DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.205 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

基于电-热-流耦合的高倍率储能电池液冷方案研究

朱何荣[1]，李 创[1]，熊 杰[1]，于海波[1]，王万纯[2]
(1.南京南瑞继保工程技术有限公司研究院，南京 211102；2.南京南瑞继保电气有限公司研究院，南京 211102)

摘要：为解决高倍率下储能电池模组温度高、均匀性差的问题，考虑电池及铝排的产热，建立一种电池模组电-热-流耦合仿真模型，分析冷板布置方案和流量对电池模组温度性能的影响。结果表明：布置双大面或侧面冷板的方案可控制最大温升在11.0 K以内，优于布置单大面冷板的方案；布置侧面冷板的方案控制温升极差的效果优于布置大面冷板的方案；在流量3.0 L/min以内时，增大流量能够有效降低模组最大温升和温升极差；在流量2.0 L/min以内时，布置大面或侧面冷板的方案增设底面冷板对模组温度性能有明显改善。对比实验与仿真结果，最大温升误差在0.9 K以内，验证了耦合仿真模型的准确性。

关键词：电-热-流耦合；液冷方案；储能电池模组；高倍率；最大温升；温升极差

Research on Liquid Cooling Scheme for High-rate Energy Storage Battery Based on Electric-thermal-fluid Coupling

ZHU Herong[1], LI Chuang[1], XIONG Jie[1], YU Haibo[1], WANG Wanchun[2]
(1. Research Institute, Nanjing NR Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Research Institute, Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: To solve the problem of high temperature rise and poor temperature uniformity of energy storage battery module under high-rate operation, considering the heat generation of batteries and aluminum bars, an electric-thermal-fluid coupling simulation model for battery module was established, and the influence of cold plate arrangement scheme and flow rate on the temperature characteristics of the battery module was analyzed. The results indicate that the scheme of arranging double large surface or side cold plates can control the maximum temperature rise within 11.0 K, which is better than the scheme of arranging single large surface cold plates. The scheme of arranging side cold plates is superior to the scheme of arranging large surface cold plates in controlling the temperature rise range. Increasing the flow rate can effectively reduce the maximum temperature rise and temperature rise range of the module when the flow rate is within 3.0 L/min. Adding bottom cold plates in the scheme of arranging large or side cold plates can improve the temperature characteristics of the module when the flow rate is within 2.0 L/min. The comparison between experimental and simulation results shows that the maximum temperature rise error is within 0.9 K, which verifies the accuracy of the coupled simulation model.

Keywords: Electric-thermal-fluid coupling; liquid cooling scheme; energy storage battery module; high rate; maximum temperature rise; temperature rise range

储能技术是新能源发展的核心支撑，必将带动全球能源格局革命性调整[1-2]。锂离子电池以能量密度高、循环寿命长等优势，广泛应用于电化学储能系统[3-4]。锂离子电池最佳工作温度范围为25~40 ℃，温度过低或过高均会导致性能下降，甚至引发热失控，因而设计一个可靠高效的热管理系统至关重要[5-6]。当前电池热管理有风冷、液冷、相

收稿日期：2024-11-30；**修回日期**：2025-02-22；**录用日期**：2025-03-10；**网络首发日期**：2025-03-26

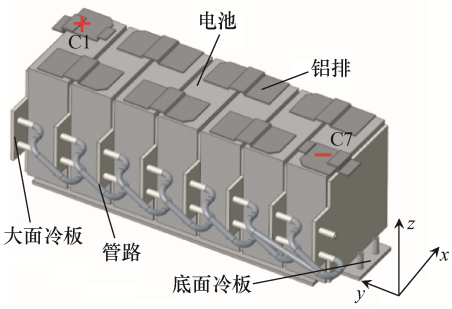
变冷却、浸没式冷却、热管冷却及耦合冷却等诸多方案[7-10]。Peng 等[11]考虑电池产热的差异建立模组热力学模型，发现电池产热的差异会加快模组温度上升和增大模组温差；邝锡金等[12]提出了一种“自均温”液冷板，通过流道对称设计及冷热流道交叠的拓扑结构设计，显著提高了电池顶面温度均匀性；Al-Zareer 等[13]将一维电化学模型与三维传热传质模型结合，模拟电池模组浸没式冷却的效果，发现浸没冷却的冷却性能优于液冷；Jaguemont 等[14]复合使用液冷板和相变材料，通过相变材料吸收电池热量，通过液冷板调节相变材料的温度，可以较好地控制电池模组的最高温升和温度均匀性；Zhang 等[15]发现使用扁平热管的电池热管理系统可在确保能耗最小的前提下更有效地降低模组最高温度和温差；徐晶等[16]提出了一种相变材料与风冷耦合的电池冷却系统，通过遗传算法对响应面模型进行优化，有效降低了模组的最高温度和最大温差。

