储能系统与工程

电池箱风冷热管理系统流动传热特性的试验与数值研究

杨祖林[1]，孙文轩[2]，李明飞[2]，饶睦敏[2]，贺顺江[1]，陈 伟[2]
（[1]四川大学空天科学与工程学院，四川 成都 610065；[2]广东能源集团科学技术研究院有限公司，广东 广州 510630）

摘 要：在电池储能装置设计中，风冷是常用的结构简单、成本低廉的热管理方式。本研究以大容量磷酸铁锂储能电池箱为对象，采用试验测量与数值计算相结合的方法，研究了电池充放电过程中风冷热管理系统的耦合流动传热特性，分析了风道布局和风冷流速对热管理系统流动传热特性的影响。研究结果表明：风道设计是影响换热性能的核心因素，风冷流道长度流向距离越短，热管理作用效果越好，其中，在风速5 m/s时，短风道布局的方案二（电池横向排列+中部拓宽风道）较方案一（电池纵向布局+长直风道）电池均温低2℃左右，仅入口流通盲区存在局部温度积聚；风冷流速的调控作用同样显著，风冷流速增大可降低电池平均温度和电池间温差，但不改变各电池的温度分布形态，对于横向风道布局而言，当风冷流速增大时，各电池的温度均匀性有了大幅改善，这源于流道长度与风冷热沉的协同作用。本研究明确了流道长度优化、入口布局设计及流速调控的核心优化方向，为大容量风冷式电池箱热管理系统的设计优化提供了理论支撑与工程参考，助力提升储能系统运行安全性与经济性。

关键词：风冷热管理；储能电池；流动传热；试验测量；数值分析
doi：10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0218
中图分类号：TK 02 文献标志码：A 文章编号：2095-4239（2026）08-3131-12

Flow and heat transfer in an air-cooled battery thermal management system: Experiments and simulations

YANG Zulin[1], SUN Wenxuan[2], LI Mingfei[2], RAO Mumin[2], HE Shunjiang[1], CHEN Wei[2]
([1]School of aeronautics and astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; [2]Guangdong Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510630, Guangdong, China)

Abstract: Air cooling is a widely adopted thermal management method for battery energy storage systems due to its simple structure and low cost. This study investigates the coupled flow and heat transfer characteristics of an air-cooled thermal management system for a large-capacity lithium iron phosphate battery pack during charging and discharging cycles. A combined approach of experimental measurement and numerical simulation is used to analyze the effects of air duct layout and cooling airflow velocity on system performance. The results demonstrate that duct design is the primary factor affecting heat exchange performance. Specifically, a shorter flow length along the duct direction leads to superior

收稿日期：2026-03-17；修改稿日期：2026-05-02。
基金项目：四川省自然科学基金（2026NSFSCZY0046）。
第一作者：杨祖林（1999—），男，硕士研究生，研究方向为电池热管理技术，E-mail：1587031869@qq.com；**共同第一作者：**孙文轩（1993—），男，硕士研究生，研究方向为电池热管理技术，E-mail：sunwenxuan@geg.com.cn；**通信作者：**陈伟，教授，研究方向为能源动力领域的流动传热与冷却技术研究，E-mail：chenwei2017@scu.edu.cn。
引用本文：杨祖林, 孙文轩, 李明飞, 等. 电池箱风冷热管理系统流动传热特性的试验与数值研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3131-3142.
Citation：YANG Zulin, SUN Wenxuan, LI Mingfei, et al. Flow and heat transfer in an air-cooled battery thermal management system: Experiments and simulations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3131-3142.

thermal management. For instance, at an airflow velocity of 5 m/s, the average battery temperature in Scheme 2 (transverse battery arrangement with a widened central duct) is approximately 2℃ lower than in Scheme 1 (longitudinal battery arrangement with a straight duct). Localized temperature accumulation in Scheme 2 is limited to the flow blind zone near the inlet. Airflow velocity also plays a significant role. Increasing the airflow velocity reduces both the average battery temperature and the temperature difference between batteries, without altering the individual battery temperature distribution pattern. For the transverse duct layout, increased airflow velocity significantly improves temperature uniformity among batteries, a synergistic effect of optimized duct length and enhanced cooling capacity. This study identifies core optimization directions: duct length optimization, inlet layout design, and flow velocity regulation. The findings provide theoretical support and engineering references for the design optimization of thermal management systems in large-capacity air-cooled battery packs, ultimately enhancing the operational safety and economic efficiency of energy storage systems.

Keywords: air-cooled thermal management; energy storage battery; flow and heat transfer; experimental measurement; numerical analysis

在全球能源结构向清洁化、低碳化转型的背景下，电池储能系统凭借灵活调节、响应迅速等优势，已成为可再生能源并网消纳、电网峰谷调节及应急供电的核心支撑技术[1]。其中，磷酸铁锂电池因循环寿命长、安全性高、成本可控等特点[2-3]，被广泛应用于大容量集装箱式储能项目中。然而，电池在充放电过程中不可避免地产生热量，若热量无法及时散发或温度分布不均，将导致电池单体性能衰减速率不一致，严重时可能引发热失控，直接威胁储能系统的运行安全与使用寿命[4-5]。因此，构建高效、可靠的热管理系统，实现电池温度的精准控制与均匀分布，已成为大容量电池储能技术规模化应用的关键瓶颈。

空气冷却系统因其结构简单、成本低廉、维护便捷等优势[6]，在中低功率密度储能系统中得到普遍应用。但对于大容量电池箱而言，风道设计[7]、电池排布方式直接决定了冷却介质的流动路径与传热效率，进而影响整体热管理效果。现有研究表明，合理的风道结构可避免流场分布不均、局部热量积聚等问题出现[8-9]，电池排布方向的差异可能改变流体与电池表面的换热面积及对流强度[10]。如 Zhang 等人[11]研究发现在电池箱冷却管道中加装挡板并调整电池间距能有效提升电池热管理系统的冷却性能，能使最大温差分别减少 2.2% 和 90.8%。Fan 等人[12]对电池箱内流道结构的风管尺寸、电池间距和电池配置也做了优化，优化结果使电池最大温度降低 1.57 K、温差减少 0.8 K。Gogoi 等人[13]综述评估了优化气流分布如何显著改善电池模块间的散热和温度均匀性。王晓松等人[14]提出增设挡板、导流板、扰流板等导流结构，以进一步优化风量分配、提升送风均匀性的同时，也在电池箱热管理系统的设计、分析与优化过程中，流动传热数值计算技术发挥着不可或缺的支撑作用。

