差减小,不利于冷却性能。环境温度越高,蒸发作用越强,冷却性能越强,因此,在高环境温度下空气温差变大,这意味着高环境温度导致电池的最高温度和最大温差增大。高风速可以提高冷却性能,但风扇功耗相应增加。当环境温度小于或等于 305 K 且风速任意时,在 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 的喷雾量下,电池的最高温度和最大温差可控制在 313.15 K 和 5 K 以内。

4 结论

本研究旨在研究通风冷却和液体喷雾联合条件下电池模块的热性能。为了增强对流换热,液滴被均匀地喷射到流道中。考察了喷嘴布置、喷雾量、液滴尺寸和环境温度对散热的影响。结果表明与仅通风冷却相比,采用喷雾辅助强制风冷的集成冷却系统具有更优越的冷却性能。电池模块内部的温度分布受喷射液体量和喷嘴布置的影响。从双喷嘴布置切换到四喷嘴布置可以实现优化设计。随着喷雾量的增大可降低电池模块的温度,但温度的均匀性会有所降低。所以要达到令人满意的冷却效果,最小喷雾量需要达到 $3.72 \text{ g}/(\text{Ah}\cdot\text{h})$ 。考虑

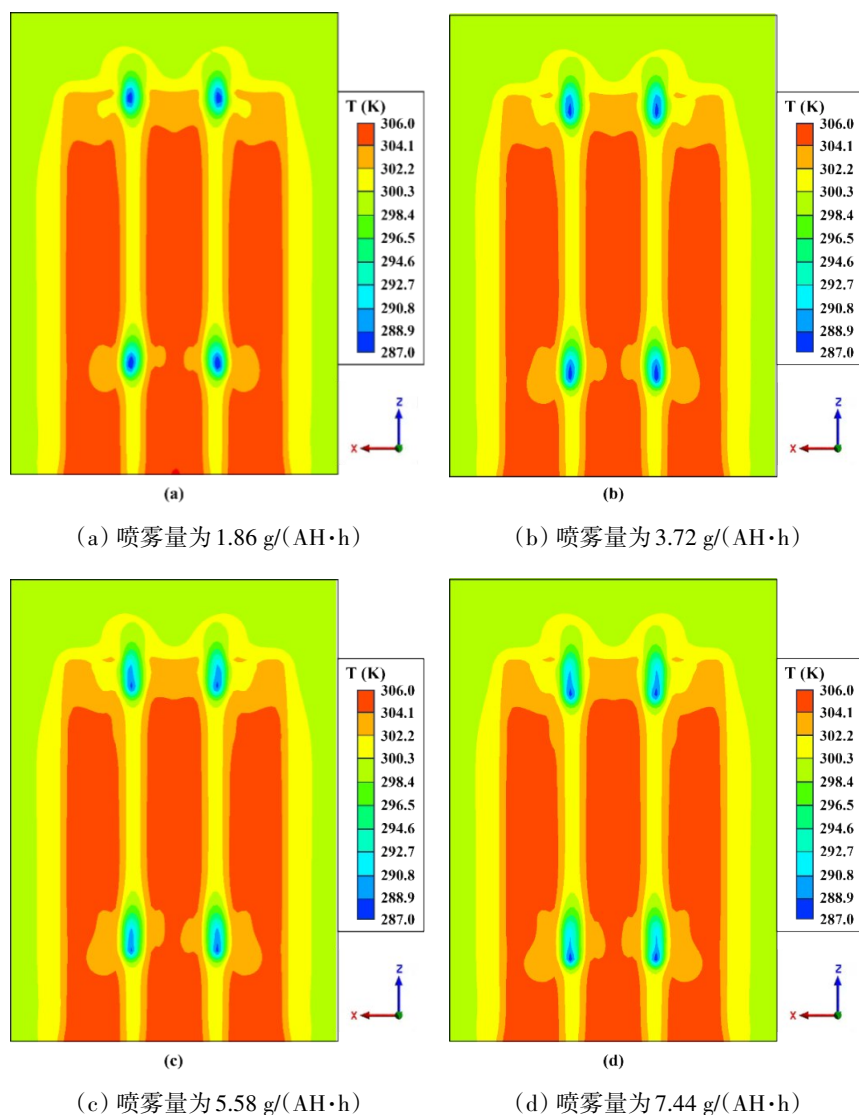
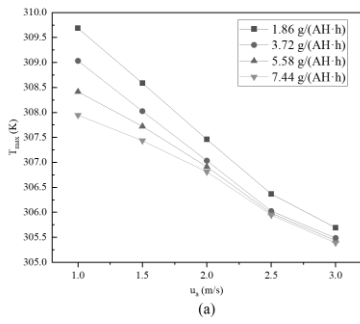


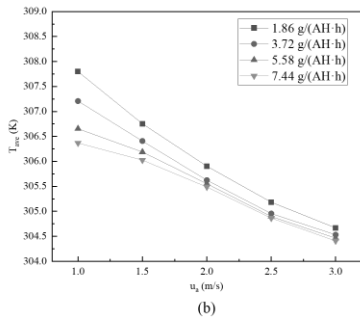
图 6 在距入口 0.29m 处的横截面上, 空气流速为 2 m/s 时, 布置四个喷嘴的温度等值线图

