

分类号: TM912

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110134



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于液体冷却的无模组动力电池包
热管理研究

论 文 作 者 张红松

校 内 导 师 王建彬 教授

校 外 导 师 汪爽、周超群 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向 (领域) 电池包热管理

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TM912

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：22201110134

基于液体冷却的无模组动力电池包热管理研究

RESEARCH ON THERMAL MANAGEMENT OF CTP POWER BATTERY PACK BASED ON LIQUID COOLING

学生姓名

张红松

指导教师

王建彬 教授

校外导师

汪爽、周超群 高级工程师

专 业

机械

研究方向

电池包热管理

论文答辩日期：2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：张红松

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：张红松

日期：2025 年 5 月 20 日

指导教师签名：王建树

日期：2025 年 5 月 20 日

基于液体冷却的无模组动力电池包热管理研究

摘要

高能量密度的电池包能有效提升电动汽车的续航里程,为电动汽车产业的快速发展奠定基础。但是随着电池包能量密度的增加,在运行过程中会产生大量热量,如果不及时散热,可能会缩短电池寿命,甚至导致发生热失控。因此对于无模组电池包进行热管理研究并将电池包控制在一定的平均温度范围是至关重要的。在电池包的所有冷却方法中,液体冷却因其更高的导热性和更好的冷却效果而被广泛使用。

目前关于无模组电池包热管理的研究较少,因此本文设计了一种无模组电池包,在搭建单体热模型的基础上,探究其热管理性能,为后续无模组电池包研究提供参考。主要开展以下几个方面的工作:

(1) 研究分析了电池的生热机理以及传热特性。明确其主要的热传递方式为热传导与热对流,并确定了相应的热传导系数公式和对流传热方程。为简化计算同时确保结果的准确性,进一步研究了电池模型简化后材料属性参数的近似计算方法。

(2) 完成了方形锂离子电池的性能测试并建立单体电池的仿真模型。搭建测试电池性能的实验平台,通过 HPPC 内阻实验测得锂离子电池放电内阻,采用直接测量法测定熵热系数与 SOC 的实验曲线。将电池内阻的变化拟合到 SOC 和温度的多项式函数关系中,根据 Bernardi 理论算出单体电池的生热速率特性曲线。随后建立了单体电

池的热仿真模型，并与实验进行对比分析。分析表明，电池放电最大温度偏差控制在 3%以内，能够较真实地反映锂离子电池的产热过程。

(3) 设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板。在搭建单体电池热模型的基础上，分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。研究结果表明，电池包具有很好的冷却性能，能够满足 2.0C 放电工况的冷却需求，并且在低温环境下电池包也能正常的工作。此外在 CLTC 工况下小流量运行电池包温差仅为 0.25°C 左右，说明在小流量冷却液在电池回路内循环流动有利于电池包均温性，与无冷却液流动相比，冷却液流量为 $2\text{L}/\text{min}$ 时电池包的最大温差下降了 1.31°C 。

(4) 为了提升电池包仿真分析的计算效率，提出了基于相似原理的高效热管理仿真方法。首先对温度场的相似准则进行了推导，其次将电芯和电池包按比例缩小建立缩小模型，并通过仿验证其有效性。研究表明，理论推导确定的相似准则和相似关系对于电芯和电池包都是可行的，电芯的计算效率提升了 3 倍多，电池包的计算效率提升了 4.5 倍多，显著提高了计算效率。

关键词：无模组电池包，锂离子电池，液体冷却，均温性，相似理论

RESEARCH ON THERMAL MANAGEMENT OF CTP POWER BATTERY PACK BASED ON LIQUID COOLING

ABSTRACT

High energy density battery packs can effectively increase the driving range of electric vehicles and lay a foundation for the rapid development of the electric vehicle industry. However, as the energy density of battery packs increases, a large amount of heat is generated during operation. If the heat is not dissipated in time, it may shorten the battery life and even lead to thermal runaway. Therefore, it is crucial to conduct thermal management research on module-free battery packs and keep the battery pack within a certain average temperature range. Among all the cooling methods for battery packs, liquid cooling is widely used due to its higher thermal conductivity and better cooling effect.

Currently, there are fewer studies on the thermal management of CTP battery packs, so this paper designs a CTP battery pack to explore its thermal management performance based on the construction of a single-body thermal model, which provides a reference for the subsequent research on CTP battery packs. The following aspects are mainly carried out:

(1) The heat generation mechanism and heat transfer characteristics of the battery are studied and analysed. The main heat transfer modes are

heat conduction and convection, and the corresponding heat conduction coefficient formula and convection heat transfer equation are determined. In order to simplify the calculation and ensure the accuracy of the results, the approximate calculation method of the material property parameters after the simplification of the battery model is further studied.

(2) Completed the performance test of square lithium-ion battery and established the simulation model of single cell. The experimental platform for testing battery performance was built, and the internal resistance of lithium-ion battery discharge was measured by HPPC internal resistance experiment, and the experimental curves of entropy thermal coefficient and SOC were determined by direct measurement method. The variation of battery internal resistance was fitted to the polynomial functional relationship between SOC and temperature, and the characteristic curve of heat generation rate of a single cell was calculated according to Bernardi's theory. Subsequently, a thermal simulation model of the single cell was established and analysed in comparison with the experiment. The analysis shows that the maximum temperature deviation of battery discharge is controlled within 3%, which can reflect the heat generation process of lithium-ion battery more realistically.

(3) A CTP battery pack and a symmetric serpentine runner liquid cooling plate are designed. On the basis of building a thermal model of a single battery, the cooling performance of the CTP battery pack under

different discharge multipliers, the low-temperature heating performance, and the temperature uniformity of the battery pack under CLTC conditions are analysed. The results show that the battery pack has good cooling performance, which can meet the cooling demand of 2.0C discharge condition, and the battery pack can work normally under low temperature environment. In addition, the temperature difference of the battery pack under CLTC condition with small flow rate is only about 0.25°C, which indicates that the circulating flow of coolant in the battery circuit with small flow rate is conducive to the temperature uniformity of the battery pack, and the maximum temperature difference of the battery pack with a coolant flow rate of 2L/min decreases by 1.31°C compared with that without coolant flow.

(4) In order to improve the computational efficiency of the battery pack simulation analysis, an efficient thermal management simulation method based on the similarity principle is proposed. Firstly, the similarity criterion of the temperature field is derived, and secondly, the cell and the battery pack are scaled down to establish a scaled-down model, and its validity is verified by simulation. It is shown that the similarity criterion and similarity relationship determined by the theoretical derivation are feasible for both the electric cell and the battery pack, and the computational efficiency is improved by more than 3 times for the electric cell and more than 4.5 times for the battery pack, which significantly

improves the computational efficiency.

KEY WORDS: CTP Battery Pack, Lithium-Ion Battery, Liquid Cooling, Homogeneous Temperature, Similarity Theory

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
插图清单.....	X
插表清单.....	XII
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 无模组电池包热管理研究现状.....	3
1.3 基于相似原理的电池包高效热管理研究现状.....	6
1.4 本文主要研究内容.....	7
第 2 章 锂离子动力电池结构及热特性.....	9
2.1 锂离子电池的种类.....	9
2.2 锂离子电池结构与工作原理.....	10
2.2.1 锂离子电池结构.....	10
2.2.2 锂离子电池工作原理.....	12
2.3 锂离子电池的生热特性.....	13
2.4 锂离子电池的传热及热物特性.....	14
2.4.1 锂离子电池的传热.....	14
2.4.2 热物性参数.....	14
2.5 本章小结.....	15
第 3 章 锂离子电池性能测试及仿真方法建立.....	16
3.1 研究对象及实验设备.....	16
3.1.1 锂离子电池基本参数.....	16
3.1.2 实验设备.....	17
3.2 锂离子电池内阻特性.....	18
3.2.1 HPPC 内阻特性实验.....	18
3.2.2 实验设计.....	19
3.2.3 内阻特性.....	20

3.3 生热速率的获取.....	22
3.4 锂离子电池温升实验.....	25
3.4.1 温升实验方案设计.....	25
3.4.2 不同环境温度下温升测试结果.....	26
3.5 电池单体热模型的建模方法.....	27
3.5.1 模型建立及网格划分.....	27
3.5.2 边界条件的设置与网格无关性验证.....	27
3.5.3 仿真结果分析.....	28
3.5.4 模型验证.....	29
3.6 本章小结.....	31
第 4 章 无模组电池包设计及其性能分析.....	32
4.1 无模组电池包设计及流体分析.....	32
4.1.1 无模组电池包.....	32
4.1.2 液冷板设计.....	32
4.1.3 流体分析.....	33
4.2 冷却性能分析.....	35
4.2.1 仿真模型与边界条件.....	35
4.2.2 不同放电倍率下电池包冷却性能影响分析.....	37
4.2.3 导热材料的影响分析.....	38
4.2.4 不同入口水温与冷却液质量流量的影响分析.....	39
4.3 电池包的低温加热性能分析.....	42
4.3.1 冷却液质量流量对于加热性能的影响.....	42
4.3.2 冷却液入口温度对于加热性能的影响.....	44
4.4 CLTC 工况下电池包均温性能分析.....	46
4.5 本章小结.....	49
第 5 章 基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法.....	50
5.1 温度场相似准则的推导.....	50
5.1.1 温度场相似准则.....	50
5.1.2 温度场原型与相似模型的参数设置.....	53

5.2 电芯的相似准则验证.....	54
5.2.1 模型建立及边界条件的设置.....	54
5.2.2 仿真分析.....	55
5.3 电池包的相似准则验证.....	58
5.3.1 模型建立及边界条件的设置.....	58
5.3.2 仿真分析.....	59
5.4 本章小结.....	60
第 6 章 总结与展望.....	61
6.1 全文总结.....	61
6.2 研究展望.....	63
参考文献.....	64
攻读硕士学位期间取得的成果.....	71
致谢.....	72

插图清单

图 1-1 近 6 年全球电动汽车销量	1
图 1-2 中国 2024 年新能源汽车分布情况	2
图 1-3 电池包直接冷却示意图	4
图 1-4 电池包间接冷却示意图	4
图 1-5 U 形转弯和逆流顶蓬到顶蓬的液冷板	4
图 1-6 回形冷却结构	5
图 2-1 锂离子电池结构	11
图 2-2 电池内部结构图	11
图 2-3 锂离子电池工作原理示意图	12
图 3-1 方形锂离子电池	16
图 3-2 实验平台	18
图 3-3 温度传感器布置方式	18
图 3-4 HPPC 测试电芯脉冲电流与电压变化	19
图 3-5 恒温 2h 温度监测图	20
图 3-6 不同温度不同 SOC 下的电芯放电内阻	21
图 3-7 熵热系数测试过程	23
图 3-8 不同 SOC 下的熵热系数	23
图 3-9 不同环境温度下放电倍率为 0.5C 的生热速率.....	25
图 3-10 0.5C 放电倍率下电池的温升.....	26
图 3-11 几何模型和网格划分	27
图 3-12 网格无关性验证	28
图 3-13 不同环境温度下单体电池温升云图	29
图 3-14 实验与仿真对比	30
图 4-1 无模组电池包	32
图 4-2 液冷板结构图	33
图 4-3 不同质量流量下液冷板的压降	34
图 4-4 仿真模型和网格划分	35
图 4-5 网格无关性验证	36

图 4-6 环境温度为 42℃时不同放电倍率下的电池包生热速率	37
图 4-7 电池包温度分布云图	38
图 4-8 不同放电倍率下电池包的温度曲线图	39
图 4-9 入口水温 20℃	40
图 4-10 入口水温 25℃	41
图 4-11 不同流量下电池包加热性能的温度曲线图	43
图 4-12 不同流量下电池包的温差与加热速率	44
图 4-13 不同温度下电池包加热性能的温度曲线图	45
图 4-14 不同温度下电池包的温差与加热速率	46
图 4-15 生热率曲线	47
图 4-16 电池包温度分布云图	48
图 4-17 电池包温度变化曲线图	49
图 5-1 电池的导热热平衡分析	50
图 5-2 网格划分	54
图 5-3 原型与相似缩小模型计算结果比对	55
图 5-4 温度-时间历程曲线	56
图 5-5 不同缩小比例下电芯的温度云图	58
图 5-6 网格划分	58
图 5-7 原型与相似缩小模型计算结果比对	59

插表清单

表 2-1 电池不同外形结构特点	9
表 3-1 锂离子电池基本参数	17
表 3-2 实验平台设备参数	17
表 3-3 HPPC 内阻测试步骤	20
表 3-4 电芯的放电内阻	21
表 3-5 不同放电倍率下的多项式系数	24
表 3-6 锂离子电池主要物性参数	27
表 4-1 不同质量流量下的雷诺数与压降	35
表 4-2 材料物性参数	36
表 4-3 电池包的最高温度和最大温差	38
表 4-4 不同放电倍率下电池包入口水温 and 冷却液质量流量的关系	42
表 4-5 不同流量对于加热性能的影响	44
表 4-6 不同温度对于加热性能的影响	46
表 5-1 参数的比例关系	54
表 5-2 电芯模型参数设置	55
表 5-3 不同缩小比例下电芯的模型参数	56
表 5-4 不同的缩小比例模型计算效率	58
表 5-5 相似缩小 2 倍模型的材料物性参数	59
表 5-6 模型的计算效率对比	60

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着全球能源结构的转型和环保意识的增强，电动汽车因其零排放、高效率等特点，正成为未来汽车发展的重要趋势^[1]。根据国际能源署（IEA）的统计数据^[2]，2024 年全球电动汽车（包括纯电动汽车和插电式混合动力汽车）的销量将达到 1700 万辆，与 2023 年的 1400 万辆相比，增长约 21.43%，如图 1-1 所示。

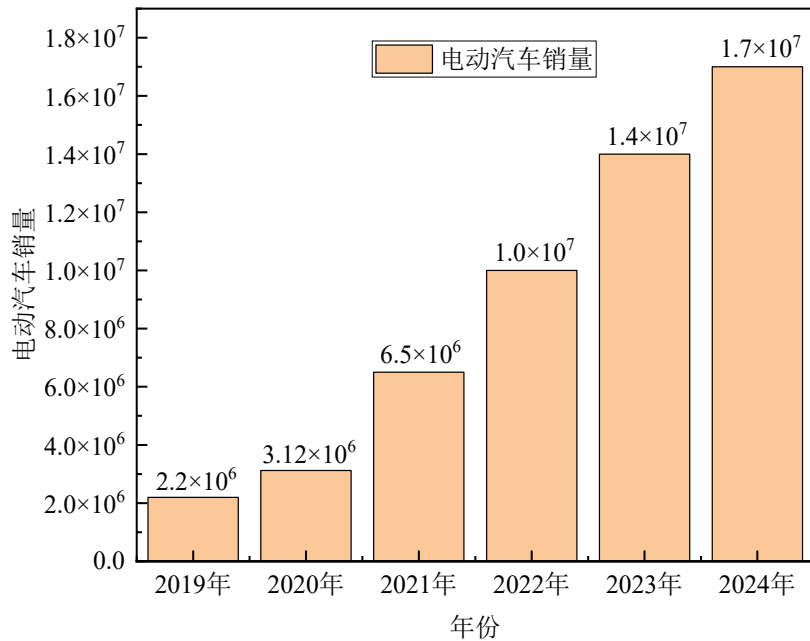


图 1-1 近 6 年全球电动汽车销量

这一大幅增长表明全球市场对电动汽车的需求持续旺盛，也反映了新能源汽车产业的快速发展。根据彭博新能源财经（BNEF）2023 年报告^[3]，2023 年全球动力电池市场规模达到 450GWh，预计到 2030 年将增长到 2500GWh，年复合增长率（CAGR）约为 20%。中国政府在“十四五”规划^[4]中提出，到 2025 年，新能源汽车（NEV）的销量要占到新车总销量的 20%以上，2024 年中国新能源汽车的市场份额已提前达到 37.3%^[5]，如图 1-2 所示。

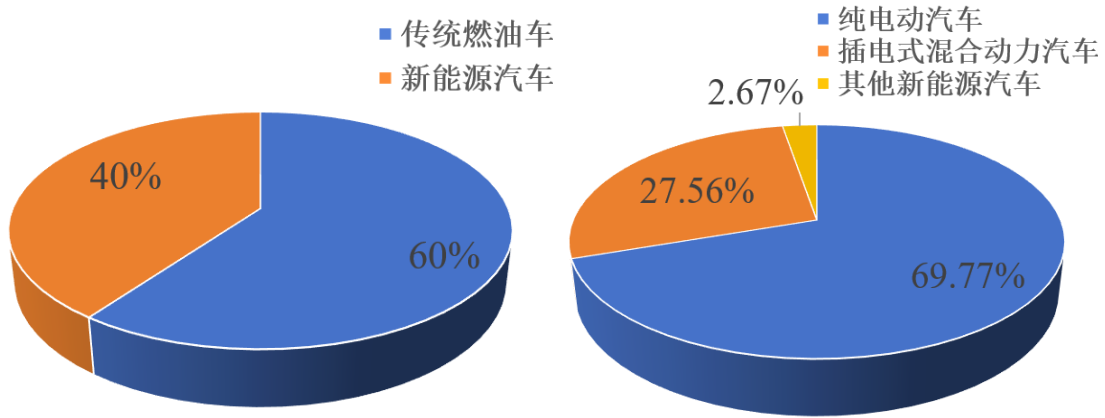


图 1-2 中国 2024 年新能源汽车分布情况

电动汽车具有明显的环保优势，运行过程中几乎零排放，可有效减少温室气体和有害气体的排放^[6]。根据中国科学院的一项研究，与传统燃油汽车相比，每辆电动汽车在整个生命周期内可减少碳排放约 1.7 吨。同时，电动汽车的能效更高，电能转换效率超过 85%，而传统燃油汽车的能效仅为 20-30%^[7]。

尽管电动汽车发展迅速，但其核心技术电池包的能量密度和热管理仍面临诸多挑战。随着电池包能量密度的增加，电动汽车在行驶过程中，会产生大量热量，导致会发生自燃的风险，因此动力电池的热管理成为近年来研究的重点^[8]。传统的电池包通常采用风冷或自然冷却系统进行温度控制。然而，随着电池能量密度的提高和充放电功率的增加，传统冷却方式在温度分布均匀性和冷却效率方面逐渐显现出不足^[9]。研究表明，当电池温度超过 45℃ 时，其寿命将缩短 50% 以上；当温度低于 0℃ 时，电池的功率输出将降低 30% 以上^[10]。特别是在大功率放电或快速充电时，电池组内部的温度梯度可能会变得很大，从而导致电池性能下降和安全隐患^[11]。因此，高效的热管理系统对于提高电池性能和安全性至关重要。

无模组电池包具有能量密度高、空间利用率高、整体结构轻量化等诸多优点，是推动电动汽车发展的重要技术之一，也是未来电池包发展的趋势^[12]。无模组设计大大减轻了电池包的重量，并通过最大限度地减少结构部件提高了空间利用率。随着电池包能量密度的增加，在运行过程中会产生大量热量，如果热量不散发，可能会缩短电池寿命，甚至导致发生热失控。因此对于无模组电池包进行热管理研究并将电池包控制在一定的平均温度范围是至关重要的^[13]。在电池包的所有冷却方法中，液体冷却因其更高的导热性和更好的冷却效果而被广泛使用^[14]。

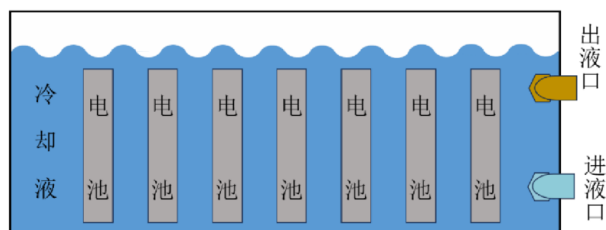
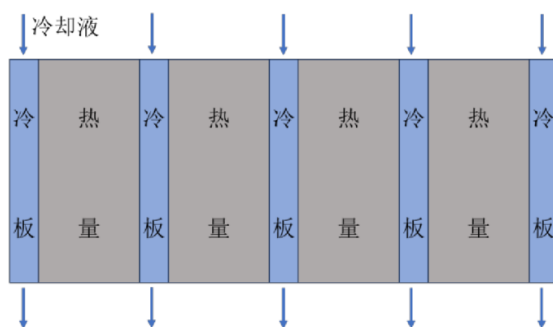
1.2 无模组电池包热管理研究现状

续航里程已成为制约电动汽车发展的主要问题之一，这导致了需要高能量密度的电池包^[15]。然而传统动力电池集成方式 CTM (Cell to Module)的空间利用率大约是 40%，不利于提升整车续航和轻量化^[16]。因此，CTP(Cell to Pack)无模组技术应运而生^[17]。该技术取消了电池模组，直接将电芯集成为电池包，从而提高了体积利用率 10%~30%，并使能量密度达到 200Wh/kg 以上^[18]。随着电池包能量密度的增加，在运行过程中会产生大量热量，如果热量不散发，可能会缩短电池寿命，甚至导致发生热失控^[19]。因此控制电池包保持在一定的平均温度范围是至关重要的。通常情况下，锂离子电池的推荐温度范围为 20℃至 45℃，温差保持在 5℃以下^[20]。

现有的电池热管理系统（BTMS）包括风冷、液体冷却、相变材料（PCM）和热管等^[21]。空气冷却方法最常用于小型电池组，因为它的传热能力低于其他冷却方法。液体冷却系统因传热系数较高，其传热能力远优于空气冷却而被广泛使用^[22]。相变材料可以吸收和释放大量潜热，但其导热系数较低。热管冷却系统具有良好的导热性，但存在成本高和系统复杂性的局限性。在其他冷却方法中，液体冷却因其更高的导热性和更好的冷却效果而被广泛使用^[23]。

液体冷却系统因其优异的传热性能和温度控制精度，被认为是解决高密度电池热管理难题的解决方案之一。通过液体循环，能够实现快速的热量吸收和分布，从而维持电池组在最佳温度范围内运行^[24]。然而，如何将液体冷却与无模组电池包的相结合，仍是一个有待深入研究的领域。特别是在液体冷却路径设计、散热均匀性优化以及系统可靠性保障方面，仍存在诸多挑战和研究空间^[25]。

液体冷却系统又分为直接接触和间接接触液体冷却系统^[26]。在直接接触式冷却系统中，使用矿物油等冷却液作为冷却剂，将电池浸入冷却剂中^[27]，如图 1-3^[28]所示。间接接触液体冷却系统，冷板连接到电池上，流体在微型通道内流动，以传导来自电池的热量^[29]，如图 1-4 所示。然而，直接接触的液体冷却系统存在局限性，例如如果不使用不适当的绝缘和包装，可能会发生泄漏和短路^[30]。

图 1-3 电池包直接冷却示意图^[28]图 1-4 电池包间接冷却示意图^[28]

Telli 等^[31]设计了 U 形转弯和逆流顶蓬到顶蓬的液冷板用于固定式电池储能系统的冷却。研究表明逆流顶蓬到顶蓬的液冷板优势在于可以更好地控制整个模块的体积温度分布,更有利于电池的使用寿命,如图 1-5 所示。杨鹏等^[32]设计了一种口风琴型的冷板,同时采用了两种壁面散热相结合的方式,发现主壁面采用蛇形流道的冷板和侧壁面采用窄形流道冷板的散热能力最佳。