尽管已有较多学者围绕电池箱热管理系统开展了数值模拟与实验研究，但现有成果普遍存在单一维度优化、耦合机制缺失的核心局限：仅优化风道而忽略排布对气流路径的重塑作用，易导致流场与电池换热面不匹配，局部换热死角难以根除；仅调整排布而不匹配风道宽度，会造成风道内流阻失衡、流量分配不均，无法从根源上解决温度均匀性差、局部热积聚的行业痛点。同时，现有研究多面向小容量电池模组，针对大容量磷酸铁锂储能电池箱的针对性研究匮乏，尤其对电池长期充放电过程中温度均匀性的动态演变规律尚未明晰，相关结论难以直接为工程设计提供精准技术支撑。基于此，本研究以某兆瓦级集装箱储能电池舱中工程应用的 4×6 矩阵式标准电池箱（24 块磷酸铁锂单体，4×6 为工程验证最优布局）为研究对象，覆盖通信基站小型储能电池柜、兆瓦级储能舱等实际场景，聚焦电池排布与风道宽度的耦合效应，突破单一参数优

化局限；采用数值模拟与实验测试相结合的方法，对比两种设计方案的温度极值、温差及平均温度分布，揭示风道结构与排布方式的耦合传热机理，厘清风冷流速的调控规律。本研究从流道长度、流量分配与换热面积协同匹配视角出发，明晰工程在用模块的流场与温度场演化特征，为该系统及同类型小型储能电池箱的热管理优化提供理论依据与工程参考，提升储能系统运行安全性与经济性。

1　研究模型

本研究主要以某兆瓦级集装箱储能电池舱中实际应用的4×6矩阵式标准电池箱为研究对象（4×6排布为该电池舱工程最优布局构型），采用多物理场耦合分析方法，对比两种优化结构电池箱的流动换热性能。两种电池箱内部均搭载24块磷酸铁锂单电池，为该兆瓦级电池舱的标准模块单元。两种电池箱结构模型如图1所示，二者内部均置有24块磷酸铁锂单电池，且电池均通过底座、压条及铝板等协同固定于开设有多个通风口的铝制外壳内部，铝制外壳厚度为1.2 mm，为构建强制对流环境，外壳出风口均安装有一台风扇用于抽取电池箱内部的空气。在研究的两种电池箱中，所采用的单电池性能参数均保持一致，容量为117 Ah，尺寸大小为149 mm×115 mm×71 mm，标称电压为3.2 V，且都呈现4×6的矩阵式布局，同样地，所采用的风扇规格也相同，其风力直径约为116 mm。而对于两种电池箱的核心结构差异体现在两方面：其一为电池排布方向不同，模型一中电池沿风扇抽风方向呈纵向排布，模型二中电池则相对于风扇抽风方向呈横向排布；其二为通风道尺寸存在差异，模型二特意将电池箱中部区域的通风道宽度进行了拓宽设计。

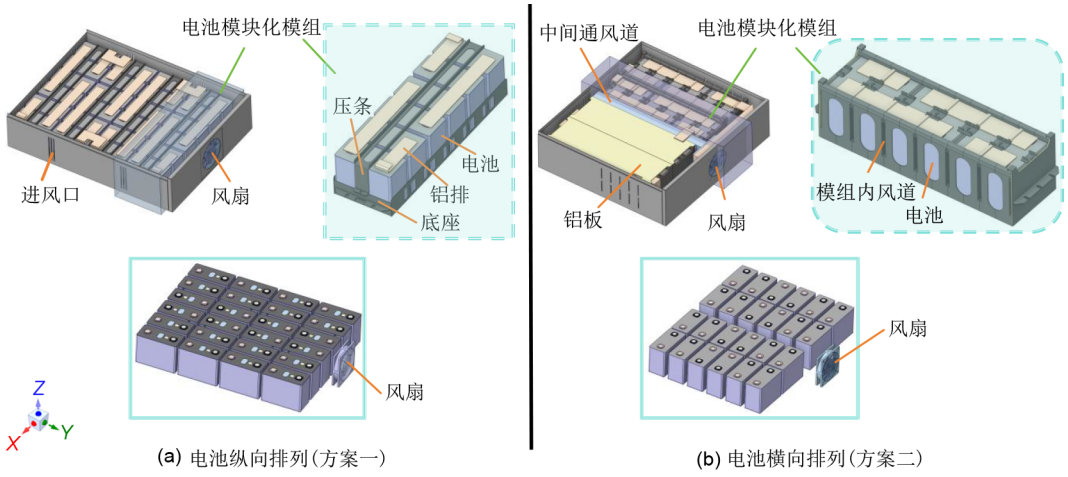


图 1　两种电池单体不同排列方式电池箱结构模型

Fig. 1　Structural model of battery box with two different arrangement modes of battery cells

2　数值计算方法

2.1　模型简化

为方便计算，降低该两种模型数值计算过程的计算量，对图1所示的两种原始电池模型分别做了模型简化处理，简化后的模型如图2所示。考虑到本研究的核心目标是探究风道设计与电池排列方式对电池箱流动换热性能的影响，故在模型简化过程中，可考虑去除两种电池箱结构中对流动换热性能无显著影响的非关键部件，如电池压条、铝排、底座等，然后对电池单体，则采用等尺寸大小的矩形体代替以实现简化，铝制外壳采用一体化建模处理，电池箱出风口的风扇则直接替换为相同直径的通风口（该通风口在后续数值计算的边界条件设置中定义为质量流量出口），最后，再对简化后的模型进行空气流通域提取，简化后的模型对应的部分结构参数亦如图2所示。

2.2　数值模型

为简化本研究的数值计算过程，确保计算聚焦于核心研究目标，本研究假设：①电池在工作过程中热物理参数（如导热系数、比热容、密度等）保持恒定；②忽略电池在工作过程中的热辐射换热效

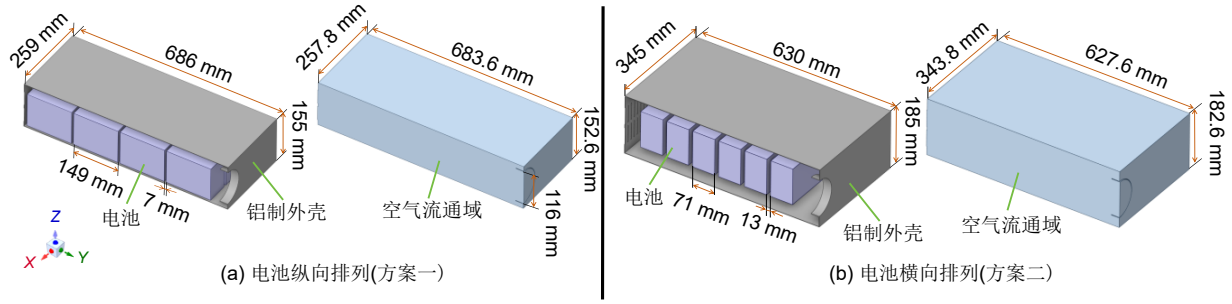


图 2 模型简化示意图

Fig. 2 Model simplification schematic

应及电化学反应对整体热行为的影响；③所采用的两种模型在计算时，各电池的放电倍率、速率及发热功率均保持一致。

对于本研究采用的电池，其发热原理可以由 Bernadi 等[15]于 1985 年提出的电池生热速率模型来表示：

$$Q = I(U - U_0) + IT_b\frac{\partial U}{\partial T_b} \tag{1}$$

根据上面公式不难看出，在电池工作过程中，电芯的发热来源主要可以分为两个部分：不可逆热与可逆热，式中等号右边的前半部分是电池不可逆热的简化数值计算公式，主要由电池工作过程中的欧姆极化、浓差极化、反应极化所产生。式中等号右边的后半部分则是电池可逆热的简化数值计算公式，在电池实际运行过程中，由于可逆热占比极小，对电池发热情况影响几乎可以忽略，所以在工程实际应用时往往不加以研究计算。另外，结合该公式可以利用恒流放电的方法测得电池在不同放电倍率下的发热功率随时间（或 SOC）变化情况，并根据本文研究计算工况的设计情况可以获得电池发热功率密度 q 随时间变化的曲线，其中：