储能电池单体容量大、发热量高，受限于散热问题，目前实际应用中充放电倍率多为 0.50C 或 0.25C，仅调频等少量场景可短时使用 1.00C 倍率，但高倍率是电化学储能发展的必然方向。本文以方形锂离子电池模组为对象，考虑电池及铝排产热，建立电池模组电-热-流多物理场耦合仿真模型，通过仿真分析 1.00C 工况下不同液冷方案模组的温度性能，对比不同方案对模组最高温升和温升极差的影响，并通过实验验证了仿真分析的准确性及本文结论的可靠性。

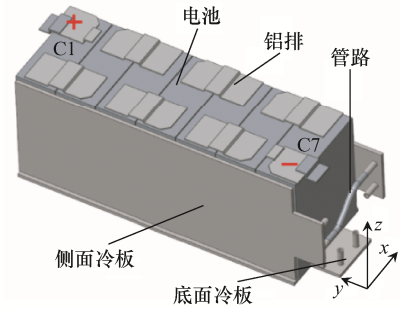
1 电-热-流耦合仿真模型的构建

1.1 仿真几何模型

建立的电池模组模型包括电池、铝排、液冷板及管路，模组共计 7 块电池(C1~C7)。本文选用电池为额定电压 3.2 V、额定容量 280 A·h、尺寸 174 mm×204 mm×71.6 mm 的磷酸铁锂电池。为探究适宜大容量电池高倍率充放的液冷方案，在电池底面、大面及侧面布置冷板，共形成 9 种布置方案，部分液冷方案结构示意如图 1 所示。图 1(a)为双大面+底面冷板方案，设置 8 块串联的大面冷板和 1 块底面冷板；图 1(b)为侧面串联+底面冷板方案，设置 2 块串联的侧面冷板和 1 块底面冷板。冷板与电池之间设有导热材料填充间隙。其他方案冷板布置详见表 1，不再赘述。



(a) 双大面+底面冷板



(b) 侧面串联+底面冷板

图 1 部分液冷方案结构示意

Fig. 1 Structure of partial liquid cooling scheme

表 1 液冷方案介绍

Tab. 1 Introduction of liquid cooling scheme

编号	方案	介绍
1	底面	1 块底面冷板
2	单大面	间隔布置 4 块串联的大面冷板
3	单大面+底面	间隔布置 4 块串联的大面冷板+1 块底面冷板
4	双大面	8 块串联的大面冷板
5	双大面+底面	8 块串联的大面冷板+1 块底面冷板
6	侧面串联	2 块串联的侧面冷板
7	侧面串联+底面	2 块串联的侧面冷板+1 块底面冷板
8	侧面并联	2 块并联的侧面冷板
9	侧面并联+底面	2 块并联的侧面冷板+1 块底面冷板

1.2 电−热−流耦合数学模型

1.2.1 铝排产热分析

模组进行恒流充放电时，铝排中为恒定直流电流，所产生的电场为恒定电场，其基本方程包括传导电流的连续性方程和电场强度的环路线积分方程[17]，分别表示为

$$\nabla J = 0 \tag{1}$$

$$\nabla E = 0 \tag{2}$$

式中：∇ 为拉普拉斯算子，$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$；$J$ 为电流密度；E 为电场强度。

在金属导体中恒定电流产生的热量可通过焦耳定律计算，其微分形式[17]为

$$p = JE \tag{3}$$

式中，p 为产热功率密度。

1.2.2 传热分析

热传递有热传导、热对流和热辐射 3 种基本形式。模组中热源包括电池和铝排，电池热量主要以热传导的形式传递到冷板上，铝排热量则主要经由电池以热传导的形式传递到冷板上，之后通过冷板与冷却液间的热对流将热量带出模组。此外，两者的热量还可通过自然散热和热辐射散出，但液冷散热下其效率相对较低，分析时可以忽略不计。

热传导过程可以通过傅里叶定律进行描述[18]，即

$$\boldsymbol{q} = -\lambda \nabla T \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{q}$ 为热流密度矢量；λ 为导热系数；∇T 为温度梯度，$\nabla T = \boldsymbol{i}\frac{\partial T}{\partial x} + \boldsymbol{j}\frac{\partial T}{\partial y} + \boldsymbol{k}\frac{\partial T}{\partial z}$，$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$ 分别为 x、y、z 方向上的单位矢量，T 为温度。

