DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.151 **中图分类号**：TM911 **文献标志码**：A

敞开式锂离子电池模块的风冷散热研究

田刚领[1]，罗 军[2]，陈 晨[1]，李 铜[1]，赵晓亮[1]
(1.平高集团储能科技有限公司，天津 300000；2.平高集团有限公司，平顶山 467000)

摘要：温度是影响锂离子电池储能系统安全和运行效率的主要因素之一，良好的热管理设计有助于改善储能系统电芯运行的温度环境，是高安全、高效储能系统的基本保障。为改善电芯运行的温度环境，设计了一种适用于锂离子电池储能系统的敞开式风冷散热电池模块，采用数值模拟方法探究了风扇的风量、散热口琴管截面形状以及电芯与口琴管接触导热系数等对风冷散热电池模块散热性能的影响。结果表明：风扇风量由0.400 m^3/min增大到2.400 m^3/min时，风冷散热电池模块最高温度和最低温度均先明显下降，然后趋于平衡，电池模块最大温差由9.3 ℃降低到6.6 ℃，降低了2.7 ℃；风冷散热电池模块散热口琴管截面形状由均布状态优化为分区布局，提高了口琴管风量分配的合理性；在风扇风量为2.000 m^3/min的条件下，电池模块最大温差由6.8 ℃降低到4.5 ℃，温差缩小了33.8%。此外，在一定范围内，通过增大电芯与口琴管间的接触导热系数，可以有效降低风冷散热电池模块的整体温升。

关键词：锂离子电池；敞开式风冷散热电池模块；热管理；仿真优化

Study on Air-cooled Heat Dissipation of Open-type Lithium-ion Battery Module

TIAN Gangling[1], LUO Jun[2], CHEN Chen[1], LI Tong[1], ZHAO Xiaoliang[1]
(1. Pinggao Group Energy Storage Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 2.Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Temperature is the main factor affecting the safety and operating efficiency of lithium-ion battery energy storage systems, and an excellent thermal management design is helpful in improving the operating temperature environment of batteries, which is the basic guarantee for the safety and high efficiency of energy storage systems. To improve the operating temperature environment of batteries, an open-type air-cooled heat dissipation battery module used in lithium-ion battery energy storage systems was designed, and a numerical simulation method was used to study the effects of fanflow rate, cross-sectional shape of heat dissipation harmonica tubes and the contact heat transfer coefficient between the battery and harmonica tubes on the heat dissipation performance of the air-cooled battery module. Results showed that as the fan flow rate increased from 0.400 m^3/min to 2.400 m^3/min, both the maximum and minimum temperatures of the air-cooled heat dissipation battery module decreased considerably until an equilibrium was reached. The maximum temperature difference of the battery module decreased from 9.3 ℃ to 6.6 ℃, with a decrease of 2.7 ℃. The air flow distribution rationality of harmonica tubes was improved by changing the harmonica tube cross-sectioal shape from uniform distribution state to partitioned layout, which reduced the maximum temperature difference of the battery module from 6.8 ℃ to 4.5 ℃ at a fan flow rate of 2.000 m^3/min, with a substantial decrease of 33.8%. In addition, the overall temperature rise of the air-cooled heat dissipation battery module can be effectively reduced by increasing the contact heat transfer coefficient between the battery and harmonica tubeswithin a certain range.

Keywords: Lithium-ion battery; open-type air-cooled heat dissipation battery module; thermal management; simulation and optimization

收稿日期：2024-09-26；**修回日期**：2024-11-21；**录用日期**：2024-12-23；**网络首发日期**：2025-01-03

储能作为解决风电、光伏发电间歇性和波动性问题，增强能源系统供应安全性和灵活性的重要手

段，发展迅速。锂离子电池储能是目前应用最广泛的技术之一，但热流密度大且散热困难，易导致电芯温升高、温差大，从而影响安全和使用性能[1-2]。锂离子电池的热管理至关重要，根据冷却介质不同，锂离子电池散热技术可分为风冷、液冷、相变及热管散热[3-8]，其中风冷散热结构简单、经济性好，是锂离子电池散热的主要研究方向，但风冷散热换热系数低、流量分配不均匀，难以做到精细化的热管理[9-11]。液冷散热采用冷却效率更高的冷却液，具有散热能力强、能耗低等优点，也是目前最常用的散热方式之一，但液冷系统存在价格高、易漏液、安装和维护困难等问题，多用于对热管理要求更高或高倍率储能系统中。

国内外研究人员针对锂离子电池风冷散热开展了大量研究，主要集中在散热系统流动参数分析、散热流道优化方面。白晓辉等[12]开展了风冷散热电池模块多风道散热模型数值计算，提出采用挡风板将单风道系统分割为多风道系统的分层冷却方法，保证了电池组最高温度和最大温差在合理范围内；李岳峰等[13]研究了进口速度、高度和温度对风冷散热电池模块中风冷系统散热性能的影响，提出“侧向间隙进风，前端出风”的新型强制风冷散热系统；Yu 等[14]提出带翅片的风冷散热方式，进行风冷散热电池模块热管理，对单进出风口和双进出风口 2 种空气进出形式、光滑和翅片 2 种表面形式的散热特性进行了仿真对比，确定了双进风口和翅片散热的设计方案；Oyewola 等[15]在标准 Z 型风冷散热电池模块散热系统上引入阶梯状发散腔，并通过优化发散腔内台阶数量和长度获得最优的气流分布形态，提高了风冷散热电池模块风冷系统的冷却效率；Lin 等[16]采用正交试验结合单因素分析法对锂离子电池热管理系统进行了优化，基于通道高度、空气流速和通道数量等对电池温度分布影响规律的分析，提出一种错列逆流风冷结构，增强了风冷散热电池模块的导热效率，有效减小了电池的局部温差。

