

基于FLUENT方形锂离子电池液冷系统结构优化设计

张德鑫

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年12月15日; 录用日期: 2025年1月5日; 发布日期: 2025年1月15日

摘要

动力电池是电动汽车的重要组成部分, 直接影响着电动汽车的性能, 液体冷却系统是诸多散热方式中比较高效的一种方式, 通常实现更高的冷却效率。本文在传统蛇形流道与并行流道的基础上进行改进, 设计一种单流道并行冷板和双流道并行冷板, 利用Fluent软件仿真技术对比分析在不同结构下电池模组的冷却效果, 选定最佳冷却结构。探究在不同入口流速、初始温度下模组的散热效果。结果表明: 在入口速度为0.35 m/s时, 电池模组温差符合评价标准, 且增大入口流速可有效降低电池模组温度, 但超过0.5 m/s时散热效果降低。降低冷却液入口温度可以有效降低模组最高温度, 但温度低于一定范围, 模组温差将逐渐增大。

关键词

液冷散热, 流道结构, 模组, 动力电池

Optimization Design of Liquid Cooling System Structure Based on FLUENT Square Lithium-Ion Battery

Dexin Zhang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 15th, 2024; accepted: Jan. 5th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

Power battery is an important part of electric vehicles, which directly affects the performance of electric vehicles, and liquid cooling system is one of the more efficient ways to dissipate heat, usually achieving higher cooling efficiency. In this paper, on the basis of the traditional serpentine flow

channel and parallel flow channel, a single flow channel parallel cold plate and a double flow channel parallel cold plate are designed, and the cooling effect of the battery module under different structures is compared and analyzed by using Fluent software simulation technology, and the optimal cooling structure is selected. Explore the heat dissipation effect of the module under different inlet flow rates and initial temperatures. The results show that when the inlet velocity is 0.35 m/s, the temperature difference of the battery module meets the evaluation criteria, and increasing the inlet flow rate can effectively reduce the temperature of the battery module, but the heat dissipation effect is reduced when the inlet velocity exceeds 0.5 m/s. Lowering the coolant inlet temperature can effectively reduce the maximum temperature of the module, but if the temperature falls below a certain range, the temperature difference of the module will gradually increase.

Keywords

Liquid Cooling and Heat Dissipation, Runner Structure, Module, Power Battery

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在国家经济迅猛发展的背景下，传统的内燃机汽车普遍使用，无疑加剧了能源消耗和环境压力。这一问题已经引起了全球的关注，促使我们加快步伐向绿色能源转型[1]。这种转型不仅关乎经济发展，更关乎人类的生存环境和未来。在这种大环境下，锂离子电池以其独特的优势，正在成为新能源汽车产业的核心动力[2]。

电池热管理系统的设计和实施显得尤为重要。这是一个需要精细考虑的问题，因为电池在不同工况下的温度变化是不同的，需要采用不同的冷却方式。其中，液冷散热因其高效率而被广泛应用[3]。

电池在不同工况下的温度变化各异，因此需要采用不同的冷却方式，其中液冷散热相较于其他方式展现出更高的效率。电池热管理系统包含板、水管、水泵和换热器等组件，但其性能尤其散热效果受冷板结构、冷却液流速和种类等影响显著。因此，优化冷板设计和选择适合的冷却液是提高散热效果的关键[4]。

HUANG 等研究了典型直线型多通道冷却板的分布特征，提出了一种流线型微通道冷却板设计方法，结果表明，这种方法在冷却液流动过程中可以降低其流动阻力，使流量分布更加均匀，提高综合换热性能[5]。唐爱坤等[6]设计了一种具有微小通道冷却扁管的散热结构，并利用实验和数值模拟相结合的方法对方形锂离子电池进行生热特性及冷却分析，结果表明该冷却结构能有效降低电池组温度。液冷散热方式虽然取得了一定的研究进展，但对其液冷方式的研究还有很大提升空间，以满足空间占用更小，更安全，更有效地电池组冷却需求。

本文旨在通过增加流道数量，探究单流道与双流道冷却板对电池温度的调控效果，以期更有效地降低电池模组温度，从而降低热失控风险。在保持液冷单流道且横截面一致的条件下，对比分析不同冷却板的性能，为电池热管理提供优化方案。