热对流可通过牛顿冷却公式进行描述[18]，即

$$q = h\Delta t \tag{5}$$

式中：q 为对流换热的热流密度；h 为表面传热系数；Δt 为壁面与冷却液间的温差。

1.2.3 流场分析

计算流体力学的基本控制方程包括连续性方程、动量方程及能量方程，不考虑重力影响时，不可压缩流体的 3 个方程[19]表述如下。

连续性方程为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{6}$$

动量方程为

$$\rho\left[\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}\right] = -\nabla P + \mu\nabla^2\boldsymbol{v} \tag{7}$$

能量方程为

$$\rho C\left[\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{v}\nabla T\right] = \lambda\nabla^2 T \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{v}$ 为流体速度矢量；ρ 为流体的密度；P 为流体的静压；μ 为流体的动力黏度；C 为流体的比热容。

综上，首先通过电场仿真获取铝排的产热功率密度分布；然后将结果导入到流体力学分析软件中，同步进行温度场和流场的求解；最后通过电−热−流多物理场耦合仿真获得考虑电池和铝排产热的电池模组的温度性能。

1.3 仿真条件设定

考虑电池及铝排产热，进行模组 1.00C 工况稳态仿真。假定电池内部产热均匀，冷却液为黏性不可压缩流体，不考虑自然冷却和辐射散热的影响，且忽略电池极柱和铝排间的接触热阻。每块电池的产热量为 33 W，铝排产热通过 Maxwell 电场仿真得到，获得产热功率后导入 Fluent 中进行流场和温度场仿真。冷板、铝排材质为铝，其余物性参数见表 2。

表 2　物性参数

Tab. 2 Physical property parameters

材料	密度/ ($kg\cdot m^{-3}$)	比热容/ [$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$]	导热系数/ [$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$]
电池	2 133	964	9.040(x 方向) 3.560(y 方向) 11.000(z 方向)
冷却液	1 071	3 300	0.384
导热材料	3 000	1 150	2.000

2　仿真结果与分析

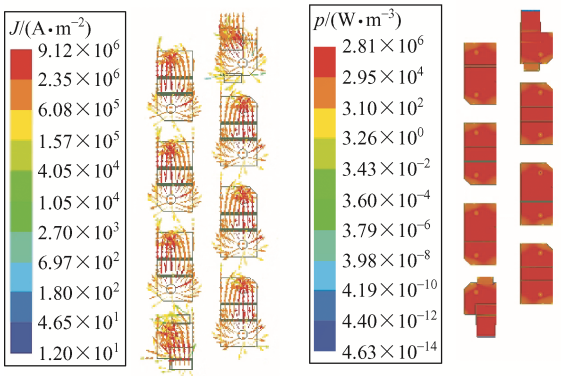
模组热管理重点是电池，但铝排热量必须先传导至电池后才能由冷板带走，使得铝排的温度最高，因此对模组的温度性能分析不能忽略铝排产热的影响，且铝排的最大温升和温升极差可以表征模组的温度性能。由于端部电池散热条件与中间差异较大，本文重点分析电池 C2~C6 的正极铝排。

2.1 铝排产热分析

Maxwell计算得到的铝排电流密度和产热功率密度如图 2 所示。由图 2(a)可见，电流主要分布在两极柱之间，外部区域分布稀疏；由图 2(b)可见，两极柱之间产热较为均匀，外侧产热功率密度较小，与电流密度的分布相符，表明两极柱之外的区域对铝排的载流能力贡献较小。对式(3)进行积分即可得到铝排的产热功率 Q_J 为

$$Q_J = \int_V (JE)\mathrm{d}V \tag{9}$$

式中，V 为铝排体积。



(a) 电流密度分布 (b) 产热功率密度分布

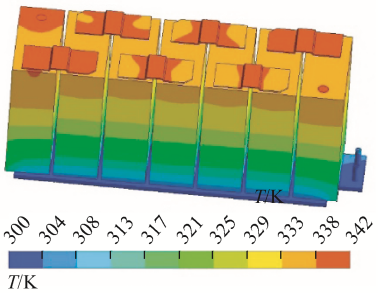
图 2 铝排电场仿真结果

Fig. 2 Electric field simulation results of aluminum bars

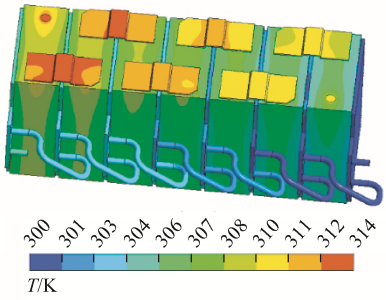
计算得到串联铝排产热功率为 1.63 W，正负极铝排产热功率为 1.14 W，模组铝排总产热功率为 12.06 W。