上述研究多针对散热结构简单或容量小的风冷散热电池模块开展研究，对工程实践指导作用有限。本文对工程应用的风冷散热电池模块热管理进行研究，设计出一种敞开式散热结构的风冷散热电池模块，通过仿真分析风扇风量、散热口琴管截面形状与接触导热系数等对风冷散热电池模块散热性能的影响，形成风冷散热电池模块热管理系统优化设计，对指导工程实践意义重大。

1 风冷散热电池模块散热结构设计

敞开式风冷散热电池模块结构设计如图 1 所示，由底板、电芯、口琴管、风道、风扇等组成。风冷散热电池模块成组方式为 2 并 16 串，电芯额定容量 220 A·h，电芯尺寸为高度 204 mm、宽度 174 mm、厚度 52 mm；电芯间距即口琴管厚度 9 mm；电池模块总体尺寸为长度 1 100 mm、宽度 460 mm、高度 206 mm；风道长度 940 mm、宽度 80 mm、高度 204 mm。风冷散热电池模块采用开放式结构，顶部和两侧无箱体；电池管理系统安装在电池模块前端面板上，用于采集电芯电压和温度信息；风道与电池模块前端面板上的风扇连接。电池模块散热时，气流从电池模块两侧的口琴管进入风道，由风扇抽出。电芯和风道之间采用泡棉密封，避免气体泄露。

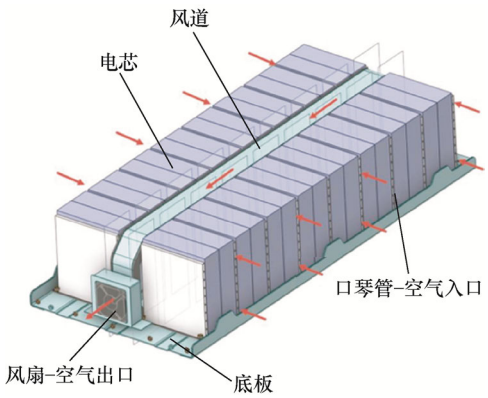


图 1 风冷散热电池模块结构

Fig. 1 Structure of air-cooled heat dissipation battery module

2 热仿真方法

2.1 控制方程

电芯散热仿真常用的模型有电化学-热耦合模

型、等效电路–热耦合模型、共轭传热模型等，其中电化学–热耦合模型精度最高，可以给出介观尺度下电芯各部分的产热速率和宏观尺度下电芯的温度分布[17]，但计算量大，电芯仿真耗时较长，极少直接用于电池模组大规模仿真。等效电路–热耦合模型无法求解流体域流动过程，对流换热系数需要预先人为设定，难以精确表征固体与气体耦合区域复杂的流体换热特性，不适用于冷却结构优化类研究。共轭传热模型能够同时求解固体导热与流体流动换热，直观获得电芯温度场，便于开展风冷散热电池模块散热结构的仿真分析。因此，本文选用固体–流体共轭传热模型进行仿真计算。在风扇驱动下，空气围绕电芯和口琴管表面流动换热，可以看作连续介质的黏性不可压缩流动，遵循连续性方程、动量方程和能量方程，即

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial \omega}{\partial z}=0 \tag{1}$$

$$\begin{cases}\rho\dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+\omega\dfrac{\partial u}{\partial z}=f_x-\dfrac{\partial P}{\partial x}+\\ \qquad\mu\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\ \rho\dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+\omega\dfrac{\partial v}{\partial z}=f_y-\dfrac{\partial P}{\partial y}+\\ \qquad\mu\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\ \rho\dfrac{\partial \omega}{\partial t}+u\dfrac{\partial \omega}{\partial x}+v\dfrac{\partial \omega}{\partial y}+\omega\dfrac{\partial \omega}{\partial z}=f_z-\dfrac{\partial P}{\partial z}+\\ \qquad\mu\left(\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}+\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}\right)\end{cases} \tag{2}$$

$$\rho C_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+\omega\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\dot{\phi} \tag{3}$$

式中：u、v、ω 分别为空气流速在 x、y、z 方向的分量；ρ 为空气密度；f 为体积力；μ 为空气动力黏度系数；P 为空气压力；T 为电芯温度；t 为时间；C_{p} 为空气定压比热容；λ 为空气导热系数；$\dot{\phi}$ 为空气热源项。

风冷散热电池模块散热时，固体传热包括电芯导热、口琴管导热、流–固耦合传热。其中，电芯内部产生的热量通过热传导传递到电芯表面，其能量控制方程为

$$\rho_{\mathrm{S}}C_{\mathrm{PS}}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_{\mathrm{S},x}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\lambda_{\mathrm{S},y}\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\lambda_{\mathrm{S},z}\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\dot{\phi}_{\mathrm{S}} \tag{4}$$

式中：ρ_{S} 为电芯密度；C_{PS} 为电芯比热容；$\lambda_{\mathrm{S},x}$、$\lambda_{\mathrm{S},y}$、$\lambda_{\mathrm{S},z}$ 为电芯各向异性导热系数；$\dot{\phi}_{\mathrm{S}}$ 为电芯热源项。