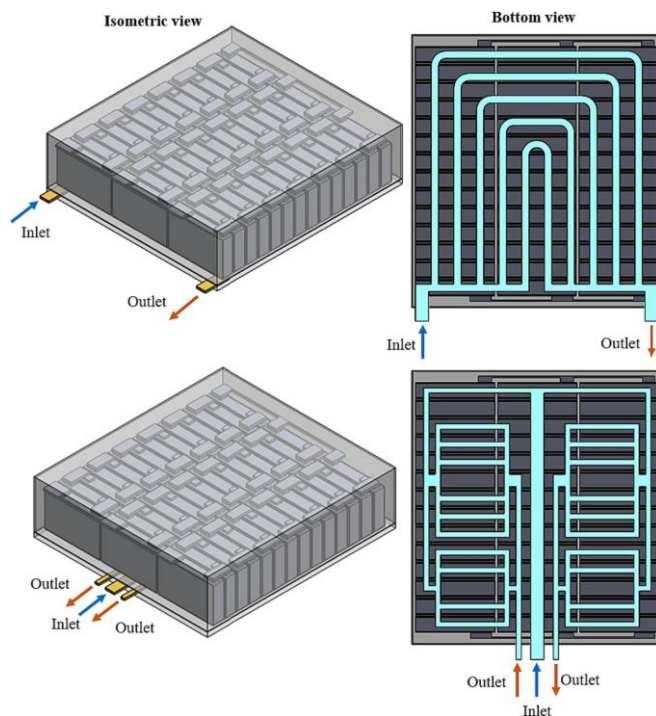


图 1-5 U 形转弯和逆流顶蓬到顶蓬的液冷板

Gungor 等^[33]提出了一种热效率高的解决方案，在电池之间插入一个基于构造冠层到冠层架构的液体冷却系统。结果表明具有 5 个分支的配置似乎是最有趣的配置，在树冠到树冠架构中具有高热效率和低泵送功率。Mubashir 等^[34]提出一个单、双蛇形槽液冷板，在相同操作条件下，采用双蛇形通道冷板的电池最大温度和温差低于 SSC 冷板。此外，在 120mL/min 的流速下，与单蛇形通道冷板相比，双蛇形通道冷板的功耗降低了 86.7%。Jarrett 等^[35]通过优化设计带有蛇形流道的板式液体冷却结构，获得了最佳蛇形流道冷却板结构。尽管电池单体之间的温差会增大，但更宽的蛇形流道有利于更大程度的散热，如图 1-6 所示。

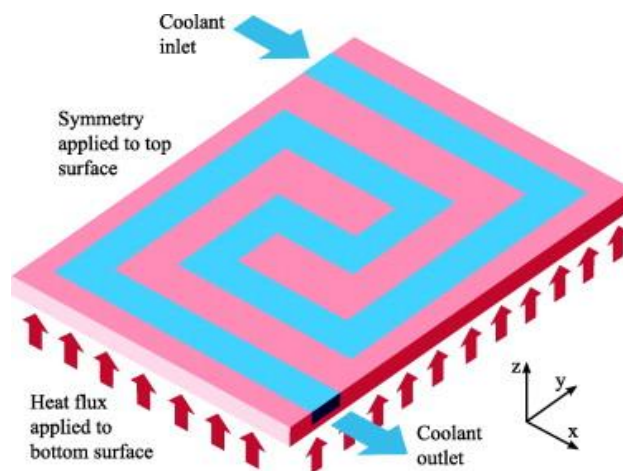


图 1-6 回形冷却结构

陈宇等^[36]提出了一种叠层式冷板散热方案，通过在冷板下方采用直接冷却方式进行了优化。研究发现，同层式直液双冷板结构的散热性能更优越。Deng 等^[37]建立了 U 型管状蛇形通道结构的冷板，结果表明 5 通道的通道长流向布局具有最高效的冷却性能。与沿宽度流动方向的 2 通道相比，这种设计可以将最高温度降低 26°C。Sheng 等^[38]利用双入口和出口对蛇形通道液体冷却板的性能进行了数值研究，以优化电池中不理想的温度分布问题。结果表明进出口位置对温度分布有较大影响，增加流速可以降低电池温度，但对温度分布的影响较小。Deng 等^[39]通过使用双层分叉通道改善了传统单蛇纹石通道冷板的性能。结果表明，双层冷板具有较好的温度均匀性。宽度的增加和流速的增加可以降低电池温度。

虽然文献中提到了很多关于电池组散热的研究与分析，但对于在电动汽车上的无模组电池包的设计与研究工作要少得多。Shen 等^[40]提出了 CTP 电池系统的发展提高了电池组的体积能量密度，这是未来电池包发展的趋势。因此，研究热

特性至关重要，这可以促进 CTP 技术安全设计的改进和优化。Wang 等^[41]研究详细分析了 CTP 系统在不同测试条件下的热特性。结果表明，基于热阻网络的 CTP 温度校准可实现内部温度重建和最佳温度布置，并将校准周期缩短 60%以上。Sun 等^[42]对 CTP 电池模块的散热性能进行了分析，并评估了通道高度、通道宽度、冷却液流量和冷却液温度对 CTP 电池模块温度和温差的影响。结果表明流量和温度对电池温度有正向影响。在相同的操作条件下，最高温度可分别降低 10.93%和 15.12%。

可见，现阶段更多是关于电池组或单个电池模块的冷却系统设计与研究，对于无模组电池包设计与研究较少。因此本文对无模组电池包的整体结构进行设计与分析，在搭建热模型的基础上，分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性，为后续研究无模组电池包提供参考。

1.3 基于相似原理的电池包高效热管理研究现状

在电池热管理领域，现有研究主要基于不同层次的简化假设条件，针对电池系统的运行工况开展热特性分析，构建了一维、二维及三维的温度场模型^[43]。其中，三维热模型的构建则往往采用如下简化的假设条件：将单体电池简化为单一材料的各向异性结构，并假设其为均匀热源或施加一致性热流分布^[44]。简化的热模型仅包括热传递和热对流。更准确的模型是基于实际物理场的模型，其中包括副反应引起的可逆热、质量传递损失引起的热量，还有一些模型包括混合引起的热量^[45]。许多作者使用适用于均匀发热的一维模型和三维电化学热模型的不同假设研究了单节电池和多节电池组的散热行为^[46]。

为了准确预测电池的热特性，有必要通过控制良好的实验来收集数据，这些数据可用于评估产生的热量。Kim 等^[47]引入了一种热建模技术来估计锂离子电池的温度变化。他们发现，热建模对于保持锂离子电池的最佳工作温度和温差至关重要。锂离子电池的热建模对于了解其热行为以及开发主动和被动热管理系统至关重要^[48]。已经开发了几种数值模型，例如电化学、电热和集总模型，以近似锂离子电池的热行为。Bernardi 等^[49]开发了一个电池的整体能量平衡方程，该方程考虑了电化学过程、相变和混合焓的影响。Chen 和 Evans^[50]开发了二维和三维模型来模拟锂离子电池的热量产生和热行为。他们认为电池发热是均匀的。Rao

和 Newman^[51]提出了一种基于锂离子电池能量平衡和焓势估计电池热量产生的新方法,认为混合效应可以忽略不计。Chen 等人^[52]将多层耦合模型与集总模型进行了比较,发现多层耦合模型一致且准确地估计了电池的温度。因此,作者得出结论,集总模型不太准确。Xie 等^[53]指出,电热模型经常无法解释基本的物理化学原理,而是将电池视为一个单一的同质实体。

目前,最常用的方法还是将电芯简化为由各向异性的单一材料,并假设电芯为均匀的发热体^[54]。但是在对电池包进行建模仿真时,由于模型较大网格数量较多,导致计算效率低下,占用较多计算资源。因此,现在有一种基于相似理论的解决方法。将电芯和电池包相似缩小之后进行有限元计算与分析^[55]。相似理论方法作为一种重要的研究手段,在工程科学领域具有广泛的应用价值,是研究复杂工程问题过程中形成的一种重要方法论。它在流体力学、传热学等学科的发展中发挥着至关重要的基础性作用,并在各类传热工程的理论与应用实践中得到了极为广泛的推广和应用^[56]。

为解决电池包在建模仿真时网格数量较多导致计算效率低下的问题,提出了基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法。基于非稳态导热微分方程,推导得出温度场的相似准则和相似关系,并进一步通过 STAR-CCM+软件对相似准则和相似关系的正确性进行验证。

1.4 本文主要研究内容

本文以锂离子电池为研究对象,采用液体冷却的方法,设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板。在搭建单体热模型的基础上,分析无模组电池包在不同放电倍率下的热管理性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。最后提出了一种基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法。其主要研究内容如下:

(1) 分析总结了国内外关于无模组电池包热管理的研究。现阶段更多是关于电池组或单个电池模块的冷却系统设计与研究,对于无模组电池包设计与研究较少。在其他冷却方法中,液体冷却因其更高的导热性和更好的冷却效果而被广泛使用其中。之后调研关于相似理论在电池包仿真中的研究现状。最后,综述本文主要研究内容。

(2) 研究分析电池的生热机理以及传热特性。明确其主要的热传递方式为传导与对流,并确定了相应的热传导系数公式和对流传热方程。为简化计算同时

确保结果的准确性,进一步研究了电池模型简化后材料属性参数的近似计算方法。

(3) 完成了方形锂离子电池的性能测试并建立单体电池的仿真模型。搭建测试电池性能的实验平台,通过 HPPC 内阻测试法获得不同温度不同 SOC 下的锂离子电池放电内阻,采用直接测量法测定了熵热系数与 SOC 的实验曲线。将电池内阻的变化拟合到 SOC 和温度的多项式函数关系中,并根据 Bernardi 理论获得了单体电池在放电过程中的生热速率随时间和温度变化的特性曲线。建立了锂离子电池的仿真模型,并通过实验数据的比对验证仿真结果的可靠性。

(4) 设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板,研究分析了液冷板的流体性能。在搭建热模型的基础上,分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。

(5) 提出了基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法。首先对温度场的相似准则进行了推导,其次对电芯和无模组电池包的相似缩小模型进行了仿真计算与分析。

第 2 章 锂离子动力电池结构及热特性

近年来，电动汽车正成为未来汽车发展的重要方向。由于锂离子电池能量密度高、无记忆效应并且循环寿命长，是电动汽车动力电池的热门方案。因此研究电池的热管理问题，必须首先了解电池结构与工作原理。

2.1 锂离子电池的种类

锂离子电池的分类方式主要基于其组成要素、正负极材料以及外形结构等因素。其中，正负极材料的选择是影响电池性能和寿命的关键因素^[57]。目前，大多数乘用车采用三元锂电池作为动力电源，常见的三元锂电池包括 LiCoO_2 （钴酸锂）、 LiMn_2O_4 （锰酸锂）和 LiFePO_4 （磷酸铁锂）等。与其它类型电池相比，三元锂电池具有更高的放电倍率、更高的比容量，并展现出优异的循环稳定性。此外，电芯封装的外形结构可分为三种主要形式：圆柱型、方型和软包型^[58]。不同外形结构的电池在热管理能力、能量密度以及安全性等方面展现出各自的特性，具体对比可见表 2-1。

表 2-1 电池不同外形结构特点

电池	实物	外壳材质	安全性	整车企业代表
方型		铝壳居多	好	比亚迪、蔚来、小鹏
圆柱		钢壳、铝壳	一般	特斯拉
软包		铝塑膜	较好	大众、现代

2.2 锂离子电池结构与工作原理

2.2.1 锂离子电池结构

如图 2-1 所示，锂离子电池可以根据其封装形式划分为圆柱形、软包和方型电池三类，其结构有所不同但内部组成基本一致^[59]。内部结构主要由正负集流体、正负极材料、电解液、隔膜以及 SEI (Solid Electrolyte Interface) 膜等核心组件组成，如图 2-2 所示^[60]。

(1) 正负集流体

正负集流体作为电流传输的载体，同时也是正负极材料的支撑结构。正集流体通常采用铝箔，这是因为铝的电势较高且导电性能良好；而负集流体则选用电位较低的铜箔。集流体的材料选择需满足欧姆定律的要求，即需具备一定的导电电阻特性，以平衡电荷传输效率与材料成本。

(2) 正负极材料与电化学特性

正极材料的种类直接影响电池的电压、容量及能量密度等核心性能参数^[61]。在充放电过程中，正负极材料参与内部的化学反应，实现电荷的转换与储存。实际是电池内部电化学反应的核心区域。

(3) 电解液

电解液承担着离子传导的重任，同时也参与了多种化学反应过程。其热稳定性及安全性直接影响电池的整体性能与可靠性，对电池的容量、循环寿命等方面具有重要影响。

(4) 隔膜的功能与特性

隔膜作为正负极之间的绝缘隔离层，具有选择性透过性，允许锂离子自由通过以实现电荷的迁移，同时阻止电子的直接传导，避免短路的发生。隔膜表现出一定的电阻特性，这源于其对离子和电子的绝缘能力，导致其对电池内部离子导电性能存在一定影响^[62]。

(5) SEI 膜的作用与特性

SEI 是电极材料表面与电解液之间形成的一层纳米厚度的薄膜^[63]。SEI 膜限制了电解液与负极材料的直接接触，防止电解液在充放电过程中被过度消耗或发生副反应，从而保护负极材料的完整性，避免其因化学反应而失效。SEI 膜的存在减少了负极材料的活性损失，延缓了电池容量的衰减，从而延长了电池的循环

寿命。SEI 膜在电池的充放电过程中会经历动态的形成和重构过程，尤其是在电池的初始循环阶段。如果在某些条件下（如高温、高压或过充/过放）SEI 膜破裂或分解，则可能导致电池性能的加速退化。

以上各组成部分的协同作用，构成了锂离子电池的基本工作原理，其相互之间的配合和性能匹配直接影响电池的电化学行为和热管理特性。

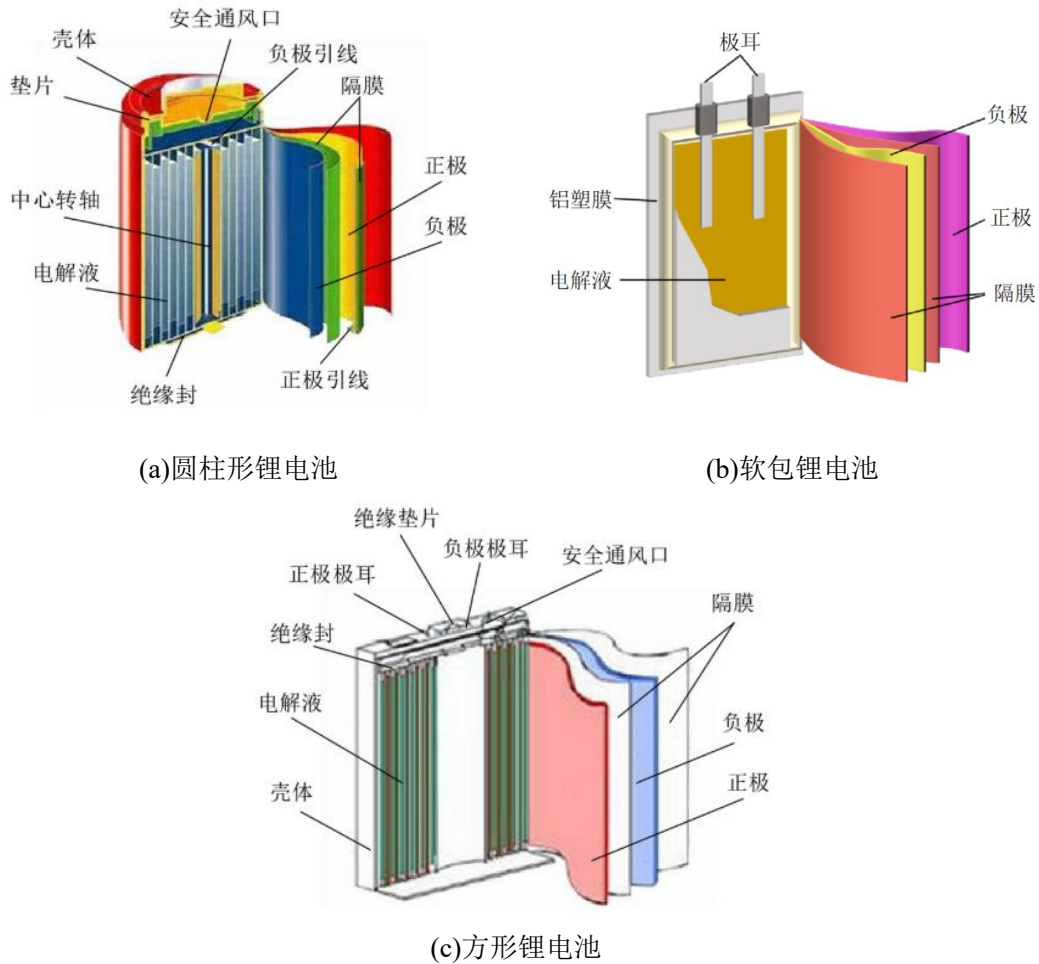


图 2-1 锂离子电池结构

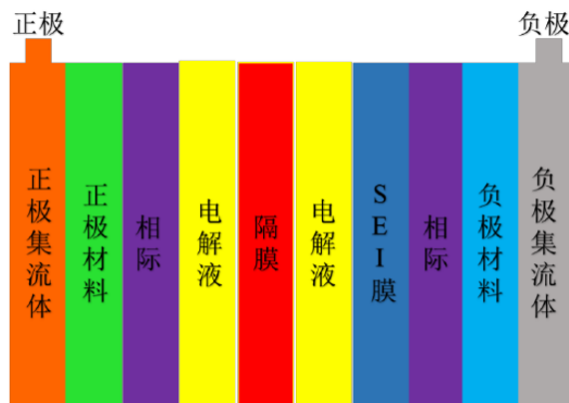


图 2-2 电池内部结构图

2.2.2 锂离子电池工作原理

如图 2-3^[64]所示，锂离子电池的工作原理本质上是一个通过锂离子在正负极之间移动来实现电能储存和释放的装置^[65]。

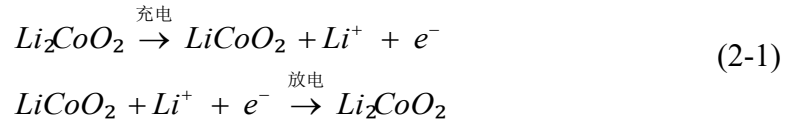
电池在放电时，锂离子从负极（石墨）脱出，穿过电解液到达正极。这个过程中，负极发生氧化反应，释放电子到电路中，形成电流。而正极则发生还原反应，接受电子和锂离子，形成 LiCoO_2 。在充电时，这个过程逆转，锂离子从正极脱出，回到负极。充电是通过外接电源迫使电子反向流动，锂离子重新嵌入石墨中。

放电过程：当电池放电时，锂离子从负极（石墨）脱嵌，穿过电解液，迁移到正极（ LiCoO_2 ）。在正极，锂离子嵌入 LiCoO_2 ，同时电池的外部电路中有电子从负极流到正极，形成电流。

充电过程：当电池充电时，外接电源迫使锂离子从正极（ Li_2CoO_2 ）脱嵌，穿过电解液，重新嵌入负极（石墨）。

正负极反应式总结：

正极



负极

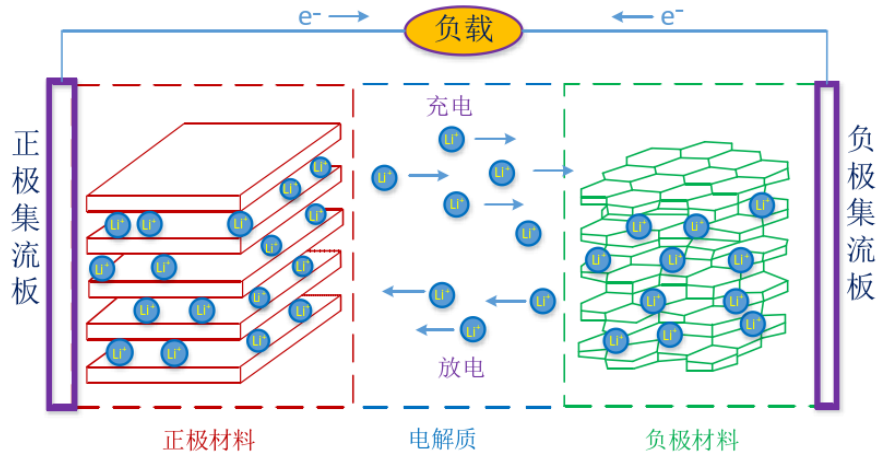
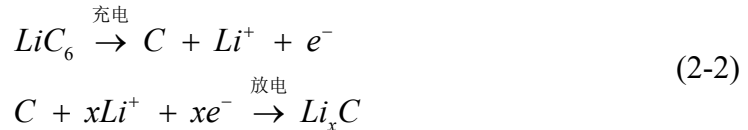


图 2-3 锂离子电池工作原理示意图

2.3 锂离子电池的生热特性

锂离子电池的生热主要源于内部电化学反应过程中释放的热能。根据文献研究^[66]，电池的总产热量可分成四个主要部分：反应热 Q_r 、极化热 Q_p 、焦耳热 Q_j 以及副反应热 Q_s 。总产热表达式如下：

$$Q = Q_r + Q_j + Q_p + Q_s \quad (2-3)$$

具体而言：

反应热 Q_r ：源于电化学反应的热力学特性，包括锂离子在正负极嵌入与脱出过程中的化学能转换。

$$Q_r = \frac{nmQ_e I}{MF} \quad (2-4)$$

n 为电池数量； m 为电极质量； Q_e 为电池电机的反应热； I 为放电电流，A； M 为摩尔质量， g/mol ； F 为法拉第常数， $96484.5C/mol$ 。

极化热 Q_p ：在充放电过程中，由于电压极化和浓度极化导致的能量损失转化的热量。

$$Q_p = I^2 R_p \quad (2-5)$$

I 为电流，A； R_p 极化内阻， Ω 。

焦耳热 Q_j ：由于电池内部电阻的存在，电流通过时会产生热量。

$$Q_j = I^2 R_j \quad (2-6)$$

I 为电流，A； R_j 为欧姆内阻， Ω 。

副反应热 Q_s ：其他如电解质分解、界面反应等过程中释放的热量，可以忽略不计。

总产热表达式为：

$$Q_{\text{总}} = Q_r + Q_j + Q_p = \frac{nmQ_e I}{MF} + I^2 R_j + I^2 R_p \quad (2-7)$$

2.4 锂离子电池的传热及热物特性

2.4.1 锂离子电池的传热

热量传递的基本方式包括热传导、对流换热和热辐射。电池在工作过程时内部会产生热量，这些热量首先通过热传导方式传递至电池表面，随后电池表面与外界环境之间的温差导致对流换热的发生。此外，温度较高的电池表面还会以电磁波的形式向外辐射热量，形成热辐射^[67]。

(1) 热传导

热量从高热区域向低热区域传递，导热性能好的材料能更有效地降低内部温度积累，防止局部过热。

$$q_n = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (2-8)$$

q_n 为热通量密度，单位： $W \cdot m^{-2}$ ； λ 为导热系数，单位： $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

(2) 热对流

热量到达电池表面后，与外界环境温差导致热对流。电池表面通过冷却液或空气的流动，将热量带走。并且增加换热系数可以更快降低电池的温度。

$$Q = hA\Delta t \quad (2-9)$$

h 为换热系数，单位： $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ； A 为换热面积； Δt 为壁面与流体温差，单位： K 。

(3) 热辐射

高温电池表面以电磁波形式发射热量。辐射换热受材料发射率和周围环境温度影响，在高温环境下更为显著。

$$Q_w = \sigma A T^4 \quad (2-10)$$

T 为热力学温度，单位： K ； σ 为辐射常数； A 为辐射表面积，单位： m^2 。由于热辐射量较少，且较为复杂，因此本文在仿真中忽略热辐射。

2.4.2 热物性参数

电芯材料各层具有不同的热物性参数，由于电芯的层叠结构，其热导率表现出各向异性特征。电芯的长度和宽度方向为并联结构，厚度方向是串联结构，可

以通过算式推算出电芯各个方向的热物性参数^[68]。其中， x 、 y 、 z 方向分别表示电芯水平、竖直，以及厚度方向的热导率。 x 、 y 、 z 方向热导率分别为：

$$\lambda_z = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i / \lambda_i)}, \quad \lambda_{x,y} = \frac{\sum L_i \lambda_i}{\sum L_i} \quad (2-11)$$

其中， λ_x ， λ_y ， λ_z 为电芯沿着 x 、 y 、 z 方向的热导率， L_i 为电芯各层厚度，第 i 层的厚度， λ_i 为各层热导率。

电芯的比热容 C_p 一般为常数，其数值的大小与组成的材料性质有关，通过质量加权法计算得到：

$$C_p = \frac{1}{m_b} \sum c_i m_i \quad (2-12)$$

其中， c_i 为各组成物质的比热容， m_i 为各组成物质的质量， m_b 为电芯质量。

由电芯的质量与电芯的体积之比得到电芯的平均密度为：

$$\rho = \frac{m_b}{v} \quad (2-13)$$

其中， m_b 表示电芯质量， v 表示电芯体积。

2.5 本章小结

研究分析了电池的生热机理以及传热特性。明确其本文仿真过程中主要的热传递方式为热传导与热对流，并确定了相应的热传导系数公式和对流传热方程。为简化计算同时确保结果的准确性，进一步研究了电池模型简化后材料属性参数的近似计算方法。