2. 电池模组的结构设计

2.1. 冷却板的结构设计

针对传统蛇形流道与并行流道的不足，本文创新性地将两者优点融合，设计了单向蛇形并联流道和双向蛇形并联流道，如图 1 所示；这些新型流道结构被放置于电池模组的上下表面，以优化电池在高温

环境下的散热性能。通过精细化设计，流道入口截面统一为 4 mm，流道宽度定为 5 mm，间距设置为 3 mm，冷板厚度保持 4 mm，长度 65 mm。最终，本文将通过对比分析选取最佳的冷却结构，为电池模组的热管理提供最优解决方案。

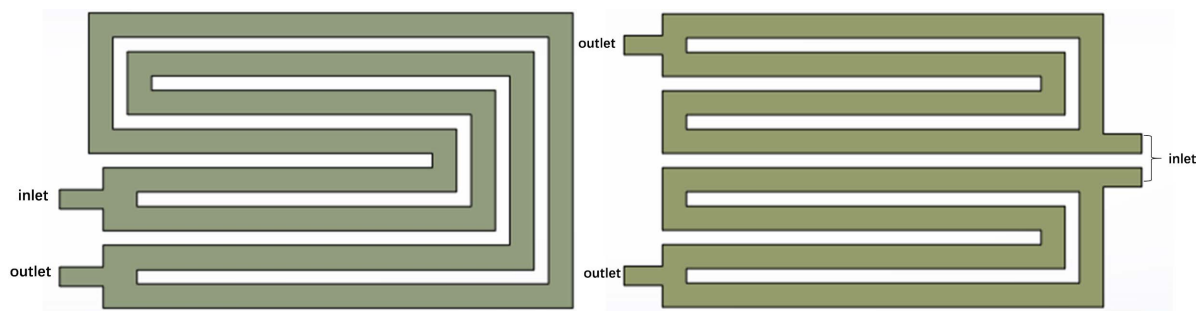


Figure 1. Single- and double-flow channel parallel cold plate structure
图 1. 单、双流道 并联冷板结构图

2.2. 动力电池模组结构设计

锂电池模组由六块单体电池和两块液冷板组成，本文聚焦于冷却板对动力电池性能影响的研究，故而将单体电池简化为尺寸为长 140 mm、宽 18 mm、高 65 mm 的长方体模型[7]。冷却板内部嵌入液冷管道，其安装方式是将冷却板置于电池的上下两侧。在冷却流程中，冷却液由进水口引入，随后分流至各个并联流道，继而汇入中间流道，最终从出水口排出，这一过程有效移除了电池产生的热量。文中仿真模拟所依据的电池单体、液冷板及冷却液的物理属性参数，详细列于表 1 和表 2 中。

Table 1. Physical and thermal characterization parameters of battery monomer
表 1. 电池单体物理参数与热特性参数

参数名称	数值
标称容量/Ah	15
额定电压/V	3.2
密度/(kg·m ⁻³)	2136.8
导热率/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	29/29/1
比热容/(J·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	1633

Table 2. Liquid cooling plate and coolant related parameters
表 2. 液冷板与冷却液相关参数

材料名称或属性	数值
冷板材料	Al
冷板导热率/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	202.4
冷板比热容/(J·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	871
冷板密度/(kg·m ⁻³)	2719
冷却液材料	50%乙二醇 + 50%水
黏度/(pa·s)	0.00394
密度/(kg·m ⁻³)	1071.1
冷却液导热率/(W·m ⁻¹ ·k ⁻¹)	0.419
冷却液比热容/(J·kg ⁻¹ ·k ⁻¹)	3485
紊流普朗特数	0.9

3. CFD 仿真模型建立

3.1. 生热率

由于锂电池在运行过程中热量传递机制相对复杂，这显著增加了建模的困难。本文采用了 BRENARDI 等人提出的生热模型来计算锂离子电池的产热速率[8]。具体计算公式为：

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(U_0 - U) - T \frac{dU_0}{dT} \right] \quad (1)$$

式中： q 为电池的生热率， W/m^3 ； V_b 为电池单体体积， m^3 ； I 为电池充放电电流， A ； U 为负载电压， U_0 为开路电压， V ； T 为电池温度， K ； $\frac{dU_0}{dT}$ 为温度系数。