$$q = \frac{Q}{V_b} \tag{2}$$

式中，V_b 表示本研究所采用的电池体积。根据实验以及计算获得的电池发热功率密度随时间变化曲线如图 3 所示，后续在利用数值计算软件 Fluent 进行计算时则以该数据为基础设置 UDF(user defined function)文件导入。

本研究所利用的风冷冷却方式是以空气为冷却介质，在 CFD 计算过程中，其对应的本研究所用的 k-ω 湍动能方程有：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k + S_k \tag{3}$$

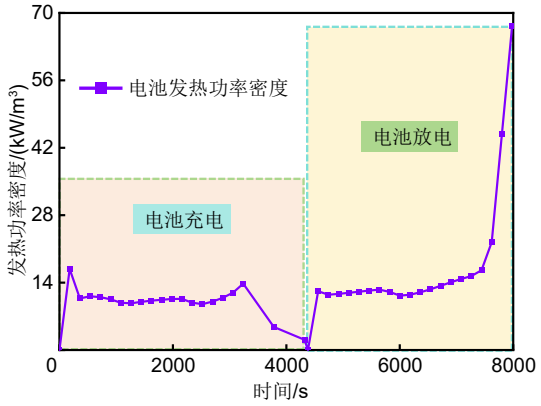


图 3 电池发热功率密度随时间变化曲线

Fig. 3 Curve of battery heat generation power density versus time

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega})\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + G\omega - Y_\omega + S_\omega \tag{4}$$

式中[16]，$\sigma_k = 0.85$；$\sigma_{\omega1} = 2.0$(近壁面)，$\sigma_{\omega2} = 1.17$(远场)。

2.3 计算方法与边界条件

本研究内容采用 Ansys Fluent 2022R1 作为数值计算工具。求解过程中开启能量方程，采用有限体积法对空气流场的控制方程进行离散与求解。经计算，电池箱风扇出口处流体在 0.5 m/s 的最低入口流速下，雷诺数即达 3714，高于圆管流动临界雷诺数 2300，表明全工况流场均为充分发展湍流，因此本研究采用湍流模型进行求解，湍流模型采用 k-ω 模型，同时开启黏性加热效应，各求解方程收敛残差设置为 10^{-8}。求解过程中，采用 Pressure-based 求解器，压力修正使用 PRESTO！格式，压力-速度用 Coupled 算法，能量方程以二阶迎风格式求解，瞬态计算定义为隐式一阶差分，时间步设为 798，每步 10 s，每步迭代次数 50，入口边界条件和出口边界条件分别定义为压力入口和质量流率出口，空气温度设为 31℃。数值计算过程中使用到的相关材料物性参数如表 1 所示。

表 1　计算仿真使用的各材料物性参数

Table 1　Material thermophysical parameters for numerical simulation

名称	空气	铝合金7075	电池单体
密度/(kg/m^3)	1.184	2810	2129
比热容/[J/(kg·K)]	1006.6	960	1174.5
热导率/[W/(m·K)]	0.025853	173	宽度方向：10.75 厚度方向：4.32 高度方向：10.49
动力黏度系数/[kg/(m·s)]	0.00001849	—	—

2.4　网格无关性验证

为排除网格因素对计算结果的影响，进而为本研究的电池模组选定精度高且适用性强的网格方案，本研究采用Ansys 2022R1 Fluent meshing对电池纵向排列的电池箱（方案一）计算模型分别划分了四套不同密度的网格，具体为网格1（284万单元）、网格2（437万单元）、网格3（556万单元）及网格4（941万单元）。基于上述四套网格，利用Fluent数值分析软件，设置电池单体在图3所示的发热功率下发热、空气出口质量流率为0.03128 kg/s的边界条件，并对结果进行对比，对比曲线如图4所示。由图可知，284万单元网格的温度在工作一段时间后显著高于其余三种网格，表明其精度较低，而其余三种网格的温升曲线差不多。综合考虑计算精度与计算量，为合理缩短计算周期，故建议选用网格3（556万单元），网格划分情况如图5所示。

另外为排除时间步设置对计算结果的影响，也对网格3密度下的网格做了相应的不同时间步10 s、12 s、15 s的计算对比，对比结果如图6所示，可

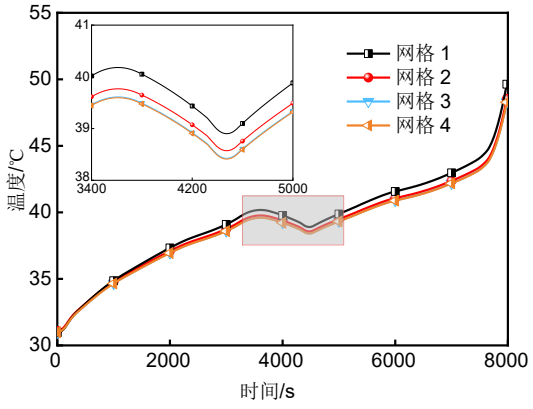


图 4　四组不同网格计算结果对比曲线

Fig. 4　Comparison curves of calculation results for four different grid schemes

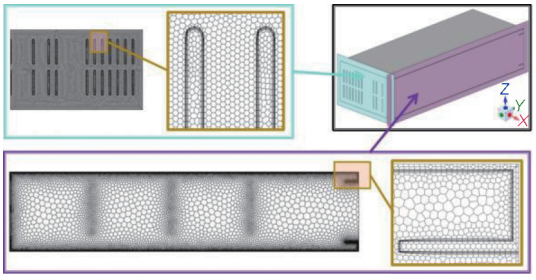


图 5　网格划分展示图

Fig. 5　Mesh generation schematic diagram

以看到，采用不同时间步的计算方式计算结果温度曲线变化几乎一致，说明了本研究采用的时间步符合要求，设置数值大小合理，不存在由于时间步设置过大而结果精度不高的问题，同样也具有合适的计算量大小。

