



大容量电池组动态浸没式液冷系统冷却性能研究

彭 傲, 孙小琴, 彭 启, 彭 飞, 朱龙云, 王子璇
(长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 大容量单体电池在储能行业被广泛运用, 但其性能受运行温度显著影响, 尤其是快速充放电需求下电池散热性能成为直接影响其应用的关键。本研究提出了一种针对大容量 280 Ah LiFePO₄ 储能电池组的动态浸没式液冷系统, 探讨了冷却液入口流速、入口温度、挡板布置方式对冷却性能的影响, 并以电池最大温度 $T_{\max}$ 、电池组最大温差 $\Delta T_{\max}$ 、散热量与泵功耗比 (cost to performance, CTP) 为评价指标, 对比分析了三种因素的影响效果。结果表明: 增设挡板能够增强液冷系统的冷却性能, 大小宽度的挡板等距交错排布相较于宽度递增的挡板等距排布分别降低了 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 4.26%、12.42%, CTP 降低了 10.98%; 当入口流速从 0.5 m/s 增至 1.7 m/s, $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 进一步降低了 2.64%、3.59%; 当入口温度从 15℃ 增至 35℃, $T_{\max}$ 上升了 77.23%, 但 $\Delta T_{\max}$ 降低了 14.17%。研究可知, 电池液冷系统的最优方案是大小宽度挡板等距交错排布, 冷却液入口流速和温度分别为 1.5 m/s 和 20℃, 相比于无挡板的初始方案, 其 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 分别降低了 29.75%、6.33%。本研究结果为大容量储能电池组液冷热管理系统设计提供一定的参考。

关键词: 电池包; 浸没式冷却; 传热分析; 最大温度; 最大温差

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1171

中图分类号: TM 912

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2284-12

Research on the cooling performance of the dynamic immersion liquid cooling system for large-capacity battery modules

PENG Ao, SUN Xiaoqin, PENG Qi, PENG Fei, ZHU Longyun, WANG Zixuan
(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: The large-capacity single batteries that are widely used in the energy-storage industry are greatly affected by the operating temperature. The thermal performance of such batteries thus becomes a key factor in determining the battery applications, especially under the conditions of fast charging or discharging. In this study, we propose a dynamic-immersion liquid-cooling system that is specifically designed for large-capacity 280 Ah LiFePO₄ energy-storage battery modules. We explored the effects of the coolant flow rate at the inlet, the inlet temperature, and the baffle configuration on the cooling performance, using maximum temperature ($T_{\max}$), maximum temperature difference ($\Delta T_{\max}$), and the ratio of heat dissipation

收稿日期: 2025-12-29; 修改稿日期: 2026-02-05。

基金项目: 国家自然科学基金 (52578108, 52208094), 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会项目 (Z231100006123010), 湖南省科学技术厅项目 (2023RC1057)。

第一作者: 彭傲 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为动力及储能电池热管理技术, E-mail: pengao@163.com; 通信作者: 孙小琴, 教授, 博士, 研究方向为储能设备管理, E-mail: xiaoqinsun@csust.edu.cn。

引用本文: 彭傲, 孙小琴, 彭启, 等. 大容量电池组动态浸没式液冷系统冷却性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2284-2295.

Citation: PENG Ao, SUN Xiaoqin, PENG Qi, et al. Research on the cooling performance of the dynamic immersion liquid cooling system for large-capacity battery modules[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2284-2295.

to pump-power consumption (cost-to-performance ratio, CTP) as evaluation indicators. We found that the installation of baffles enhances the cooling of the battery. Compared with an arrangement of large, equidistant baffles, an arrangement of alternating-sized baffles reduces $T_{\max}$ by 4.26% and $\Delta T_{\max}$ by 12.42%, while decreasing CTP by 10.98%. When the flow rate at the inlet is increased from 0.5 m/s to 1.7 m/s, $T_{\max}$ and $\Delta T_{\max}$ are further reduced by 2.64% and 3.59%, respectively. When the inlet temperature is increased from 15°C to 35°C, $T_{\max}$ is increased by 77.23%, and $\Delta T_{\max}$ is decreased by 14.17%. The optimal combination for a liquid-cooling system is an arrangement of alternating-sized baffles, with the coolant flow rate at the inlet set to 1.5 m/s and the temperature to 20°C. Compared with the initial combination without baffles, this optimal scheme reduces $T_{\max}$ by 29.75% and $\Delta T_{\max}$ by 6.33%. This research provides a useful reference for a liquid-cooling thermal-management system for a large-scale storage-battery module.

Keywords: battery pack; immersion liquid cooling; heat transfer analysis; maximum temperature; maximum temperature difference

“双碳”背景下的能源结构转型, 引发了传统化石能源的替代潮, 可再生能源如风电、光电等受到重视。然而可再生能源存在着间歇性、波动性、不可预测性等问题^[1], 使得可再生能源发电利用难、电力系统调峰难。储能系统因其电力承载和调节能力成为有效的解决方案^[2-3], 其中电化学储能具有及时响应、高效储能、布置灵活等优势^[4], 对于能源结构转型、新型电力系统发展有重要作用。

锂电池是目前应用最广泛的电化学储能载体, 具有高能量密度、低污染性、可回收性、无记忆效应等特点^[5]。然而锂电池易受高温及热不均匀性影响^[6], 从而降低稳定性与使用寿命, 甚至引发热失控, 导致火灾事故。电池最佳运行温度范围为20~40°C, 最大温差在5°C以内^[7]。因此, 设计合适的电池热管理系统 (battery thermal management system, BTMS), 对于保障电池安稳运行至关重要。

基于冷却介质的不同, 电池热管理系统可分为三类: 空气冷却、相变材料 (phase change material, PCM) 冷却和液体冷却^[8]。空气冷却技术导热系数较低, 在恶劣环境下易失效, 环境适应性弱^[9]; 相较于空气冷却, PCM冷却具有更高的冷却效率, 然而其存在泄漏风险, 且无法及时释放所吸收的热量^[10]。液体冷却分为间接冷却和直接冷却, 间接冷却中电池与冷板直接接触, 冷却液在冷板内流动带走电池运行中的产热^[11]; 直接冷却又称作浸没冷却, 将电池浸没在介电流体中实现电池散

热^[12]。浸没冷却中冷却剂与电池直接接触, 扩大了电池与传热流体的接触面积, 能使电池组温度更均匀; 此外, 该技术还能有效降低热失控风险, 介电流体的介电特性抑制火花产生, 同时降低单体电池热失控所引发的影响^[13]。

Liu等^[14]提出一种矿物油式浸没冷却系统, 对16个38120型锂离子电池模组的冷却性能开展研究, 结果表明, 在1 C、2 C、3 C放电倍率下, 电池最大温升分别降至2.67°C、5.41°C和8.69°C。Le等^[15]提出了一种针对电池热管理的歧管浸没冷却系统, 结果显示, 在5 C放电倍率下, 该系统将电池组最高温度和最大温差分别降至35.06°C和6.66°C。Zou等^[16]结合静态浸没冷却与冷却管道设计, 在40°C的高温环境下, 电池在1 C、2 C和3 C放电倍率下的最高温度分别达到37.29°C、48.06°C和55.72°C。He等^[17]探究了电池排布方式、电池间距、入口流速/温度/位置对浸没冷却系统效率的影响, 研究发现前后两排对齐的布置方式拥有最佳冷却性能, 与风冷和静态浸没冷却相比, 电池最高温度分别降低了77.71%和67.43%。