由于温度系数的值很小，因此式(1)可以简化成：

$$q = \frac{I(U_0 - U)}{V_b} = \frac{I^2 R}{V_b} \quad (2)$$

式中： R 为电池内阻， Ω 。

经计算，锂离子电池以 0.5 C、1 C、1.5 C、2 C 的生热率分别为 6593.4、15934.1、28021.98、42857.1 W/m^3 。

3.2. 边界条件的确定

在进行电池模组热仿真分析时，将电池模组视为总热源，并采用三维、隐式不定常、固体传热、分离固体能量且密度恒定的初始模型设置。在此设置中，电池被假定为均匀发热的固体。考虑到电池与冷却板周边空气流动较为缓慢，我们将其表面与空气的热交换视为自然对流，自然对流换热系数设定为 4 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。壁面的粗糙度为 0，并应用了标准壁面函数来描述层流状态，同时假设壁面为无滑移边界。在冷却液方面，设定其入口流速为 0.5 m/s ，出口则设为压力出口，相对压力设为 0 pa 。环境的温度以及电池、冷却板和冷却液的初始温度均被设定为 25℃。由于整个热交换过程随时间而变化，因此该仿真被归类为瞬态仿真[8]采用 SIMPLE 算法，其他均保持默认。

3.3. 不同放电倍率下无冷板冷却系统自然散热情况分析

25℃环境温度下，通过式(2)计算得出的生热率，且在自然对流换热系数为 4 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 条件下，可得出模组仿真温度云图(图 2)，表 3 为不同放电倍率下个温度数据。

Table 3. Battery pack temperature data at different discharge multipliers
表 3. 不同放电倍率下电池组温度数据

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	平均温度/℃	最大温差/℃
0.5	37.09	35.97	36.53	1.12
1	41.33	39.95	40.64	1.38
1.5	44.68	43.18	43.93	1.5
2	47.78	46.19	46.99	1.59

通过上述模组云图温升分析，处在电池模组中间部位的电池因受两侧电池的阻挡，与空气接触面积减少，导致热量易于在该区域积聚。相比之下，模组两侧的电池由于与外界空气接触面积更大，自然对流散热更为有效，因此温度相对中部稍低。在电池以较低倍率运行时，尽管电池的最高温度和最大温差

保持在相对合理的水平，但仍接近 40°C ，表明有必要采取散热措施进一步降低温度。然而，随着放电倍率的增加，电池的最高温度可能会超出其适宜的工作范围，极端情况下甚至可能引发热失控。为应对这一问题，需从多个角度优化冷却系统的初始条件，以实现更有效的降温效果。