第 3 章 锂离子电池性能测试及仿真建模建立

研究电池的热特性是研究电池包热管理的基础,通过对单体电池的分析,能够揭示电池在不同工况下温度演变的规律,从而为电池包热管理的设计与优化提供关键依据。通过实验测得锂离子电池的内阻,将内阻的变化拟合到 SOC(State of Charge)和温度的多项式函数关系中。根据 Bernardi 理论利用所测得的电池内阻,建立了锂离子电池的仿真模型,并通过实验数据的比对验证仿真结果的可靠性,为电池包的研究提供基础参数。

3.1 研究对象及实验设备

3.1.1 锂离子电池基本参数

近年来,基于高镍 NCM 为正极材料的三元锂离子电池因其优异的电化学性能,已成为国内外研究机构及企业的重点研发方向。本章选取方形锂离子电池作为实验对象,开展系统的电池性能实验研究。实验电池的外观如图 3-1 所示,其主要参数如表 3-1 所列。



图 3-1 方形锂离子电池

表 3-1 锂离子电池基本参数

性能参数	参数值
电芯类型	NCM
电芯标称容量/Ah	150
电芯标称电压/V	3.7
充电终止电压/V	4.2
放电终止电压/V	3.2
电芯尺寸/mm	148×78×103
电芯重量/g	≤2750

3.1.2 实验设备

本章搭建的实验平台设备主要有：电脑作为上位机控制充放电机柜；环境仓为电芯提供不同的环境温度；多功能数据采集仪进行电芯温度数据的采集和保存，并上传到上位机中，如图 3-2 所示，实验设备的参数如表 3-2 所示。

表 3-2 实验平台设备参数

设备名称（型号）	主要参数	备注
充放电机柜 (BTS-5V100A)	电压范围：-5~5V； 电流范围：- 100A~100A	电压、电流精度：±0.1
小型模拟环境仓 (DW-80HS)	温度范围：- 20℃~150℃； 温度波动：<2℃	温升速率： 1.0~3.0 °C/min； 降温速率： 0.7~1.0 °C/min
多功能采集仪 (161XA)	16 通道	测量对象：热电偶
热电偶（K 型 TT-K- 30）	耐温范围：- 200℃~260℃	精度等级：I 级 误差精度：0.4%

温度传感器监测点的布置如图 3-3 所示，用胶带将电芯表面的六路温度传感器紧固，分别布置在单体电芯的四周。

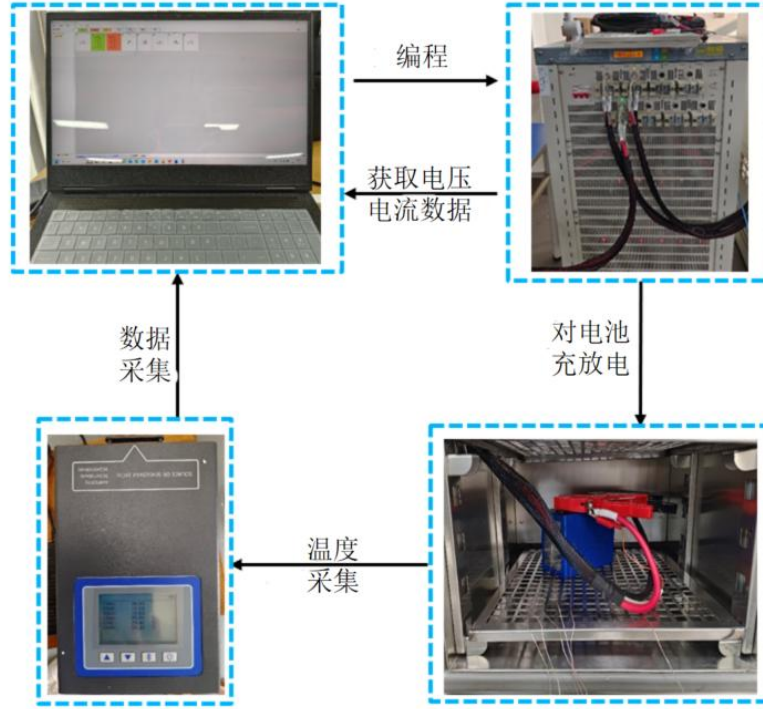


图 3-2 实验平台

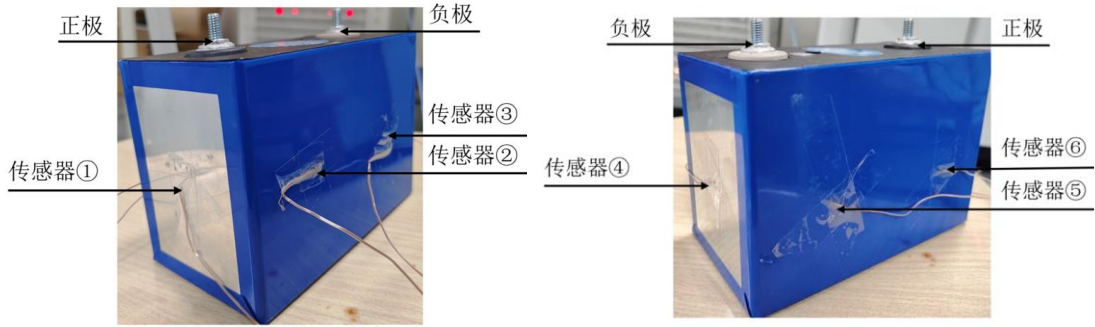


图 3-3 温度传感器布置方式

3.2 锂离子电池内阻特性

3.2.1 HPPC 内阻特性实验

在不同的环境温度下，以 0.5C 放电倍率对电芯进行混合脉冲功率特征（HPPC）的实验^[69]。根据式(3-1)~式(3-3)和图 3-4 所示的测试过程，得到电芯不同环境温度和不同 SOC 下的放电内阻。

计算公式为：

$$R_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} = \frac{U_1 - U_2}{I_d} \quad (3-1)$$

$$R_p = \frac{\Delta U_p}{\Delta I_p} = \frac{U_2 - U_3}{I_d} \quad (3-2)$$

$$R = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} = \frac{U_1 - U_3}{I_d} \quad (3-3)$$

R_o 、 R_p 、 R 分别代表欧姆内阻、极化内阻和总内阻。

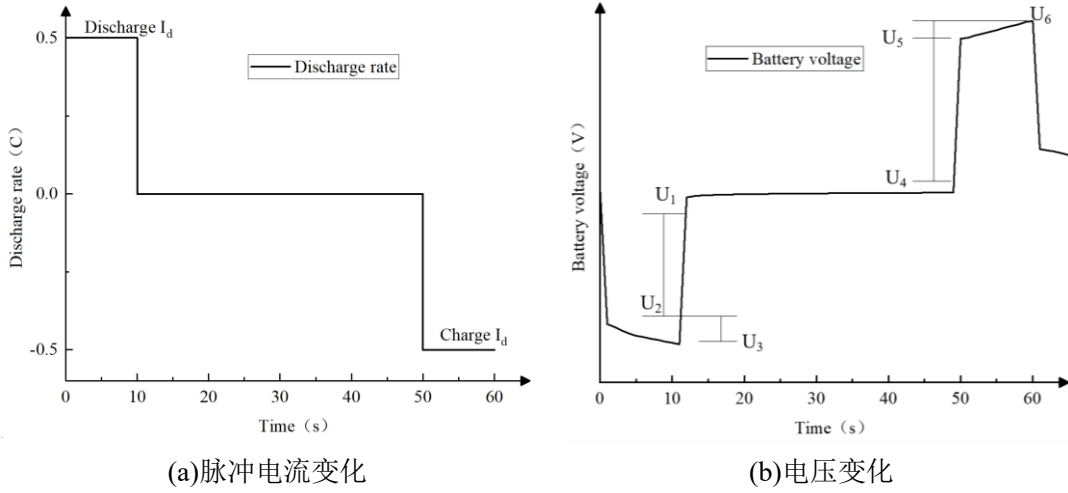


图 3-4 HPPC 测试电芯脉冲电流与电压变化

ΔI_o 、 ΔU_o 、 ΔI_p 、 ΔU_p 、 ΔI 、 ΔU 分别代表放电时脉冲电流、电压变化。 I_d 为图 3-4(a) 中的放电电流值。 U_1 、 U_2 、 U_3 分别为图 3-4(b) 中的电压值。

3.2.2 实验设计

通过 3.2.1 节了解了如何测量电芯的放电内阻，下面开始测量电芯在不同环境温度和不同 SOC 下的放电内阻。实验步骤如下：

(1) 先将电芯放在环境温度为 20℃ 的环境仓中，使电芯和环境仓中的环境温度保持一致。

(2) 采用恒流充电方式，充电倍率为 0.5C，至电芯电压达到 4.2V，之后再采用恒压充电至电流小于 0.002C，搁置 2h，使电芯在实验温度下达到温度平衡。

(如图 3-5 所示为电芯从环境温度为 12.5℃ 放进 20℃ 的环境仓中的温度监测图。在 1h 后监测电芯温度的 6 个点基本达到环境仓所设温度 20℃。因此在环境仓中搁置 2h 可以使电芯达到本实验所测的最高与最低温度。)

(3) 设定目标 SOC，初次实验从最高 100% SOC 开始。每个目标 SOC 下测 3 次内阻，取平均值。每个环境温度下共计做 30 次实验。(本实验 SOC 测量顺序为 100%，90%，80%，70%，60%，50%，40%，30%，20%，10%)

(4) 执行下表 3-3 的测试步骤，记录电芯端电压的变化，并测量开路电压记录数据。(绝对时间是指每个步骤运行的时长，运行时间是指每个步骤运行的

时长总和)

表 3-3 HPPC 内阻测试步骤

步骤	绝对时间	运行时间	电流
1	10s	10s	0.5C
2	40s	50s	0
3	10s	60s	0.5C

(5) 设置下一个 SOC，并重复操作步骤④，可测量并记录 20℃下电芯不同 SOC 的平均欧姆和极化内阻，以及放电的总内阻。

(6) 重复步骤 (1) -步骤 (5)，并调节环境仓中的环境温度，此时就可以获得不同环境温度下电芯的内阻。

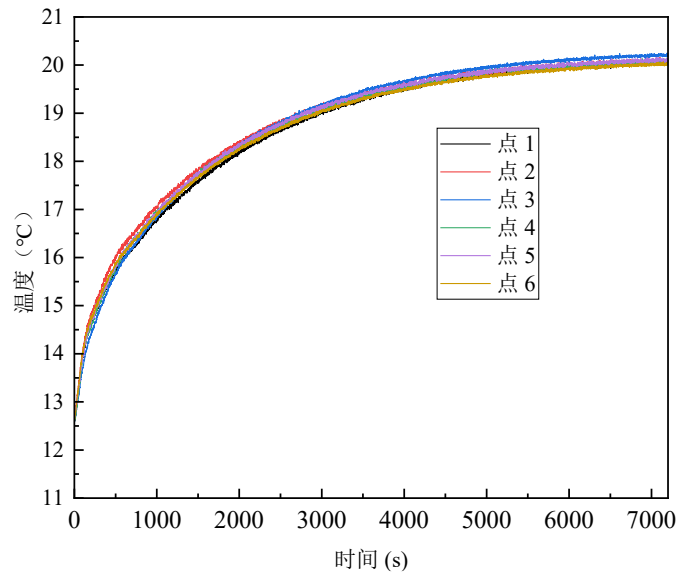


图 3-5 恒温 2h 温度监测图

3.2.3 内阻特性

根据 3.2.2 节所设计的实验步骤，下面对不同环境温度和不同 SOC 下的电芯进行内阻测试，从最低温-30℃开始，每隔 5℃测一次，一直测到 40℃。每个温度下测量 SOC 顺序为 100%，90%，80%，70%，60%，50%，40%，30%，20%，10%，总计 300 次实验。

将实验中收集的数据应用公式(3-1)、(3-2)、(3-3)计算出电芯的平均放电总内阻，并汇总在表 3-4 中。将表 3-4 中的数据画出折线图，可以更清晰的看出电芯内阻随温度与 SOC 的变化情况，如图 3-6 所示。

表 3-4 电芯的放电内阻

T\SOC	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
-30℃	15.81	13.64	12.86	12.25	12.06	12.13	12.14	12.35	12.48	12.59
-25℃	13.40	11.22	10.05	9.85	9.67	9.75	9.80	9.88	10.13	10.24
-20℃	11.70	8.33	7.28	7.06	6.92	7.03	7.13	7.20	7.30	7.56
-15℃	8.61	7.11	6.04	5.94	5.90	5.96	5.99	6.01	6.0	6.05
-10℃	5.54	5.23	4.96	4.77	4.53	4.45	4.43	4.52	4.55	4.64
20℃	3.84	3.47	3.23	3.04	2.96	2.94	2.99	3.07	3.08	3.12
25℃	3.25	2.90	2.84	2.77	2.76	2.76	2.78	2.82	2.82	2.79
30℃	2.80	2.69	2.63	2.58	2.53	2.56	2.56	2.62	2.61	2.59
35℃	2.57	2.37	2.36	2.30	2.21	2.25	2.29	2.32	2.37	2.37
40℃	2.22	2.12	2.05	2.03	2.01	2.05	2.08	2.09	2.13	2.11

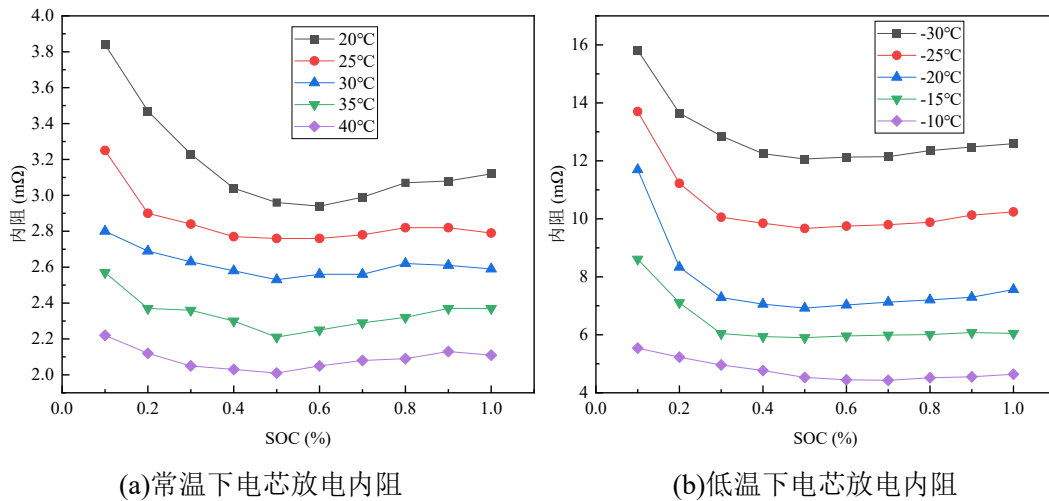


图 3-6 不同温度不同 SOC 下的电芯放电内阻

分析图 3-6 可得，在常温下并且电芯的 SOC 在 30%~100%，此时放电内阻较低且随 SOC 的变化波动较小。这说明电芯具有良好的放电性能，能量损失较少。在低温下，内阻明显高于常温，表明低温对电芯的放电性能有较大影响，电池的输出效率降低，能量损失增加。这可能是由于低温环境下电池的化学反应活性降低和电解液流动性变差所引起的。

将锂离子电芯的内阻变化拟合到 SOC 和温度的多项式函数关系中，建立电芯的后续发热模型。

$$\begin{aligned}
R(T, SOC) = & 8.03 - 0.2867 \times T - 8.21 \times SOC + 0.00559 \times T^2 \\
& + 0.2173 \times T \times SOC + 7.308 \times SOC^2 - 4.844 \times 10^{-5} \\
& \times T^3 - 0.001697 \times T^2 \times SOC - 0.08048 \times T \times SOC^2 \\
& - 2.202 \times SOC^3
\end{aligned} \tag{3-4}$$

3.3 生热速率的获取

电池生热速率的准确性是计算电池和电池包温度场仿真的关键性技术参数。其准确程度对仿真计算的可靠性具有直接决定作用，是锂离子电池热行为分析中的重要研究内容，同时也是优化电池热管理系统设计的基础依据。美国加州大学伯克利分校 D.Bernardi^[49]提出的电芯生热率模型是使用频率较高的一种模型，其简化公式如下：

$$q = \frac{1}{V} \left[I^2 (R_o + R_p) + IT \frac{\partial U_{oc}}{\partial T} \right] \tag{3-5}$$

式中， q 为生热速率， W/m^3 ； $I^2(R_o + R_p)$ 为欧姆内阻和极化内阻，即总内阻，实验数据见表 3-4； V 为单体电池体积， m^3 ； $IT \frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$ 为电池在放电时的可逆反应热； T 为电池温度， $^{\circ}C$ ； I 为电池放电电流， A ； $\frac{\partial U_{oc}}{\partial T}$ 为熵热系数^[70]，其值随 SOC 变化并可以由实验测量得到，实验过程如下：

(1) 先将电芯放在环境温度为 $25^{\circ}C$ 的环境仓中，使电芯和环境仓中的环境温度保持一致。

(2) 采用恒流充电方式，充电倍率为 0.5C，至电芯电压达到 4.2V，之后再采用恒压充电至电流小于 0.002C，搁置 2h，使电芯在实验温度下达到温度平衡。

(3) 电池从 100%SOC 开始，依此调节环境仓温度为 $-10^{\circ}C$ ， $0^{\circ}C$ ， $10^{\circ}C$ ， $20^{\circ}C$ ， $30^{\circ}C$ ，并在每个环境温度下搁置 0.5h，记录开路电压。

(4) 以 0.5C 倍率放电，每次放电 10% 的电池容量，记录不同 SOC 下的开路电压。

(5) 重复步骤 (2) - (4) 直到电池 SOC 为 0。每个目标 SOC 下测 3 次，取平均值。共计做 30 次实验。

测试过程如图 3-7 所示。

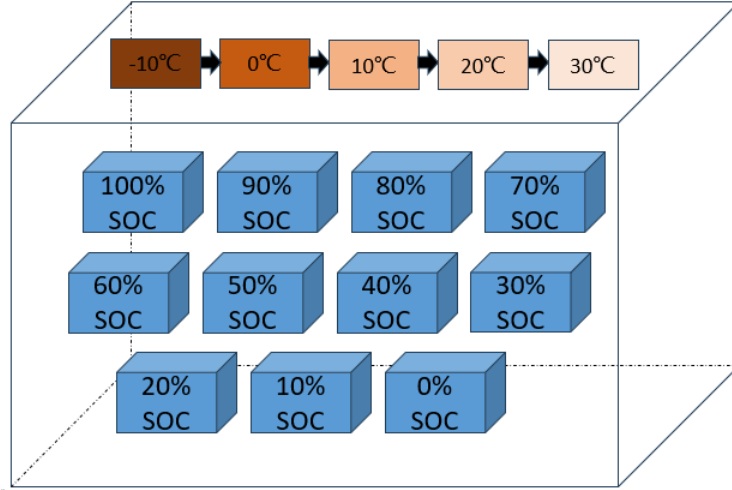


图 3-7 熵热系数测试过程

通过实验测试获取不同 SOC 条件下电池开路电压随温度变化的实验数据，将这些数据导入 Origin 软件并进行线性拟合分析。其拟合公式可由线性拟合获得，而直线斜率则代表所需的熵热系数值。结果如图 3-8 所示。

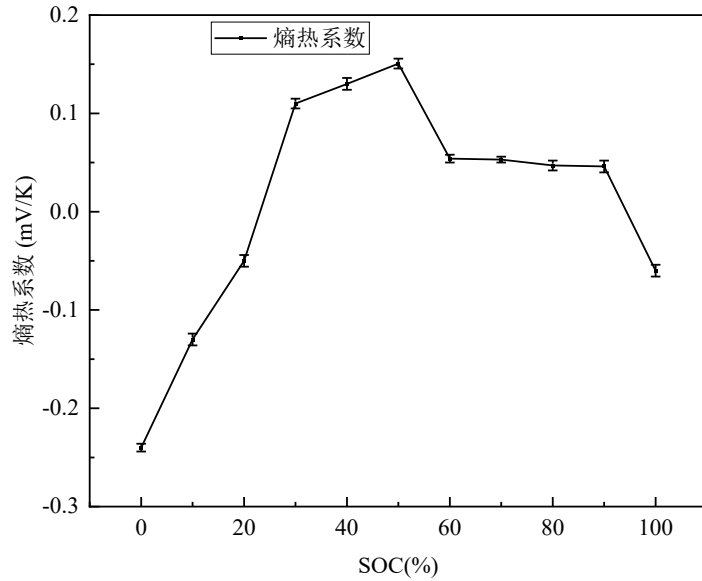


图 3-8 不同 SOC 下的熵热系数

由图 3-8 可见，熵热系数随电池 SOC 的变化呈现非线性特征，其数值在-0.3 至 0.2mV/K 范围内波动。由于熵热系数与 SOC 的变化有关，因此可以通过 SOC 的多项式拟合，然后输入到发热模型中。

$$\frac{\partial U_{oc}}{\partial T} = -0.2593 + 1.729 \times SOC - 2.401 \times SOC^2 + 0.8906 \times SOC^3 \quad (3-6)$$

根据 Cheng 等人^[71]提出的电池 SOC 估算方法可知，在恒流放电的情况下：

$$SOC = 1 - \frac{It}{3600C_R} \quad (3-7)$$

式中： C_R 为容量； t 为时间； I 为放电电流。

基于式(3-4)-式(3-7)，推导得出了电池的生热速率随温度和时间的关系式，如式(3-8)所示，确定了生热速率的数学表达式。

$$q = a_0 + a_1 \times T + a_2 \times t + a_3 \times T \times t + a_4 \times T^2 + a_5 \times t^2 + a_6 \times T^2 \times t + a_7 \times T \times t^2 + a_8 \times T^3 + a_9 \times t^3 + a_{10} \times T \times t^3 \quad (3-8)$$

式中， q 为生热速率， W/m^3 ； T 为温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t 为放电时间， s 。

其中 a_0 到 a_{10} 的系数如下表 3-5 所示。

表 3-5 不同放电倍率下的多项式系数

系数/放电倍率	0.5C	1.0C	1.5C	2.0C
a_0	2735	8237.3	20628.3	32014
a_1	-40.25	-108.68	-405.2	-731.32
a_2	0.07	0.5144	1.732	5.1
a_3	-7.684×10^{-3}	-0.059	-0.189	-0.475
a_4	1.47	7.33	13.17	26.14
a_5	1.311×10^{-5}	2.1×10^{-4}	1.42×10^{-3}	3.21×10^{-3}
a_6	1.557×10^{-4}	1.29×10^{-3}	3.94×10^{-3}	8×10^{-3}
a_7	-10^{-7}	-2×10^{-7}	-3×10^{-7}	-4×10^{-7}
a_8	-0.0214	-0.0765	-0.02374	-0.02861
a_9	4×10^{-10}	8×10^{-10}	1.2×10^{-9}	1.6×10^{-9}
a_{10}	2.3×10^{-12}	4.6×10^{-12}	6.9×10^{-12}	9.2×10^{-12}

根据表 3-5 中的系数以及公式(3-8)可以计算出电池的生热速率 q 随温度和时间变化的关系，如下图 3-9 所示。

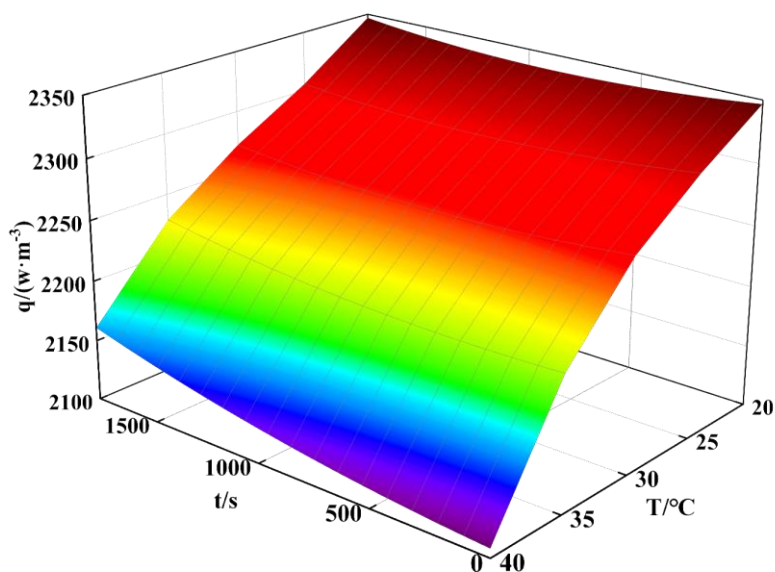


图 3-9 不同环境温度下放电倍率为 0.5C 的生热速率

3.4 锂离子电池温升实验

3.4.1 温升实验方案设计

为了获取选定电池的温升数据，并为其热仿真模型提供实验依据，本节进行了不同温度条件下的单体电池温升测试。设定环境温度为 20℃，25℃，30℃，35℃，40℃。设置电池放电倍率为 0.5C。实验装置布置情况如图 3-3 所示。实验步骤如下：