口琴管为无热源部件，与接触电芯和周围空气存在换热关系，口琴管内部热传导能量控制方程为

$$\rho_{\mathrm{H}}C_{\mathrm{PH}}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_{\mathrm{H}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{5}$$

式中：ρ_{H} 为口琴管密度；C_{PH} 为口琴管比热容；λ_{H} 为口琴管导热系数。

电芯产生的热量通过电芯和口琴管表面传递到空气中，在固体和流体之间为耦合传热。在流–固耦合计算过程中，将流–固耦合面(耦合面)自动设置为整个区域的内部面。整个区域采用同一组方程求解，只是热源不同，在耦合面的固体侧和流体侧满足温度连续与热流密度连续，即

$$\begin{cases}T_{\mathrm{s}}=T_{\mathrm{f}}\\ q_{\mathrm{s}}=q_{\mathrm{f}}\end{cases} \tag{6}$$

式中：T_{s} 为口琴管表面温度；T_{f} 为口琴管内空气温度(耦合面相邻低温区域的温度)；q_{s} 为口琴管表面热流密度；q_{f} 为口琴管内空气热流密度。

流–固耦合计算的关键是实现固体区域和流体区域通过耦合面的热量传递。由能量守恒可知，耦合面传递的热量等于其相邻低温区域吸收的热量，其能量控制方程为

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial \xi}=h(T_{\mathrm{w}}-T_{\mathrm{f}}) \tag{7}$$

式中：ξ 为固体向外指向流体的外法向；h 为耦合面的换热系数，通过流动仿真自动计算得到；T_{w} 为耦合面温度。

2.2 电芯物理参数

测量电芯各材料的比热容，并对其进行质量加权平均，得到 C_{PS}，具体公式为

$$C_{\mathrm{PS}}=\frac{1}{m_{\mathrm{b}}}\sum C_i m_i \tag{8}$$

式中：m_b为电芯质量；i为电芯组成材料，包括正极片、隔膜、负极片，取值为 3；C_i、m_i分别为电芯组成材料的比热容和质量。

电芯由正极片、隔膜、负极片叠片而成，在 x、y、z 三个方向上传热路径不同，导热系数呈各向异性。其中，x 轴(电芯厚度)方向的导热系数 $\lambda_{S,x}$ 可以采用串联计算公式，即

$$\frac{d}{\lambda_{S,x}}=\sum_{i=1}^{n}\frac{d_{xi}}{\lambda_i} \tag{9}$$

式中：d 为电芯总厚度；d_{xi}为电芯组成材料在 x 轴方向上的厚度；λ_i 为电芯组成材料的导热系数；n 为电芯组成，取值为 3。

y 轴(电芯高度)和 z 轴(电芯宽度)方向的导热系数 $\lambda_{S,y}$、$\lambda_{S,z}$ 可以采用并联计算公式，即

$$\begin{cases}\lambda_{S,y}=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\frac{d_{yi}}{d}\\ \lambda_{S,z}=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\frac{d_{zi}}{d}\end{cases} \tag{10}$$

式中，d_{yi}和 d_{zi}分别为电芯组成材料在 y 轴和 z 轴方向上的厚度。

$\dot{\phi}_S$ 可以根据电芯直流内阻 R_s进行计算，即

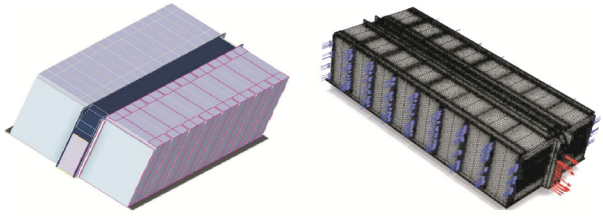
$$\dot{\phi}_S=I^2R_s \tag{11}$$

式中，I为电芯充放电电流。

仿真建模时，电芯密度为 2 260 kg/m^3，电芯 x 轴方向导热系数为 1.1 W/m·K，y 轴和 z 轴方向导热系数均为 18.0 W/m·K，比热容为 1 150 J/kg·K。电芯 50%荷电状态 SOC(state of charge)时，R_s 为 0.50 mΩ，由此可得电芯额定功率 0.5P(I=110 A)运行时的发热功率为 6 W。初始环境温度为 25 ℃。

2.3 几何模型及网格划分

风冷散热电池模块仿真模型如图 2(a)所示，仅保留电芯、口琴管、风道、风扇等关键细节，删除孔洞、倒角等细部特征，并假设：①空气视为不可压缩的理想气体；②电芯视为均匀的发热体，发热功率不变；③电芯比热容和导热系数不随温度变化。风冷散热电池模块网格划分如图 2(b)所示，网格类型为多面体网格，采用局部网格加密技术，对口琴管、风道、风扇等进行局部加密，并通过网格优化与检查，确保网格质量满足计算要求。



(a) 几何仿真模型 (b) 网络划分

图 2 风冷散热电池模块仿真模型及网格划分

Fig. 2 Simulation model and grid division of air-cooled heat dissipation battery module

表 1 给出了 4 种网格数量下，风冷散热电池模块最高温度的仿真结果，以验证网格无关性。由表可知，当网格数量达到 1 865×10^4 后，风冷散热电池模块最高温度随着网格数量的增加变化极小，进一步增加网格密度并不显著改变仿真结果，这说明结果趋于稳定，故本文选择网格数量为 1 865×10^4。

表 1 风冷散热电池模块仿真网格无关性验证

Tab. 1 Grid independence verification for simulation of air-cooled heat dissipation battery module