对于大容量电池热管理, Su等^[18]提出一种新型多孔风管耦合PCM的风冷型电池热管理系统, 探讨对于4个280 Ah LiFePO₄电池的冷却效果, 结果显示, 在2C的高放电倍率下, 电池组最大温度仅为45.15°C。Gan等^[19]设计出一种对称双螺旋流道液冷板式电池热管理系统, 结果表明, 与传统蛇形流道设计和平行流道设计比较, 0.5 C充电工况下

的1P52S 280 Ah方形电池组最大温差分别降低了0.67℃和0.85℃。Zhang等^[20]提出一种PCM复合冷板的浸没式热管理系统,该系统以PCM和介电流体为内部吸热介质、冷板为外部散热端,研究显示在最优结构下,25℃环境温度下连续0.5 C充放电循环的1P4S 280 Ah方形电池组最大温度为38.46℃。

现有的电池热管理研究主要集中于动力电池与小容量电池组。对于单体容量在200~350 Ah范围的大容量储能电池模组而言,其运行过程中产热量更大,散热需求更高。然而,现有针对大容量储能电池模组的冷却系统,多采用风冷与冷板冷却两种方式,难以满足大容量储能电池组的散热需求及温度均匀性要求。

本研究提出了一种针对大型储能电池组的浸没式电池热管理系统,讨论挡板类型、冷却液入口流速、流温对于电池组内部的温度场、速度场的影响。并对三种影响因素进行正交设计,分别选择在最大温度($T_{\max}$)、最大温差($\Delta T_{\max}$)、性能指标(cost to performance, CTP)下的影响因素排序及最优组合,确定大容量电池组的最优冷却方案。本研究为大型储能电池组热管理系统提供了新方案,提出了大型储能电池组的流动浸没式液冷系统的新型结构设计,对保障储能电站热安全具有一定参考价值。

1 储能电池组数理模型

1.1 物理模型

电池组模块由52块280 Ah LiFePO₄电池组成,串联4块为一组,并联13组(4S13P),具体电池参数见表1。冷却液循环冷却系统如图1(a)所示,电池组浸没在冷却液中,冷却液经由入口流入冷却箱内,在电池箱内流动与充放电电池进行换热,带走电池热量后经由出口流出与换热器换热进行冷却。为优化冷却液在电池箱内的流动分布,在电池箱体内侧壁添加了挡板,如图1(b)所示。

在本研究中,提出了三种不同挡板方式的电池热管理系统,分别是BTMS I、BTMS II、BTMS III。如图2所示,BTMS I的挡板从进口处开始宽度逐渐减小,BTMS II从进口开始挡板宽度大小交错,BTMS III的挡板从进口开始宽度逐渐增加。电池模组的进出口设置直径40 mm的连接管道,长

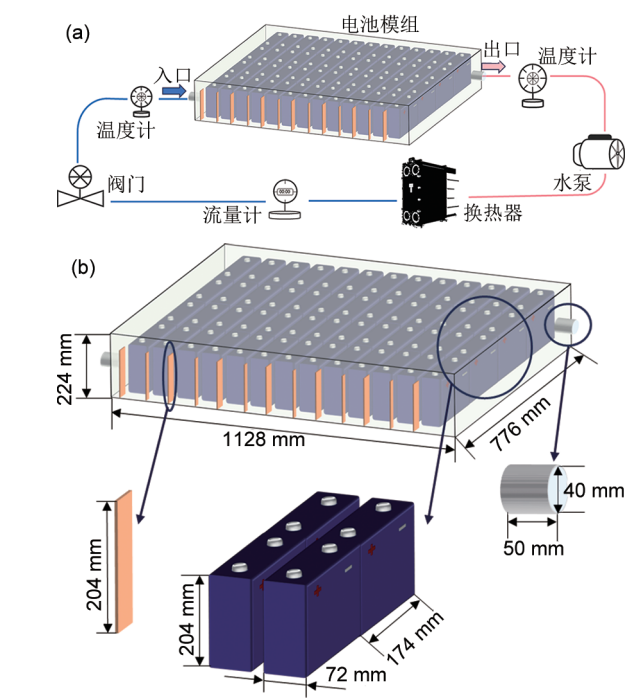


图1 电池热管理系统图: (a) 冷却液循环系统; (b) 电池冷却箱体

Fig. 1 Schematic diagram of battery thermal management system: (a) Coolant circulation system; (b) Battery cooling tank

表1 280 Ah LiFePO₄ 电池的参数
Table 1 The parameter of 280 Ah LiFePO₄ battery

参数	单位	数值
尺寸	mm ³	174×204×72
比热容	J/(kg·K)	1029.49
密度	kg/m ³	2118
热导率	W/(m·K)	X/Y/Z: 2.11/21.63/21.63
内阻	mΩ	≤1.0

度50 mm。除电池和冷却液外,电池模组材料皆为铝;冷却液为介电流体合成矿物油,与电池绝缘,不腐蚀铝材;所用材料的参数见表2。

1.2 数学模型

1.2.1 电池发热模型及控制方程

电池充放电过程中的实际产热十分复杂。为简化分析,本研究假设电池内部热物性稳定,不随温度改变而变化,电池为各向异性的发热固体,内部材料均匀分布,此时在三维瞬态下的能量方程如下^[21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{bat}}c_{p,\text{bat}}T_{\text{bat}})=\nabla\cdot(\lambda_{\text{bat}}\nabla T_{\text{bat}})+Q_{\text{gen}} \quad (1)$$

式中, ρ_{bat} 是电池的密度, $c_{p,\text{bat}}$ 是电池的比热容, T_{bat} 是电池的温度, λ_{bat} 是电池各个方向上的导

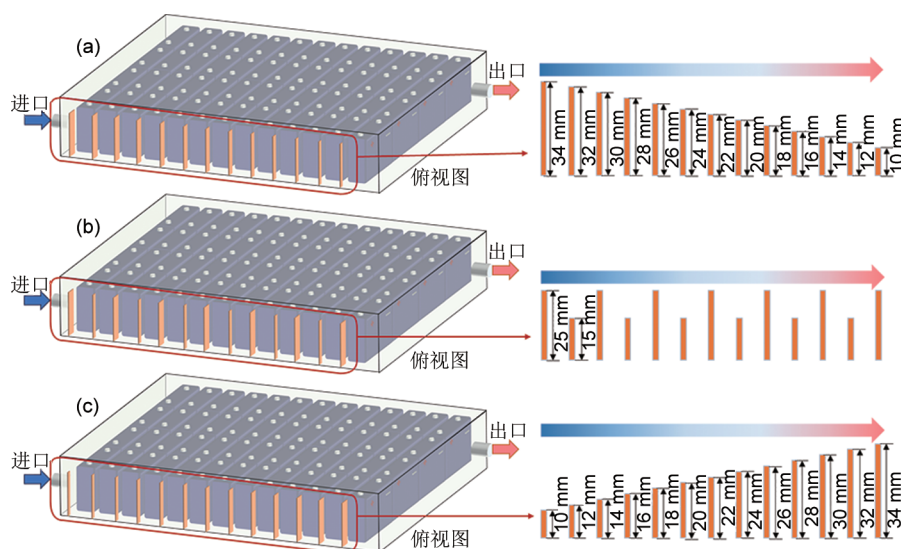


图 2 电池热管理系统的挡板布置: (a) BTMS I; (b) BTMS II; (c) BTMS III

Fig. 2 Baffle configurations of each battery thermal management systems: (a) BTMS I; (b) BTMS II; (c) BTMS III