Fig. 6 Temperature contour map with four nozzles arranged, at the cross-section 0.29m from the inlet, under the condition of air velocity of 2 m/s

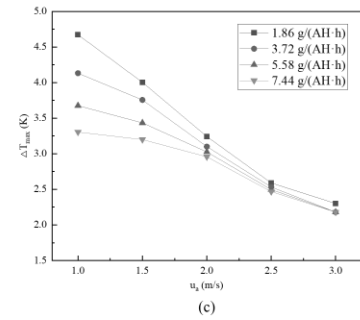
到冷却性能和最大温差, 40 μm 的液滴尺寸最能满足电池组的冷却要求。对于 305 K 以下的环境温度, 3.72 g/(Ah·h) 的喷雾量即可实现有效冷却。



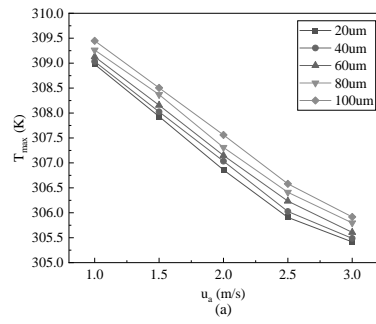
(a) 最高温度



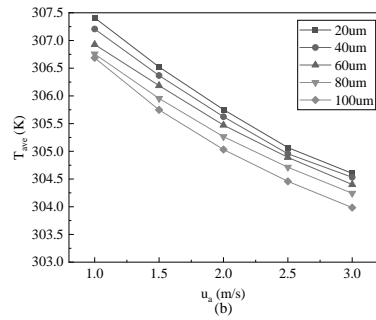
(b) 平均温度



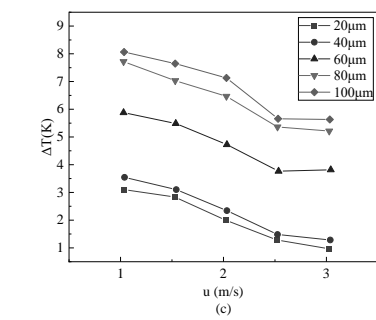
(c) 最大温差



(a) 最高温度



(b) 平均温度



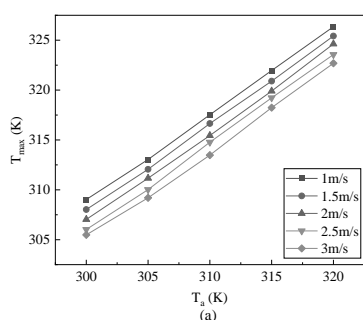
(c) 最大温差

图7 不同喷雾量和空气流速下的电池温度

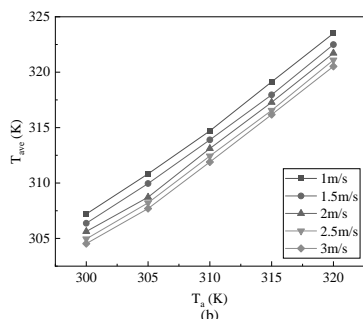
Fig. 7 Battery temperature at different water flow rates and air velocities

图8 不同粒径和空气流速下的电池温度

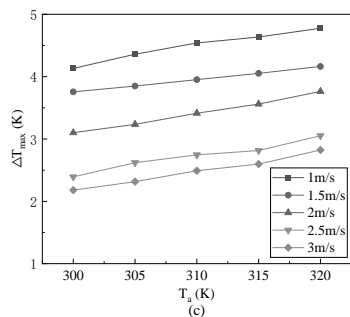
Fig. 8 Battery performances at different water droplet sizes and air velocities