(1) 设置环境仓温度为 20℃，将单体电芯放入环境仓并达到温度平衡，使电芯和环境仓的温度保持在 20℃。

(2) 用 0.5C 恒流充电方式充电至截至电压为 4.2V，然后采用恒压充电至截至电流为 0.002C 结束。

(3) 将电池在环境仓中搁置 2h，使电池温度与环境仓中设定的温度一致。

(4) 电池以 0.5C 的倍率放电 1800s。

(5) 将放完电的电池在环境仓中搁置 2h，使电池的温度与环境仓中温度保持一致。

(6) 收集电池在放电过程中电压和温度传感器采集的电池温度数据。

(7) 重复步骤 (2) 和步骤 (6)，并依次将温度设置为 25℃、30℃，35℃，40℃，采集不同环境下电池的放电温度。

3.4.2 不同环境温度下温升测试结果

测得的温度数据绘于下图 3-10 所示。

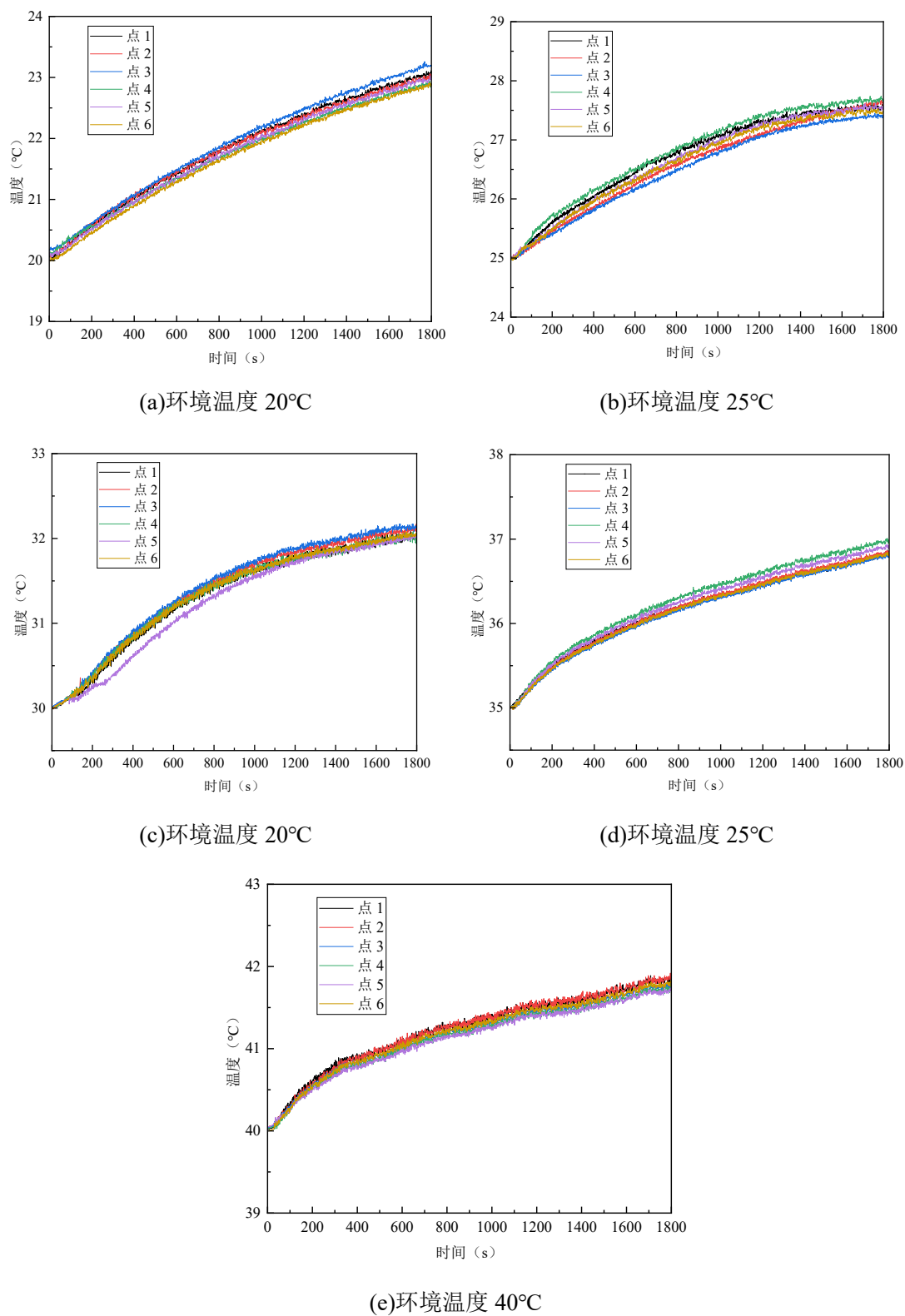


图 3-10 0.5C 放电倍率下电池的温升

由图 3-10 可见，在不同温度下，随着放电时间的推移电池的温升曲线呈现

出了相似的变化趋势，都在逐渐升高。在相同的放电深度下，环境温度越低，电池的放电温升幅度及最大温差均显著增大。

3.5 电池单体热模型的建立

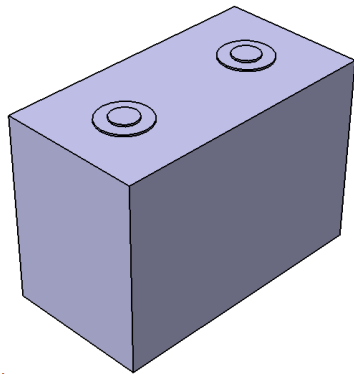
3.5.1 模型建立及网格划分

由于电芯内部涉及的材料多，并且结构复杂，所以直接创建三维模型很困难，因此需要对模型进行简化。即忽略电芯正负极柱的影响，并将电芯内部的材料均匀化^[72]。根据^[40]中的实验数据得到电芯的热物性参数，如表 3-6 所示。

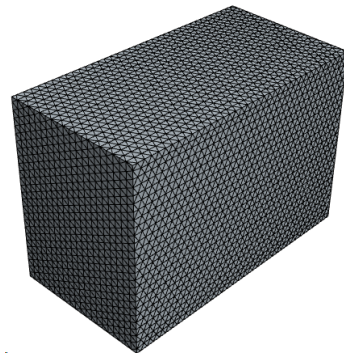
表 3-6 锂离子电池主要物性参数

密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·K)	热导率 W/(m·K)
2345	979.6	$\lambda_x = 1.21$ $\lambda_y = \lambda_z = 17.45$

在 CATIA 建模软件中建立几何模型，模型尺寸为 148×78×103mm，如图 3-11(a)所示。将模型导入到 STAR-CCM+中并用自带的网格划分功能。划分好的网格如图 3-11(b)所示。单体锂离子电池网格尺寸为 4mm，采用四面体网格，最终总的单元网格数为 74207 个，内部面数为 152884 个，节点数为 20295 个。



(a)几何模型



(b)网格划分

图 3-11 几何模型和网格划分

3.5.2 边界条件的设置与网格无关性验证

假设只考虑电池放电产热过程中的热传递和热对流并忽略热辐射，同时假定电芯内部发热均匀。将通过式(3-8)计算的电芯生热速率作为电芯热源。

接下来对网格进行无关性验证，总共划分了 8 个不同数量的网格。在 0.5C 放电倍率下，设置 20℃为仿真的静态温度和环境温度，仿真总放电时长为 1800s，

仿真时间步长设置为 1s，每步迭代 5 次。电池的外表面采用自然对流传热，传热系数为 $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。经过 7 万个以上的网格验证后，电池最高温度趋于稳定，故最终选择的网格数量为 7.4 万，如图 3-12 所示。

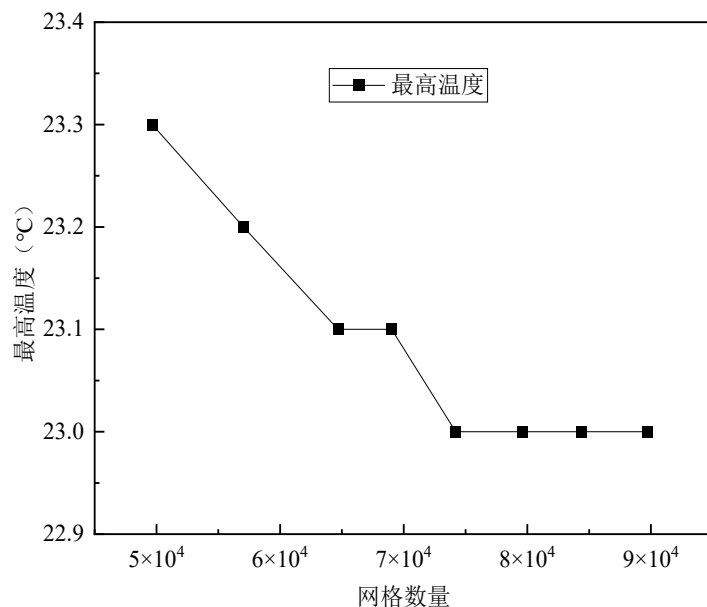
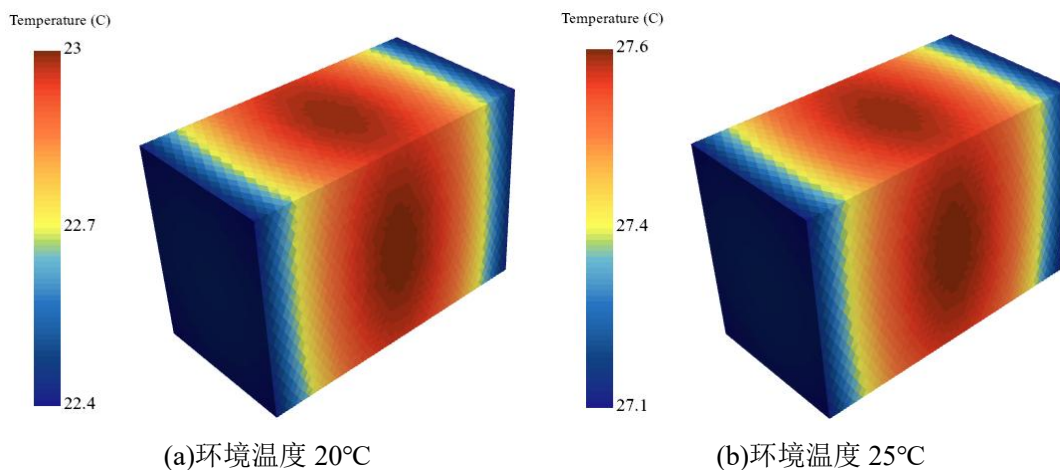


图 3-12 网格无关性验证

3.5.3 仿真结果分析

将锂离子电池工作的温度设定为 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 、 40°C ，并在放电倍率为 0.5C 的条件下进行单体电池的仿真，仿真结果如图 3-13 所示。



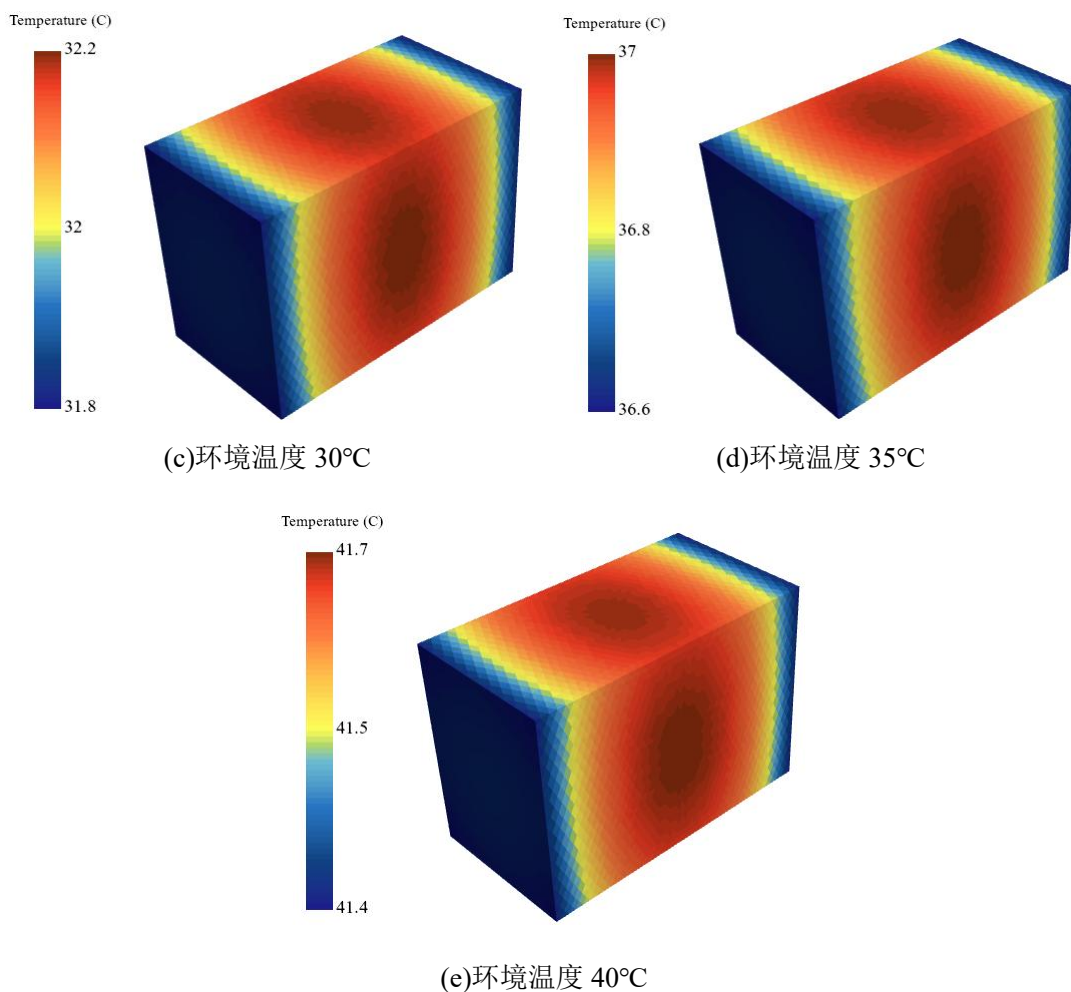


图 3-13 不同环境温度下单体电池温升云图

由图 3-13 的温度云图可以看出，在放电倍率为 0.5C 以及环境温度为 20°C、25°C、30°C、35°C、40°C 的条件下，电池放电完成后的最高温度达到了 23°C、27.7°C、32.2°C、37°C、41.7°C，温差分别达到了 0.6°C、0.5°C、0.4°C、0.4°C、0.3°C。

3.5.4 模型验证

仿真时在电池模型表面布置了 6 处测温点，位置与实验采集温度时的位置相同。为了便于进行比较和验证，将仿真获得的 6 组温度与实验采集到的 6 组温度取平均值进行对比分析，图 3-14 为不同温度下的结果对比。

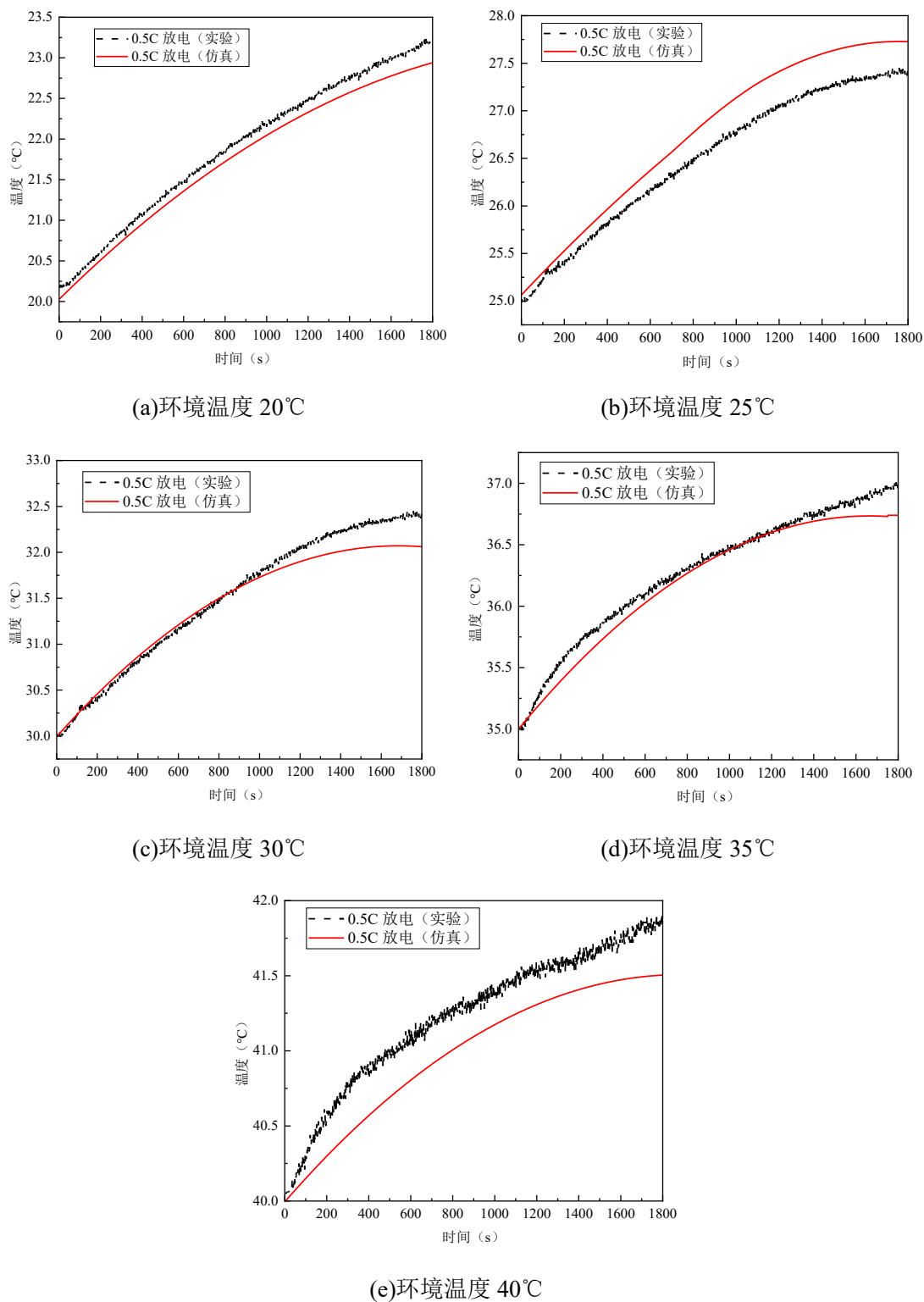


图 3-14 实验与仿真对比

从图 3-14 的实验结果可以看出，在不同环境温度下，实验测得的锂离子电池放电温升曲线呈现出相似的变化趋势，且其温升幅度随放电时间的延长而逐渐增大。当环境温度为 20℃时，0.5C 放电实验与仿真结果的最大温差为 0.35℃，

相对误差为 1.53%；在 25°C、30°C、35°C 和 40°C 的条件下，实验与仿真结果的最大温差分别为 0.41°C、0.4°C、0.27°C、0.52°C，对应的相对误差分别为 1.79%、1.75%、1.18% 和 2.27%。值得注意的是，仿真结果与实验值之间的相对误差均在 3% 以内，这充分验证了本文所建立的单体电池热仿真模型的准确性和可靠性。因此，该模型不仅可用于指导后续的电池包热管理仿真研究，也为相关热特性分析提供了可信的理论依据。

3.6 本章小结

完成了方形锂离子电池的性能测试并建立单体电池的仿真模型。首先搭建实验平台，通过 HPPC 内阻测试法获得不同温度不同 SOC 下的锂离子电池放电内阻，采用直接测量法测定了熵热系数与 SOC 的实验曲线。将电池内阻的变化拟合到 SOC 和温度的多项式函数关系中，根据 Bernardi 理论利用所测得的电池内阻，获得了单体电池在放电过程中的生热速率随时间和温度变化的特性曲线。然后建立了锂离子电池的仿真模型，并通过实验数据的比对验证仿真结果的可靠性。分析表明，最大温度偏差控制在 3% 以内，能够较真实地反映锂离子电池的产热过程。

第4章 无模组电池包设计及其性能分析

传统的电池包集成方式 CTM(Cell to Module)空间利用率少,不利于提升整车续航,因此就产生了一种新的电池包集成方式 CTP(Cell to Pack)。随着无模组电池包能量密度的增加,在运行过程中会产生大量热量,如果热量不散发,可能会缩短电池寿命,甚至导致发生热失控。因此对于无模组电池包进行热管理研究并将电池包控制在一定的平均温度范围是至关重要的。本章设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板。在搭建单体电池热模型的基础上,分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。

4.1 无模组电池包设计及流体分析

4.1.1 无模组电池包

本章所设计的无模组电池包主要由上盖板、电芯堆、连接架、隔板、隔热棉、导热结构胶、液冷板和下箱体组成。电池包的大小为 $1500 \times 1050 \times 145\text{mm}$ 。96 个电芯分为 6 个电芯堆,每个电芯堆中 16 个电芯,放置于下箱体中。电芯堆与电芯堆中间设有隔板,每个电芯堆由一个连接架与两侧隔板固定。为防止电芯发生热失控,电芯与电芯之间放置隔热棉,厚度为 2mm 。为了减少电池包和液冷板之间的接触热阻,在电池包和液冷板之间加入导热结构胶,厚度为 2mm 。液冷板放置于箱体的下方,如图 4-1 所示。

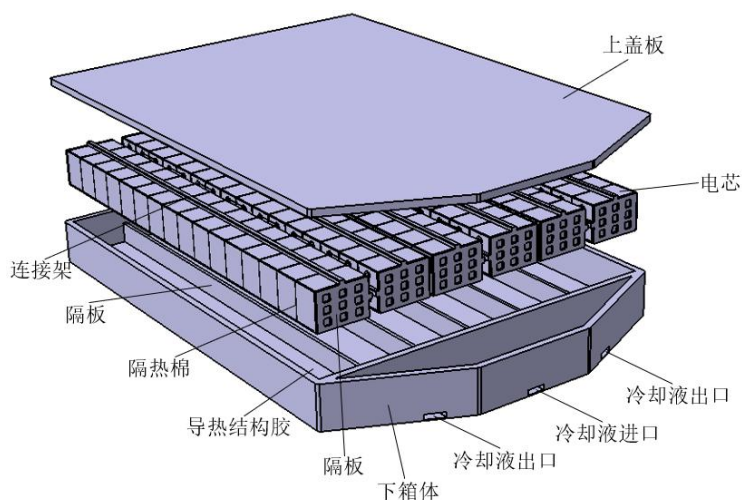


图 4-1 无模组电池包

4.1.2 液冷板设计

以典型的蛇形流道结构^[38]为参考设计，采用铝制材料设计了一种对称蛇形流道结构的液冷板。如图 4-2 所示为液冷板结构设计图，液冷板几何尺寸为 $1580 \times 1028 \times 20\text{mm}$ ，冷却液入口尺寸为 $30 \times 15\text{mm}$ 。