表 2 模型中各个材料参数

Table 2 Parameter of the materials used in this work

材料	比热容/[J/(kg·K)]	密度/(kg/m ³)	热导率/[W/(m·K)]	动力黏度/[kg/(m·s)]
铝	871	2719	202.4	—
合成油	2523	807	0.1592	0.0071

热系数, Q_{gen} 是电池发热量。其中电池的产热用 Bernardi 经典产热公式^[22]求得, 如下式:

$$Q_{\text{gen}} = \frac{I}{V_{\text{bat}}} \left[(U - U_{\text{avg}}) - T_{\text{bat}} \frac{\partial U_{\text{avg}}}{\partial T_{\text{bat}}} \right] \quad (2)$$

式中, V_{bat} 为单个电池体积, U 为电池开路电压, U_{avg} 为电池电压, I 是电池充/放电电流, $\frac{\partial U_{\text{avg}}}{\partial T_{\text{bat}}}$ 为电池熵系数。在本研究中, 所用电池在 1 C 倍率下的放热速率为 14413 W/m³。

此外, 冷却流体的能量方程、连续性方程及动量方程表达如下^[23-25]:

能量方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{v} T_i) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_i) \quad (3)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\nabla p + (\mu \nabla^2 \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

式中, T_i , ρ , $\mathbf{v}$, p , c_p , λ 分别为传热流体的温度、密度、速度、压力、比热容和导热系数。具体数值如表 2 所示。

1.2.2 电池发热模型验证

Xie 等^[26]对单个储能电池在 1 C 放电倍率下的温度变化进行了实验测试。在 ANSYS Fluent 中进行相同电池发热模拟, 将模拟中的电池平均表面温度与文献^[26]中的实验数据进行对比, 结果如图 3 所示, 模拟结果与文献^[26]中实验结果的最大相对误差为 4.22%, 平均相对误差为 2.43%。因此, 本研究中所建立的模型可靠。

1.2.3 评价指标

采用电池最高温度 (T_{max})、电池组最大温差 (ΔT_{max})、进出口压差 (ΔP) 为主要评价参数, 并提出散热量与泵功耗比 (cost to performance, CTP) 作为评价指标, 表示电池热管理系统带走的电池发热量与系统消耗泵功之间的比值。

$$\text{CTP} = \frac{Q_{\text{bat}}}{P_{\text{pump}}} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T_v}{\Delta P} \quad (6)$$

式中, ΔT_v 为进出口流体温差, Q_{bat} 为流体的散热量, P_{pump} 为消耗泵功。

1.3 网格和时间步长无关性验证

电池热管理系统采用分区域多面体网格划分, 网格为六面体与多面体结构性网格结合, 如图 4(a) 所示。图 4(b) 显示了电池组平均温度随着网格数增

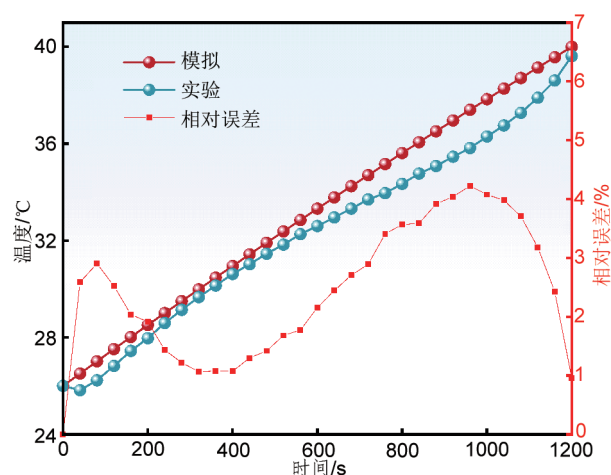


图3 电池平均温度模拟值与文献[26]实验值对比

Fig. 3 Comparison of battery temperature in reference [26] and simulation

加的变化,可以看出当网格数增加至370万后,电池组的平均温度趋于稳定,为了平衡计算性能以及计算精度,在后续的研究中选择370万的网格数作为基准网格数。同时,进行了时间步长无关性研究,如图4(c)所示,时间步长选择为1 s。

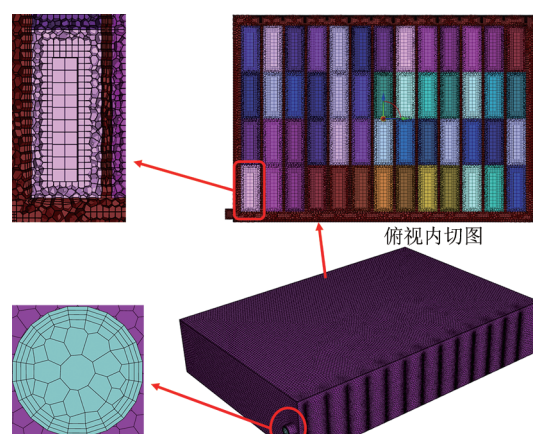
1.4 初始条件和边界条件

本研究中,选择“SST $k-\omega$ ”黏性求解模型;采用“SIMPLE”压力速度耦合求解器,“Second Order Upwind”空间离散格式,“First Order Implicit”时间项离散格式;连续性方程、动量方程、湍流方程等主要控制方程的归一化残差均下降至初始值的 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 量级以下;重力加速度为 9.81 m/s^2 ;电池的热辐射可忽略,因其温度与周围环境相当^[27];冷却液视为不可压缩牛顿流体,热物性恒定;电池简化为体积发热源,放电倍率为1 C。电池热管理系统及环境的初始温度统一设置为 25°C 。流体边界条件分别定义为速度入口和压力出口,电池和流体域之间设置为耦合热传递边界。