(a) 最高温度



(b) 平均温度



(c) 最大温差

图9 不同温度和速度下的电池温度

Fig. 9 Battery performances at different air temperatures and velocities

参考文献

- [1] Dua R H, White K, Lindland R. Understanding potential for battery electric vehicle adoption using large-scale consumer profile data[J]. *Energy Reports*, 2019, **5**: 515–524.
- [2] 徐俊, 郭皓晨, 谢延敏, 等. 储能锂电池系统综合管理研究进展[J]. *西安交通大学学报*, 2024, **58**(10): 1–23.
Xu J, Guo Z C, Xie Y M, et al. Review of research progress in integrated management for energy storage lithium battery systems [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, **58**(10): 1–23.
- [3] Saw L H, Ye Y, Yew M C, et al. Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system[J]. *Applied Energy*, 2017, **204**: 1489–1499.
- [4] Malik M, Dincer I, Rosen M, et al. Experimental investigation of a new passive thermal management system for a Li-ion battery pack using phase change composite material[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, **257**: 345–355.
- [5] Chen K, Song M X, Wei W, et al. Design of the structure of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system for cooling efficiency improvement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, **132**: 309–321.
- [6] Wu S Q, Lao L, Wu L, et al. Effect analysis on integration efficiency and safety performance of a battery thermal management system based on direct contact liquid cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **201**: 117788.
- [7] Luo M Y, Song J Q, Ling Z Y, et al. Phase change material coat for battery thermal management with integrated rapid heating and cooling functions from -40°C to 50°C [J]. *Materials Today Energy*, 2021, **20**: 100652.
- [8] Zhao L Y, Li W, Wang G Y, et al. A novel thermal management system for lithium-ion battery modules combining direct liquid-cooling with forced air-cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **232**: 120992.
- [9] Weng J W, Xiao C R, Yang X Q, et al. An energy-saving battery thermal management strategy coupling tubular phase-change-material with dynamic liquid cooling under different ambient temperatures[J]. *Renewable Energy*, 2022, **195**(C): 918–930.
- [10] 白晓辉, 高渊博, 张玉碧, 等. 方形动力电池组多风道热管理研究[J]. *西北工业大学学报*, 2024, **42**(2): 260–268.
Bai X H, Gao Y B, Zhang Y B, et al. Study on multi-channel air cooling thermal management of prismatic power battery pack[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2024, **42**(2): 260–268.
- [11] Zhang F R, Wang P W, Yi M F. Design optimization of forced air-cooled lithium-ion battery module based on multi-vents[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, **40**: 102781.
- [12] 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.
- [13] E J Q, Xu S J, Deng Y W, et al. Investigation on thermal performance and pressure loss of the fluid cold-plate used in thermal management system of the battery pack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, **145**: 552–568.
- [14] Liu J H, Chen H, Huang S L, et al. Recent progress and prospects in liquid cooling thermal management system for lithium-ion batteries[J]. *Batteries*, 2023, **9**(8): 400.
- [15] Rao Z H, Qian Z, Kuang Y, et al. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, **123**: 1514–1522.
- [16] Lan C J, Xu J, Qiao Y, et al. Thermal management for high power lithium-ion battery by minichannel aluminum tubes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, **101**: 284–292.
- [17] Li Z C, Zhang Y A, Zhang S F, et al. Phase change materials for lithium-ion battery thermal management systems: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, **80**: 110259.
- [18] El Idi M M, Karkri M, Kraiem M. Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/Metal Foam composite[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, **33**: 102077.

- [19] 岳姗, 智茂永, 郑玲玲, 等. 聚乙二醇基相变材料用于电池热管理[J]. 电池, 2024, **54**(3): 325–329.
Yue S, Zhi M Y, Zheng L L, et al. Polyethylene glycol based phase change materials for battery thermal management[J]. Battery Bimonthly, 2024, **54**(3): 325–329.
- [20] 李超恩, 王嘉诚, 郝新月, 等. 相变材料强化-液冷复合式锂电池热管理研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, **44**: 1–22.
Li C E, Wang J C, Hao X Y, et al. Research progress on phase change material enhanced-liquid cooling hybrid thermal management for lithium batteries[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, **44**: 1–22.
- [21] Tang X J, Hu J, Liu T, et al. Experimental investigation on the cooling effect of fully submerged fine water mist on lithium-ion batteries in confined space[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, **239**: 122166.
- [22] Surtaev A, Vladyko I, Miskiv N, et al. Exploring heat transfer efficiency in non-boiling spray cooling[J]. International Journal of Thermofluids, 2023, **20**: 100504.
- [23] Ren Y H, Yu Z Q, Song G J. Thermal management of a Li-ion battery pack employing water evaporation[J]. Journal of Power Sources, 2017, **360**: 166–171.
- [24] Navarro P, Ruiz J, Martínez P, et al. Numerical study of an ultrasonic spray atomiser as an evaporative cooler[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, **236**: 121455.
- [25] Zhao J, Du M S, Zhang Z, et al. Thermal management strategy for electronic chips based on combination of a flat-plate heat pipe and spray cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **181**: 121894.
- [26] 黄金佐, 李兆华, 陈新文, 等. 振动工况下喷雾冷却传热性能[J]. 化工学报, 2024, **75**(12): 4523–4531.
Huang J Z, Li Z H, Chen X W, et al. Heat transfer capacity of spray cooling under vibration environment[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(12): 4523–4531.
- [27] Yang Y, Yang L J, Du X Z, et al. Pre-cooling of air by water spray evaporation to improve thermal performance of lithium battery pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, **163**: 114401.
- [28] Saw L H, Poon H M, Thiam H S, et al. Novel thermal management system using mist cooling for lithium-ion battery packs[J]. Applied Energy, 2018, **223**: 146–158.
- [29] Saw L H, Ye Y, Tay A A O. Feasibility study of Boron Nitride coating on Lithium-ion battery casing[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, **73**(1): 154–161.
- [30] Tang Z G, Liu Z Q, Li J, et al. A lightweight liquid cooling thermal management structure for prismatic batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2021, **42**: 103078.