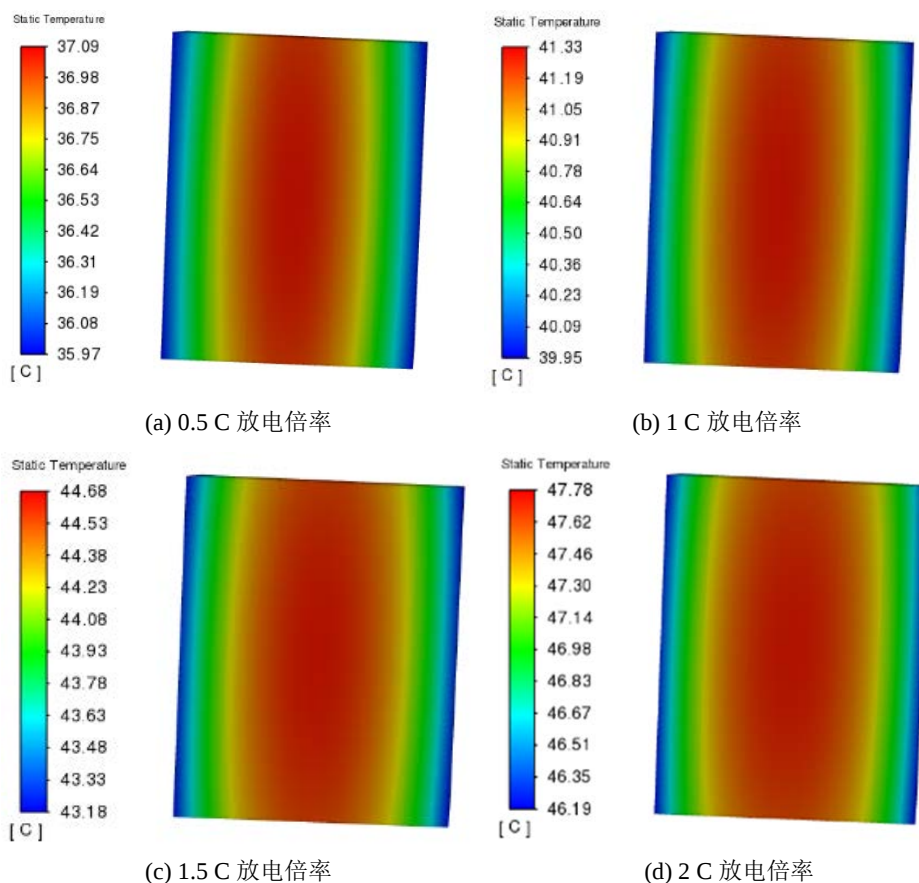


Figure 2. Simulated temperature cloud of battery module under different discharge multipliers
图 2. 不同放电倍率下电池模组仿真温度云图

4. 仿真结果分析

4.1. 流道数对动力电池组温度影响

本文在 2 C 放电倍率下对模组进行液冷散热分析，根据液冷散热系统的评价指标要求，电池组中每个电池的平均温差需控制在 5°C 以内，冷却水进出口的温差同样不应超过 5°C ，系统整体的总压降需维持在 40 kPa 以下，各模组之间的最大流量差异需小于 20%，并且在主要的换热区域内应避免出现明显的流动死区[9]。

基于上述评价指标，利用 ANSYS 软件对电池组的整个液冷系统进行了深入的 2 C 放电倍率降温仿真分析。在仿真设置中，进水口的冷却液温度被设定为 25°C ，自然对流换热系数设为 $4\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，冷却液的流速则保持在 0.5 m/s，而仿真的最大物理时间设定为 1800 秒。

经过仿真计算，获得了如图 3 所示的仿真结果。为我们提供关于液冷系统在 2 C 放电倍率下的实际降温效果、温度分布、流量分配以及压降情况等重要信息，从而帮助我们全面评估和优化液冷系统的性能。

由图 4(a)与图 4(b)分析可知，2C 倍率下完全放电，通过此液冷系统冷却后，电池模组的最高温度

31.64℃，最低温度 25℃，最大温差 6.64℃，相对于无冷板系统模组温度下降了 16.14℃，电池的温差超过了 5℃，流道压力为 483.13 pa；且观察图 4(c)与图 4(d)发现此液冷系统的最高温度为 29.55℃，在原有基础上温度下降 18.23℃，压力为 410.68 pa，电池组温差未超过 5℃，符合评价指标。