2.2 模组温度分布特性分析

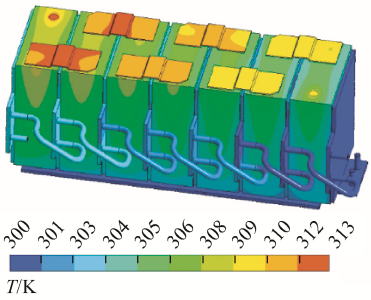
选取底面冷板、双大面冷板、双大面+底面冷板、侧面串联冷板及侧面串联+底面冷板 5 种方案分析模组温度分布。底面冷板流量 1.7 L/min，大面、侧面冷板流量 1.0 L/min 下，5 种方案的模组温度云图如图 3 所示。



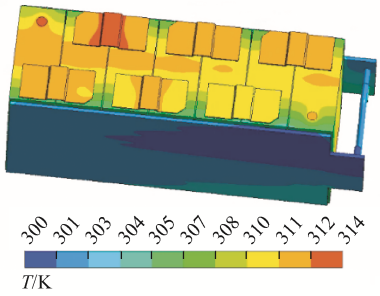
(a) 底面冷板



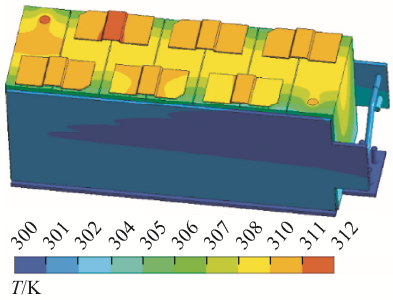
(b) 双大面冷板



(c) 双大面+底面冷板



(d) 侧面串联冷板



(e) 侧面串联+底面冷板

图 3 仿真温度云图

Fig. 3 Simulated temperature contours

由图 3(a)可见，底面冷板方案中电池温度从底到顶逐渐升高，直至铝排为模组温度最高的零件，最大温升为 42.0 K，最高温度点在铝排连接 2 个电池极柱的中间位置。由图 3(b)和(c)可见，双大面冷板方案中冷却液温度随着流道的前进逐步上升，使得铝排温度表现出相同的趋势，在流道末端铝排达

到最大温升 14.0 K，增设底面冷板可使最大温升降至 13.0 K。由图 3(d)和(e)可见，侧面串联冷板方案中铝排的温度随着流道的前进逐步上升，靠近流道末端的铝排达到最大温升 14.0 K，增设底面冷板可使最大温升降至 12.0 K。