序号	网格数量	风冷散热电池模块最高温度/℃
1	1 439×10^4	42.1
2	1 702×10^4	42.8
3	1 865×10^4	43.4
4	2 032×10^4	43.4

3 试验验证

3.1 试验平台搭建

为验证仿真模型的准确性，搭建图 3 所示的风冷散热电池模块充放电测试平台。该平台由北京大华品耐科技有限公司型号为 PSC900-300 的充放电机、上位机、广东太安伊侨能源设备有限公司型号为 TAHW-22.5M-2 的恒温箱和风冷散热电池模块组成。其中：充放电机电压范围为 0~900 V，电流范围为−300~300 A；上位机采用 CTSMoniter 软件进行风冷散热电池模块充放电参数设置、运行控制

及数据处理；恒温箱可控温度范围为−20~80 ℃，升温速率≥3 ℃/min。

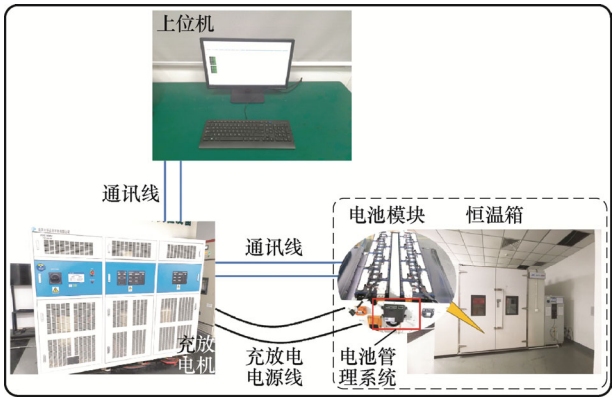


图 3　风冷散热电池模块充放电测试平台设计

Fig. 3 Design of air-cooled heat dissipation battery module charging and discharging testing platform

测试时，风冷散热电池模块置于恒温箱中，温度控制在 25±2 ℃，采用电池管理系统采集该电池模块的电压、温度等信息，并将数据上传至上位机控制软件，进行数据处理和输出；测试过程中，风冷散热电池模块的风扇开启，对该电池模块散热，同时在电芯顶部布置 16 组热电偶，并通过电池管理系统温度采集芯片监测各电芯温度。

测试过程为：①恒温箱温度调节至 25±2 ℃，放入风冷散热电池模块静置 2 h；②风冷散热电池模块以额定功率 0.5P 放电，直至电芯达到截止电压 2.50 V 或该电池模块达到截止电压 40.00 V；③静置 2 h；④风冷散热电池模块以额定功率 0.5P 充电，直至电芯达到截止电压 3.65 V 或该电池模块达到截止电压 58.40 V；⑤静置 2 h；⑥重复步骤②的放电操作；测试结束。

3.2　仿真与试验结果对比

风冷散热电池模块各监测点温度仿真结果与试验结果对比如图 4 所示，可知整体呈现相同的变化趋势，但仿真温度与试验结果存在一定的差异。仿真建模时，将电芯简化为理想的发热源，发热量通过电芯在 50%SOC 电量时测量内阻计算得到。风冷散热电池模块充放电过程中，电芯发热量不随时间变化，但在实际应用中，电芯在充放电后期，极化内阻增大、副反应增多、发热量非线性增大，因此试验测试得到的电芯温度高于仿真结果，整体温差偏差 3.0 ℃左右。但二者变化趋势基本一致，且实测电芯温度监测点温差为 5.0 ℃，仿真温度监测点温差为 4.0 ℃，仅相差 1.0 ℃，说明仿真模型具有较高的精度。

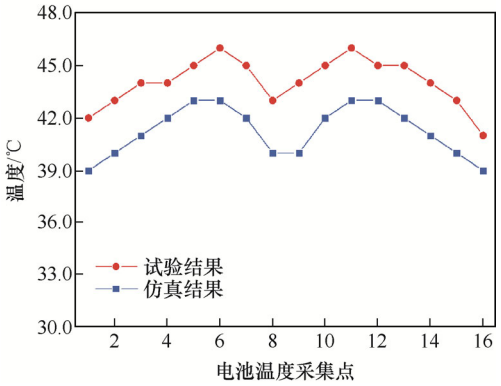


图 4　电芯监测点温度仿真与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between simulation and test results of battery temperature at sampling points

4　结果及分析

4.1　风量对风冷散热电池模块温度分布的影响

风冷散热电池模块散热时，通过风扇抽风促使气流在口琴管及中间风道内部流动，实现对电芯的散热。风扇风量的大小对风冷散热电池模块温度有着最直接的影响，工程上通过选择不同型号的风扇调节散热风量的大小。已有研究表明，在一定范围内，随着风扇风量的增大，风冷散热电池模块散热系统冷却效果明显提高[16,18]。图 5 为不同风扇风量下，风冷散热电池模块温度场仿真云图。由图可知，随着风量增大，风冷散热电池模块的电芯温度逐渐下降，且该电池模块中间部分电芯温度略高于两端电芯温度，靠近风扇的电芯温度低于远离风扇的电芯温度。

图 6 给出了电芯温度随风扇风量变化的曲线，可知随着风量增加，电芯最高、最低温度以及温差逐渐降低并趋于平衡。风量 1.200 m^3/min 时，电芯最高温度为 41.6 ℃，最大温差为 7.7 ℃；风量 1.600 m^3/min 时，电芯最高温度 39.6 ℃，最大温差