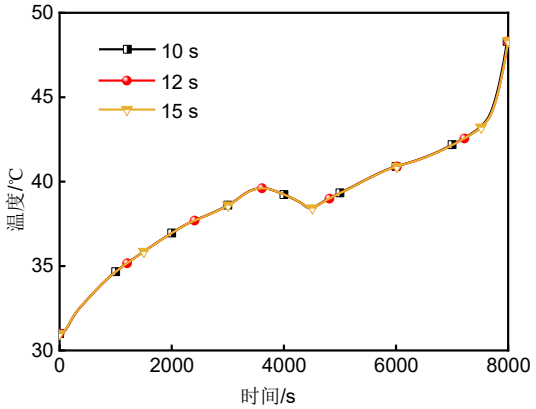


图 6　不同时间步计算结果对比曲线

Fig. 6　Comparison curves of computational results at different time steps

3　实验测量方法

为了设计对比出仅风冷式电池箱最佳的4×6排布结构，本研究就电池单体呈纵向与横向排列的电池箱实物进行了相关的工作温度测试实验。在电池

充电测试时，以234 A（1 C）恒流充电到电池单体电压3.55 V，再以80 A（0.34 C）恒流充电到3.6 V，最后以50 A（0.2 C）恒流充电到最高单体电压3.65 V，然后搁置1分钟进行放电测试，放电测试时则一直以234 A恒流放电到最低单体电压2.5 V，其中电池充电过程中风扇维持送风量约0.03128 kg/s（最大风速约5 m/s），放电过程维持约0.06256 kg/s（最大风速约10 m/s），实验过程一直采用恒流放电法进行实验测试。

实验台搭建情况如图7所示，在实验时，将电池箱放于电池充放电柜中，由充放电倍率仪控制电池充放电倍率，在电池工作过程中，遍布在电池箱内各个电池单体上的热电偶进行温度测量，然后把相应的温度数据通过数据采集仪传入到电脑内进行实时监控，在实验过程中所采用的测试工具单如表2所示，相对应的两个电池箱测试实物图及测试点位置分布如图8所示。

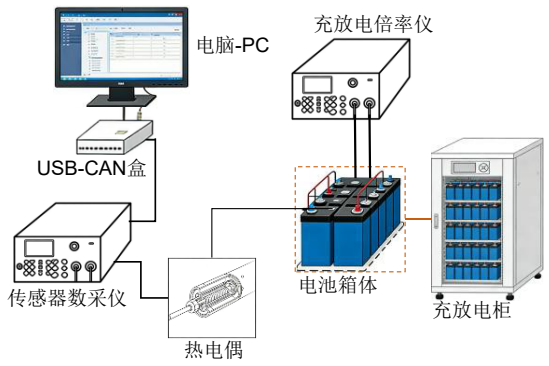


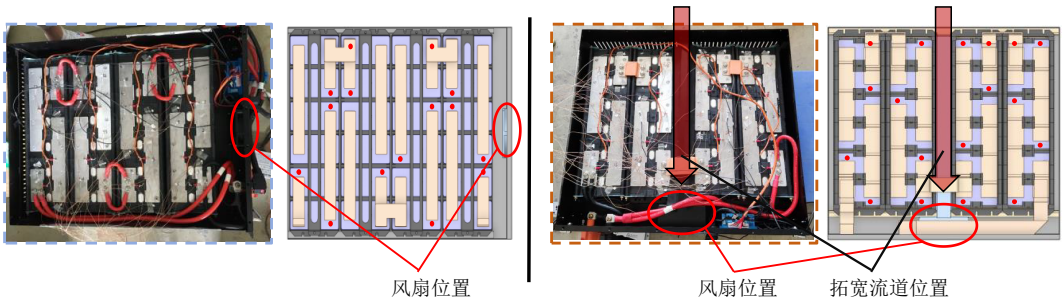
图 7 充放电电池实验台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the charge-discharge battery test bench

表 2 测试工具清单

Table 2 List of testing tools

序号	设备名称	设备型号	备注
1	充放电柜	亿晟达EST-B240V200A-2CH	—
2	多路温度巡检仪	DC5508H	测试精度误差0.2%
3	霍尔（电流传感器）	SCB11VT-300A	—
4	USBCAN盒	USBCAN-2I	—
5	辅助电源	eTM1003P	—



(a) 纵向排列(方案一) (b) 横向排列(方案二)

图 8 两种方案电池箱实物及实验与计算测试点设置分布图

Fig. 8 Battery box prototypes for two schemes and layout of experimental and numerical testing points

4 结果与讨论

4.1 风道布局对电池箱热管理系统流动传热特性的影响分析

图9为采用恒流放电法测得的两种方案测试点温度极值对比曲线。由图可知，在本实验工况下，2300~7000 s时段内方案一测试点的最高温度显著高于方案二，平均温差约1.5℃；而在2300 s之后，方案一测试点的最低温度则持续低于方案二，最大温差可达3℃。上述结果表明，实验条件下方案一电池内部测试点的温差大于方案二，该分析结果可再次由相应的温差曲线对比图10进一步验证，从图中可以看到，随着电池放电过程的推进，两种方案测试点的温差均呈逐渐增大的趋势，但方案一的温差幅值更为显著。单从电池箱内测试点的温度实验结果来说，方案一的电池温度均匀性劣于方案二。

由于本实验测试在捕捉电池不同方案的换热动

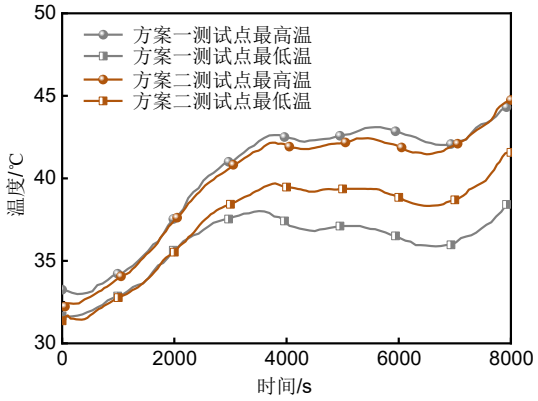


图 9　实验下两种方案测试点温度对比

Fig. 9　Temperature comparison of testing points between two experimental schemes

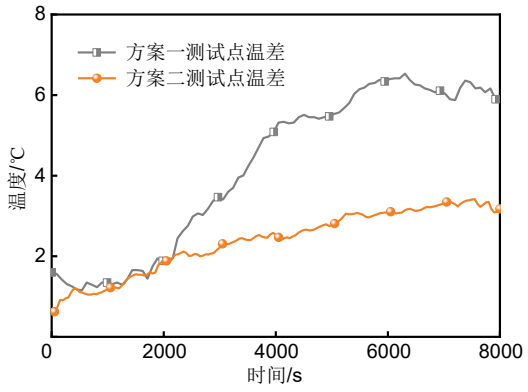


图 10　实验下两种方案测试点温度差对比

Fig. 10　Temperature difference comparison at testing points for two experimental schemes