2.3 流量对模组温度性能影响分析

仿真得到各方案电池正极铝排最大温升 T_M 与冷却液流量 Q 的关系如图 4 所示。

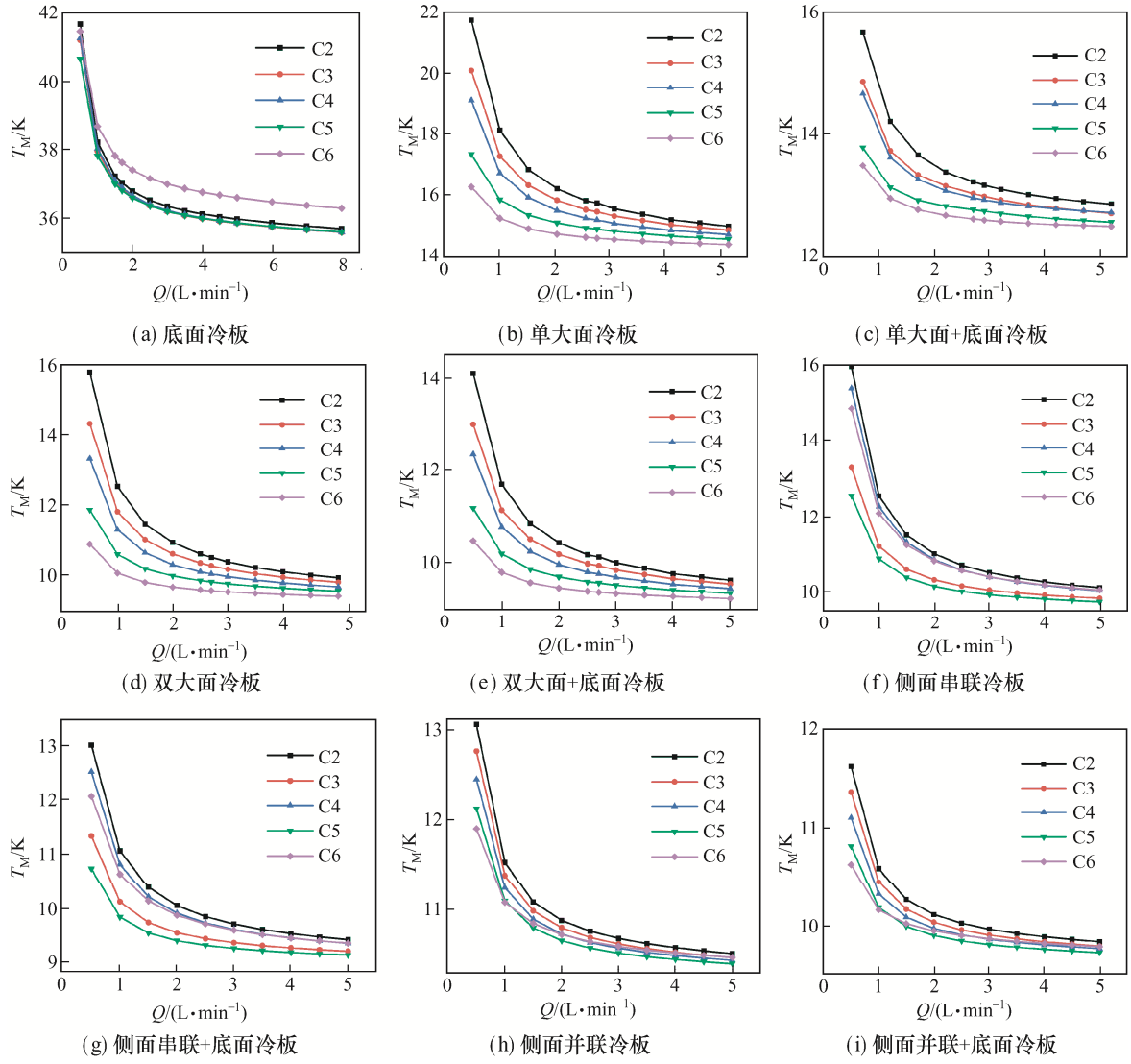


图 4　铝排最大温升 T_M 与冷却液流量 Q 的关系

Fig. 4 Relationship between maximum temperature rise T_M of aluminum bar and coolant flow rate Q

由图 4(a)可见，底面冷板方案中所有铝排最大温升均随流量的增大而下降，但幅度渐缓。除 0.5 L/min 外，C6 电池铝排温升最大，C2~C5 差异一直较小，原因是 C6 电池正极铝排靠近冷板出口位置，冷却液温度高，散热效果差。8.0 L/min 流量下 C6 铝排最大温升为 36.2 K，表明常温下底面冷板无法将电池温度控制在 40 ℃以内。流量达到 1.5 L/min 后，增大流量对最大温升的影响已不明显，其原因是底面冷板与电池接触面积小，电池与冷板间的热传导效率限制了散热效果。

由图 4(b)~(e)可见，由于冷却液从 C6 电池侧流动到 C2 的过程中温度逐渐升高，设有大面冷板时铝排最大温升均从 C6 至 C2 递增。各方案下增大流量均可降低最大温升和温升极差，但降幅越来越小。流量从 2.0 L/min 提高到 3.0 L/min，各方案最大温升下降均在 0.6 K 以内，温升极差下降在 0.4 K 以内，继

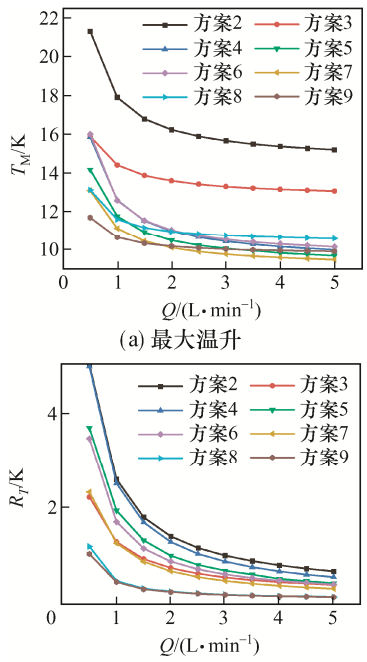
续提升流量已无法明显改善模组温升及均温性。

由图 4(f)和(g)可见，设有侧面串联冷板的方案中各流量下电池铝排温升 C2 最大，C3、C5 较小，原因是 C3 和 C5 正极铝排靠近第一块冷板，而 C2 正极铝排靠近第二块冷板后端，冷却液流动过程中温度上升，散热能力逐渐下降。

由图 4(h)和(i)可见，设有侧面并联冷板的方案中各流量下 C2 铝排温升均最大，原因是 2 块冷板的冷却液均从 C6 电池侧流向 C2，过程中冷却液温度逐步上升，散热效果逐步变差。随着流量的增大，各方案下最大温升和温升极差均有所下降，但幅度逐渐减小。流量从 2.0 L/min 提高到 3.0 L/min，各方案最大温升下降均在 0.5 K 以内，温升极差下降在 0.3 K 以内，继续提升流量已无法明显改善模组温升及均温性。