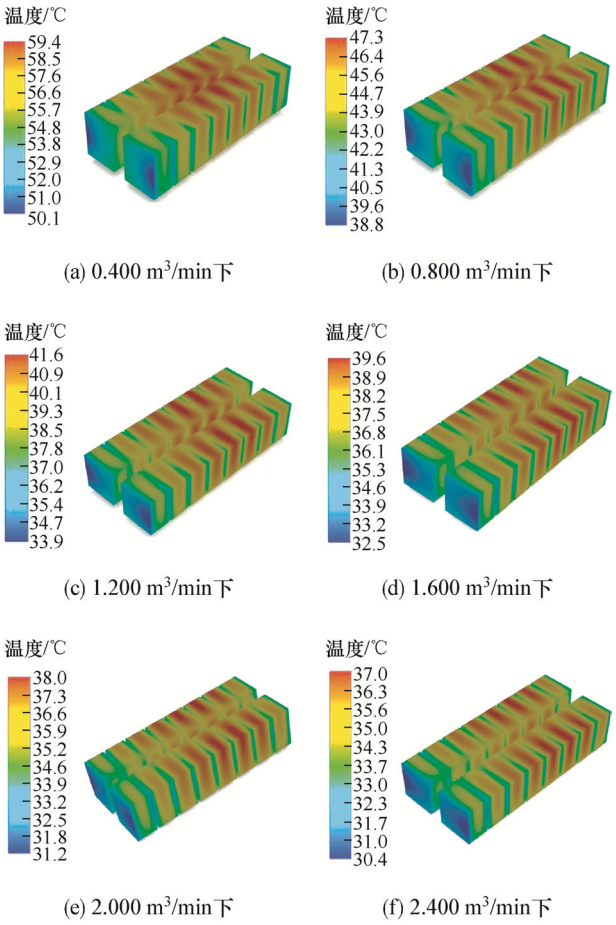


图 5 不同风量下风冷散热电池模块温度场仿真云图

Fig. 5 Cloud nephograms of temperature field for air-cooled heat dissipation battery module at different air flow rates

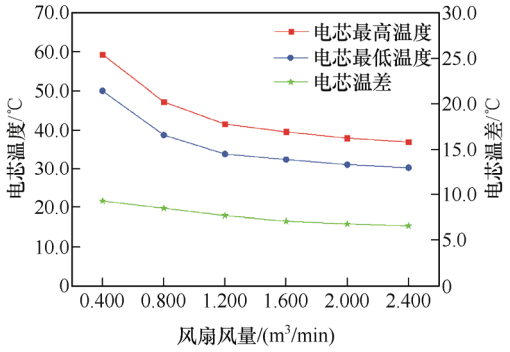


图 6 不同风量下电芯温度变化曲线

Fig. 6 Change curves in battery temperature at different air flow rates

7.1 ℃；风量 2.000 m³/min 时，电芯最高温度 38.0 ℃，最大温差 6.8 ℃，温差始终较大。综上可见，增大风扇风量有利于降低电芯温度和减小温差，但增大到一定程度后对其影响较小，且随着风量增大，通风阻力会迅速增大，导致风扇噪声和体积增大，功率也随之增大。因此进行风扇风量选择时，需综合考虑散热效果、噪声以及耗电量等因素。

按照远离风扇的顺序将口琴管依次编号为#1~#9，图 7 为 2.000 m³/min 风量时风冷散热电池模块各口琴管的风量分配。口琴管均匀分布状态下，就总体而言，距离风扇位置越远，口琴管风量越小。其中：口琴管 2 的风量最大，为 0.136 m³/min；口琴管 9 的风量最小，为 0.084 m³/min。风量分布与热负荷分布不完全匹配，如风冷散热电池模块中间的电芯热量容易集聚，需要提供更大的风量散热，与实际风量不匹配，导致该电池模块产生了较大的温差。因此，有必要优化口琴管的风量分配，以提高电芯温度的一致性。

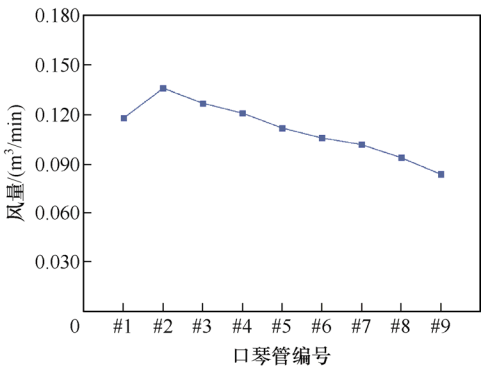


图 7 风扇风量 2.000 m³/min 时口琴管风量分配

Fig. 7 Distribution of air flow for harmonica tubes at fan flow rate of 2.000 m³/min

4.2 口琴管截面形状对风冷散热电池模块温度分布的影响

风量分配不合理是导致电芯温差大的主因，可以通过改变风道进出口位置、数量、形状、长度、宽度等进行改善[19]。本文通过调节风冷散热电池模块不同部位口琴管的截面形状，实现并联支路流量与电芯散热需求的合理匹配。根据电芯温度及温差判断优化结果，开展口琴管截面形状多轮仿真迭代。优化过程中口琴管截面形状如图 8 所示。图 8(a)为口琴管基本结构，其厚度 9 mm、宽度 174 mm、高度 195 mm、壁厚 0.9 mm；口琴管中间镂空部分按照从上到下的顺序依次划分为 a~m，共 13 个区域；图 8(b)为风冷散热电池模块初