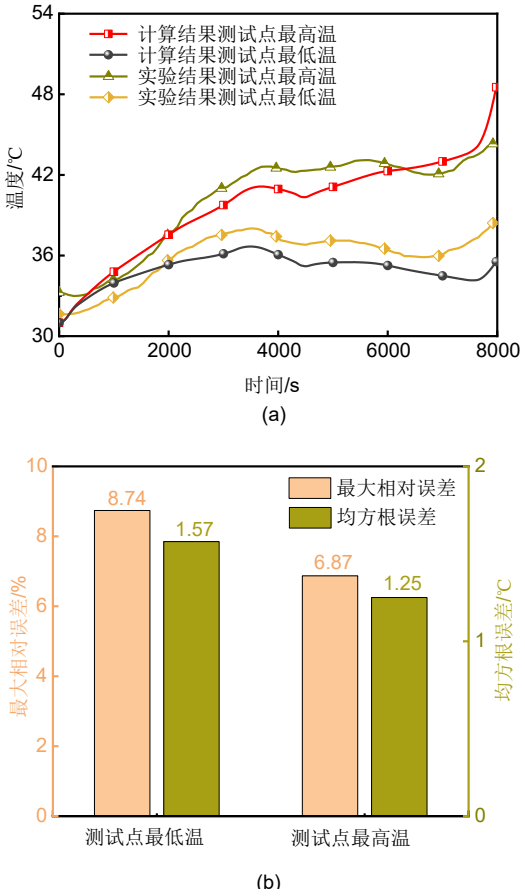


图 11　方案一实验与计算结果测试点温度对比：(a) 温度极值随时间变化；(b) 最大相对误差与均方根误差

Fig. 11　Temperature comparison at testing points between experimental and numerical results for scheme 1: (a) Variation of extreme temperatures with time; (b) maximum relative error and root mean square error (RMSE)

态过程数据时存在一定局限性，仅能够获取电池箱内电池单体上设置的测试点的温度变化情况，并不能获取整个电池箱内部温度分布及流场情况，数据采集便捷性与准确性不足。因此，本研究除通过实验探究两种方案的电池箱热性能外，还进一步采用 Ansys Fluent 2022R1 软件开展了相应的数值模拟分析，以实现对电池热行为的全面表征，图 11(a) 为采用数值计算及实验方式对方案一电池箱模型各个测试点进行计算及实验的结果对比分析情况，重点呈现了两种研究方法下电池箱内测试点温度极值的变化特征，可以看到，数值计算与实验测得的测试点最高温度、最低温度均随电池发热功率的变化呈现一致的演变趋势，在 3500 s、4500 s、7000 s 左右均出现明显波动，整体变化规律高度吻合，对于不同的温度大小可以究其原因在于数值模拟中对电池箱模型进行了简化处理，忽略了铝排、压条、底座等次要结构。为进一步量化验证数值计算与实验结果的一致性，图 11(b)给出了各关键时间节点下，仿真与实验结果中电池最高、最低温度的最大相对误差与均方根误差。由图可知，电池测试点最低温与最高温的最大相对误差分别为 8.74%、6.87%（均小于 10%），均方根误差分别为 1.57℃、1.25℃（均小于 2℃），满足实验与数值计算的误差要求。综上，数值计算结果与实验结果的变化趋势具有良好的一致性，验证了本研究数值模拟方法的可靠性与可行性。

同时，为了计算的方便性，后续数值计算全周期均采用固定风速边界条件，温度捕捉不再使用测试点，而利用数值分析直接捕捉所有电池的温度最大、平均、最低温度，图 12 为两种电池箱设计方案的数值计算结果，呈现了电池工作过程中箱内电

池的温度极值对比。由图可知，无论是最高温度还是最低温度，方案一均比方案二高出约2℃，且两者温度变化趋势一致，均与电池发热功率的变化规律相同，为进一步对比两种方案箱内电池的温度分布均匀性，图13给出了对应的电池温差对比曲线，从图中可以看到，在5500 s之前，方案一的电池温差低于方案二，表明该阶段方案一的温度均匀性更优，但随着电池持续工作发热，5500 s之后方案二的温度均匀性逐渐占优。此外，两种电池箱方案的电池均温对比情况又如图14所示，由图可知，方案二的电池均温均比方案一的电池均温低，低约2℃左右，直接说明了方案二更好的换热效果。综合上述温度极值、温度均匀性及平均温度的分析结果，方案二在电池热管理效果方面略优于方案一，整体换热性能更佳。

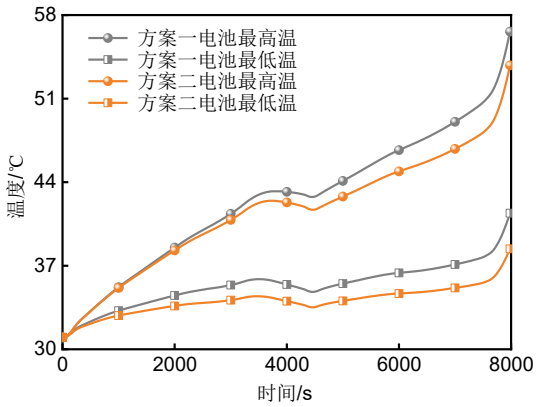


图 12 仿真计算下两种方案电池温度极值对比

Fig. 12 Comparison of extreme battery temperatures for two schemes under numerical simulation

图15直观呈现了两种方案电池箱工作过程中的电池温度分布云图。可清晰观察到，方案一电池箱内的高温区主要集中于风扇出风口区域，而方案二的温度分布更为均匀，高温区呈“心”型分布特征，结合图16空气在电池箱内流速分布图可以知道，电池高温分布位置主要处于流体流速较慢以及流道即将终止的区域，从而结合传热学原理与结构设计特点，图15温度分布差异的成因主要包括以下两方面：一方面，流体通道结构对传热效率的影响：根据传热学理论，横截面积恒定的换热通道中，流体传热效率会沿流动方向逐渐衰减，这一规