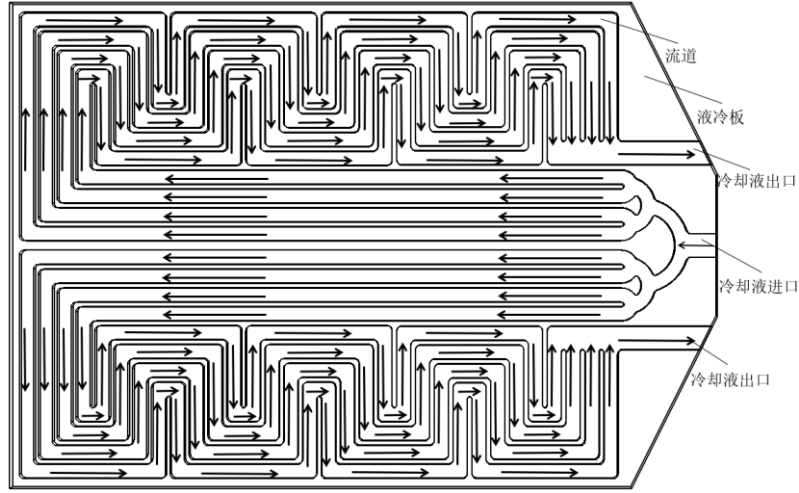


图 4-2 液冷板结构图

4.1.3 流体分析

根据流体动力学原理，冷却液在流道中的流动状态取决于雷诺数(Re)。在工程中，雷诺数通常被用作确定流体流动状态的临界值。如果 $Re < 2300$ ，则流体为层流；如果 $2300 < Re < 4000$ ，则流体处于从层流到湍流的过渡状态；如果 $Re > 4000$ ，则流体被视为湍流。冷却液的雷诺数可用以下公式计算^[73]：

$$Re = \frac{\rho v d_h}{\mu} \quad (4-1)$$

Re 是雷诺数； ρ 是冷却液密度； v 是入口流量； d_h 是流道的水力直径； μ 是动态粘度。流道的横截面积均为矩形， d_h 的矩形流道可以计算如下^[74]

$$d_h = \frac{4A}{C} = \frac{2ab}{a+b} \quad (4-2)$$

A 是流道的横截面积； C 是横截面的周长； a 和 b 分别是流道的高度和宽度。

在设计液冷板时，应在保证足够的冷却效果的前提下，尽可能减少液冷板的压降，以提高冷却效率并降低能耗。液冷板在不同冷却液质量流量下的压降云图如图 4-3 所示。

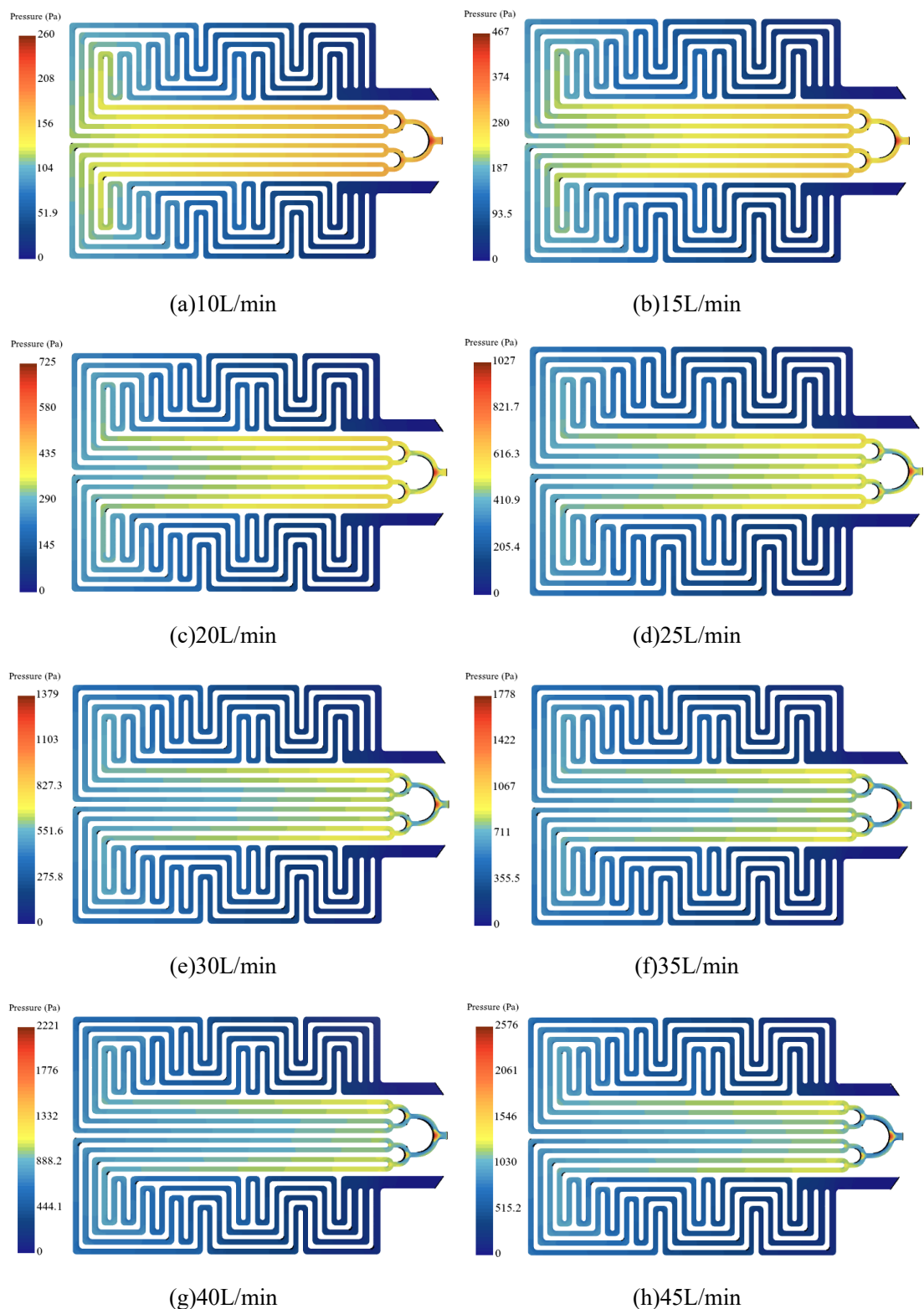


图 4-3 不同质量流量下液冷板的压降

冷却液选择 50%乙二醇水溶液，在 20℃和 25℃下的动力粘度为 $0.0039\text{Pa} \cdot \text{s}$ 和 $0.0034\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。根据公式(4-1)和(4-2)可以计算出在不同质量流量下冷却液的雷诺数。如表 4-1 所示。

表 4-1 不同质量流量下的雷诺数与压降

质量流量 L/min	雷诺数	状态	压降 $\Delta p(\text{Pa})$
10	441	层流	260
15	630	层流	467
20	945	层流	725
25	1260	层流	1027
30	1386	层流	1379
35	1638	层流	1778
40	1890	层流	2221
45	2142	层流	2576

由表 4-1 可知,当质量流量为最大 45L/min 时,液冷板的最大压降为 2576Pa,雷诺数为 2142,此时为层流状态,冷却液流动状态较为稳定。与参考文献^[31]中所设计的逆流顶蓬到顶蓬的液冷板相比,本文所设计的液冷板在同等雷诺数的情况下,压降较小。下面对此液冷板进行冷却性能分析。

4.2 冷却性能分析

4.2.1 仿真模型与边界条件

由于电池包内部零件种类多且复杂,所以需要对电池包进行简化。简化后的电池包模型仅保留了电芯、导热结构胶、液冷板以及隔热棉。采用 CATIA 进行三维建模,使用 STAR-CCM+软件进行网格划分,仿真模型和网格划分如图 4-4(a)、图 4-4(b)所示。模型采用多面体网格划分。

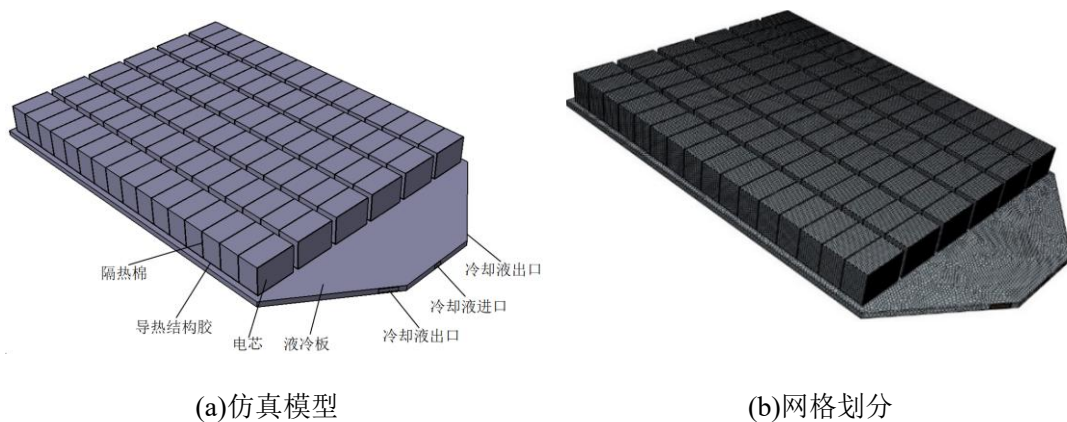


图 4-4 仿真模型和网格划分

仿真模型中液冷板材料为铝,冷却液为 50%乙二醇水溶液,隔热棉的材料为

云母板，导热结构胶的材料为硅胶，如表 4-2 所示。

表 4-2 材料物性参数

名称	密度 kg/m ³	比热容 J/(kg·K)	热导率 W/(m·K)	动力粘度 Pa·s
电芯	2345	979.6	$\lambda_x = 1.21$ $\lambda_y = \lambda_z = 17.45$	-
液冷板	2702	903	237	-
冷却液	1071	3300	0.384	20°C=0.0039 25°C=0.0034
导热结构胶	1200	1240	0.9	-
隔热棉	1230	1457	0.23	-

为了获得准确的计算结果，对网格进行无关性验证。设置入口水温与液冷板初始温度为 25°C，电池包、导热结构胶和隔热棉初始温度为 42°C，冷却液质量流量为 20L/min。共设定了 8 个不同数量的网格，如图 4-5 所示。当网格数量达到 430 万以上时，电池包的最高温度趋于稳定，故最终选择的网格数量为 448 万。

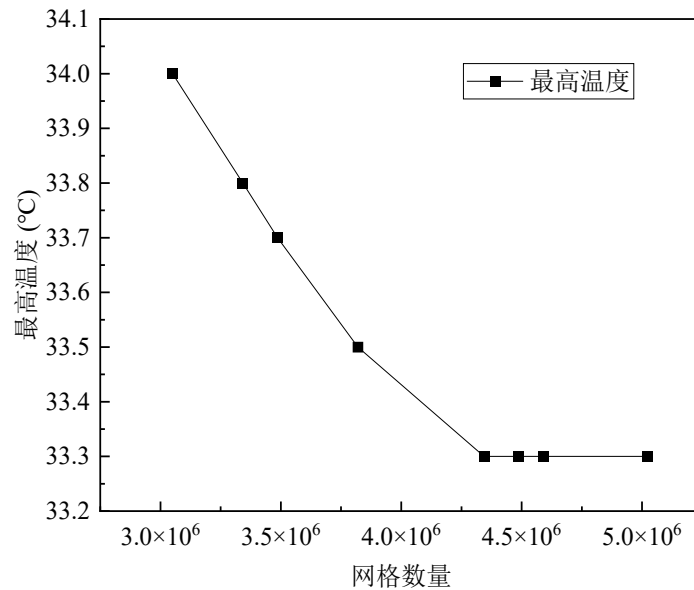


图 4-5 网格无关性验证

对无模组电池包仿真时，由于热辐射较小，因此忽略热辐射的影响。只考虑电池包放电产热过程中的热传递和热对流对电池包散热的影响。入口设置为冷却液质量流量入口，出口设置为压力出口，相对压力为 0.0 Pa。仿真总放电时长为 1800s，仿真时间步长设置为 1s，每步迭代 5 次。根据式 (3-8) 和表 3-5 可以得

到电池包在环境温度为 42℃时的不同生热速率 q ，如图 4-6 所示。

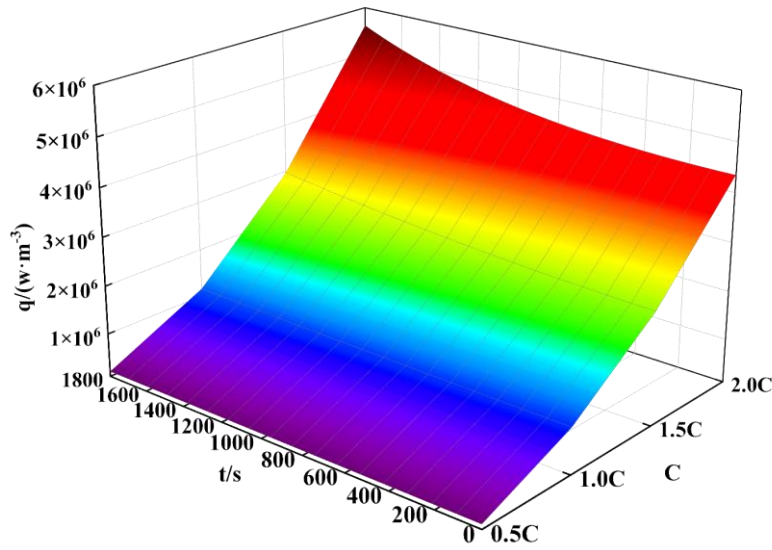
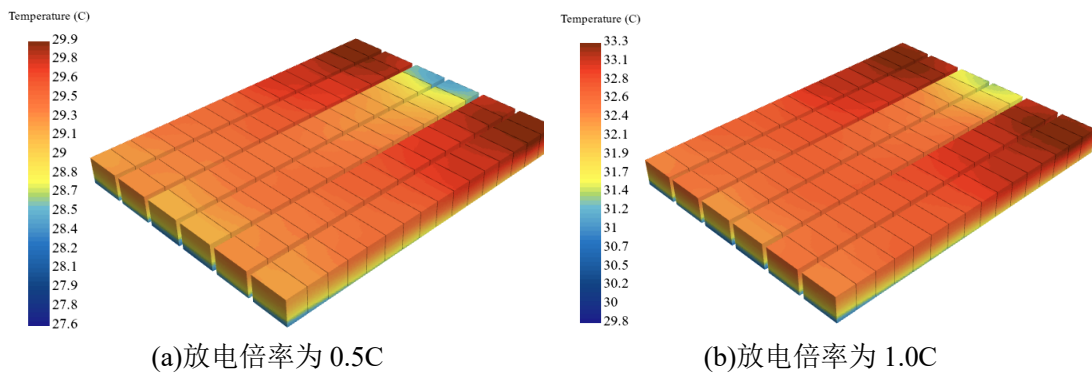


图 4-6 环境温度为 42℃时不同放电倍率下的电池包生热速率

4.2.2 不同放电倍率下电池包冷却性能影响分析

设置入口水温与液冷板初始温度为 25℃，冷却液质量流量为 20L/min，电池包、导热结构胶和隔热棉初始温度为 42℃。然后进行不同放电倍率下的仿真计算。根据仿真结果得到电池包的温度分布云图，如图 4-7 所示，温度数据如表 4-3 所示。根据仿真结果可得，增加放电倍率导致电池包的温度不一致性更加明显。当放电倍率从 1.5C 增加至 2C 时，最高温度和最大温差的变化最为显著，分别增加 8.3℃和 2.9℃。而将放电倍率从 0.5C 增加至 1C 时，变化最小，分别增加 3.4℃和 1.2℃。



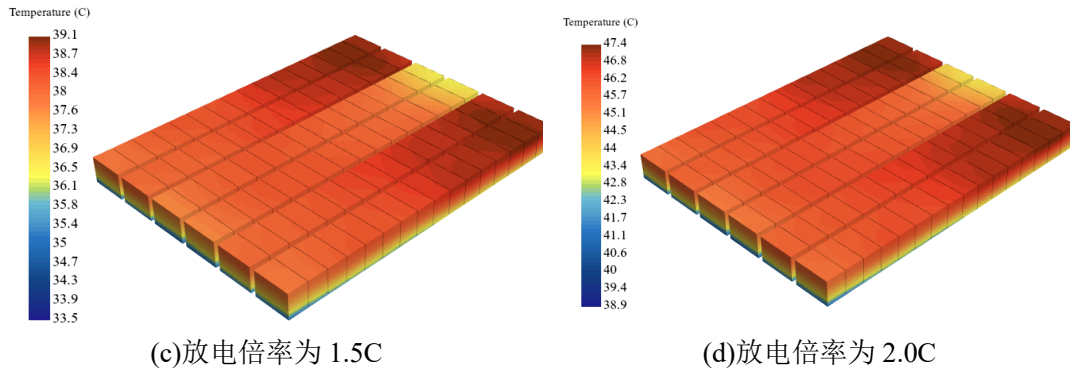


图 4-7 电池包温度分布云图

表 4-3 电池包的最高温度和最大温差

放电倍率	最高温度	最大温差
0.5C	29.9℃	2.3℃
1.0C	33.3℃	3.5℃
1.5C	39.1℃	5.6℃
2.0C	47.4℃	8.5℃

随着放电倍率的增加，电池包的最高温度和最大温差均呈上升趋势。针对高放电倍率下电池包的最高温度和温差过大现象，可以得出如下结论，固定入口水温与冷却液质量流量不适用于所有的放电倍率条件，即针对不同放电倍率需要给出不同的入口水温与冷却液质量流量。

4.2.3 导热材料的影响分析

在无模组电池包技术中，电芯的固定不再需要螺栓与螺母，而是采用导热结构胶进行固定，且导热结构胶具有良好的导热性能，可以将电芯底部产生的热量迅速传导到液冷板，从而降低电芯的工作温度，提高电芯的散热效果，防止电芯过热。

在 STAR-CCM+软件中设置电池包、导热结构胶和隔热棉的初始温度为 42℃，入口水温与液冷板的初始温度为 25℃，冷却液的质量流量为 20L/min。在同一个放电倍率下做不同热导率仿真计算，得出热导率、最高温度和最大温差之间的关系。将电池包的放电倍率设为 0.5C、1.0C、1.5C、2.0C，仿真结果如图 4-8 所示。随着导热结构胶的热导率在增加，可以看出电池包的最高温度有所降低，但电池包的最大温差却在上升。导热结构胶中最主要的热物性参数是热导率，因为热导率的大小决定了导热结构胶的热传导能力，热导率越大，传导速度越快。但并不

是热导率越大越好，热导率越大就会造成电芯底部热传导加快，使电芯上下的温差变大，导致电芯内部的化学反应速率发生变化，从而影响电芯的动力性能，导致动力性能下降。且会缩短电芯的寿命，增加电芯的热失控风险。故选择一个合适的热导率对电芯的散热、性能以及寿命有重大的影响。

通过对图 4-8 的分析可得，当导热胶的热导率从 $0.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 变化到 $1.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时，无论在何种放电倍率下，电池包的最高温度均呈现下降趋势。这有利于电池包的安全运行。与此同时，各个电芯之间的最大温差逐渐增大，不利于维持电池包内部均匀温度分布。结合 $0.5\text{C} \sim 2\text{C}$ 放电倍率下电池包最高温度和最大温差与导热胶热导率之间的关系，在平衡考虑下选择了具有 $0.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 热导率的导热胶。

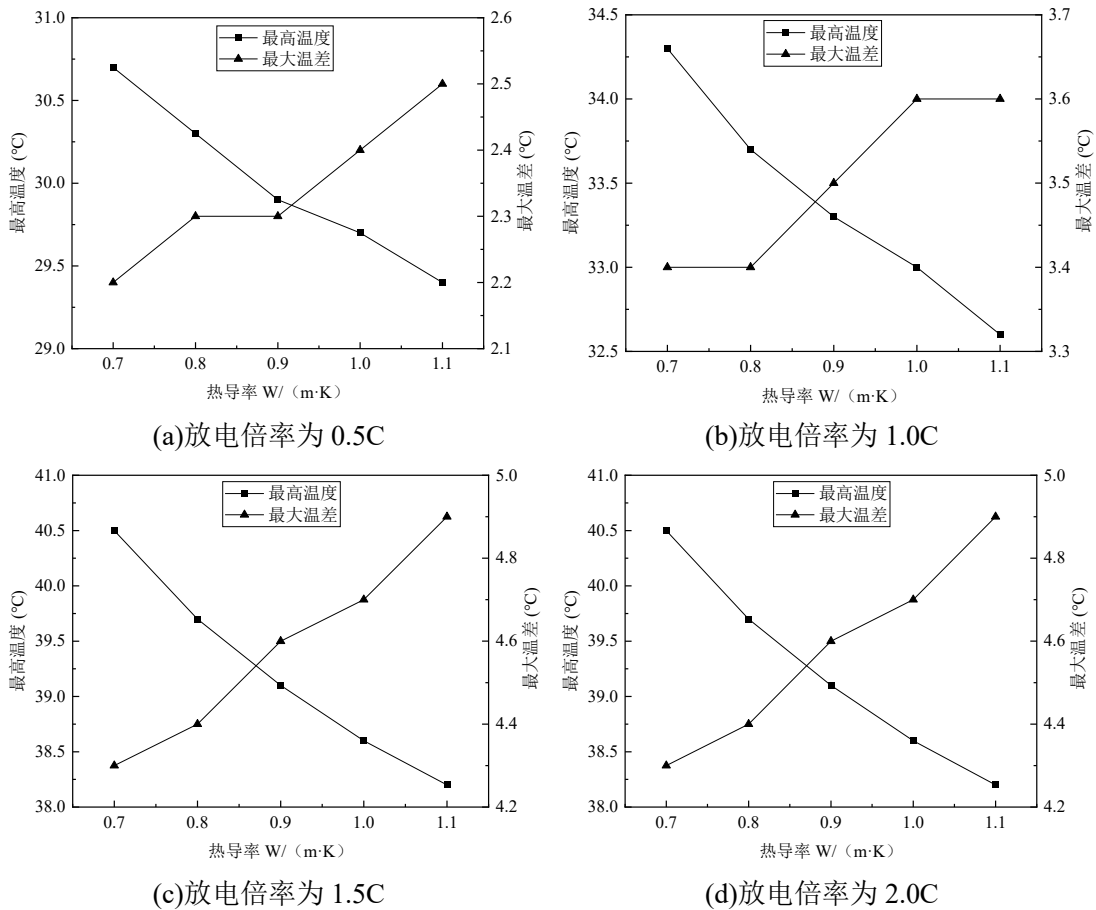


图 4-8 不同放电倍率下电池包的温度曲线图

4.2.4 不同入口水温与冷却液质量流量的影响分析

通过 4.2.2 节的仿真分析可得，针对不同放电倍率下的电池包，需要给出不同的入口水温与冷却液质量流量。因此需要找出在不同放电倍率下电池包的最佳

入口水温与冷却液质量流量。且通过 4.2.3 节的仿真分析得出最佳的导热结构胶的热导率为 $0.9\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。本节对放电倍率为 0.5C、1.0C、1.5C、2.0C 四种放电倍率下的电池包做不同入口水温和冷却液质量流量的仿真，得出结果如图 4-9 和图 4-10 所示。