始结构，口琴管#1~#9 结构相同，a~m 的 13 个区域均镂空；图 8(c)为风冷散热电池模块口琴管优化一设计，口琴管#1 仅区域 e~g 镂空，口琴管#2、#3 仅区域 c~h 镂空，口琴管#4 仅区域 b~k 镂空，口琴管#5 仅区域 a~k 镂空，口琴管#6~#9 区域 a~f 镂空，整体上，口琴管镂空区域沿着远离风扇的方向逐渐变大； 图 8(d)为风冷散热电池模块口琴管优化二设计，口琴管#1 仅区域 b、c、j、k 镂空，口琴管#2、#3 仅区域 a~d、i~m 镂空，口琴管#4~#8 仅区域 a~e、i~m 镂空，口琴管#9 仅区域 a~d、i~m 镂空；图 8(e)为风冷散热电池模块口琴管优化三设计，口琴管#1 仅区域 c、f、i 镂空，口琴管#2、#3 仅区域 b、c、e、f、h、i、k、l 镂空，口琴管#4 仅区域 b~d、f~h、j~l 镂空，口琴管#5~#8 仅区域 a~c、e~g、i~m 镂空，口琴管#9 仅区域 c、f、i、l 镂空；图 8(f)为风冷散热电池模块口琴管最终优化设计，口琴管#1 仅区域 c、f、i 镂空，口琴管#2、#3 仅区域 b、c、e、h、k、l 镂空，口琴管#4~#8 仅区域 a~c、e、g、i~l 镂空，口琴管#9 仅区域 c、f、i、l 镂空，该布置由 4 种口琴管截面形状构成，可以在优化风量分配的同时，避免口琴管种类过多增加成本。

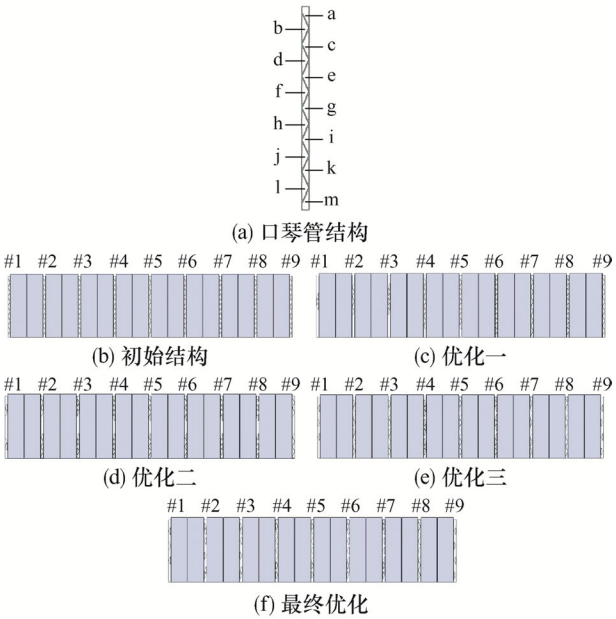


图 8　口琴管结构及截面形状优化

Fig. 8 Optimization of structural and cross-sectional shape of harmonica tubes

口琴管截面形状优化后，风扇风量 2.000 m^3/min 时，风冷散热电池模块温度场仿真云图如图 9 所示。从图中可以看出，风冷散热电池模块前端靠近风扇部分电芯温度稍高，中间部分电芯温度稍低。优化后，风冷散热电池模块最高温度 37.2 ℃，最低温度 32.7 ℃，最大温差 4.5 ℃，相比于优化前的 6.8 ℃，最大温差缩小了 2.3 ℃，效果显著。

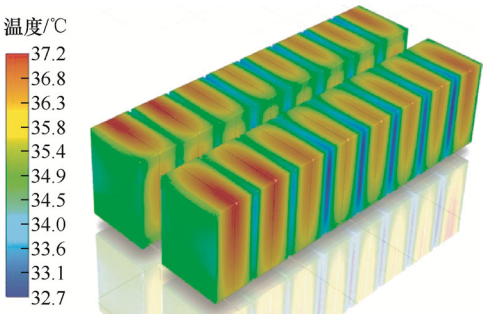


图 9　风扇风量 2.000 m^3/min 时口琴管优化后电芯温度场仿真云图

Fig. 9 Cloud nephograms of temperature field of battery after optimization of harmonica tubes at fan flow rate of 2.000 m^3/min

风冷散热电池模块口琴管通风截面形状优化前、后，口琴管#1~#9 的风量分配对比如图 10 所示。风冷散热电池模块前、后两端的口琴管#1 和#9 仅需为单侧电芯散热，中间部位的口琴管#2~#8 需为左、右两侧的电芯散热，故口琴管#1 和#9 的通风量应低于口琴管#2~#8 的通风量。此外，越靠近风扇部位，风道内汇集的气流量越大，在风道内与电芯表面热交换会对电芯二次冷却。因此，口琴管布局设计时，需要减小风冷散热电池模块两端电芯的受风量，而中间部分电芯的受风量应随着与风扇距离的增大而增大。图 10 显示，口琴管布局优