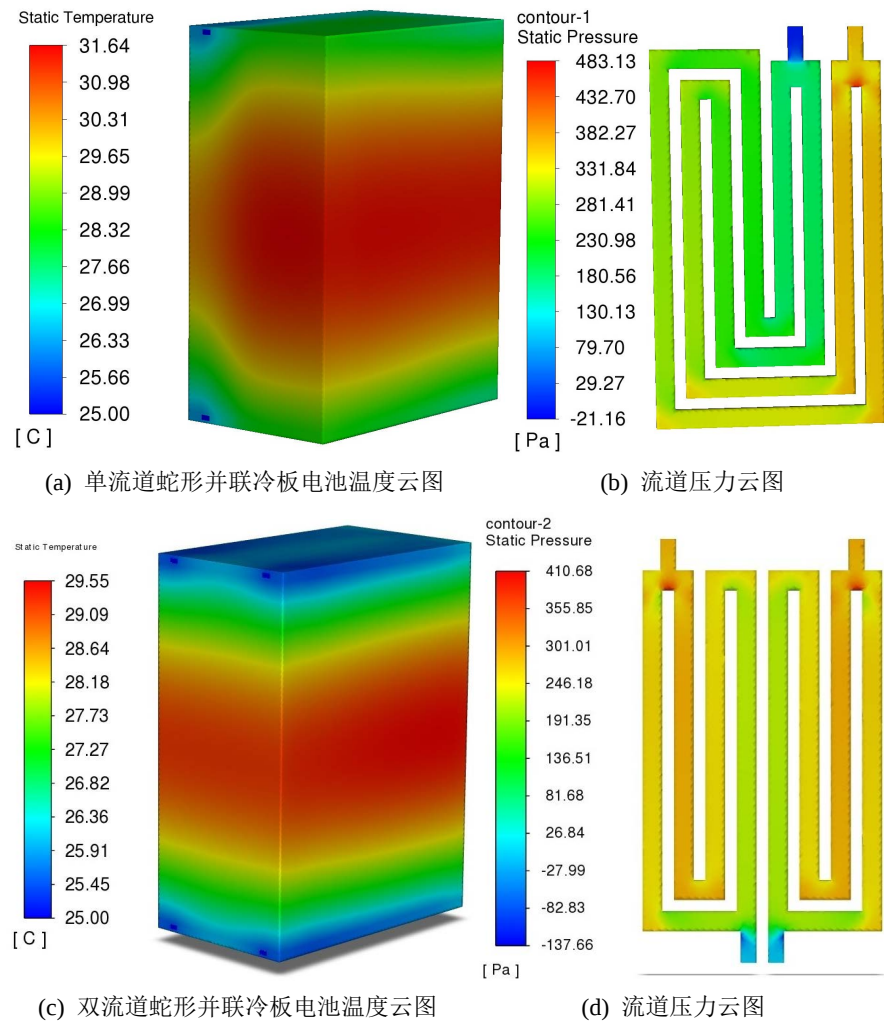


Figure 3. Simulation cloud of cell temperature and runner pressure for different runners at 2 C discharge multiplication rate

图 3. 2 C 放电倍率下不同流道电池温度及流道压力仿真云图

2 C 放电倍率下，单双流道冷板对比效果如表 4 所示，对比放电结束后双流道电池组最高温度与冷板压力均小于单流道冷却方式，由此说明双流道冷却方式更适用于电池模组的散热，优于单流道冷却方式，从温差方面而言，双流道冷却方式温差不超过 5℃，符合评价标准，单流道冷却方式超过 5℃。

Table 4. Temperature and pressure distribution before and after runner optimization
表 4. 流道优化前后温度与压力分布

冷却结构	最高温度/℃	温降/℃	温差/℃	流道压力/pa
单流道	31.64	16.14	6.64	483.13
双流道	29.55	18.23	4.55	410.68

4.2. 冷却液入口速度对双流道冷却方式散热效果的影响

在双流道冷却方式的基础上, 采用不同的入口流速, 探究入口流速对电池模组温度的影响以及当流速为多少时符合评价温差标准, 流速为何值时散热效果减弱。入口流速分别设置为 0.2 m/s、0.35 m/s、0.5 m/s、0.7 m/s、1 m/s, 放电倍率为 2 C, 其余参数保持不变。电池模组完全放电后的温度云图如图 4 所示。