2.4 各方案液冷效果对比分析

基于前述分析，底面冷板方案无法满足 1.00C 工况散热需求，其余 8 种方案模组的 T_{M} 和温升极差 R_T 与 Q 的关系如图 5 所示，编号与结构形式的对应关系见表 1。



(a) 最大温升

(b) 温升极差

图 5 8 种方案 T_{M} 和温升极差 R_T 随 Q 的变化曲线

Fig. 5 Curves of T_{M} and temperature rise range R_T with Q under eight schemes

由图 5(a)可见，8 种方案最大温升均随着流量的增大而降低，且下降速度渐缓。除设置单大面冷板的方案最大温升始终较高外，其余 6 种方案在 2.0 L/min 以上流量时模组最大温升差在 1.0 K 以内，对模组最高温度的控制效果相近。单大面冷板时增设底面冷板，在分析流量范围内均能够将模组最大温升降低 2.0 K 以上；双大面和侧面冷板方案增设底面冷板可降低最大温升，但随着流量的增大降幅越来越小；双大面和侧面并联方案在流量 1.0 L/min 以上时降幅在 1.0 K 以内，侧面串联方案在流量 2.0 L/min 以上时降幅在 1.0 K 以内。

由图 5(b)可见，8 种方案温升极差均随着流量的增大而降低，且下降幅度渐缓，各方案的差异也逐渐缩小。设有侧面冷板的模组均温性较优，有大面冷板的模组均温性相对较差，但随着流量的增大差距逐步缩小，3.0 L/min 以上流量时差距已在 0.5 K 以内。设置侧面并联冷板时增设底面冷板无法降低模组温升极差；设置大面或侧面串联冷板时增设底面冷板则可降低模组温升极差，但效果随流量的增大而减弱。双大面和侧面串联方案流量达到 1.0 L/min 后增设底面冷板带来的温升极差缩减已在 0.5 K 以内，单大面方案流量达到 2.5 L/min 后增设底面冷板带来的温升极差缩减已在 0.5 K 以内。

3 实验验证

3.1 实验布置

为验证仿真结果的可靠性，测试了设有双大面冷板、侧面串联冷板及侧面并联冷板的 6 种方案在大面、侧面冷板总流量为 1.0 L/min 时的模组温升情况。

实验布置如图 6 所示，将电池模组放入环境试验箱，通过电池管理模块采集电池模组的电压、电流、温度等信息，并经由充放电设备上送至控制平台，通过热电偶采集铝排及试验箱环境温度变化情况。热电偶布置于铝排中心区域，以便与仿真结果进行对比。控制平台下发充放电控制指令至充放电设备，经由电池管理模块下发至