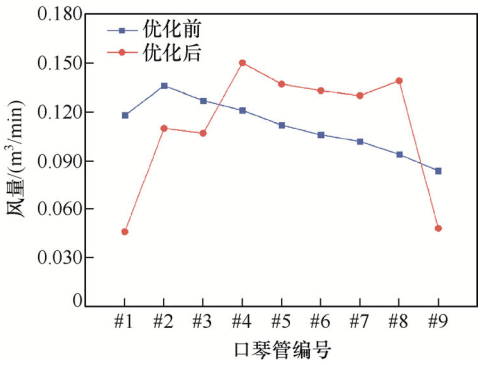


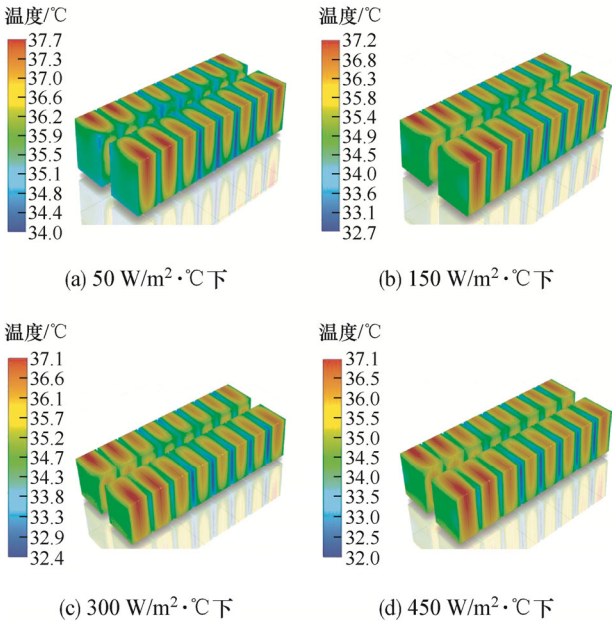
图 10　口琴管分布优化前、后风量分配对比

Fig. 10 Comparison of air flow rate distribution before and after optimization of harmonica tubes

化前，靠近风扇的口琴管风量大，远离风扇的口琴管风量逐渐减小，风量分配不合理导致了电芯温差偏大；口琴管布局优化后，靠近风冷散热电池模块前、后两端的口琴管#1 和#9 风量减小，风扇远端风量增大，改善了风量分配合理性，提高了电芯温度一致性。

4.3 接触导热系数对风冷散热电池模块温度分布的影响

电芯与口琴管交界面接触状态也是工程上较易调节与优化的环节之一。为评估电芯与口琴管交界面接触导热系数对电芯温度的影响，本文仿真得到了 2.000 m^3/min 风量、口琴管截面形状非均匀分布条件下，不同接触导热系数的风冷散热电池模块温度场云图，如图 11 所示。由图可知，随着接触导热系数的增大，风冷散热电池模块最高温度逐渐下降，整体温度也有所下降，电池模块散热能力提升。



(a) 50 W/m^2·℃下　(b) 150 W/m^2·℃下

(c) 300 W/m^2·℃下　(d) 450 W/m^2·℃下

图 11　不同接触导热系数下风冷散热电池模块温度场仿真云图

Fig. 11 Cloud nephograms of temperature field of air-cooled heat dissipation battery module at different contact heat transfer coefficients

图 12 为接触导热系数与电芯温度及温差关系曲线，可见，接触导热系数达到 150 W/m^2·℃时，电芯最高温度基本不再下降，但继续增大接触导热系数，会导致电芯温差增大。因此，需要合理控制电芯与口琴管热接触状态，如可通过提高接触面平面度、界面填充导热硅胶或增加电池组捆扎带的预紧力等方式来控制。

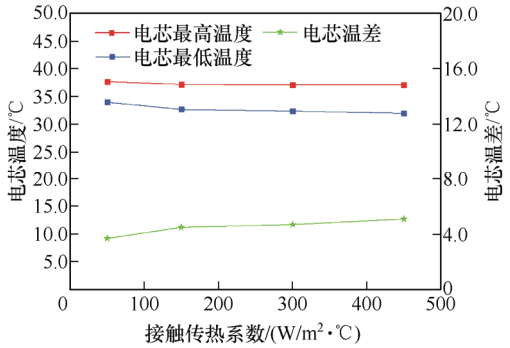


图 12　接触导热系数与电芯温度曲线

Fig. 12 Curves of battery temperature vs contact heat transfer coefficient

5　结论

针对本文提出的敞开式风冷散热电池模块，研究了风扇风量、散热口琴管截面形状及口琴管和电芯接触导热系数等对电池模块散热性能的影响，并从工程实践角度提出了风冷散热电池模块散热优化思路。主要结论如下。

(1)随着风扇风量增大，电芯温升和温差先快速下降，后趋于平衡。风扇风量由 0.400 m^3/min 增大到 2.400 m^3/min 时，风冷散热电池模块最高温度由 59.4 ℃降低到 37.0 ℃，最低温度由 50.1 ℃降低到 30.4 ℃，最大温差由 9.3 ℃降低到 6.6 ℃，但电芯温差始终较大。

(2)风冷散热电池模块各口琴管风量分配不合理是电池模块温差大的主要原因。通过优化风冷散热电池模块散热口琴管截面形状，降低电池模块前、后两端口琴管风量，合理分配中间段口琴管风量，可以提高电池模块温度一致性。风扇风量为 2.000 m^3/min 时，优化前、后风冷散热电池模块最大温差由 6.8 ℃降低到 4.5 ℃，缩小了 2.3 ℃，效果显著。

(3)电芯与口琴管间的接触导热系数对风冷散

热电池模块温度分布存在较大影响。一定范围内增大电芯与口琴管间的接触导热系数，可以提高电池模块散热系统的散热能力，降低电池模块的整体温升。

参考文献：

[1] Ranjbaran Y S, Shojaeefard M H, Molaeimanesh G R. Thermal performance enhancement of a passive battery thermal management system based on phase change material using cold air passageways for lithium batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107744.