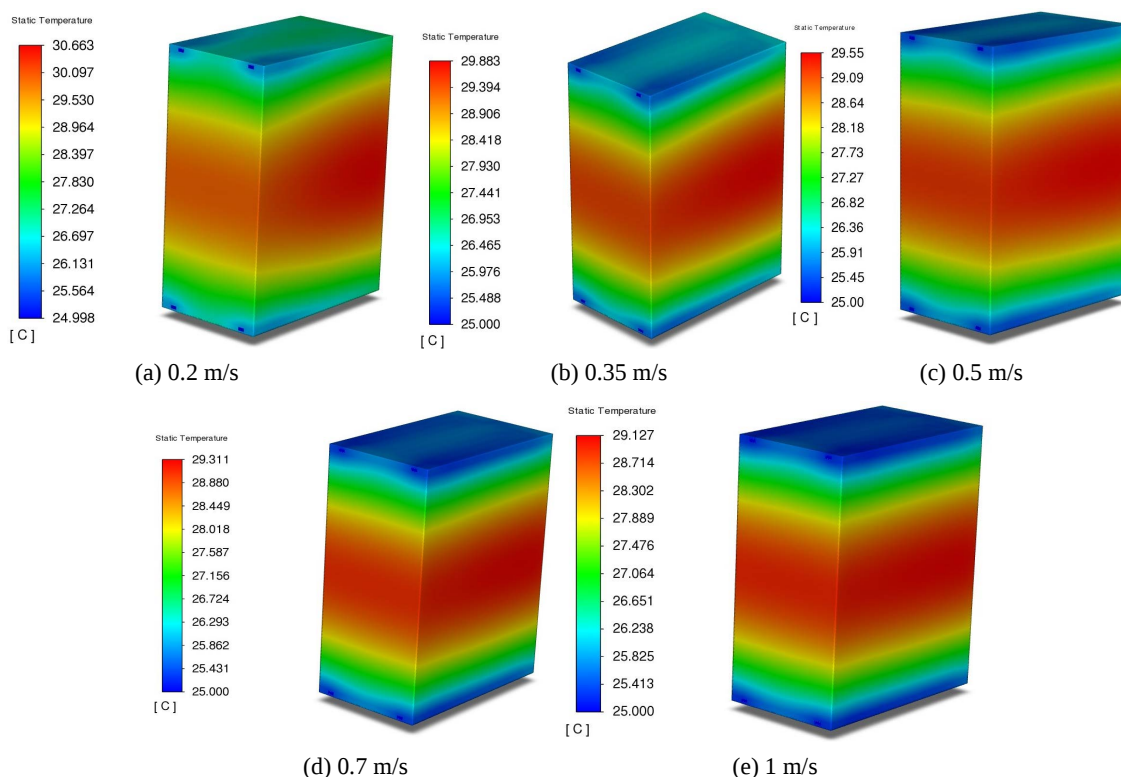


Figure 4. Temperature distribution of battery module at different coolant inlet flow rates

图 4. 不同冷却液入口速度电池模组温度分布

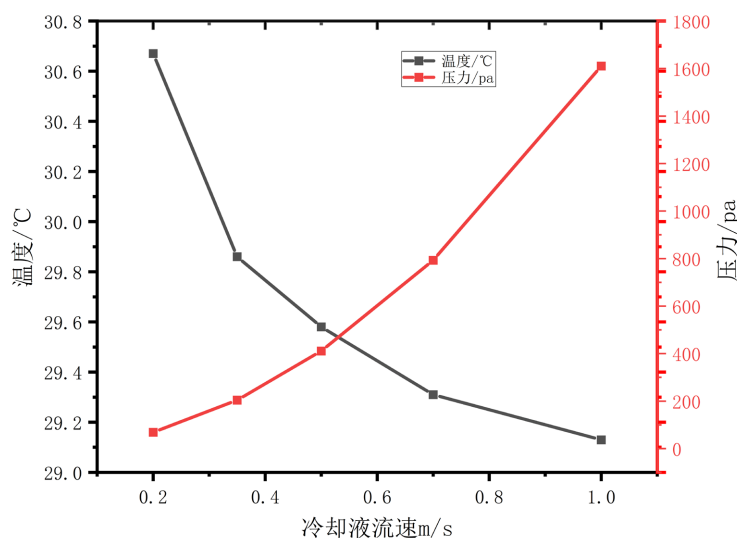


Figure 5. Coolant inlet flow rate vs. maximum battery pack temperature and cold plate pressure distribution

图 5. 冷却液入口流速与电池组最高温度以及冷板压力分布

冷却液入口流速与电池组最高温度以及冷板压力关系如图 5 所示。随着冷却液流速逐渐增大，模组最高温度及温差逐渐降低，当流速达到 0.35 m/s 时，模组温差小于 5℃，符合评价标准，当入口流速超过 0.5 m/s 时，降温效果逐渐降低。相对于入口流速对温度的影响，如图 6 所示，随着入口流速的增大，模组温差逐渐较小。