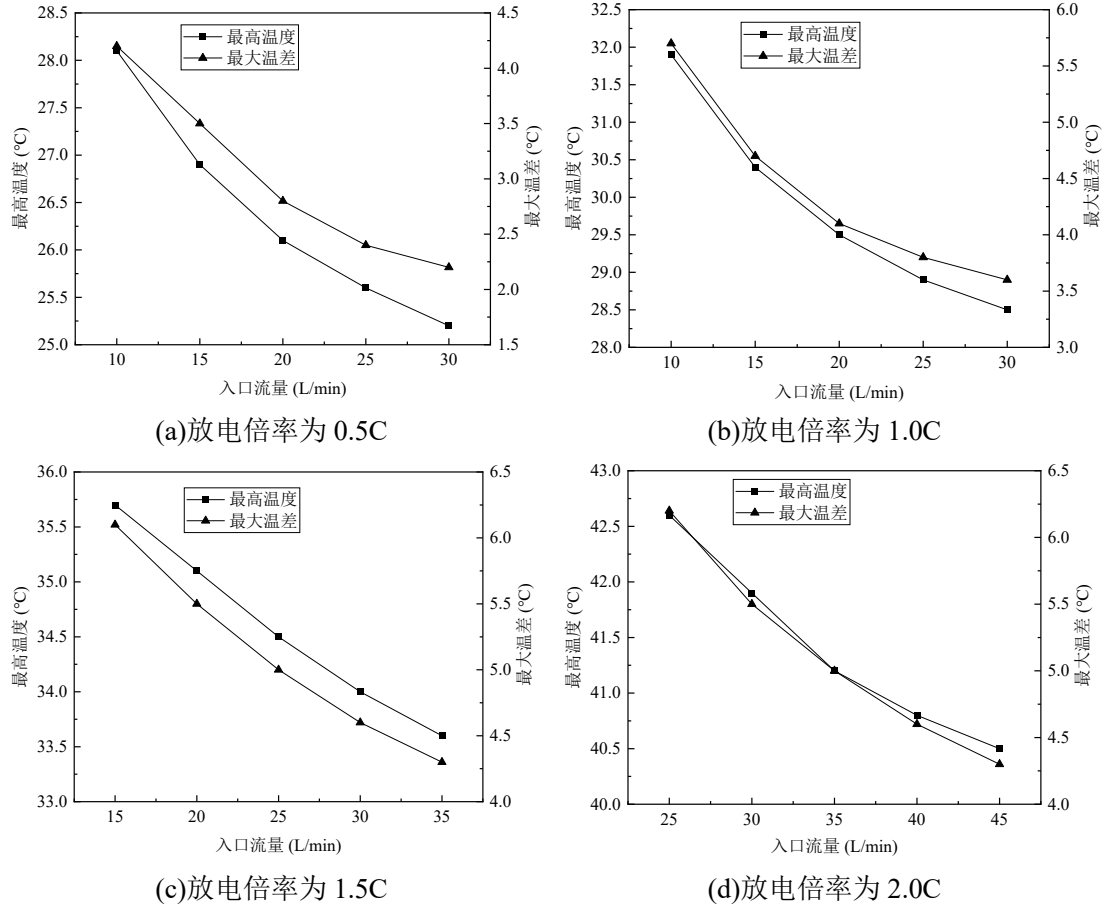
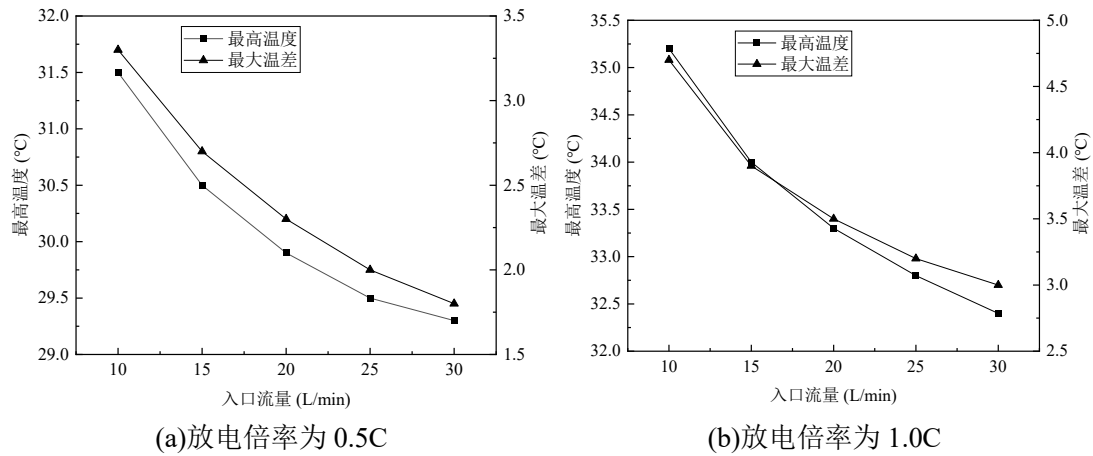


图 4-9 入口水温 20°C



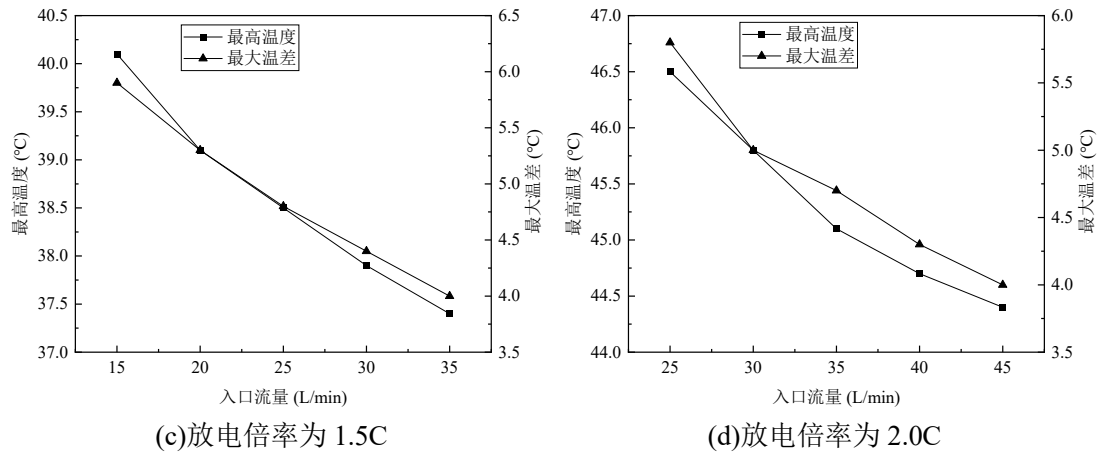


图 4-10 入口水温 25°C

随着入口流量的增加,电池包的最高温度在下降,但下降的幅度在逐渐减小。这是因为电池包失去的热量在相应增加,而产生的热量不变。当电池包内部产生的热量与传递给冷却液的热量达到平衡时,电池包的最高温度下降幅度将减小,且由于入口流量的增加,导致液冷板中的冷却液分布更加均匀,使得电池包的最大温差也在降低。当入口水温从 25°C 降到 20°C 时,电池包的最高温度下降了 3~4°C,但最大温差却增加 1°C 左右,这是由于入口水温下降,导致靠近液冷板的电池包底部温度下降明显,但由于电芯本身的各向异性导致传热较慢,因此扩大了电池包的整体温差。

综合表 4-1 的雷诺数与压降以及从图 4-9 和图 4-10 可以得出不同放电倍率下电池包的最佳的入口水温和冷却液质量流量,使得电池包的温差满足在 5°C 以内,其对应关系如表 4-4 所示。例如在 1.0C 放电倍率下,选择入口水温为 25°C,冷却液质量流量等于 10L/min,此时液冷板的压降最小,因此该条件为 1.0C 放电工况下电池包的最佳入口水温与质量流量。

表 4-4 不同放电倍率下电池包入口水温 and 冷却液质量流量的关系

不同放电倍率	入口水温	冷却液质量流量
0.5C	20℃	≥10L/min
	25℃	≥10L/min
1.0C	20℃	≥15L/min
	25℃	≥10L/min
1.5C	20℃	≥25L/min
	25℃	≥25L/min
2.0C	20℃	≥35L/min
	25℃	≥30L/min

综上所述，本文设计的液冷板能够满足 2C 放电工况的冷却需求，相较于参考文献^[31]中所设计的逆流顶蓬到顶蓬的液冷板相比，本文所设计的液冷板不仅压降小，冷却效果也更好。

4.3 电池包的低温加热性能分析

由 4.2 节分析可知，该无模组电池包具有很好的冷却性能，能够满足 2.0C 放电工况的冷却需求。但是电池包不仅能在高温下进行冷却，同样还需要在低温条件下为电池包提供可靠的加热，以确保其在极端环境下（如北方冬季）仍能维持正常工作性能。因其水冷冷热一体化加热方式^[75]具备较高的可靠性和良好的热管理效果，所以在本章研究中选择采用水冷冷热一体化加热。

4.3.1 冷却液质量流量对于加热性能的影响

不同冷却液质量流量下对电池包加热性能是不同的，因此，本节先分析冷却液的质量流量对电池包加热性能的影响。将电池的初始设置为-30℃，初始的入口水温为设置为 30℃，当电池包最低温度达到 15℃后停止加热。调节液冷板入口的质量流量，将入口流量依此设为 10L/min、15L/min、20L/min 和 30L/min 进行加热性能仿真，仿真的结果如图 4-11 所示。

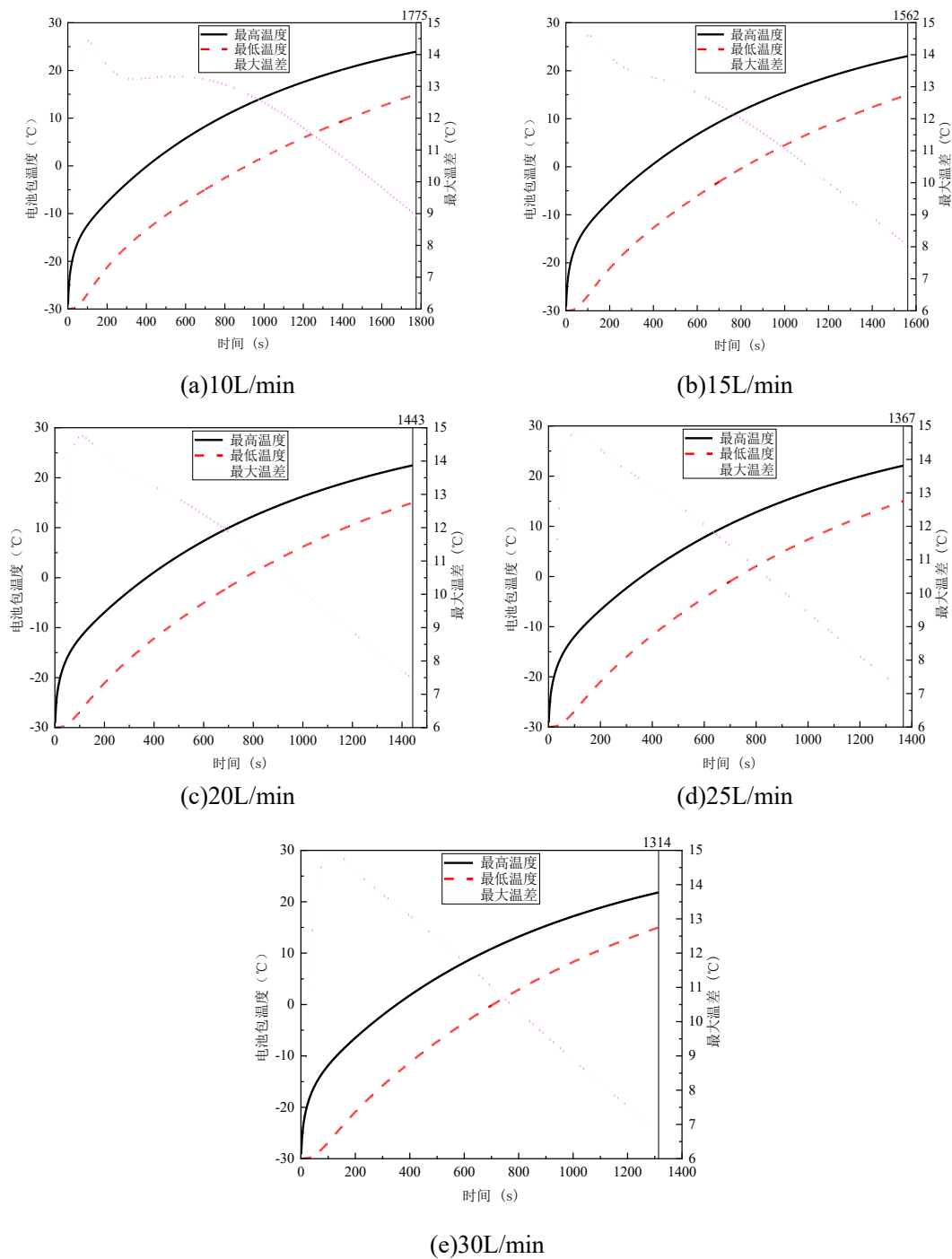


图 4-11 不同流量下电池包加热性能的温度曲线图

仿真结果表明，加热开始后，电池包内部温度呈现先快速上升后趋于平缓的趋势，同时温度梯度逐渐增大并最终减小。根据表 4-5 的仿真数据分析可知，冷却液流量的增加对电池包的加热速率和温度分布具有显著影响：随着冷却液流量的增加，电池包的加热速率显著提高，同时温度梯度逐渐减小。

表 4-5 不同流量对于加热性能的影响

冷却液流量(L/min)	10	15	20	25	30
加热到 15℃所需时间(min)	29.6	26	24	22.8	21.9
加热结束后温度最大值(℃)	23.94	23.05	22.48	22.09	21.82
加热结束后温度最小值(℃)	15	15	15	15	15
加热结束后最大温差(℃)	8.94	8.05	7.48	7.09	6.82
加热速率(℃/min)	1.52	1.73	1.87	1.98	2.05

将表 4-5 中的数据画成折线图可以更清晰的看到不同流量下电池包的最大温差与加热速率。

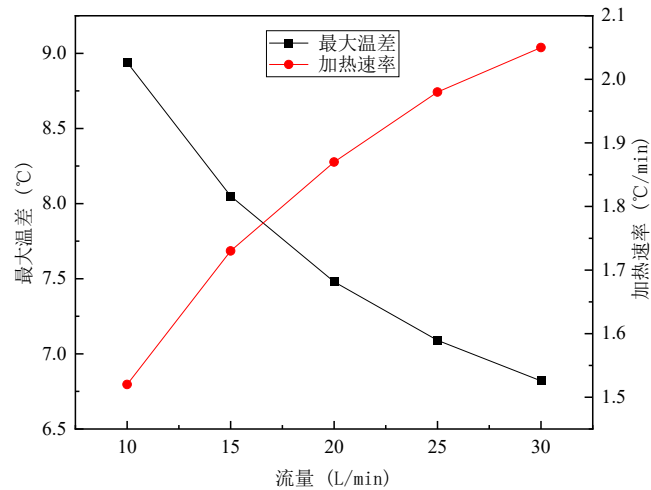


图 4-12 不同流量下电池包的温差与加热速率

随着冷却液入口流量的增加，电池包的加热速率显著提升，如图 4-12 所示。然而，当流量持续增大时，加热速率的提升幅度逐渐趋于平缓。因此，在实际应用中选择冷却液入口流量时，需综合考虑加热效率、系统能耗及流体动力学等因素，以实现最优的热管理效果。

4.3.2 冷却液入口温度对于加热性能的影响

现在分析入口温度对加热性能的影响，确定冷却液的质量流量为 20L/min，将入口温度设定为 20℃、25℃、30℃、35℃和 40℃，当电池包最低温度达到 15℃后停止加热。不同入口温度下的电池包温升曲线仿真结果如图 4-13 所示。

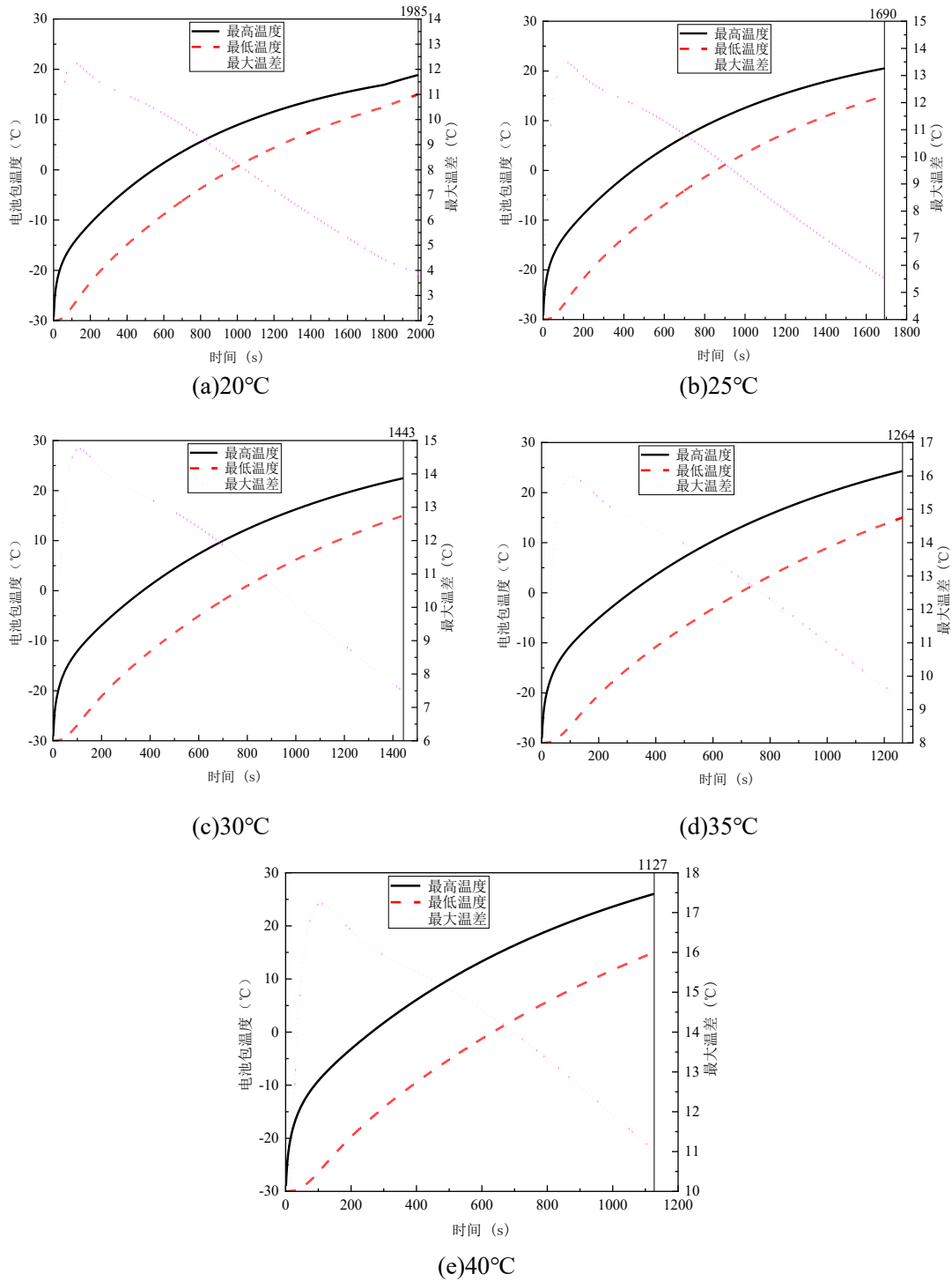


图 4-13 不同温度下电池包加热性能的温度曲线图

仿真结果表明,随着入口温度的升高,电池包内部温度呈现先快速上升后趋于平缓的趋势,同时温度梯度逐渐增大并最终减小。如表 4-6 所示,当冷却液入口温度从 20°C 递增至 40°C 时,电池包的加热速率显著提升。加热速率从 1.36°C/min 增加到 2.40°C/min,增幅达 1.04°C/min。说明冷却液的入口温度对于加热速率的影响很大,但随之最大温差由 3.87°C 增加到 11.03°C。

表 4-6 不同温度对于加热性能的影响

冷却液入口温度(°C)	20	25	30	35	40
加热到 15°C所需时间(min)	33	28.2	24	21	18.8
加热结束后温度最大值(°C)	18.87	20.52	22.48	24.30	26.03
加热结束后温度最小值(°C)	15	15	15	15	15
加热结束后最大温差(°C)	3.87	5.52	7.48	9.30	11.03
加热速率(°C/min)	1.36	1.60	1.87	2.14	2.40

将表 4-6 中的数据画成折线图能清晰的看到不同温度对于电池包最大温差与加热速率的影响。

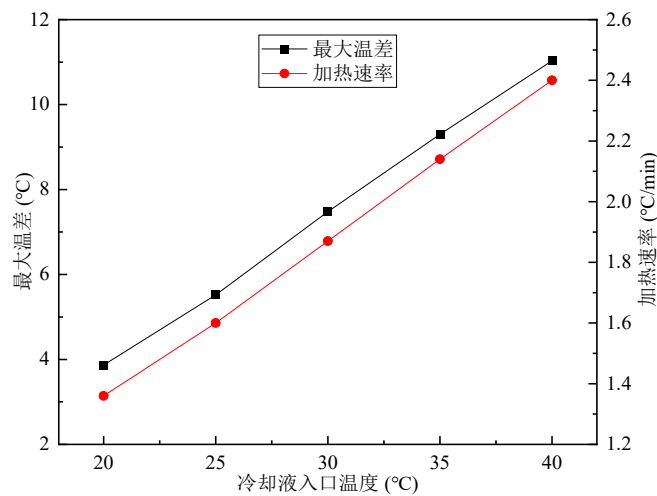


图 4-14 不同温度下电池包的温差与加热速率

随着入口温度的增加，电池包的加热速率也逐渐变大，由图 4-14 可知。但随着入口温度的增加，电池包的最大温差也在上升。因此在选择冷却液入口温度时，应综合冷却液的入口流量进行选择。

通过仿真研究了不同质量流量和温度与对电池包加热性能的影响。仿真结果表明，入口温度的升高显著提升了电池的加热速率，但也导致了电池包内部更大的温差。另外，冷却液的流量对电池包的加热能力具有显著影响，入口冷却液流量越大，电池包内部的温差越小，同时电池包的加热能力越强。选择冷却液质量流量为 20L/min 与冷却液温度为 20°C 时，此时的加热速率为 1.36°C/min，加热结束后的电池包最大温差为 3.87°C，满足小于 5°C 的设计需求。

4.4 CLTC 工况下电池包均温性能分析

电动汽车在运行过程中电池包不会长时间以恒倍率行驶，因此其发热速率也

是不一样的。由于液冷板在电池包底部，电池包上下的温度会产生差异，这种温度的不均匀性会严重影响电池包的性能，所以对电池包进行均温性仿真分析是非常重要的。汽车在行驶中会出现加速、减速、怠速、停车、爬坡等状况，逐一设置太耗费时间。因此选择当前通用的中国轻型汽车行驶工况（CLTC），在轻型汽车行驶工况下模拟仿真电池包的均温性^[76]。在 STAR-CCM+ 中设置电池包的内热源为 CLTC 工况下的生热率，如图 4-15 所示为 3 个 CLTC 循环工况下的生热率曲线。

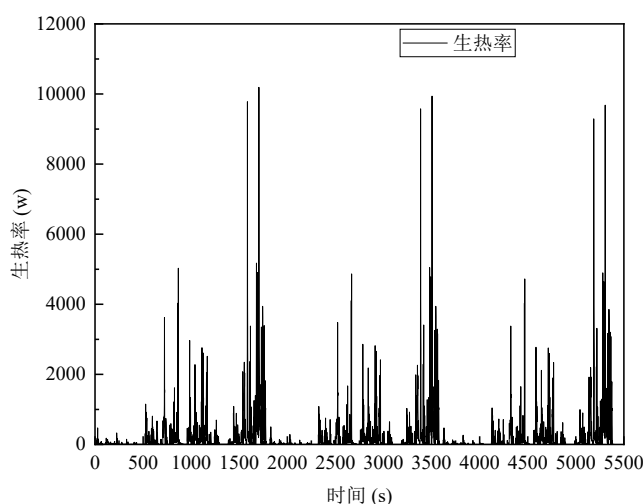
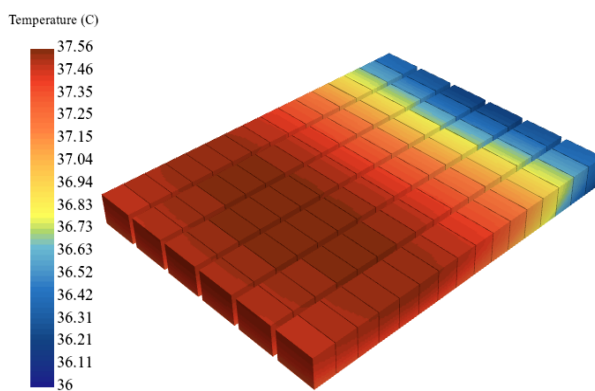


图 4-15 生热率曲线

通过 STAR-CCM+ 中的自定义函数，将冷却液设置为内循环，即液冷板出口的温度为下一次迭代完成后液冷板进口的温度。设置电池包、导热结构胶和隔热棉初始温度为 38℃，入口水温与液冷板初始温度为 25℃，内循环的冷却液质量流量分别设为 2L/min、3L/min、4L/min、5L/min。电池包一共运行 3 个 CLTC 工况，每个 CLTC 工况运行 1800s，总共运行 5400s。得到如图 4-16 所示的电池包温度分布云图。