[2] 韦鹏, 舒小杨, 朱文超, 等. 基于长短期记忆网络的动力电池组温度场时空建模[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4306-4315.
Wei Peng, Shu Xiaoyang, Zhu Wenchao, et al. Spatio-temporal modeling of power battery pack temperature field based on long short-term memory network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4306-4315. (in Chinese)

[3] 贺元骅, 余兴科, 樊榕, 等. 动力锂离子电池热管理技术研究进展[J]. 电池, 2022, 52(3): 337-341.
He Yuanhua, Yu Xingke, Fan Rong, et al. Research progress in thermal management technology of power Li-ion battery [J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(3): 337-341. (in Chinese)

[4] 刘书琴, 王小燕, 张振东, 等. 锂离子电池组液冷式热管理系统的设计及优化[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(7): 2155-2165.
Liu Shuqin, Wang Xiaoyan, Zhang Zhendong, et al. Experimental and simulation research on liquid-cooling system of lithium-ion battery packs [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(7): 2155-2165. (in Chinese)

[5] Rani M G, Rangasamy R. Review of phase change material application in thermal management of electric vehicle battery pack [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2024, 238(1): 197-214.

[6] Wu Hanming, Niu Ming, Shao Yuankai, et al. Investigations of Li-ion battery thermal management systems based on heat pipes: A review [J]. ACS Omega, 2024, 9(1): 97-116.

[7] 吕超, 张爽, 朱世怀, 等. 储能锂离子电池包强制风冷系统热仿真分析与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 48-55.
Lü Chao, Zhang Shuang, Zhu Shihuai, et al. Thermal simulation analysis and optimization of forced air cooling system for energy storage lithium-ion battery pack [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 48-55. (in Chinese)

[8] Zhang Furen, Liu Peiwen, He Yanxiao, et al. Cooling performance optimization of air cooling lithium-ion battery thermal management system based on multiple seconddary outlets and baffle [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104678.

[9] Fan Yuqian, Zhan Di, Tan Xiaojun, et al. Optimization of cooling strategies for an electric vehicle in hightemperature environment [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 117088.

[10] 李淼林, 臧孟炎, 李长玉, 等. 锂离子电池组风冷散热结构的优化[J]. 电池, 2020, 50(3): 266-270.
Li Miaolin, Zang Mengyan, Li Changyu, et al. Optimization of structure of air cooling heat dissipation for Li-ion batteries [J]. Battery Bimonthly, 2020, 50(3): 266-270. (in Chinese)

[11] 孙广强, 李志强, 王方, 等. 锂离子电池冷却固定一体化冷板散热研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3352-3360.
Sun Guangqiang, Li Zhiqiang, Wang Fang, et al. Research on cooling and fixing of lithium-ion battery cooling and fixed integrated cold plate heat dissipation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3352-3360. (in Chinese)

[12] 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 Xiaohui, Gao Yuanbo, Zhang Yubi, 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. (in Chinese)

[13] 李岳峰, 黄文强, 王杭烽, 等. 储能锂电池包强制风冷

系统散热设计及热仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14248-14255.
Li Yuefeng, Huang Wenqiang, Wang Hangfeng, et al. Thermal design and simulation analysis of forced air cooling system for energy storage lithium-ions battery pack [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(33): 14248-14255. (in Chinese)

[14] Yu Jie, Zhang Yunsen, Qi Cong, et al. Effects of air inlet and outlet on thermal management of electric vehicle battery pack equipped with fins [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2024, 19(3): e3061.

[15] Oyewola O M, Awonusi A A, Ismail O S. Design optimazation of Air-Cooled Li-ion battery thermal management system with Step-like divergence plenum for electric vehicles [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 71: 631-644.

[16] Lin Xiongchao, Shao Keke, Wang Caihong. Optimization and numerical simulation of novel air-cooling system for the thermal management of lithium-ion battery pack [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(1): 220141.

[17] 王春生, 孙含笑, 薛晨博. 基于电化学-热耦合的锂电池热效应分析[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 265-273.
Wang Chunsheng, Sun Hanxiao, Xue Chenbo. Analysis of thermal effect of lithium battery based on electrochemical-thermal coupling [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 265-273. (in Chinese)

[18] 王见信, 王斌, 马淑倩. 液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理研究及优化[J]. 电源学报, 2026, 24(6): 210-219.
Wang Jianxin, Wang Bin, Ma Shuqian. Research and optimization of lithium-ion battery thermal management with liquid cooling-air cooling coupling [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(6): 210-219. (in Chinese)

[19] 张文涛, 李晓杰, 王发成, 等. 有限空间下动力电池风冷散热结构优化研究[J]. 电源技术, 2025, 49(4): 782-793.
Zhang Wentao, Li Xiaojie, Wang Facheng, et al. Research on optimization of air-cooled heat dissipation structure of power batteries in limited space [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(4): 782-793. (in Chinese)



田刚领

作者简介：

田刚领(1977—)，男，博士，教授级高级工程师。研究方向：储能技术。E-mail：gangling_tian@126.com。

罗军(1987—)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：储能技术。E-mail：luojun8901@163.com。

陈晨(1991—)，男，本科，助理工程师。研究方向：储能技术。E-mail：15699902090@163.com。

李铜(1992—)，男，硕士，助理工程师。研究方向：储能技术。E-mail：litong12977@163.com。

赵晓亮(2002—)，男，本科，助理工程师。研究方向：储能技术。E-mail：skyforlyn@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)