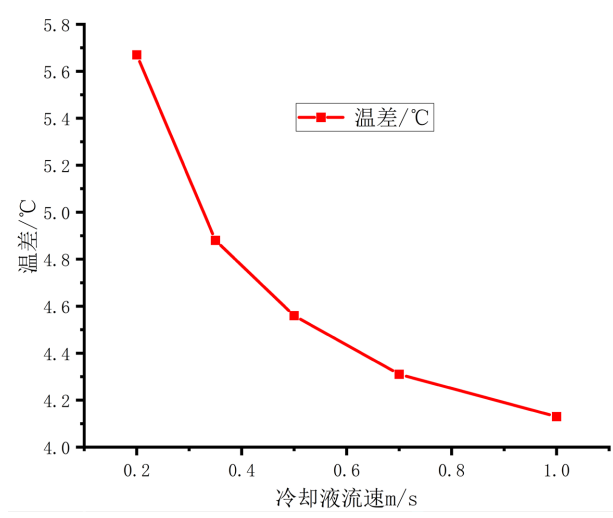


Figure 6. Coolant inlet flow rate and temperature difference distribution
图 6. 冷却液入口流速与温差分布

4.3. 冷却液入口温度对双流道冷却方式散热效果的影响

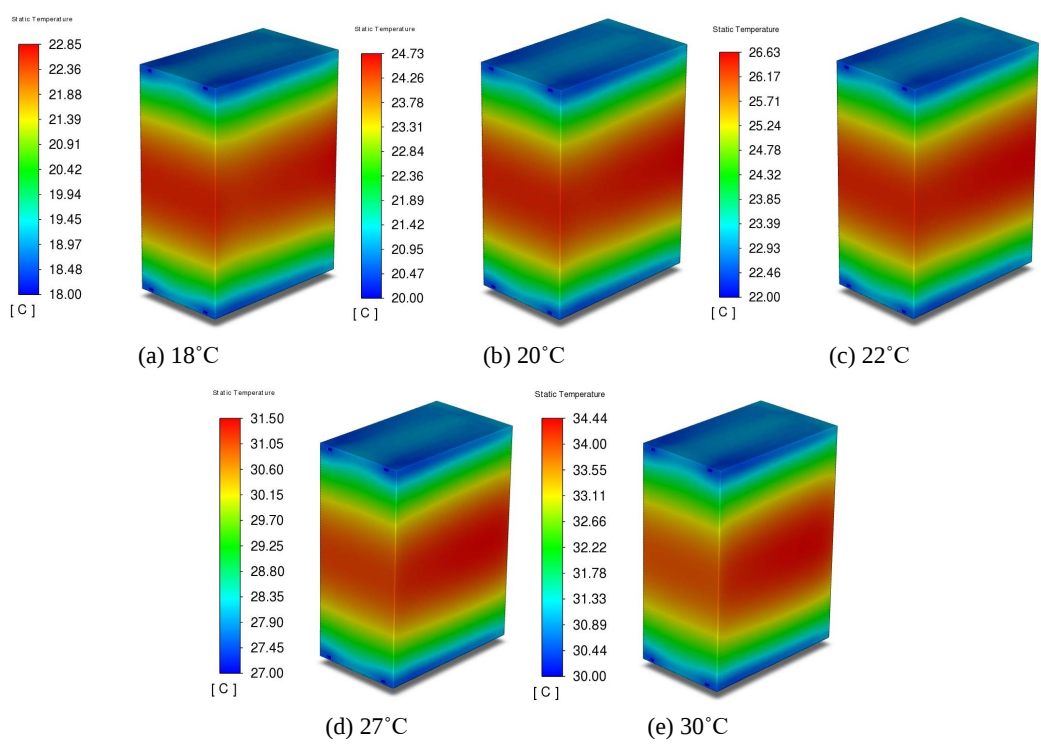


Figure 7. Temperature distribution of battery module at different coolant inlet temperatures
图 7. 不同冷却液入口温度下电池模组的温度分布

在双流道冷却板的基础上，探究不同冷却液温度对散热效果影响，对电池模组进行对比分析。冷却液温度分别设为 18℃、20℃、22℃、27℃、30℃，环境温度设为 25℃，冷却液入口流速设为 0.5 m/s，其余参数保持不变，电池模组完全放电后，冷却液入口温度与电池模组温度关系如图 7 所示。

当电池模组完全放电后，图 8 展示了冷却液入口温度与模组最高温度及其温差分布之间的关系。通过对仿真结果的分析，我们发现：随着冷却液入口温度的下降，动力电池模组的最高温度呈现降低趋势，散热性能因此显著提升。同时，模组的最低温度也随之达到更低水平。然而，这一变化导致的结果是，冷却液入口温度越低，模组内部的温差变得越大，以至于可能超出既定的评价标准。这种温差的增大加剧了锂离子单体电池之间的不一致性，为电池的有效控制带来了不利影响。