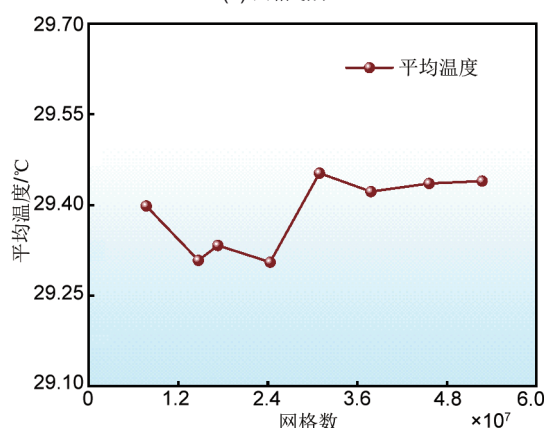
2 入口温度与速度变化的影响

2.1 冷却液入口流速变化对电池组温度场、速度场的影响

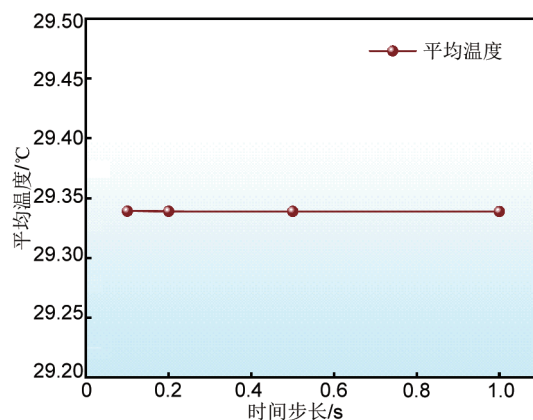
流体速度的变化会影响电池与流体之间的对流传热强度。入口流速选择从 0.5 m/s 增加至 1.7 m/s ^[28],满足电池冷却的基本要求。各流速下电池温度云图如图5所示,随着入口流速的增加,各个BTMS内的电池冷却效果都增强,电池组整体温度



(a) 网格划分



(b) 网格无关性验证



(c) 时间步长无关性验证

图4 网格和时间步长无关性验证

Fig. 4 Grid and time step independence verification

都随之降低。在三个BTMS中,电池组的温度由入口向出口上升。BTMS II的电池组温度分布最均匀,平均温度由 $(30.24 \pm 0.79)^\circ\text{C}$ 降低至 $(29.25 \pm 0.67)^\circ\text{C}$; BTMS III的电池组温度分布最差,标准差达 0.99°C 。三个BTMS中电池组低温区域皆位于靠近入口处的电池,且随着入口流速的增加,电池

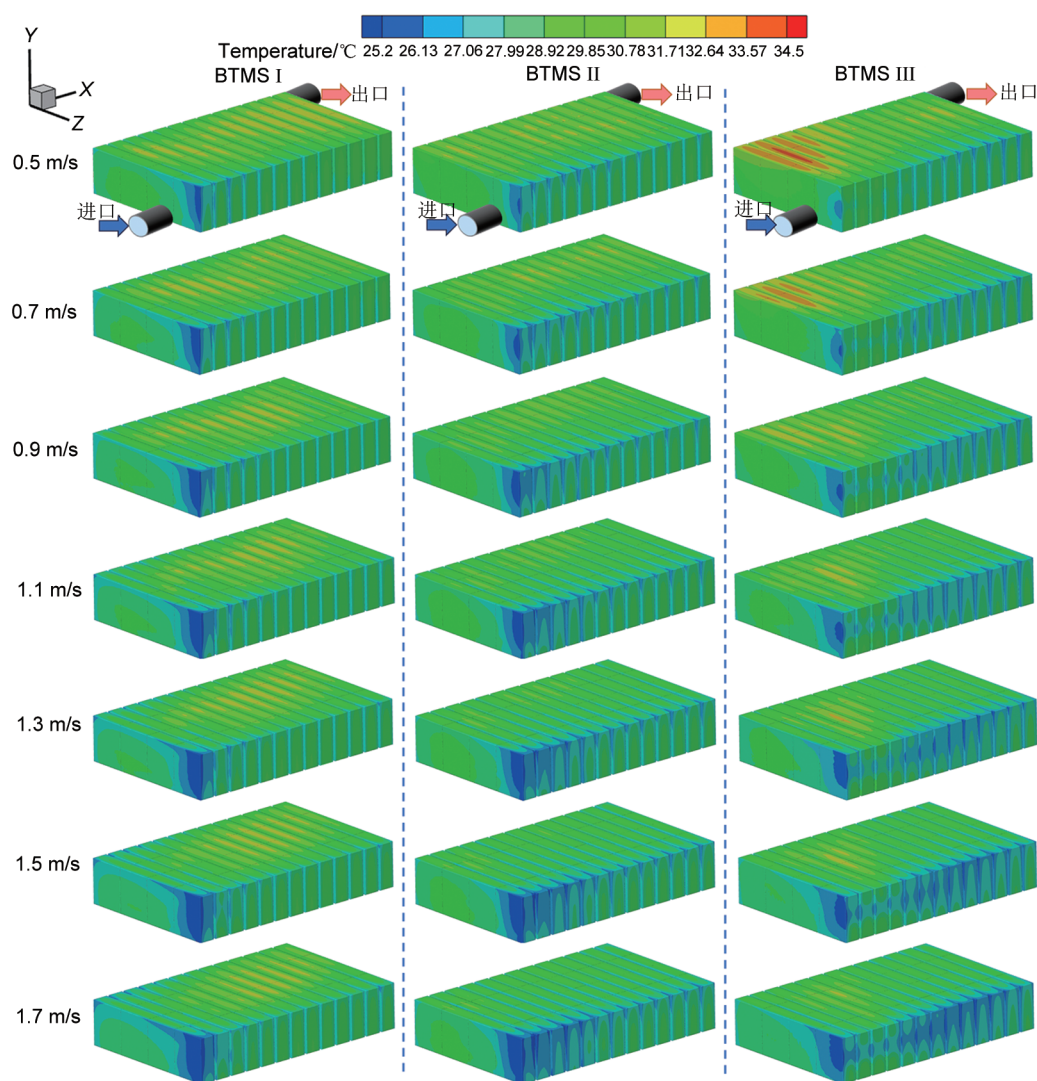


图5 不同入口流速下BTMS电池组的温度分布

Fig. 5 Temperature contours with varied inlet velocity in three BTMSs

组低温区域随之增多,与此同时,电池组内的高温区域也减少。

图6展示了三种BTMS不同入口流速下在 $Y=112\text{ mm}$ 截面处挡板附近的速度分布。对于BTMS I,由于挡板从入口处逐渐减小,位于最前端的最大挡板阻挡入口的流量,使得电池组的流体流速降低。入口流速为 0.5 m/s 时,第一块挡板处冷却液流速降低到 0.1 m/s 以下。对于BTMS II,交错挡板可以较好地平均各个电池间的流量,入口流速为 0.5 m/s 时入口流量在入口处降低到 0.1 m/s ,然而后续挡板处的冷却液流速依然高于BTMS I。对于BTMS III,入口处的挡板对于流体的阻挡作用不大,流体直接流入到后排电池处,前排电池的冷却液流量较小,后排的电池较前两种BTMS获得更多的流量,

入口处 0.5 m/s 的速度到第十一排电池组时才降低到 0.1 m/s ;在低流速下,整体冷却效果较差,位于前排的电池组温度偏高,最高温度达 35.33°C 。