(a)无内循环

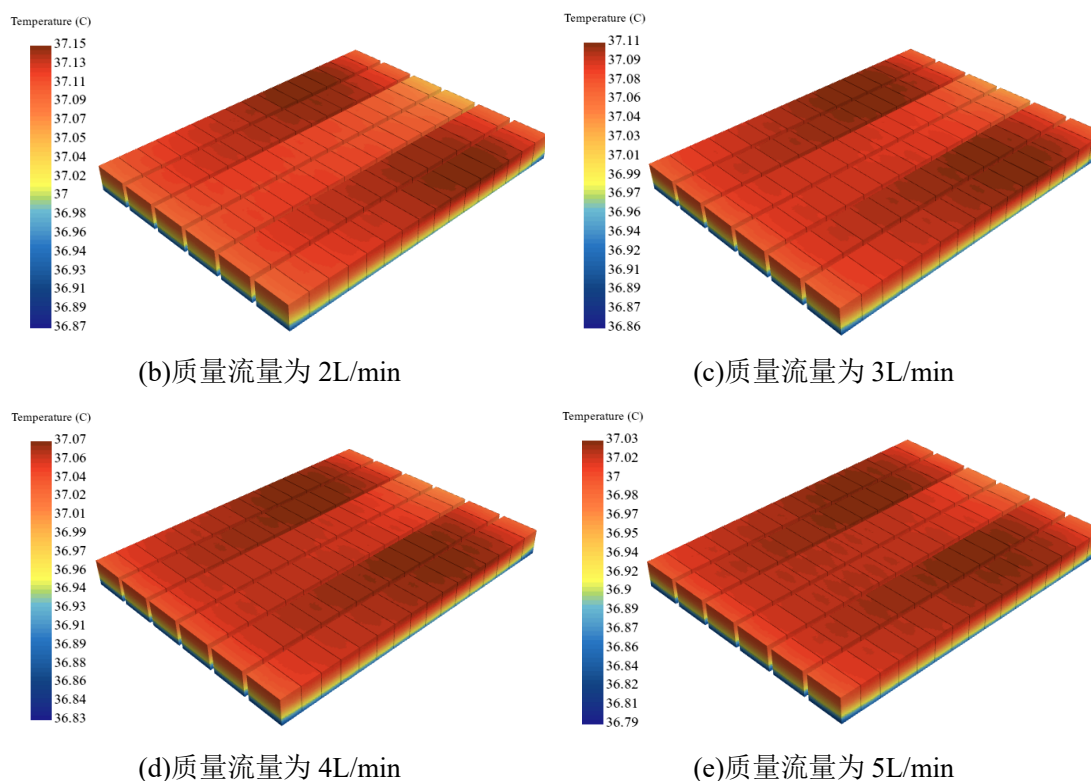
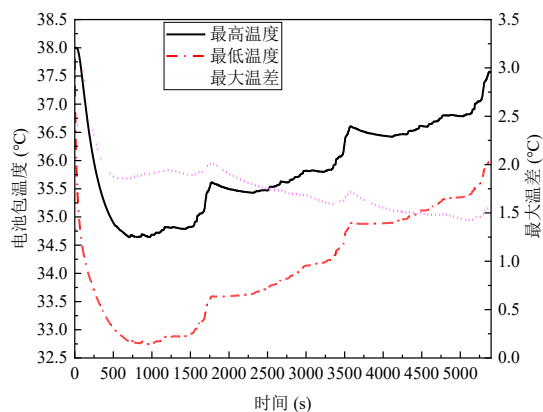


图 4-16 电池包温度分布云图

从图 4-16 可以看出有小流量循环的电池包温差更小，均温性能更好。将仿真获得的电池包温度变化转换成曲线图，从图 4-17 所示。从图中可以看出 3 个 CLTC 循环工况结束后，无冷却液内循环情况下电池包的最高温度为 37.56°C ，最大温差为 1.56°C ，而在有小流量的情况下电池包的最高温度控制在 37°C 左右，最大温差稳定在 0.25°C 上下。虽然在无冷却液内循环与有小流量内循环的情况下电池包的最高温度都相差不大，但最大温差却相差了 1.31°C 。说明在小流量循环的情况下，电池包的均温性效果更好。而在 4 种小流量循环下电池包的最高温度与最大温差均相差不大，所以选择流量为 2L/min 即可满足电池包的均温性。



(a)无内循环

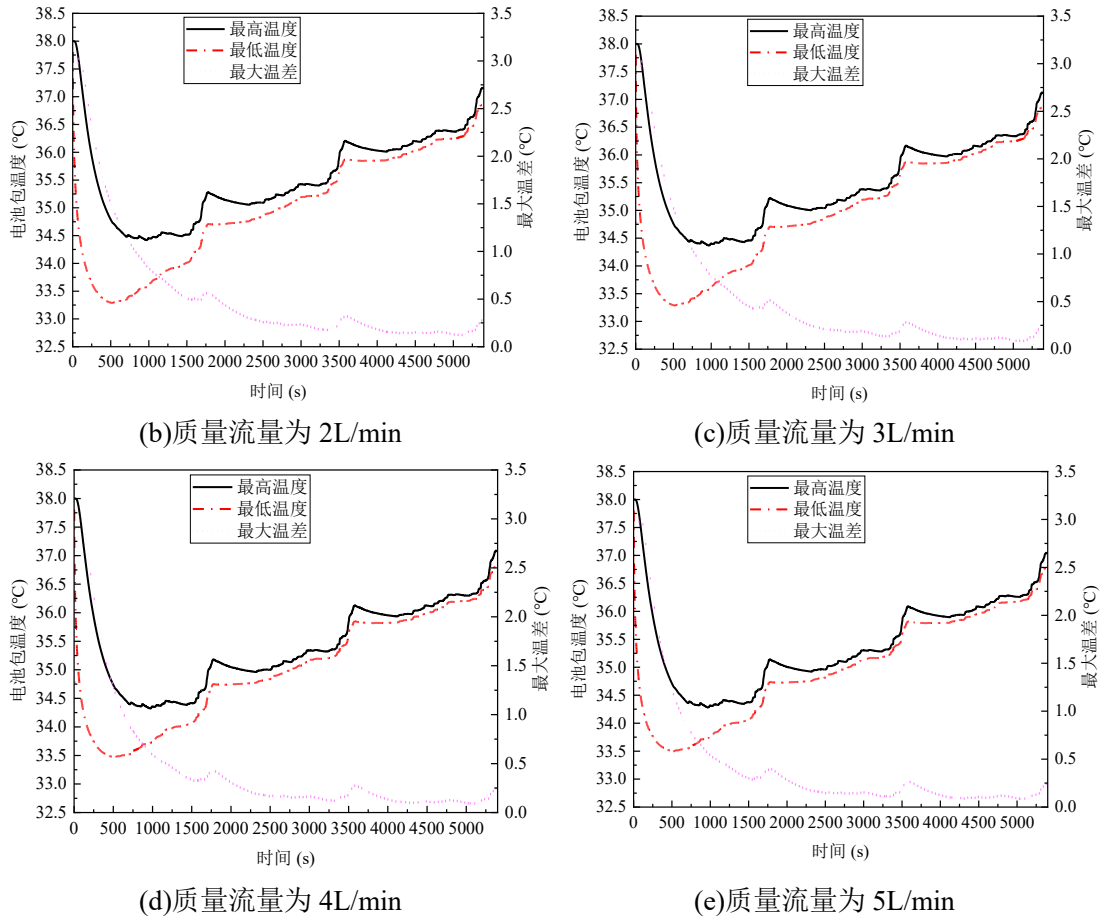


图 4-17 电池包温度变化曲线图

4.5 本章小结

本章主要是对电池包进行热管理性能研究。首先是设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板，研究分析了液冷板的流体性能。在搭建单体电池热模型的基础上，分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。研究结果表明，电池包具有很好的冷却性能，能够满足 2.0C 放电工况的冷却需求，并且在低温环境下电池包也能正常的工作。此外在 CLTC 工况下小流量运行电池包温差仅为 0.25℃左右，说明在小流量冷却液在电池回路内循环流动有利于电池包均温性，与无冷却液流动相比，冷却液流量为 2L/min 时电池包的最大温差下降了 1.31℃。

第 5 章 基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法

为解决电池包在建模仿真时网格数量较多导致计算效率低下的问题，本章提出了基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法。对温度场的相似准则进行了推导，并对电芯和无模组电池包的相似缩小模型进行了仿真计算与分析。

5.1 温度场相似准则的推导

5.1.1 温度场相似准则

电池的生热与散热过程是一个典型的三维、内热源非稳态导热过程^[77]。式(5-1)为三维常物性、非稳态、第三类边界条件下的导热微分方程^[78]。

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial^2 y} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial^2 z} + q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-1)$$

设电池内热源值为 q ， W/m^3 。如图 5-1 所示，空间任一点的热流密度矢量可分解成 x 、 y 、 z 坐标轴方向的分热流量。

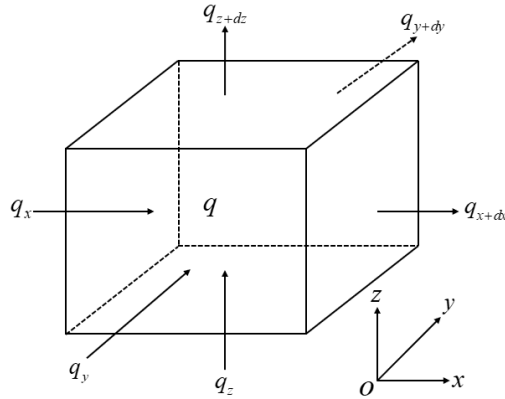


图 5-1 电池的导热热平衡分析

通过 $x=x$ 、 $y=y$ 、 $z=z$ 三个表面导入电池的热流量为

$$\left. \begin{aligned} (q_x)_x &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_x dydz \\ (q_y)_y &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_y dxdz \\ (q_z)_z &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z dxdy \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

式中, $(q_x)_x$ 表示热流量在 x 方向的分量 q_x 在 x 点的值, $(q_y)_y$ 和 $(q_z)_z$ 相似。

通过 $x = x + dx$ 、 $y = y + dy$ 、 $z = z + dz$ 三个表面导出电池的热流量为

$$\left. \begin{aligned} (q_x)_{x+dx} &= (q_x)_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx = (q_x)_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_x dydz \right] dx \\ (q_y)_{y+dy} &= (q_y)_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy = (q_y)_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_y dxdz \right] dy \\ (q_z)_{z+dz} &= (q_z)_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz = (q_z)_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z dxdy \right] dz \end{aligned} \right\} \quad (5-3)$$

电池热力学能的增量

$$\rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} dxdydz \quad (5-4)$$

电池内热源的生成热

$$q dxdydz \quad (5-5)$$

根据能量守恒定律得

$$\begin{aligned} &\text{导入的总热流量} + \text{体内热源的生成热} \\ &= \text{导出的总热流量} = \text{热力学能的增量} \end{aligned} \quad (5-6)$$

其中 ρ 为密度、 C 为比热容、 q 为热源、 τ 为时间。

将式 (5-2)、(5-3)、(5-4) 及 (5-5) 代入式 (5-6), 经整理得

$$\begin{aligned} \rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q \\ \Rightarrow \rho C \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \end{aligned} \quad (5-7)$$

其中 λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别为 x 、 y 和 z 三个方向的热传导系数; T 为温度; t 为时间。

第三类边界条件可表示为

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(T_n - T_f) \quad (5-8)$$

其中 h 为流体间的表面传热系数; n 为换热表面的外法线; T_f 为环境中的流体温度。

对于电池 x 、 y 、 z 三个面被冷却可写为

$$\begin{cases} x=0, \frac{\partial T}{\partial x}=0; x=a, \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}=h_x(T-T_f) \\ y=0, \frac{\partial T}{\partial y}=0; y=b, \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}=h_y(T-T_f) \\ z=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0; z=c, \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}=h_z(T-T_f) \end{cases} \quad (5-9)$$

初始条件

$$t=0, T(x, y, z, t)=T_0 \quad (5-10)$$

其中 h_x 、 h_y 和 h_z 分别为 x 、 y 和 z 三个方向的对流换热系数； T_0 为初始温度； T_f 为环境中流体的温度； a 、 b 、 c 分别为 x 、 y 、 z 三个方向上的几何参数。

引入长度、时间、温度三个标尺，并将式(5.8)-(5.10)作无量纲化处理。 x 、 y 、 z 方向上长度标尺分别取为 δ_x 、 δ_y 和 δ_z 分别为

$$\delta_x = \lambda_x^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5-11)$$

$$\delta_y = \lambda_y^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5-12)$$

$$\delta_z = \lambda_z^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5-13)$$

温度标尺取为

$$\theta_0 = T_0 - T_f \quad (5-14)$$

式中 θ_0 为过余温度标尺。

时间标尺取为

$$\tau = \rho C_p \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5-15)$$

得到无量纲下的导热微分方程

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 Z} + Q \quad (5-16)$$

第三类边界条件

$$\begin{cases} X=0, \frac{\partial \Theta}{\partial X}=0; X=A, \frac{\partial \Theta}{\partial X}=B_{ix} \Theta \\ Y=0, \frac{\partial \Theta}{\partial Y}=0; Y=B, \frac{\partial \Theta}{\partial Y}=B_{iy} \Theta \\ Z=0, \frac{\partial \Theta}{\partial Z}=0; Z=C, \frac{\partial \Theta}{\partial Z}=B_{iz} \Theta \end{cases} \quad (5-17)$$

初始条件

$$F_o = 0, \Theta = 1 \quad (5-18)$$

其中式(5.16)-式(5.18)中， $\Theta = \theta/\theta_0$ 为无量纲温度， θ 为过余温度；

$F_o = \frac{t}{\tau} = t(\rho C_p)^{-1} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{3}}$ 为傅里叶数，表示无量纲时间；

$Q = \frac{q}{\theta_0 \tau} = \frac{q}{\theta_0} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{3}}$ 为无量纲生热速率； $X = \frac{x}{\delta_x} = x \lambda_x^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 、

$Y = \frac{y}{\delta_y} = y \lambda_y^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 和 $Z = \frac{z}{\delta_z} = z \lambda_z^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 分别为 x 、 y 、 z 三个方向上的

无量纲位置坐标； $A = \frac{a}{\delta_x} = a \lambda_x^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 、 $B = \frac{b}{\delta_y} = b \lambda_y^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 和

$C = \frac{c}{\delta_z} = c \lambda_z^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{a^2 b^2 c^2}{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \right)^{-\frac{1}{6}}$ 分别为 x 、 y 、 z 三个方向上的无量纲对流边界位置；

$B_{ix} = \frac{h_x \delta_x}{\lambda_x}$ 、 $B_{iy} = \frac{h_y \delta_y}{\lambda_y}$ 和 $B_{iz} = \frac{h_z \delta_z}{\lambda_z}$ 为毕渥数。

由式(5-16)-(5-18)可以看出，无量纲过余温度 Θ 的解必为 F_o 、 Q 、 X 、 Y 、 Z 、 A 、 B 、 C 、 B_{ix} 、 B_{iy} 和 B_{iz} 的函数，即

$$\Theta = f(F_o, Q, X, Y, Z, A, B, C, B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}) \quad (5-19)$$

以上即为无量纲数，也称为相似准则数。

5.1.2 温度场原型与相似模型的参数设置

基于相似理论提出将电池 x 、 y 、 z 三个方向上的尺寸缩小 M 倍，需要满足下表所示的比例关系，如表 5-1 所示。其中 M 是缩放比例因子，这一比例关系

的确立，为模型验证提供了理论依据。

表 5-1 参数的比例关系

热传导系数			对流换热系数			生热速率
λ_x	λ_y	λ_z	h_x	h_y	h_z	q
M^{-1}	M^{-1}	M^{-1}	M	M	M	M^{-2}

5.2 电芯的相似准则验证

5.2.1 模型建立及边界条件的设置

由于电芯内部涉及的材料多，并且结构复杂，所以直接创建三维模型很困难，因此需要对模型进行简化。即忽略电芯正负极柱的影响，并将电芯内部的材料均匀化^[72]。根据文献^[39]中的实验数据得到电芯的热物性参数，原型与模型的参数如表 5-2 所示。

在 CATIA 建模软件中建立几何模型，模型尺寸为 148×78×103mm，使用 STAR-CCM+ 软件进行网格划分。采用四面体网格，原型的网格数为 74207 个，内部面数为 152884 个，节点数为 20295 个。相似缩小 2 倍后的模型尺寸为 74×39×51.5mm，，网格数为 14538 个，内部面数为 30282 个，节点数为 4633 个。划分好的网格如图 5-2 所示。

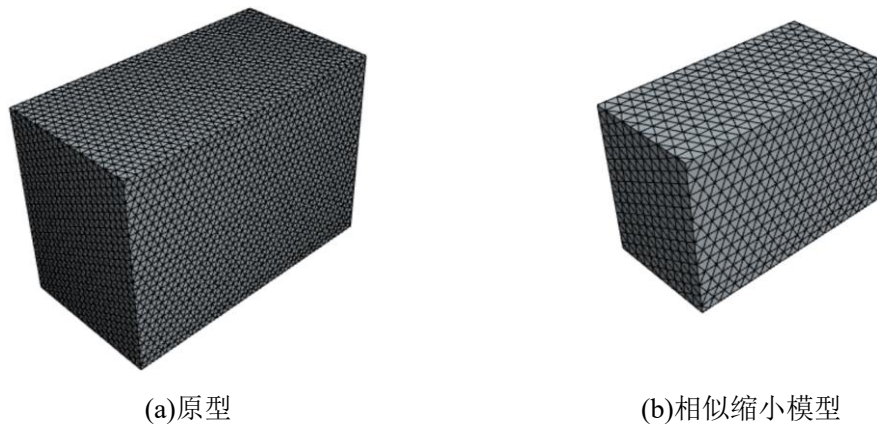


图 5-2 网格划分

根据式(3-8)计算出的电芯生热速率作为电芯热源。设置 25℃为仿真的静态温度和环境温度。仿真总放电时长为 1800s，仿真时间步长设置为 1s，每步迭代 5 次。电池的外表面采用自然对流传热，电芯三个面的热传导系数如表 5-2 所示。

表 5-2 电芯模型参数设置

参数	几何参数 mm			热传导系数 ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)			对流换热系数 ($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$)		
	a	b	c	λ_x	λ_y	λ_z	h_x	h_y	h_z
原型	148	103	78	17.45	17.45	1.21	15	10	20
缩小 2 倍	74	51.5	39	8.725	8.725	0.605	30	20	40

表 5-2 电芯模型参数设置（续表）

参数	密度 ($kg\cdot m^{-3}$)	比热容 ($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	生热速率 ($W\cdot m^{-3}$)	初始温度 °C
原型	2345	979.6	q	25
缩小 2 倍	2345	979.6	M^{-2}	25

5.2.2 仿真分析

(1) 缩小 2 倍

图 5-3(a)、图 5-3(b)分别为原型和模型在放电 1800s 后的温度云图。

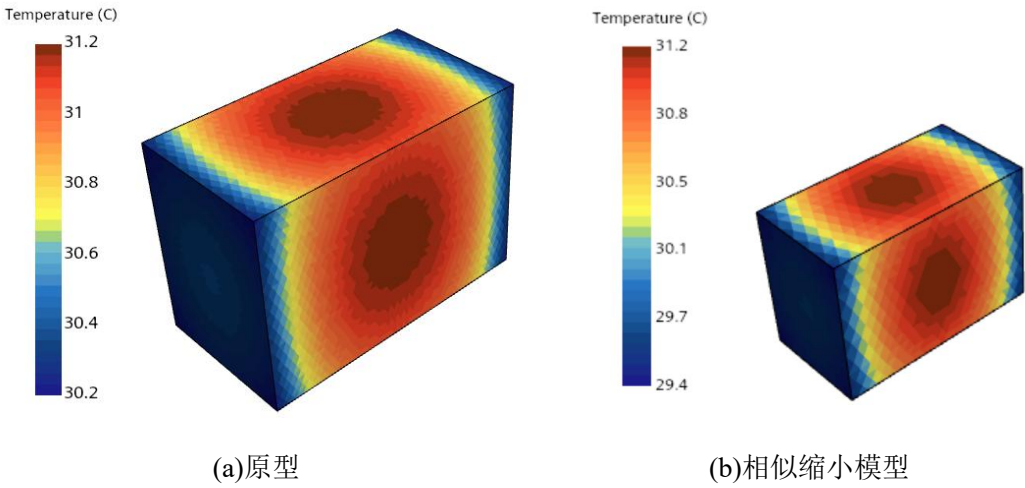


图 5-3 原型与相似缩小模型计算结果比对

图 5-4 为原型和模型中电芯平均温度的时间历程曲线。

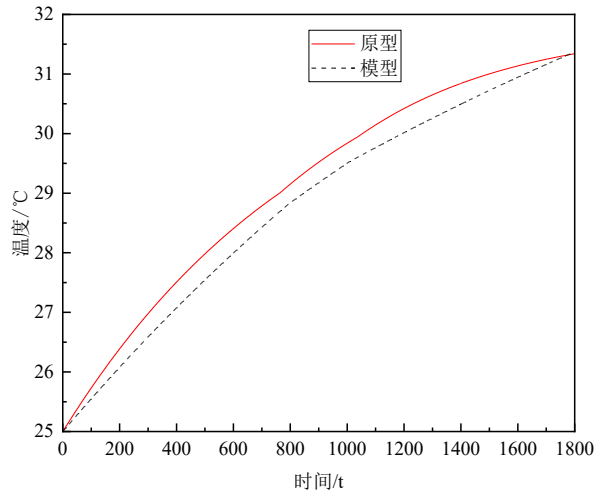


图 5-4 温度-时间历程曲线

由图 5-3 和图 5-4 的计算结果可知，电芯原型与相似缩小模型平均温度的时间历程曲线是相似，但电芯最低温度相差 0.8°C ，还是存在较小的误差。但这也足以说明理论推导确定的相似准则和相似关系对于电芯是可行的。可为后续在无模组电池包相似缩小提供参考和依据。

(2) 不同缩小比例

接下来对不同比例下的电芯进行缩小验证，进一步验证理论推导的相似准则与相似关系的可靠性。不同缩小比例下电芯的密度与比热容是不变的，初始温度也固定。表 5-3 是不同缩小比例下的电芯模型参数设置。

表 5-3 不同缩小比例下电芯的模型参数

参数	几何参数 mm			热传导系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)			对流换热系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)		
	a	b	c	λ_x	λ_y	λ_z	h_x	h_y	h_z
原型	148	103	78	17.45	17.45	1.21	20	10	15
缩小 2 倍	74	51.5	39	8.725	8.725	0.605	40	20	30
缩小 3 倍	49.3	34.3	26	5.817	5.817	0.4033	45	30	60
缩小 4 倍	37	25.75	19.5	4.3625	4.3625	0.3025	60	40	80
缩小 5 倍	29.6	20.6	15.6	3.49	3.49	0.242	75	50	100

图 5-5 为不同缩小比例下电芯的温度云图。通过图 5-5 可知，缩小比例越大，电芯的温度误差越大。虽然缩小比例越大，误差越大，但最大温度都不高于 2°C 。通过仿真分析验证了理论推导的相似准则和关系对电芯的适用性，不仅证明了其科学合理性，还显著提高了计算效率，节省了计算资源。