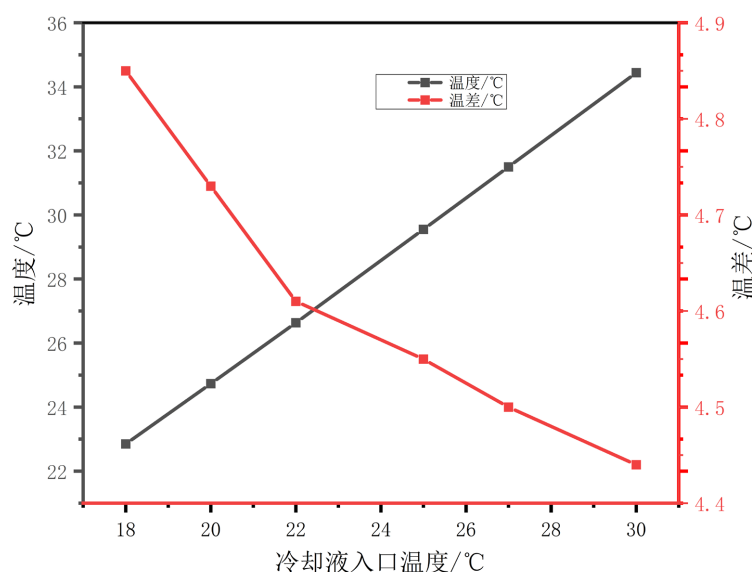


Figure 8. Distribution of coolant inlet temperature and module maximum temperature and temperature difference
图 8. 冷却液入口温度与模组最高温度及温差分布

5. 结论

本文对装配有单流道冷板和双流道冷板的动力电池模组进行仿真分析。仿真结果表明：双流道冷板相对于单流道冷板有更加显著的散热效果。在双流道冷板的基础上，针对冷却因素，对装配有双流道液冷板电池模组进行散热分析可得出以下结论：

(1) 随着冷却液流速不断变大，电池模组温度也在逐渐上升，但相应温差却在不断下降，并且当冷却液入口流速达到 0.35 m/s 时，动力电池模组温差符合评价标准，在 5℃ 之内；冷却液入口温度同入口流速有着相同的结果。

(2) 增加冷却液入口流速以及降低冷却液入口温度对降低模组温度有较好的效果，但超过一定范围散热效果将会降低，冷却液入口温度过低温差将会越来越大。

参考文献

- [1] Deng, T., Zhang, G., Ran, Y. and Liu, P. (2019) Thermal Performance of Lithium Ion Battery Pack by Using Cold Plate. *Applied Thermal Engineering*, **160**, Article 114088. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114088>
- [2] 杜光超, 郑莉莉, 张志超, 等. 圆柱形高镍三元锂离子电池高温热失控实验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 249-256.
- [3] 邹晓辉, 李翔晟, 张继龙, 等. 动力电池模组热管流道变结构研究[J]. 电源技术, 2020(4): 527-531.

-
- [4] Balakrishnan, P.G., Ramesh, R. and Prem Kumar, T. (2006) Safety Mechanisms in Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **155**, 401-414. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.002>
 - [5] Huang, Y., Mei, P., Lu, Y., Huang, R., Yu, X., Chen, Z., *et al.* (2019) A Novel Approach for Lithium-Ion Battery Thermal Management with Streamline Shape Mini Channel Cooling Plates. *Applied Thermal Engineering*, **157**, Article 113623. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.033>
 - [6] 唐爱坤, 娄刘生, 单春贤, 等. 大容量锂电池液冷冷却结构设计及仿真分析[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 775-777.
 - [7] 汪鹏伟. 强制风冷锂离子电池热管理系统设计与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
 - [8] Bernardi, D., Pawlikowski, E. and Newman, J. (1985) A General Energy Balance for Battery Systems. *Journal of the Electrochemical Society*, **132**, 5-12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
 - [9] 贾明正, 李一岚, 黑中垒. 冷却板流道数对动力电池冷却效果的影响研究[J]. 河南科技, 2021, 40(15): 117-121.