三种BTMS的 $T_{\max}$ 均随入口流速的升高而降低,如图7所示。低 $T_{\max}$ 值代表了对电池组更优的温控效果。在各个流速下,BTMS II的 $T_{\max}$ 最低,BTMS III的 $T_{\max}$ 最高。当流速从 0.5 m/s 增至 1.7 m/s 时,BTMS I、BTMS II、BTMS III的电池最大温度分别从 34.56°C 、 34.16°C 、 35.33°C 降至 34.17°C 、 33.25°C 、 34.4°C ,降幅分别为 1.13% 、 2.66% 、 2.63% 。对于BTMS I,当流速增加至 0.7 m/s 后,其 $T_{\max}$ 便不随入口流速的增加而改变,说明此时前排最宽的挡板对于BTMS的冷却影响过大,阻挡了大部分的入口流量,使得后续入口流速对于 $T_{\max}$ 的影

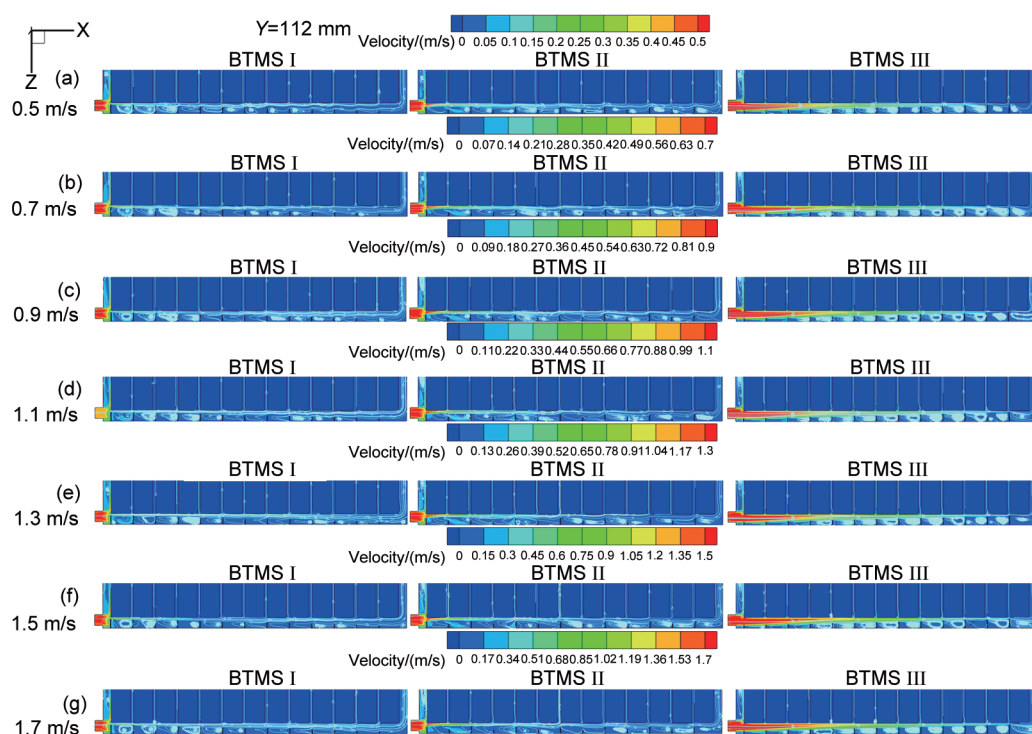


图6 不同入口流速的BTMSs速度分布
Fig. 6 Velocity contours of three BTMSs with varied inlet velocity

响较小。对于BTMS II, 流速从0.5 m/s增至1.3 m/s时, $T_{\max}$ 线性降低, 而流速从1.3 m/s增至1.7 m/s时, 电池最大温度降低幅度减缓, 此时挡板的设置能良好地提升电池热管理效果。对于BTMS III, 其 $T_{\max}$ 在各个流速均保持最高, 随着流速的增加, $T_{\max}$ 先快速降低, 随后又保持平稳, 当流速增加至1.3 m/s时, $T_{\max}$ 再次开始缓慢降低, 因为前排较窄的挡板对于流量的阻挡作用较小, 对于流量重新分配作用较小。

三种BTMS的 $\Delta T_{\max}$ 随入口流速的变化如图8所示。低 $\Delta T_{\max}$ 值代表了电池组拥有更优的温度均匀性。各入口流速条件下, BTMS II的 $\Delta T_{\max}$ 最低, 其温度均匀性最优。在BTMS I中, 其 $T_{\max}$ 在0.7 m/s后保持不变, 而电池组最低温度逐渐降低, 所以其 $\Delta T_{\max}$ 随着入口流速增加先降低后缓慢上升, 最优温度均匀性出现在入口流速0.7 m/s时, $\Delta T_{\max}$ 为8.8℃。对于BTMS II, 其 $T_{\max}$ 基本保持下降, 电池组最低温度也逐渐下降, $T_{\max}$ 下降幅度较大, 则 $\Delta T_{\max}$ 随入口流速增加逐渐降低; 当流速到达1.3 m/s后, $\Delta T_{\max}$ 随着流速增加基本保持不变, 此时 $T_{\max}$ 和电池组最低温度降幅相同, 最优温度均匀性出现在入口流速1.7 m/s时, 此时 $\Delta T_{\max}$ 为7.96℃。对于

BTMS III, $T_{\max}$ 先降低后保持不变又再次降低, 而电池组最低温度一直在降低, 所以 $\Delta T_{\max}$ 随流速增加先降低后升高再降低, 最优温度均匀性出现在入口流速1.7 m/s时, 此时 $\Delta T_{\max}$ 为8.91℃。

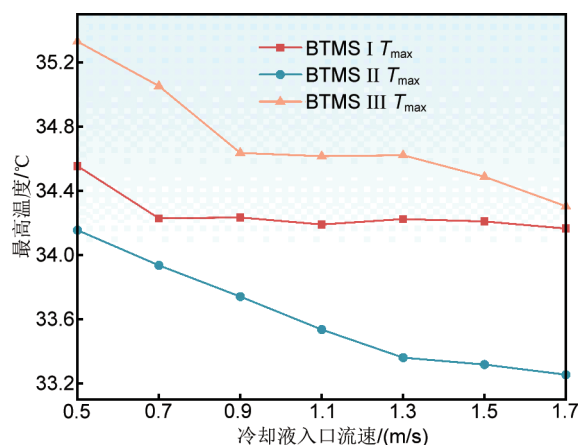


图7 不同进口流速下的各个BTMS最高温度
Fig. 7 Maximum temperature with varied inlet velocity in three BTMSs

各个BTMS的CTP与 ΔP 随入口速度变化如图9所示。各BTMS的 ΔP 均随着入口流速的增加而上升, 所消耗的泵功率同时上升。BTMS II的 ΔP 最高, BTMS III的 ΔP 最低。CTP代表了BTMS所付