电池模组，以实现模组充放电过程的精确控制。冷却液温度和流量由液冷机组控制，其他实验条件见表 3。

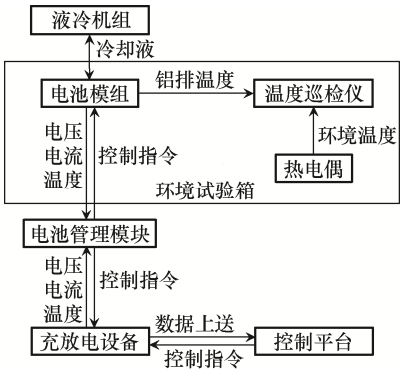


图 6　电池模组温升实验布置

Fig. 6 Experimental setup for temperature rise of battery modules

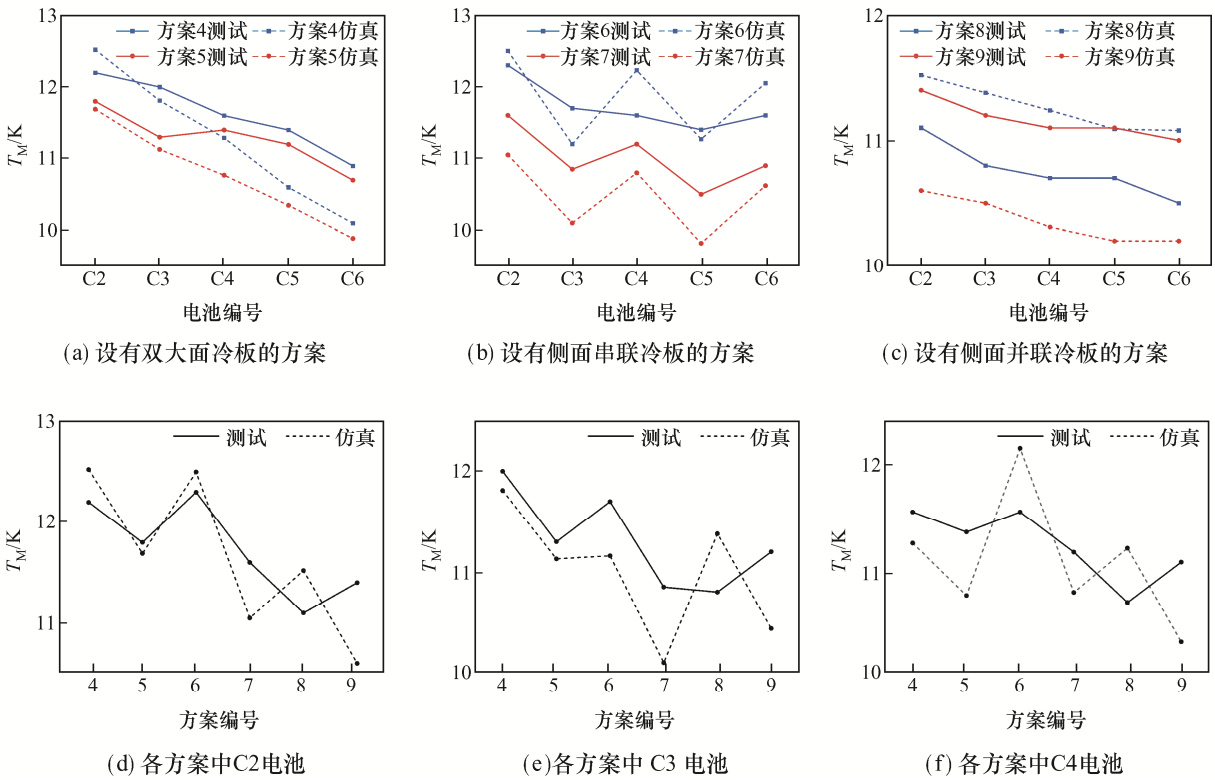
3.2　实验结果及分析

6 种方案中电池 C2~C6 正极铝排 T_M 仿真与实验结果对比如图 7 所示。由图 7(a)~(c)可见，设有双大面冷板的方案最大温升误差在 0.9 K 以内，设有侧面串联冷板的方案最大温升误差在 0.8 K 以内，设有侧面并联冷板的方案最大温升误差在 0.6 K 以内。由图 7(d)~(f)可见，6 种方案中 C2、C3、C4 电池的最大温升误差均在 0.8 K 以内。误差来源于多个方面，包括仿真时模型的简化，对自然散热和辐射散热的忽略，实际条件下环境试验箱温度和冷却液供液温度无法稳定、存在波动等。从方案角度及电池角度评判 6 种方案的误差均小于 0.9 K，表明本文建立的电−热−流耦合仿真模型的计算结果是可信的。

表 3　实验条件

Tab. 3 Experimental conditions

项目	具体条件
充放电电流/A	280
运行程序	充电 1 h，静置 30 min，放电 1 h
进液温度/℃	20
环境温度/℃	25
冷却液	50%乙二醇水溶液



(a) 设有双大面冷板的方案　(b) 设有侧面串联冷板的方案　(c) 设有侧面并联冷板的方案

(d) 各方案中C2电池　(e)各方案中 C3 电池　(f) 各方案中C4电池

图 7　仿真与实验结果对比

Fig. 7 Comparison results between simulation and experiment

4 结论

本文建立了 1.00 C 高倍率储能电池模组的电-热-流多物理场耦合仿真模型，研究了冷板布置方案和冷却液流量对模组温度性能的影响，得出的主要结论如下。

(1)铝排的电流密度和产热功率密度分布规律一致且主要集中在两极柱之间，表明极柱外侧区域对铝排载流能力的贡献较小，可据此进行铝排的结构优化设计，改善模组的温度特性。

(2)设有双大面或侧面冷板的方案可控制模组最大温升在 11.0 K 以内，设有单大面冷板的方案可控制在 15.0 K，底面冷板方案无法满足高倍率散热需求。设有侧面冷板的方案控制温升极差的效果优于设有大面冷板的方案，但流量达到 3.0 L/min 后差距缩小至 0.5 K 以内。

(3)各冷板布置方案中增大冷却液流量均能够提升冷却效果，降低模组的最大温升和温升极差，但降低幅度逐渐减小，流量达到 3.0 L/min 以上后降幅已不明显。

(4)大面或侧面冷板方案增设底面冷板能够降低最大温升，单大面方案降幅在 2.0 K 以上，双大面和侧面方案降幅随着流量的增大而减小，流量 2.0 L/min 后降幅均在 1.0 K 以内。增设底面冷板时，侧面并联方案无法降低温升极差，大面或侧面串联方案温升极差降幅随着流量的增大而减小，流量 1.5 L/min 后均降至 1.0 K 以内。

本文对高倍率储能电池的液冷方案进行了仿真和实验研究，但未能探究更高充放电倍率的液冷方案，未深入分析冷板的具体结构对冷却效能的影响。后续将在本文的基础上对此进行深入研究，并考虑电池产热的不均匀性、功率的动态变化等因素完善多物理场耦合模型，为高倍率电池热管理系统的开发提供更精确的指导。

参考文献：

[1] Rahman M M, Oni A O, Gemechu E, et al. Assessment of energy storage technologies: A review [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113295.