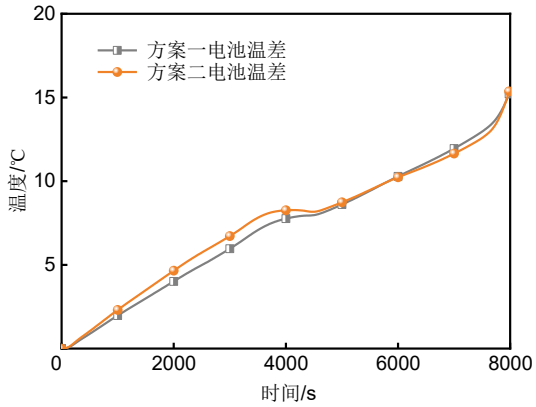


图 13 仿真计算下两种方案电池温差对比

Fig. 13 Temperature difference comparison of two schemes in simulation

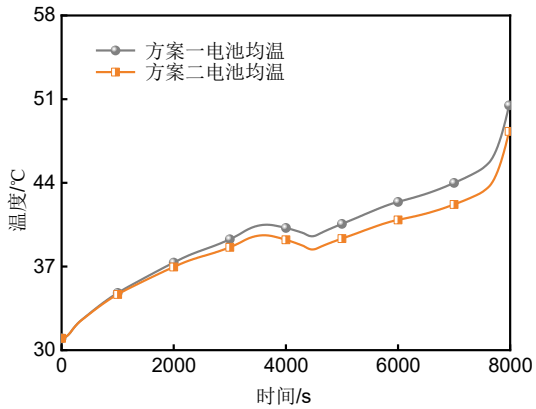


图 14 仿真计算下两种方案电池均温对比

Fig. 14 Average temperature comparison of two schemes in simulation

律与本研究电池模组的流体通道特性高度契合，方案一采用较长的直通风道设计，导致大量换热效率已衰减的流体流经风扇出风口区域，最终形成温度积聚，而方案二通过中间拓宽的流体通道设计，显著缩短了有效换热流道长度，提升了流体与电池的传热效率，从而实现更均匀的温度分布；另一方面，冷却介质入口布局的影响：这一因素在方案二中体现得尤为显著，方案二电池箱的空气入口存在流通盲区（俯视图下壳体的右上角与右下角区域），该区域流体流通量较少，换热不充分，导致温度积聚现象相对明显。因此，在该类型电池箱的工程设计中，需充分考量流体通道的长度优化、宽度匹配，以及冷却介质进出口的布局合理性，以实现更优的温度控制效果。

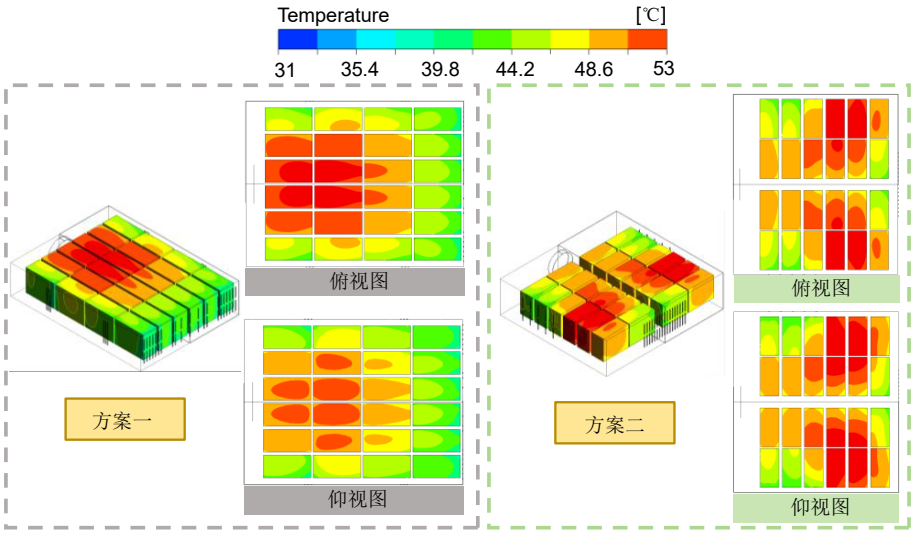


图 15　两种方案在电池工作结束时电池温度分布云图

Fig. 15　Temperature contours of two schemes at the end of battery operation

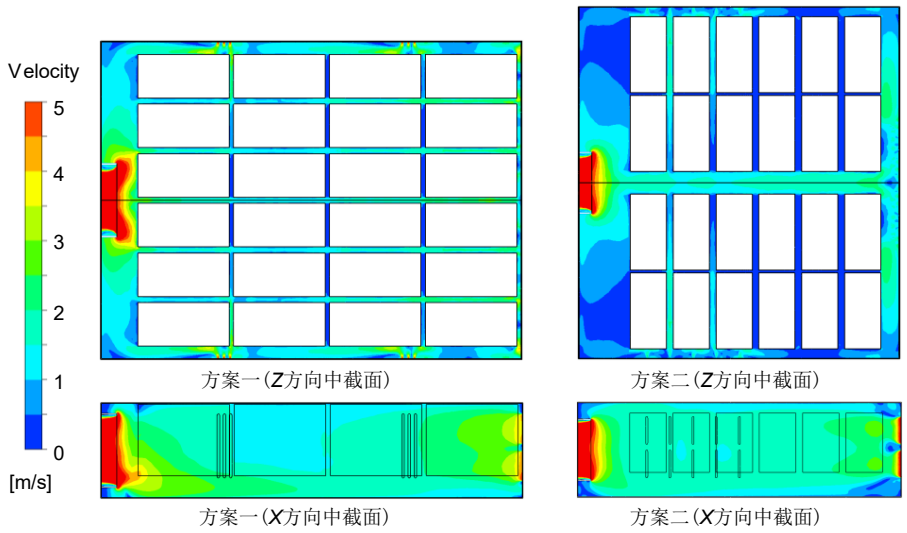


图 16　两种方案在电池箱工作过程中流体流速分布云图（*X*与*Z*方向中截面）

Fig. 16　Flow velocity contours in the battery box during operation for two schemes (*X*-*Z* mid-planes)

4.2　风冷流速对电池箱热管理系统流动传热特性影响分析

为进一步了解风冷流速是否改变电池箱内部流体流动情况，从而导致采用两种不同结构对电池热管理换热效果影响不同，该部分研究对两种结构分别进行了风冷流速0.5 m/s、1 m/s、2 m/s、5 m/s、10 m/s的计算，并做了相应的分析。图17所示为两种方案不同冷却介质流速下电池平均温度对比情况，由图可以看到，随着冷却介质流速的增大，两种方案的电池平均温度均逐渐降低；且在本研究的流速取值范围内，方案二的电池平均温度始终低于方案一，体现出稳定的换热优势。其各自流速下的两种电池箱方案内电池温差又如图18所示，从图中可以清晰观察到，随着冷却介质流速的增大，两种方案的温差差值逐渐缩小，其中10 m/s流速下，在电池工作到4000 s时出现了由方案二温差大于方案一到方案一温差大于方案二的转变，说明流体介质流速变化虽未改变两种方案换热能力的优劣排序，但对调控两种方案电池箱内的电池温差及温度场均匀性具有明显作用。

图19进一步呈现了风冷流速0.5 m/s与10 m/s下两种方案电池箱内流体流速分布情况，在这种等比例放大流速与云图尺度后的结果对比展示下，可以明显看到采用10 m/s流速的电池箱内部受扰流影响的流体流速明显要比0.5 m/s流速的小（云图

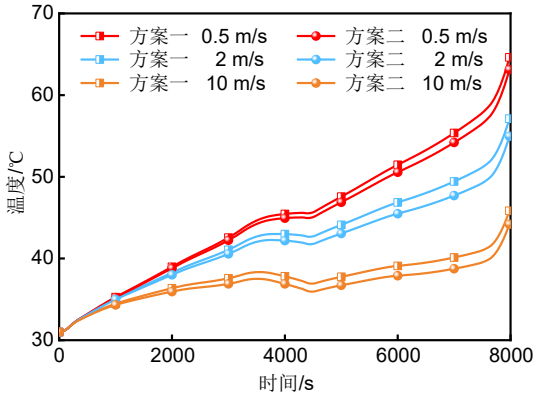


图 17 两种方案在三种不同冷却介质流速下电池平均温度对比曲线

Fig. 17 Comparison curves of average battery temperature under three different cooling medium flow rates for two schemes