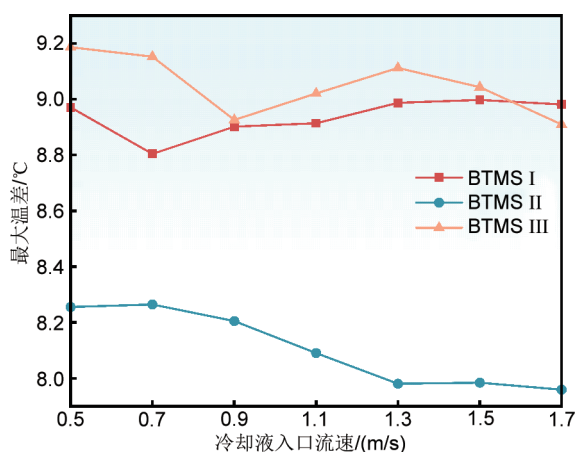


图8 不同进口流速下的各个BTMS最大温差

Fig. 8 Maximum temperature difference with varied inlet velocity in three BTMSs

出的能量与所带来的冷却效果的对比, 即BTMS的冷却效率高。随着入口流速的增加, 各个BTMS的CTP大幅度降低, 系统冷却效率均下降。当流速 ≤ 0.7 m/s时, BTMS III拥有最高的冷却效率, 即最高的CTP; 而当流速 >0.9 m/s后, BTMS I的冷却效率最高, BTMS II的冷却效率最低。

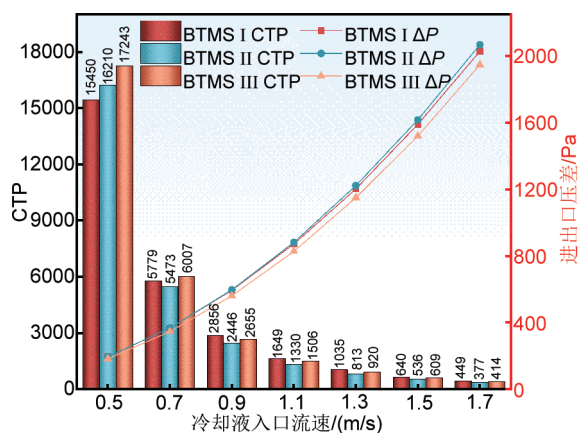


图9 不同进口流速下各个BTMS的CTP与进出口压差

Fig. 9 CTP and pressure drop with varied inlet velocity in three BTMSs

2.2 冷却液入口温度变化对电池组温度场、速度场的影响

进一步分析入口温度变化对于电池模组内温度场、速度场的影响。环境温度保持 25°C , 入口流速选择 1.5 m/s, 电池放热倍率为 1 C。入口温度首先选择与环境温度相同为 25°C ^[29], 而后又以 5°C 为一梯度分别上升、下降两个梯度。不同入口温度条件下的电池模组温度云图如图10所示。随着入口

温度升高, 电池模组温度整体上升, 电池最高温度显著升高, 而最大温差相应降低。尽管电池组的整体温度在上升, 电池模块内整体的温度分布并未随入口温度上升而显著变化。BTMS II展现出最均匀的温度分布特性。

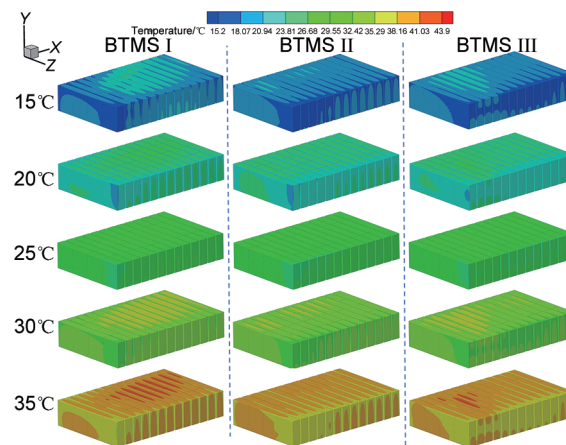


图10 不同进口温度下各个BTMS电池模组温度分布

Fig. 10 Temperature contours of battery module with varied inlet temperature in three BTMSs

三种BTMS中 $T_{\max}$ 随入口温度的变化如图11所示。BTMS II的 $T_{\max}$ 保持最低, BTMS III的 $T_{\max}$ 最高, 而BTMS III与BTMS I的 $T_{\max}$ 较为接近。当入口温度从 15°C 升至 35°C 时, BTMS I、BTMS II和BTMS III的 $T_{\max}$ 分别从 27.29°C 、 24.26°C 和 26.32°C 上升至 43.71°C 、 42.99°C 和 43.92°C , 温升幅度分别为 60.17% 、 77.21% 和 66.87% 。在固定流速条件下, 各BTMS设计对入口温度的变化均较为敏感。

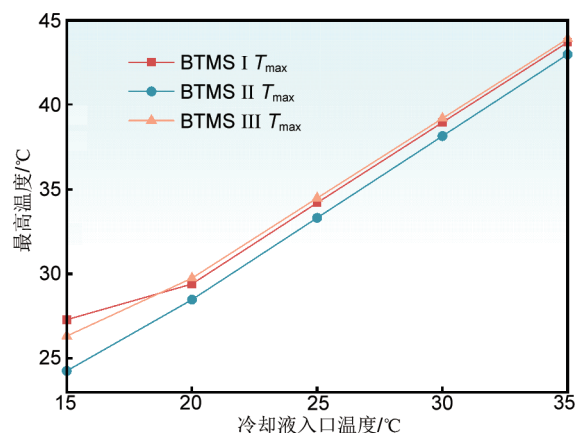


图11 不同进口温度下各个BTMS最高温度

Fig. 11 Maximum temperature with variation of inlet temperature in three BTMSs

三种BTMS中 $\Delta T_{\max}$ 随入口温度的变化如图12所示。在入口温度为15℃工况下,三种系统的 $\Delta T_{\max}$ 均达到各自入口温度条件中的峰值,其中BTMS I、BTMS II、BTMS III的 $\Delta T_{\max}$ 分别为12.08℃、8.92℃和10.87℃。当入口温度从15℃提升至20℃, $\Delta T_{\max}$ 急剧下降。因为在电池放电过程的热管理中,最高温度降幅不大,而15℃的入口温度下,电池组的最低温度接近入口温度,此时的 $\Delta T_{\max}$ 最高。当入口温度超过20℃继续升温,三种BTMS的 $\Delta T_{\max}$ 均呈现随入口温度升高而线性下降的趋势。具体而言,当入口温度从20℃升至35℃时,BTMS I、BTMS II、BTMS III的最大温差分别从9.19℃、8.14℃、9.3℃降至8.5℃、7.66℃、8.47℃。