[2] 曾少鸿，吴伟雄，刘吉臻，等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. 储能科学与技术，2023，12(9): 2888-2903.
Zeng Shaohong, Wu Weixiong, Liu Jizhen, et al. A review of research on immersion cooling technology for lithium-ion batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2888-2903. (in Chinese)

[3] 马锐，贾学翠，张永康，等. 基于三次样条插值法的储能锂电池建模与参数辨识[J]. 电源学报，2023，21(1): 133-141.
Ma Rui, Jia Xuecui, Zhang Yongkang, et al. Modeling and parameters identification of Li-ion battery for energy storage based on cubic spline interpolation method [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 133-141. (in Chinese)

[4] 于洪峰，曹阳阳，许成林，等. 储能电池热管理及控制策略研究进展[J]. 电源技术, 2026, 50(1): 20-32.
Yu Hongfeng, Cao Yangyang, Xu Chenglin, et al. Advances in thermal management and control strategies for energy storage batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(1): 20-32. (in Chinese)

[5] Wu Weixiong, Wang Shuangfeng, Wu Wei, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.

[6] Xu Xiaoming, Tang Wei, Fu Jiaqi, et al. The forced air cooling heat dissipation performance of different battery pack bottom duct [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(12): 3823-3836.

[7] Choudhari V G, Dhoble A S, Panchal S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 163: 120434.

[8] Weragoda D M, Tian Guohong, Burkitbayev A, et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224: 120070.

[9] 魏瑾，刘少胡. 并联蛇形液冷流道结构设计及影响因素分析[J]. 电源技术, 2026, 50(1): 121-128.

Wei Jin, Liu Shaohu. Design and analysis of influencing factors for a parallel serpentine liquid-cooling channel structure [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(1): 121-128. (in Chinese)

[10] 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 thermal management for lithium-ion batterise with liquid cooling-air cooling coupling [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(6): 210-219. (in Chinese)

[11] Peng Xiongbin, Ma Chong, Garg A, et al. Thermal performance investigation of an air-cooled lithium-ion battery pack considering the inconsistency of battery cells [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 596-603.

[12] 邝锡金，严天瞳，何巧灵，等. 储能液冷电池包的热管理设计与优化研究[J]. 电源技术, 2026, 50(5): 873-881.
Kuang Xijin, Yan Tiantong, He Qiaoling, et al. Research on thermal management design and optimization of energy storage liquid-cooled battery pack [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2026, 50(5): 873-881. (in Chinese)

[13] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. Heat and mass transfer modeling and assessment of a new battery cooling system [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 765-778.

[14] Jaguemont J, Omar N, Van den Bossche P, et al. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 308-320.

[15] Zhang Zhuqian, Wei Ke. Experimental and numerical study of a passive thermal management system using flat heat pipes for lithium-ion batteries [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114660.

[16] 徐晶，相飞飞，王翔，等. PCM-风冷耦合的锂电池冷却系统优化设计[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 281-287.
Xu Jing, Xiang Feifei, Wang Xiang, et al. Optimization design of PCM-air cooling coupled lithium-ion battery cooling system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 281-287. (in Chinese)

[17] Li Houmin, Li Shiyong, Hu Bing, et al. Electromagnetic Field Theory Fundamentals [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2022.

[18] Lienhard J H IV, Lienhard J H V. A Heat Transfer Textbook [M]. 3rd ed. Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2000.

[19] Amalesh T, Narasimhan N L. Introducing new designs of minichannel cold plates for the cooling of Lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2020, 479: 228775.



朱何荣

作者简介：

朱何荣(1985—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：储能电池包设计与仿真，智能变电站技术。E-mail：zhuhr@nrec.com。

李创(1992—　)，男，通信作者，硕士，工程师。研究方向：储能电池包的结构设计及仿真，电力一、二次设备设计及仿真。E-mail：lichuang@nrec.com。

熊杰(1991—　)，男，硕士，工程师。研究方向：新型电力设备结构设计。E-mail：xiongj@nrec.com。

于海波(1984—　)，男，硕士，高级工程师。研究方向：储能系统设计，电力一、二次设备及系统设计。E-mail：yuhb@nrec.com。

王万纯(1987—　)，男，硕士，工程师。研究方向：储能系统集成与控制保护。E-mail：wangwanchun@nrec.com。

(责任编辑：耿越)