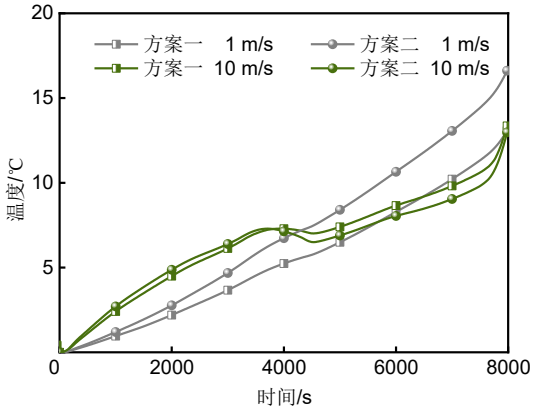


图 18 两种方案在两种不同冷却介质流速下电池温差对比曲线

Fig. 18 Temperature difference comparison curves for two schemes under two cooling medium flow rates

中蓝色区域的面积大小），说明在电池箱内高温区域，流速较快时，其冷却介质与电池单体的有效换热接触面积较流速较慢得多，加之空气流速提升本身会直接强化换热效果，故而随着流速增大，会显著改变电池箱内温差分布特征，将该流场规律结合 4.1 节总结的两个对电池箱内换热效果影响的因素，也就解释了图 18 曲线中有两种方案电池温差大小出现反转现象的原因。

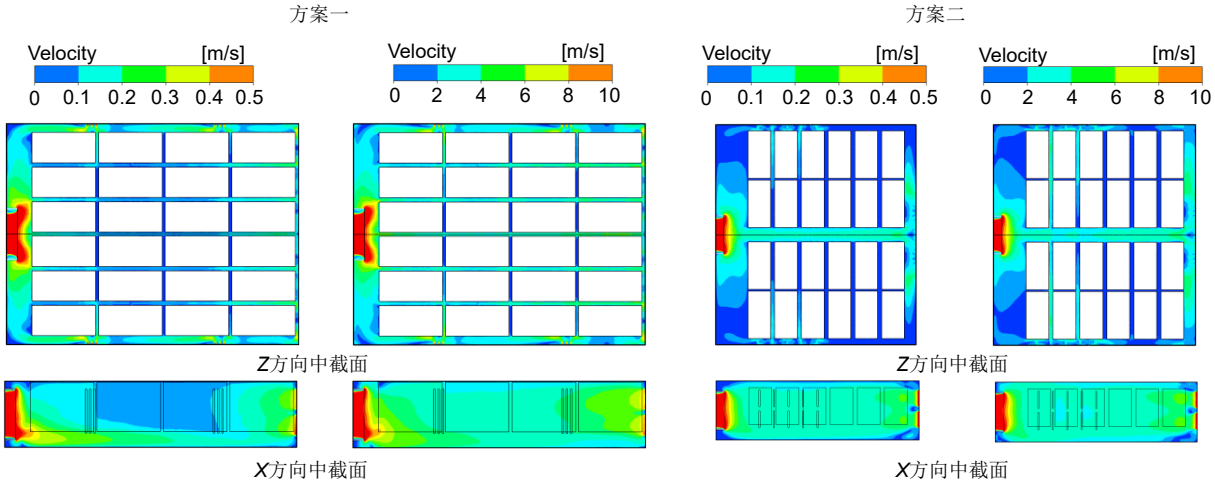


图 19 两种方案在两种空冷流速下电池箱内流体流速分布云图

Fig. 19 Flow velocity contours in the battery box under two air-cooling flow rates for two schemes

图 20 为两种电池箱设计方案的流体出口温度对比结果，由图可知，两种方案的出口温度随冷却介质流速的变化规律与前文所述的电池温差变化特征具有一致性：随着流速的增大，出口温度呈现明显的转折特征-低流速阶段方案二的出口温度高于方案一，而当流速达到一定阈值后，方案一的出口温度反超方案二。这一现象表明，冷却介质流速对不同方案中流体的携热能力也具有显著调控作用，直接影响流体带走电池热量的效率。

结合图 21 所示的不同流速下电池箱温度分布云图进一步说明：冷却介质流速的增大仅改变电池箱内电池的温度数值高低，电池间温差差值大小，并未改变温度分布的整体形态特征，即温度分布的核心区域与分布趋势始终保持稳定。

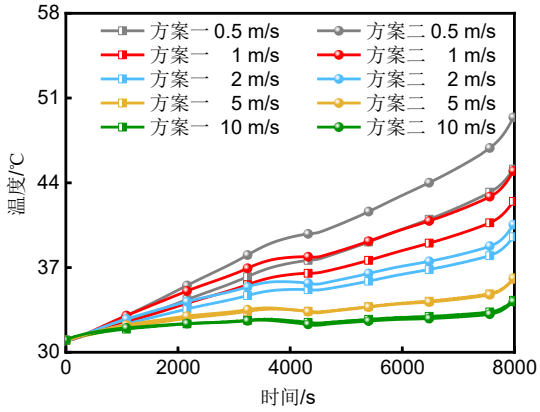


图 20　两种方案在不同冷却介质流速下电池箱出口温度对比

Fig. 20　Outlet temperature comparison of battery box for two schemes under different cooling medium flow rates

5　结　论

本研究针对大容量集装箱式风冷电池箱热管理系统的设计需求，以两种具有不同电池排布方向（顺向/横向）和通风道宽度（直通风道/中部拓宽风道）的电池箱为研究对象，采用数值模拟与实验测试相结合的方法，系统探究了风道设计及冷却介质流速对电池箱流动传热特性的影响，明确了换热性能优化的核心方向，主要结论如下。

风道设计是影响电池箱换热性能的核心因素，具体体现在两方面：其一，从流道结构来看，依据传热学理论，流体传热效率会沿流动方向逐渐衰减。方案一采用长直风道设计，导致换热能力相对较为饱满后的流体在风扇出风口区域积聚，造成局部高温；而方案二通过中部拓宽风道的设计，缩短了有效换热流道长度，显著提升了流体与电池的传热效率，实现了更均匀的温度分布。其二，从入口布局来看，冷却介质入口的结构设计直接影响箱内流量分配，方案二虽因入口存在流通盲区，局部出现温度积聚现象，但整体流场分配更均衡，最终实现了更优的全局温度控制效果。

风冷流速对热管理效果的调控作用也同样显著：其一，流速增大可有效降低两种方案的电池平均温度，但不会改变电池温度分布的整体形态；其二，在本研究设定的 0.5~10 m/s 流速范围内，方案二的换热优势始终保持稳定，流速变化并未改变两种方案换热能力的优劣排序。此外，流速对电池温差及温度均匀性的调控效果突出：随着流速增大，两种方案的温差差值逐渐缩小，在 10 m/s 高流速工况下，还会出现方案二与方案一的温差反转现象。具体而言，高流速能减少电池箱内受扰流影响的低流速区域，增加冷却介质与电池单体的有效换热接触面积，同时强化介质的携热能力，最终有效改善电池温度均匀性。