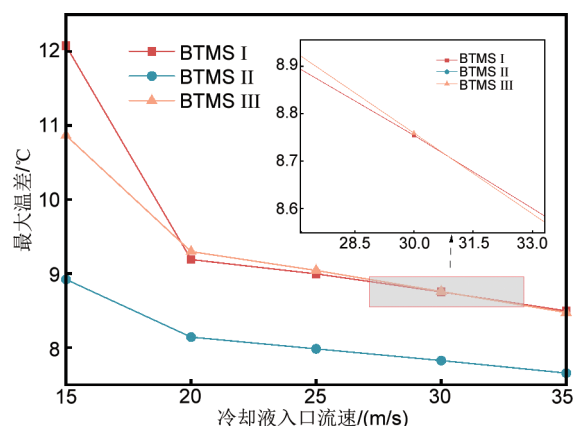


图12 不同进口温度下各个BTMS最大温差

Fig. 12 Maximum temperature difference with inlet temperature in three BTMSs

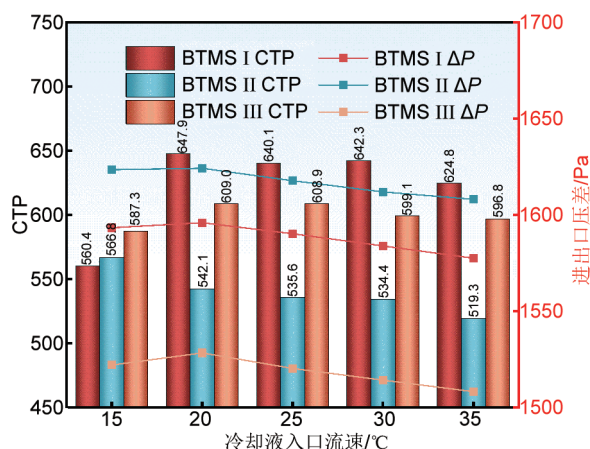


图13 不同进口温度下各个BTMS的CTP与进出口压差

Fig. 13 CTP and pressure drop with inlet temperature in three BTMS

3 正交设计及结果分析

由上述分析可知,冷却液入口速度与入口温度的改变对电池模组温度分布的影响存在差异。因此,后续进行冷却液入口流速、入口温度以及挡板结构三个方面对电池冷却性能影响的正交设计优化研究。

3.1 正交设计

设计因素包括冷却液入口温度、入口流速、挡板类型3种,分别记为影响因素A、B、C。冷却液入口温度包括20℃、25℃、30℃三种,记作 A_1 、 A_2 、 A_3 ;入口流速有0.7 m/s、1.1 m/s、1.5 m/s三种,记作 B_1 、 B_2 、 B_3 ;挡板类型有BTMS I、II、III,记作 C_1 、 C_2 、 C_3 。本研究采用 $L_9(3^4)$ 正交设计表。评价指标有电池最高温度($T_{\max}$)、电池组最大温差($\Delta T_{\max}$)及性能评价指标散热量与泵功耗比(CTP),具体结果见表3。

表3 正交设计结果

Table 3 Orthogonal designed table and its results

序号	影响因素			评价指标		
	A/℃	B/(m/s)	C	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	CTP
1	20	0.7	I	29.40	8.97	5765.35
2	20	1.1	II	28.71	8.26	1340.67
3	20	1.5	III	29.74	9.30	608.99
4	25	0.7	II	33.94	8.26	5473.50
5	25	1.1	III	34.62	9.02	1506.35
6	25	1.5	I	34.21	9.00	640.14
7	30	0.7	III	39.61	8.72	5800.69
8	30	1.1	I	38.95	8.67	1643.38
9	30	1.5	II	38.16	7.83	534.36

3.2 极差分析

通过数据的极差,即各因素数据组平均值中的最大值与最小值的差值,评估组间偏差程度和最优组合方案^[30]。极差值越大,说明该因素水平变化对试验指标的影响越大,该因素越重要。各评价指标下的极差分析结果如表4所示。在 $T_{\max}$ 的影响因素中,冷却液入口温度的影响最为显著,其次是挡板类型,最低是冷却液入口流速。在 $\Delta T_{\max}$ 的影响因素中,挡板类型的影响最为显著,其次是冷却液入口温度,入口流速影响最低。在CTP的影响因素中,入口流速的影响最显著,其次是挡板类型,最低为入口温度。

表 4 极差分析

Table 4 Results of range analysis

综合平均值	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$			$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$			CTP		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	29.28	34.31	34.18	8.84	8.65	8.88	2571.67	5679.84	2682.96
K_2	34.25	34.09	33.60	8.76	8.65	8.12	2540.00	1496.80	2449.51
K_3	38.90	34.04	34.66	8.41	8.71	9.01	2659.47	594.50	2638.67
R_a	9.62	0.28	1.05	0.44	0.06	0.90	119.48	5085.35	233.45
显著性分析	A>C>B			C>A>B			B>C>A		
优化组合	A1, B3, C2 (20℃-1.5 m/s-II)			A3, B1, C2 (30℃-0.7 m/s-II)			A3, B1, C1 (30℃-0.7 m/s-I)		

3.3 优化结果分析

由正交设计结果可知，单一评价指标下的各最优结果不同。图 14 展示了各优化方案冷却性能的雷达对比图， $T_{\max}$ 与 $\Delta T_{\max}$ 指标越小，越靠近内部，代表 BTMS 的温控性能与温度均匀性表现越好；CTP 指标越大，越靠近外边沿，代表 BTMS 的能耗越低。表 5 展示了在三种评价指标下最优化组合结果与初始组合结果的对比，初始组合为电池模组无挡板，入口温度和流速为 30℃，0.7 m/s。评价指标 $T_{\max}$ 下的最优组合是 20℃-1.5 m/s-II，其 $T_{\max}$ 最低为 28.48℃，对比初始组合降低 29.75%；评价指标 $\Delta T_{\max}$ 下的最优组合是 30℃-0.7 m/s-II，其 $\Delta T_{\max}$ 最低为 8.05℃，对比优化前降低 7.36%；评价指标 CTP 下的最优组合是 30℃-0.7 m/s-I，其 CTP 最高为 6276.97，对比优化前提升了 25.77%。综合考虑降低电池组的 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ ，20℃-1.5 m/s-II 的表现最好，能够将 $T_{\max}$ 降低 29.75%，降幅最大，同时还能降低 $\Delta T_{\max}$ 6.33%。

表 5 优化结果对比

优化组合(A-B-C)	$T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	CTP
初始组合	40.54	8.69	4990.93
20℃-1.5 m/s-II	28.48(29.75%)	8.14(6.33%)	542.14(-89.14%)
30℃-0.7 m/s-II	38.71(4.51%)	8.05(7.36%)	5375.78(7.71%)
30℃-0.7 m/s-I	39.00(3.80%)	8.58(1.27%)	5758.80(15.34%)

4 结 论

本研究介绍了一种新型的带有挡板的浸没式电池热管理系统。研究了冷却液入口流速、入口温度、挡板类型对于电池组温度场、速度场的影响。随后，对三种影响因素进行正交设计试验。根据上述分析得出了如下结果：

（1）挡板类型及布置显著影响电池模组的温度场和速度场分布，进而影响电池组的冷却效率。从入口处开始大小交错的挡板布置方式（BTMS II）在减少 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 的表现上最优，分别降低了 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 4.26%、12.42%。

（2）随着冷却液入口流速的增加，BTMS 内 $T_{\max}$ 基本呈单调下降趋势； $\Delta T_{\max}$ 则表现随入口流速增加而波动升降的特性。值得注意的是，入口流速的提升会导致电池仓进出口冷却液液压差增大，进而引起泵功耗增加。然而，随着入口温度升高，电池组整体温度上升， $T_{\max}$ 呈显著上升趋势，而 $\Delta T_{\max}$ 则呈现出减小趋势。

（3）在考虑冷却液入口温度、冷却液入口流速及挡板类型三种影响因素下，正交优化后的最优工况为 20℃-1.5 m/s-II，相比优化前， $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$ 分别减少了 29.75%、6.33%。

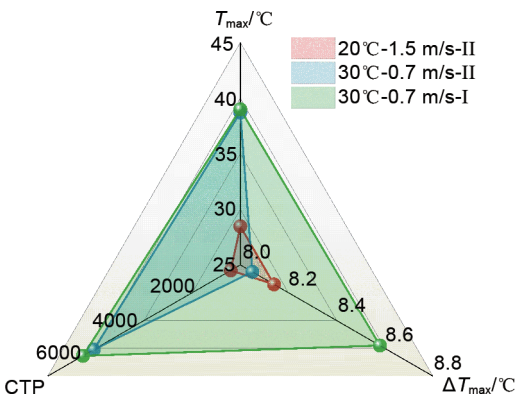


图 14 各优化方案性能雷达图

Fig. 14 Performance radar chart for each optimization scheme

参考文献

- [1] YAO J Y, ZHANG T S, HAN Z W, et al. Study on the effect of immersion thermal management for high-current rate fast charging of 21700 Li-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111061. DOI:10.1016/j.est.2024.111061.
- [2] 康芳明, 苏庆宗, 王亚雄. 基于 280A·h 方块电池组风冷热管理单元的仿真研究[J]. *化工进展*, 2024, 43(12): 6711-6722.
- KANG F M, SU Q Z, WANG Y X. Simulation of air-cooling thermal management unit based on 280A·h prismatic energy storage battery packs[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(12): 6711-6722.
- [3] 李岳峰, 徐卫潘, 韦银涛, 等. 储能锂电池包浸没式液冷系统散热设计及热仿真分析[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(10): 3534-3544.
- LI Y F, XU W P, WEI Y T, et al. Thermal design and simulation analysis of an immersing liquid cooling system for lithium-ions battery packs in energy storage applications[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(10): 3534-3544.
- [4] LI Y, BAI M L, ZHOU Z F, et al. Thermal management for the prismatic lithium-ion battery pack by immersion cooling with Fluorinated liquid[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 257: 124453. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124453.
- [5] ABEROUMAND S, DUBAL D, WOODFIELD P, et al. Enhancement in vanadium redox flow battery performance using reduced graphene oxide nanofluid electrolyte[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108343. DOI: 10.1016/j.est.2023.108343.
- [6] AN Z G, GAO W L, ZHANG J Y, et al. Bionic capillary/honeycomb hybrid lithium-ion battery thermal management system for electric vehicle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 242: 122444. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122444.
- [7] 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. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.120992.
- [8] LI W L, WANG Y W, WU W Y, et al. Analysis of immersion cooling performance for LiFePO₄ battery packs: Coolant effect and optimization[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 64: 103830. DOI:10.1016/j.tsep.2025.103830.
- [9] HAN P, WANG J Y, ZHAO X M, et al. Performance study of fin structure in air-cooled thermal management system for column power battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104: 114697. DOI:10.1016/j.est.2024.114697.
- [10] WANG Y, WANG Y T, HE T B, et al. A numerical study on a hybrid battery thermal management system based on PCM and wavy microchannel liquid cooling[J]. *Renewable Energy*, 2024, 235: 121273. DOI:10.1016/j.renene.2024.121273.
- [11] WANG L B, ZUO H Y, ZHANG B, et al. Effects of the cold plate with airfoil fins on the cooling performance enhancement of the prismatic LiFePO₄ battery pack[J]. *Energy*, 2024, 296: 131210. DOI:10.1016/j.energy.2024.131210.
- [12] DONMEZ M, KARAMANGIL M I. Artificial neural networks-based multi-objective optimization of immersion cooling battery thermal management system using Hammersley sampling method[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 64: 105509. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105509.
- [13] SUN Y W, JIN Y G, JIANG Z P, et al. A review of mitigation strategies for li-ion battery thermal runaway[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 149: 107259. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107259.
- [14] LIU J H, MA Q W, LI X B. Numerical study on heat dissipation performance of a lithium-ion battery module based on immersion cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 66: 107511. DOI: 10.1016/j.est.2023.107511.
- [15] LE Q, SHI Q L, LIU Q, et al. Numerical investigation on manifold immersion cooling scheme for lithium ion battery thermal management application[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 190: 122750. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122750.
- [16] ZOU Z Y, XIE J K, LUO Y J, et al. Numerical study on a novel thermal management system coupling immersion cooling with cooling tubes for power battery modules[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 83: 110634. DOI:10.1016/j.est.2024.110634.
- [17] HE Q, LI X C, SHAN W H, et al. Numerical and experimental investigations on heat transfer characteristics and influencing factors of immersion cooling system for high-capacity prismatic lithium-ion battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104: 114518. DOI:10.1016/j.est.2024.114518.
- [18] SU Q Z, KANG F M, LI J M, et al. Experimental and numerical investigation of a composite thermal management system for energy storage battery based on air cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 262: 125184. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.125184.
- [19] GAN H L, TIAN J A, QIU H R, et al. Thermal performance of symmetrical double-spiral channel liquid cooling plate based battery thermal management for energy storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 263: 125399. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.125399.
- [20] ZHANG Z H, YAO X L, ZHANG J S, et al. Investigation of a novel passive self-adaptive battery thermal regulator combining liquid immersion and PCM[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 120: 116356. DOI:10.1016/j.est.2025.116356.
- [21] EL WAKIL N, CHERECHES N C, PADET J. Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2006, 45(6): 615-626. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2005.09.002.
- [22] 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.
- [23] LIU Q, QIN L, SHI Q L, et al. Optimization of the active battery immersion cooling based on a self-organized fluid flow design[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109851. DOI: 10.1016/j.est.2023.109851.
- [24] TETE P R, GUPTA M M, JOSHI S S. Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct[J]. *Journal of*

- Energy Storage, 2022, 48: 104041. DOI:10.1016/j.est.2022.104041.
- [25] DUBEY P, PULUGUNDLA G, SROUJI A K. Direct comparison of immersion and cold-plate based cooling for automotive Li-ion battery modules[J]. Energies, 2021, 14(5): DOI: 10.3390/en14051259.
- [26] XIE J K, LIU X Y, ZHANG G Q, et al. A novel strategy to optimize the liquid cooling plates for battery thermal management by precisely tailoring the internal structure of the flow channels[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 184: 107877. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2022.107877.
- [27] TIAN J M, MEI W X, TANG J, et al. Numerical study on heat dissipation and structure optimization of immersed liquid cooling mode used in 280Ah LiFePO₄ batteries[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 185: 446-457. DOI: 10.1016/j.psep.2024.02.077.
- [28] 陈岳浩, 陈莎, 陈慧兰, 等. 储能电池组浸没式液冷系统冷却性能模拟研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(2): 648-658.
- CHEN Y H, CHEN S, CHEN H L, et al. Simulation study on cooling performance of immersion liquid cooling systems for energy-storage battery packs[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(2): 648-658.
- [29] XU J C, FANG H F, WANG M Q, et al. Simulation research on thermal management system of battery module with fin heat dissipation structure[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 239: 122177. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2023.122177.
- [30] WANG J G, LU S, WANG Y Z, et al. Novel investigation strategy for mini-channel liquid-cooled battery thermal management system[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(3): 1971-1985. DOI:10.1002/er.5049.