本研究成果为大容量风冷式电池箱热管理系统的优化设计提供了直接技术支撑，明确了流体通道长度优化、宽度拓宽、冷却介质进出口布局、流速优化的核心方向。后续可进一步拓展研究不同电池矩阵排布方式、风道截面形状、多风扇协同配置及

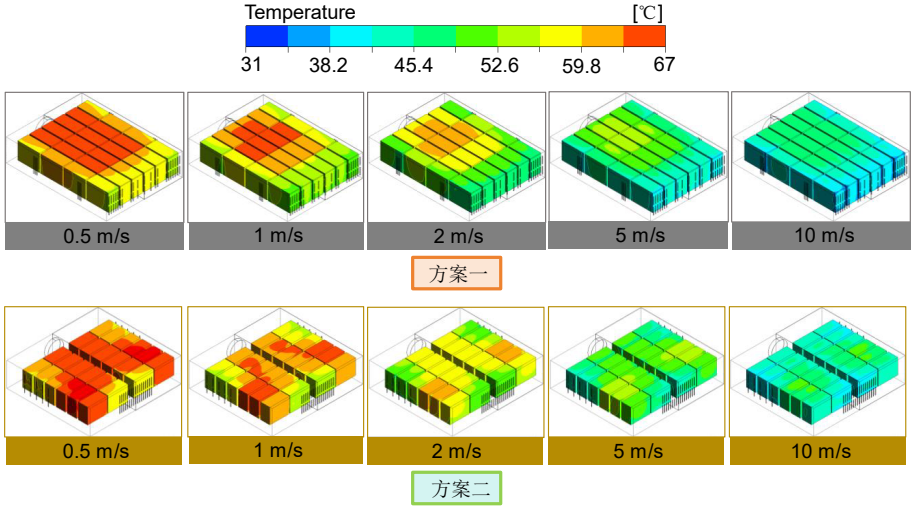


图 21　两种方案在不同冷却介质流速下电池工作结束时电池温度分布云图

Fig. 21　Temperature contours of two schemes at the end of battery operation under various cooling medium flow rates

极端工况下的换热性能，为更高功率密度电池储能装置的热管理系统设计提供更全面的理论依据与工程参考。

符号说明

I—— 电池工作电流，A
k—— 湍动能，m^2/s^2
Q—— 单体电池总生热功率，W
q—— 电池体积生热率，W/m^3
T_b—— 电池工作温度，K、℃
t—— 电池工作时间，s
U—— 电池工作端电压，V
U_0—— 电池开路电压，V
V_b—— 单体电池体积，m^3
ρ—— 流体（空气）密度，kg/m^3
u_j—— 流体j方向的速度分量，m/s
μ—— 流体动力黏度，kg/(m·s)
ω—— 比耗散率，s^{-1}
σ_k、σ_ω—— 湍流普朗特数（量纲为1）
G_k、G_ω——湍动能、比耗散率生成项，$kg/(m\cdot s^3)$
Y_k、Y_ω—— 湍动能、比耗散率耗散项，$kg/(m\cdot s^3)$
S_k、S_ω—— 湍动能、比耗散率源项，$kg/(m\cdot s^3)$

参考文献

[1] VERMA S P, SARASWATI S. Numerical and experimental analysis of air-cooled Lithium-ion battery pack for the evaluation of the thermal performance enhancement[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 108983. DOI:10.1016/j.est.2023.108983.

[2] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536. DOI: 10.1016/j. apenergy. 2014. 09.081.

[3] FENG X N, OUYANG M G, LIU X, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review[J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267. DOI: 10.1016/j. ensm.2017.05.013.

[4] WANG M W, TENG S Y, XI H, et al. Cooling performance optimization of air-cooled battery thermal management system[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117242. DOI:10.1016/j. applthermaleng.2021.117242.

[5] SHI Y, AHMAD S, LIU H Q, et al. Optimization of air-cooling technology for $LiFePO_4$ battery pack based on deep learning[J]. Journal of Power Sources, 2021, 497: 229894. DOI: 10.1016/j. jpowsour.2021.229894.

[6] SAW L H, YE Y H, TAY A A O, et al. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling [J]. Applied Energy, 2016, 177: 783-792. DOI: 10.1016/j. apenergy.2016.05.122.

[7] 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.

[8] 姜洋, 龙曦, 朱禹, 等. 风冷电池包风道设计与仿真优化分析[J]. 汽车工程师, 2020(5): 27-30. DOI: 10.3969/j. issn. 1674-6546.2020. 05.008.
JIANG Y, LONG X, ZHU Y, et al. Air duct design and simulation optimization analysis of air-cooled battery pack[J]. Tianjin Auto, 2020(5): 27-30. DOI:10.3969/j.issn.1674-6546.2020.05.008.

[9] 董晨, 魏学哲, 戴海峰, 等. 车用电池包风道设计与仿真[J]. 机电一体化, 2013, 19(9): 82-88. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-080x. 2013.0 9.016.
DONG C, WEI X Z, DAI H F, et al. Simulation and design of the air duct of lithium-ion battery pack[J]. Mechatronics, 2013, 19(9): 82-88. DOI:10.3969/j.issn.1007-080x.2013.09.016.

[10] 王一凡, 杨哩娜, 牛钰森, 等. 多轴重载特种车的电池排布及散热研究[J]. 弹箭与制导学报, 2025, 45(4): 466-473.
WANG Y F, YANG L N, NIU Y S, et al. Research on battery layout and cooling for multi-axle heavy-duty vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2025, 45(4): 466-473.

[11] ZHANG F R, YI M F, WANG P W, et al. Optimization design for improving thermal performance of T-type air-cooled lithium-ion battery pack[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103464. DOI:10.1016/j.est.2021.103464.

[12] FAN H, WANG L, CHEN W, et al. A J-type air-cooled battery thermal management system design and optimization based on the electro-thermal coupled model[J]. Energies, 2023, 16(16): 5962. DOI:10.3390/en16165962.

[13] GOGOI B, DEKA H, SHARMA P, et al. Maximizing efficiency: Exploring the crucial role of ducts in air-cooled lithium-ion battery thermal management[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, 150(5): 3121-3138. DOI:10.1007/s10973-024-13883-1.

[14] 王晓松, 游峰, 张敏吉, 等. 集装箱式储能系统数值仿真模拟与优化[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 577-582. DOI: 10.12028/j. issn.2095-4239.2016.04.027.
WANG X S, YOU F, ZHANG M J, et al. Numerical simulation and parametric optimization on the container type energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 577-582. DOI:10.12028/j.issn.2095-4239.2016.04.027.

[15] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12. DOI:10.1149/1.2113792.

[16] MENTER F. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows[C]//23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. 06 July 1993 - 09 July 1993, Orlando, FL. Reston, Virginia: AIAA, 1993: 2906. DOI: 10.2514/6.1993-2906.