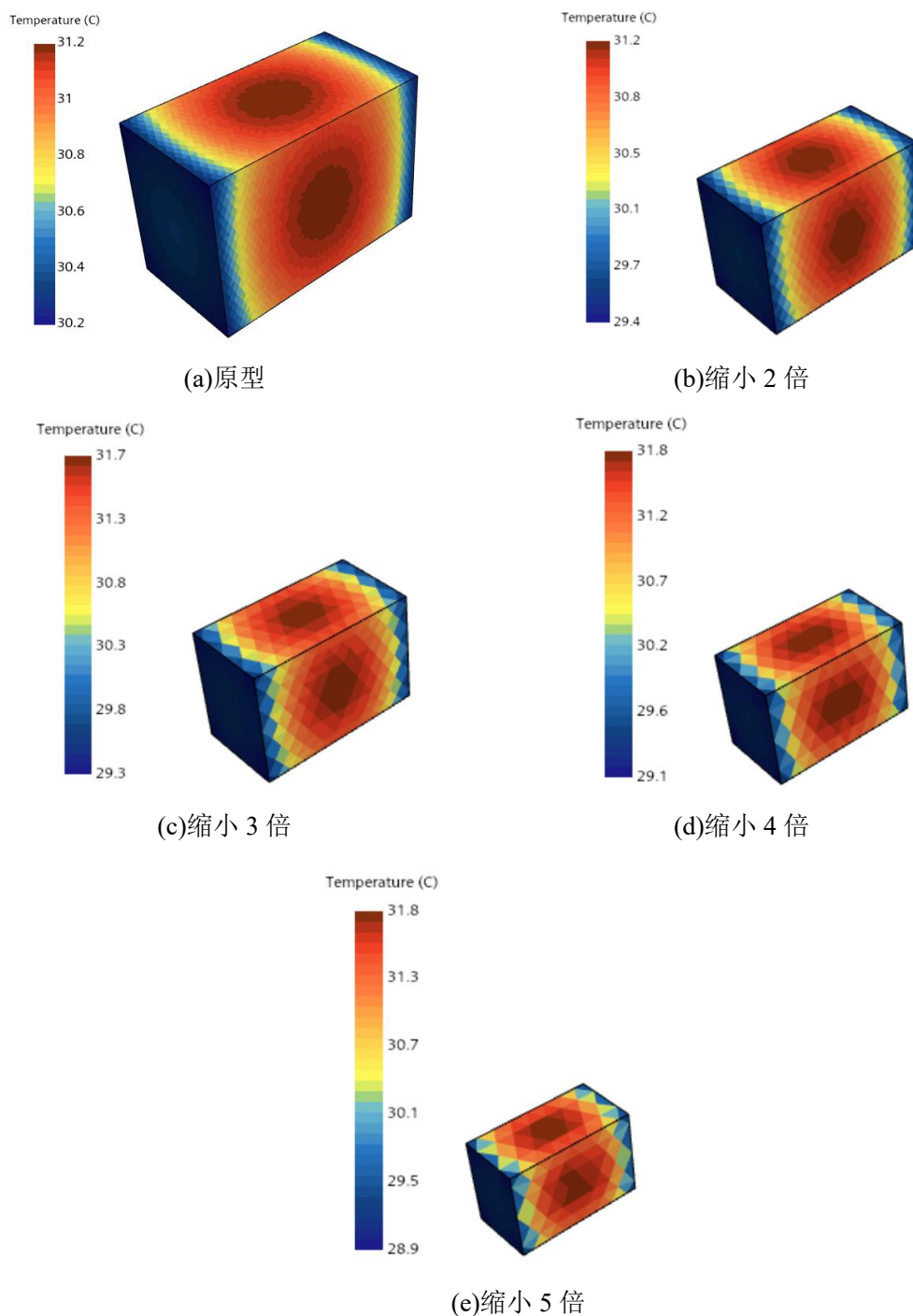


图 5-5 不同缩小比例下电芯的温度云图

通过对不同缩小比例下模型的计算效率对比发现，在缩小 3 倍后，模型的计算效率提升并不明显，且与原型的最髙温度相差 0.5°C ，最低温度相差 0.9°C ，如表 5-4 所示。因此综合考虑对于无模组电池包的相似缩小，选择缩小 2 倍即可，这样既可以提高计算效率，又能减小误差。

表 5-4 不同的缩小比例模型计算效率

模型	网格数量	计算效率
原型	74214	619s
缩小 2 倍	14538	193s
缩小 3 倍	4888	71.5s
缩小 4 倍	2628	58.4s
缩小 5 倍	1575	56.7s

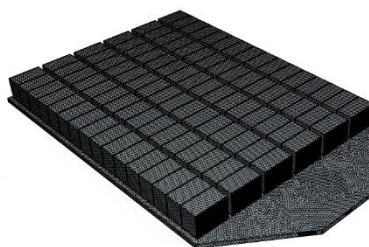
5.3 电池包的相似准则验证

5.3.1 模型建立及边界条件的设置

简化后的电池包仅保留了电芯、导热结构胶、液冷板以及隔热棉。采用 CATIA 三维软件进行三维建模，使用 STAR-CCM+ 软件进行网格划分，网格划分如图 5-6 所示。原型的网格数为 5023801 个，内部面数为 20602546 个，节点数为 20253959 个。相似缩小 2 倍后的模型网格数为 797438 个，内部面数为 4120429 个，节点数为 4219511 个。。



(a)原型



(b)相似缩小 2 倍模型

图 5-6 网格划分

原型的参数如表 4-2 所示，相似缩小 2 倍的模型参数如表 5-5 所示。

表 5-5 相似缩小 2 倍模型的材料物性参数

名称	密度 kg/m^3	比热容 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	热导率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
电芯	2345	979.6	$\lambda_x = 0.605$ $\lambda_y = \lambda_z = 8.725$
液冷板	2702	903	118.5
冷却液	1071	3300	0.192
导热结构胶	1200	1240	0.45
隔热棉	1230	1457	0.115

根据 4.2.1 节计算出的电池包生热速率作为电池包热源，相似缩小 2 倍模型的电池包生热速率缩小为原来的 4 倍。仿真总时长为，仿真时间步长设置为 1s，每步迭代 5 次。

5.3.2 仿真分析

设置 25°C 为仿真的静态温度和环境温度。图 5-7(a)、图 5-7(b) 为电池包原型和相似缩小 2 倍模型在放电 1800s 后的温度云图。

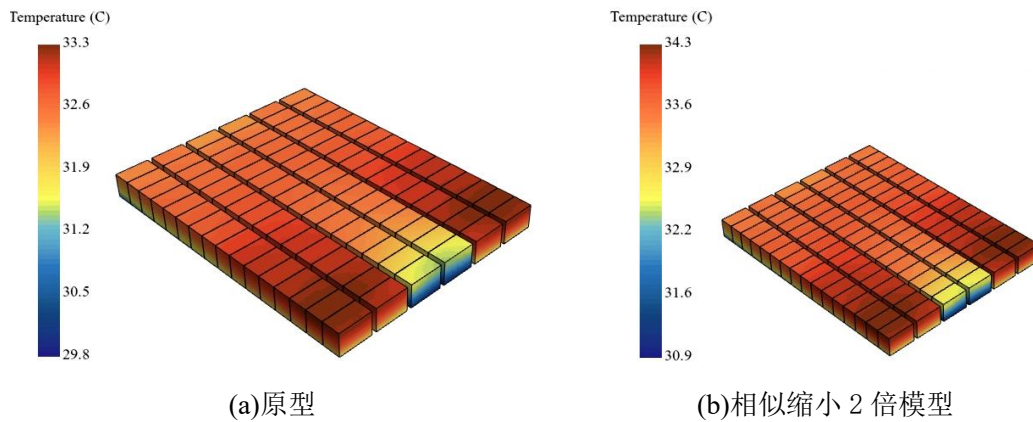


图 5-7 原型与相似缩小模型计算结果比对

通过图 5-7 可以看出，原型电池包与相似缩小 2 倍的模型在最高温度和最低温度上的差异分别为 1°C 和 1.1°C。结果表明，通过理论推导得出的相似准则和相似关系在电池包层面具有良好的适用性，验证了其可靠性和有效性。并且在对电池包和电芯进行相似缩小后，计算效率有了很大的提升。电芯的计算效率提升了 3 倍多，电池包的计算效率提升了 4.5 倍多，如表 5-6 所示。相似缩小后的模型不仅误差很小，并且节省了计算资源，从而减少了对硬件资源的需求。

表 5-6 模型的计算效率对比

模型	网格数量	计算效率
原型	5023801	492min
缩小 2 倍	797438	107min

5.4 本章小结

本章对温度场的相似准则进行了推导,并对电芯和无模组电池包的相似缩小模型进行了仿真计算与分析,得出如下结论:在对电芯和电池包整体几何尺寸进行 M 倍比例缩小后,为了保证温度场的完全相似性,需将相应方向的热传导系数按 M 倍比例缩小,同时生热率则需按 M^2 倍比例缩小,而对流换热系数按 M 倍比例放大。通过仿真的计算与分析发现,理论推导确定的相似准则和相似关系对于电芯和电池包都是可行的,电芯的计算效率提升了 3 倍多,电池包的计算效率提升了 4.5 倍多,不仅证明了其合理性,还显著提高了计算效率。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

无模组电池包具有能量密度高、空间利用率高、整体结构轻量化等诸多优点，是推动电动汽车发展的重要技术之一，也是未来电池包发展的趋势。随着无模组电池包能量密度的增加，在运行过程中会产生大量热量，如果热量不散发，可能会缩短电池寿命，甚至导致发生热失控，因此控制电池包保持在一定的平均温度范围是至关重要的。本文设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板，并对其进行热管理研究。主要工作是搭建测试电池性能的实验平台，测量锂离子电池放电内阻，建立了锂离子电池的仿真模型。其次是分析无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。最后为解决电池包在建模仿真时网格数量较多导致计算效率低下的问题，本文提出了基于相似原理的电池包高效热管理仿真方法。对温度场的相似准则进行了推导，并对电芯和无模组电池包的相似缩小模型进行了仿真计算与分析。

本文的结论如下：

（1）分析总结了国内外关于无模组电池包热管理的研究。现阶段更多是关于电池组或单个电池模块的冷却系统设计与研究，对于无模组电池包设计与研究较少。在其他冷却方法中，液体冷却因其更高的导热性和更好的冷却效果而被广泛使用其中。之后调研了关于相似理论在电芯和电池包仿真中的研究现状。

（2）研究分析了电池的生热机理以及传热特性。明确其主要的热传递方式为热传导与热对流，并确定了相应的热传导系数公式和对流传热方程。为简化计算同时确保结果的准确性，进一步研究了电池模型简化后材料属性参数的近似计算方法。

（3）完成了方形锂离子电池的性能测试并建立单体电池的仿真模型。首先搭建实验平台，通过 HPPC 内阻测试法获得不同温度不同 SOC 下的锂离子电池放电内阻，采用直接测量法测定了熵热系数与 SOC 的实验曲线。将电池内阻的变化拟合到 SOC 和温度的多项式函数关系中，根据 Bernardi 理论利用所测得的电池内阻，获得了单体电池在放电过程中的生热速率随时间和温度变化的特性曲

线。然后建立了锂离子电池的仿真模型，并通过实验数据的比对验证仿真结果的可靠性。分析表明，最大温度偏差控制在 3% 以内，能够较真实地反映锂离子电池的产热过程。

(4) 设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板，并完成了对电池包热管理的性能分析。首先对液冷板进行了压降分析与对比，在根据第三章搭建的单体电池热模型的基础上，分析了无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。研究结果表明，该无模组电池包具有很好的冷却性能，能够满足 2.0C 放电工况的冷却需求，并且在低温环境下电池包也能正常的工作。此外，在 CLTC 工况下小流量运行电池包温差仅为 0.25℃ 左右，小流量冷却液在电池回路内循环流动有利于电池包均温性，与无冷却液流动相比，冷却液流量为 2L/min 时电池包的最大温差下降了 1.31℃。

(5) 提出了基于相似原理的高效热管理仿真方法。在对电芯和电池包整体几何尺寸进行 M 倍比例缩小后，为了保证温度场的完全相似性，需将相应方向的热传导系数按 M 倍比例缩小，同时生热率则需按 M^2 倍比例缩小，而对流换热系数按 M 倍比例放大。通过仿真进行验证，确认了所建立的相似准则和关系的合理性与准确性。研究表明，电芯的计算效率提升了 3 倍多，电池包的计算效率提升了 4.5 倍多，很大程度上提高了计算效率。

本文创新点如下：

(1) 为了提升电池包的能量密度，本文设计了一种无模组电池包和对称蛇形流道液冷板，并分析了无模组电池包在不同放电倍率下的冷却性能、低温加热性能以及在 CLTC 工况下电池包的均温性。

(2) 为了提升电池包仿真分析的计算效率，提出了基于相似原理的高效热管理仿真方法。首先对温度场的相似准则进行了推导，其次将电芯和电池包按比例缩小建立缩小模型，并通过仿真进行验证。确认了所建立的相似准则和关系的合理性与准确性。为电芯与电池包的热动力学建模与分析提供了可靠的理论依据和方法参考。

6.2 研究展望

通过本文的研究工作，对无模组电池包的热管理进行了系统性探讨，但在研究过程中仍存在一些局限性，未来有待进一步深入研究。具体如下：

（1）本文设计了一种无模组电池包，并进行了热管理分析，但未涉及电池包的结构分析。因此未来可以进一步进行结构优化设计，考虑强度、振动及热膨胀等多因素的影响。

（2）现如今对电池包的研究重点在无模组方向，未来电池包可能的发展方向之一是 CTC（Cell to Chassis）技术。CTC 是指将电芯直接集成到车身结构中，省去了传统的模组和电池包结构。这种设计不仅可以使电池包更轻量化，还能提高车辆的续航能力。

（3）在电芯与电池包的相似缩小仿真研究中，未来可以在减少仿真计算时间、提高仿真效率的基础上，进一步扩展研究内容，结合实验设计与分析。通过对电芯与电池包的几何特征进行缩小，建立实验模型。深入研究缩小后材料性能的影响，如热导率、密度和比热容等等，确保实验与仿真结果的匹配性。此外，还需要优化实验设计方法，考虑实验周期、材料成本以及实验数据处理的复杂性。通过实验与仿真的结合，可以更全面地评估相似缩小方法的有效性，进一步提升仿真结果的可信度。

参考文献

- [1] 国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021,(7):39-43.
- [2] Cochrane L, Bobarykina D. Strategic analysis of metal dependency in the transition to low-carbon energy: A critical examination of nickel, cobalt, lithium, graphite, and copper scarcity using IEA future scenarios[J]. Energy Research & Social Science, 2024, 118: 103773.
- [3] Biancardi A, Mendes C, Staffell I. Battery electricity storage as both a complement and substitute for cross-border interconnection[J]. Energy Policy, 2024, 189: 114134.
- [4] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[N]. 人民日报, 2021-03-13:001.
- [5] Oxford A. Battery production can sustain long-run overcapacity[J]. Emerald Expert Briefings, 2024 (oxan-db).
- [6] Chen Q, Li C. The green paradox in NEV manufacturing: regulatory impacts on innovation from a stakeholder perspective[J]. Energies, 2024, 17(14): 3508.
- [7] Pietroń M, Żurek D, Faber K, et al. AD-NEv: A Scalable Multilevel Neuroevolution Framework for Multivariate Anomaly Detection[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2024.
- [8] 张爽. 锂离子电池储能集装箱风冷式热管理系统仿真分析及优化设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [9] 许守平, 李相俊, 惠东. 大规模储能系统发展现状及示范应用[J]. 电源技术, 2015, 39(01):217-220.
- [10] 林海雪. 现代储能技术应用概括及展望[J]. 电源学报, 2015, 13(05):34-40+47.
- [11] Andreas P. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27:778-788.
- [12] Wang H, Xu H, Zhao Z, et al. An experimental analysis on thermal runaway and its propagation in Cell-to-Pack lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal

- Engineering, 2022, 211: 118418.
- [13] Wang H, Wang Q, Zhao Z, et al. Thermal runaway propagation behavior of the Cell-to-Pack battery system[J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 84: 162-172.
- [14] 王毅洁. 电动汽车锂离子电池模组环绕式液冷散热结构设计及优化研究[D]. 江苏大学, 2022.
- [15] 贺春敏. 基于 MXene/石蜡复合相变材料的锂离子电池热管理系统研究[D]. 南京邮电大学, 2023.
- [16] Gerlitz E, Botzem D, Weinmann H, et al. Cell-to-Pack-Technologie für Li-Ionen-Batterien: Aktueller Entwicklungsstand, Marktakteure in der Automobilindustrie und Auswirkungen auf eine nachhaltige Produktionstechnik unter dem Aspekt der Kreislaufwirtschaft[J]. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2021, 116(10): 689-694.
- [17] Fichtner M. Recent Research and Progress in Batteries for Electric Vehicles. Batter Supercaps. 2022; 5 (2): e202100224[J].
- [18] Jin C, Sun Y, Yao J, et al. No thermal runaway propagation optimization design of battery arrangement for cell-to-chassis technology[J]. ETransportation, 2022, 14: 100199.
- [19] Mallick S, Gayen D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems – A critical review[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106894.
- [20] Liu J, Yadav S, Salman M, et al. Review of thermal coupled battery models and parameter identification for lithium-ion battery heat generation in EV battery thermal management system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 218: 124748.
- [21] He L, Jing H, Zhang Y, et al. Review of thermal management system for battery electric vehicle[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59: 106443.
- [22] 王元哲, 唐志国, 周嘉等. 锂离子动力电池成组设计及其优化分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(12): 1590-1594.
- [23] Hwang F S, Confrey T, Reidy C, et al. Review of battery thermal management

- p>systems in electric vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 192: 114171.
- [24] 李致远, 鲁锐华, 余庆华等. 动力电池热失控特征及防控技术研究分析[J]. 汽车工程, 2024, 46(01): 139-150.
- [25] Zhang H, Wang S, Deng H, et al. Design of CTP liquid cooling battery pack and thermal Characterization experiments[J]. Applied Thermal Engineering, 2024: 124196.
- [26] 江毅, 李超恩, 温小栋, 等. 基于浸没式液冷的锂电池热管理研究进展[J]. 暖通空调, 2024, 54(02):1-10.
- [27] 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(03): 337-341.
- [28] 阙雨晨. 锂离子动力电池液冷散热系统优化设计研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [29] Liu J, Chen H, Huang S, et al. Recent progress and prospects in liquid cooling thermal management system for lithium-ion batteries[J]. Batteries, 2023, 9(8): 400.
- [30] He P, Lu H, Fan Y, et al. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management system utilizing a double-layered I-shaped channel liquid cooling plate exchanger[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2023, 187: 108200.
- [31] Telli G D, Gungor S, Lorente S. Counterflow canopy-to-canopy and U-turn liquid cooling solutions for battery modules in stationary Battery Energy Storage Systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 238: 121997.
- [32] 杨鹏. 新能源汽车动力电池冷媒直冷热管理系统的设计与优化控制[D]. 江苏大学, 2022.
- [33] Gungor S, Cetkin E, Lorente S. Canopy-to-canopy liquid cooling for the thermal management of lithium-ion batteries, a constructal approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 182: 121918.
- [34] Mubashir M, Xu J, Guo Z, et al. Experimental and numerical investigation of single and double serpentine channel cold plates on the thermal performance of lithium-ion pouch battery[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 92: 112200.

- [35] Jarrett A, KIM I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(23): 10359-10368.
- [36] 陈宇. 动力电池直液双冷热管理研究[D]. 吉林大学, 2022.
- [37] Deng T, Zhang G, Ran Y. Study on thermal management of rectangular Li-ion battery with serpentine-channel cold plate[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 143-152.
- [38] Sheng L, Su L, Zhang H, et al. Numerical investigation on a lithium-ion battery thermal management utilizing a serpentine-channel liquid cooling plate exchanger[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 658-668.
- [39] Deng T, Ran Y, Zhang G, et al. Design optimization of bifurcating mini-channels cooling plate for rectangular Li-ion battery[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 963-973.
- [40] Shen K, Sun J, Zheng Y, et al. A comprehensive analysis and experimental investigation for the thermal management of cell-to-pack battery system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118422.
- [41] Wang H, Wang S, Feng X, et al. An experimental study on the thermal characteristics of the Cell-To-Pack system[J]. *Energy*, 2021, 227: 120338.
- [42] Sun J, Chen S, Shen K, et al. Liquid cooling system optimization for a cell - to - pack battery module under fast charging[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(9): 12241-12253.
- [43] Zhang L, Liu Y, Huang X. Dynamic thermal runaway evolution of Li-ion battery during nail penetration[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 233: 126020.
- [44] 张立军, 李文博 程洪正. 计及不均匀发热与温度分布的锂离子单电池电化学-热力学耦合三维有限元模型[J]. *汽车工程*, 2015,37(12):1382-1389.
- [45] Durst F. Similarity theory[M]//*Fluid Mechanics: An Introduction to the Theory of Fluid Flows*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022: 239-266.
- [46] 肖咏坤. 基于液冷的 21700 锂离子电池散热结构与冷却性能分析[D].

湖南大学, 2023.

- [47] Kim U S, Yi J, Shin C B, et al. Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(11): 5115-5121.
- [48] Sheng L, Zhang C, Xu J, et al. Quantitative measurement of thermal performance of a cylindrical lithium-ion battery[J]. Measurement, 2025, 239: 115458.
- [49] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the electrochemical society, 1985, 132(1): 5.
- [50] Chen Y, Evans J W. Thermal analysis of lithium - ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996, 143(9): 2708.
- [51] Rao L, Newman J. Heat - generation rate and general energy balance for insertion battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(8): 2697.
- [52] Chen M, Bai F, Song W, et al. A multilayer electro-thermal model of pouch battery during normal discharge and internal short circuit process[J]. Applied thermal engineering, 2017, 120: 506-516.
- [53] Xie J, Li Z, Jiao J, et al. Lumped-parameter temperature evolution model for cylindrical Li-ion batteries considering reversible heat and propagation delay[J]. Measurement, 2021, 173: 108567.
- [54] Chauhan V K, Bhattacharya J. Error estimation of Bernardi heat evaluation of Li-ion cells under drive cycle operation[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 254: 123870.
- [55] 程洪正, 张立军, 阮丞, 刁坤. 锂离子电池温度场相似准则推导与有限元验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013,41(08):1249-1254.
- [56] 俞钊. 基于相变储热的动力电池复合热管理系统研究[D]. 河南科技大学, 2023.
- [57] 赵轩, 李美莹, 余强, 马建, 王姝. 电动汽车动力锂电池状态估计综述[J]. 中国公路学报, 2023,36(06):254-283.
- [58] Xie Y, Shi S, Tang J, et al. Experimental and analytical study on heat generation characteristics of a lithium-ion power battery[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 122: 884-894.

- [59] LIU Z, LI HX. Thermal modeling for vehicle battery system: a brief review[C]. IEEE, 2012.
- [60] 李敬会. 电池热管理系统分析与应用研究[D]. 南昌大学, 2018.
- [61] 梁高宁. 基于相变材料结合三维肋管换热器的锂离子电池热管理技术研究[D]. 重庆大学, 2022.
- [62] Manikandan B, Yap C, Balaya P. Towards understanding heat generation characteristics of Li-ion batteries by calorimetry, impedance, and potentiometry studies[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(12): A2794.
- [63] 郑海. 锂离子动力电池组液体介质热管理系统散热结构分析[D]. 中北大学, 2020.
- [64] 姚薇. 基于直冷及相变材料散热的电池组热管理系统研究[D]. 浙江大学, 2022.
- [65] Abdul - Quadir Y, Laurila T, Karppinen J, et al. Heat generation in high power prismatic Li - ion battery cell with LiMnNiCoO₂ cathode material[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(11): 1424-1437.
- [66] 何晓帆. 基于相变材料与液冷结合的锂离子电池热管理技术研究[D]. 浙江大学, 2020.
- [67] 陈树成. 基于多物理场的锂离子电池组热仿真方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [68] Doh C H, Ha Y C, Eom S. Entropy measurement of a large format lithium ion battery and its application to calculate heat generation[J]. Electrochimica Acta, 2019, 309: 382-391.
- [69] Lou T T, Zhang W G, Guo H Y, et al. The internal resistance characteristics of lithium-ion battery based on HPPC method[J]. Advanced materials research, 2012, 455: 246-251.
- [70] Geifes F, Bolsinger C, Mielcarek P, et al. Determination of the entropic heat coefficient in a simple electro-thermal lithium-ion cell model with pulse relaxation measurements and least squares algorithm[J]. Journal of Power Sources, 2019, 419: 148-154.

- [71] Cheng K W E, Divakar B P, Wu H, et al. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2010, 60(1): 76-88.
- [72] An Z, Jia L, Wei L, et al. Investigation on lithium-ion battery electrochemical and thermal characteristic based on electrochemical-thermal coupled model[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 792-807.
- [73] 周昊, 李逸飞, 范亮亮, 赵亮. 基于耗散粒子动力学的微通道内高分子运动规律研究[J]. 工程热物理学报, 2025,46(03):872-878.
- [74] Kalkan O, Celen A, Bakirci K. Multi-objective optimization of a mini channeled cold plate for using thermal management of a Li-Ion battery[J]. Energy, 2022, 251: 123949.
- [75] 薛撬, 李军求, 肖焱升, 赵宇, 刘宇, 韩冬雪. 低温环境下车用锂电池预加热策略研究[J]. 汽车工程, 2023,45(11):2014-2022.
- [76] 郭东旭, 杨耕, 冯旭宁, 卢兰光, 欧阳明高. 计及老化路径的锂离子电池加速寿命工况自动生成方法[J]. 电工技术学报, 2022,37(18):4788-4797+4806.
- [77] Zhao G, Wang X, Negnevitsky M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119626.
- [78] Weragoda D M, Tian G, Burkitbayev A, et al. A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems[J]. Applied thermal engineering, 2023, 224: 120070.

攻读硕士学位期间取得的成果

一、发表学术论文

- [1] **Zhang H**, Wang S, Deng H, et al. Design of CTP liquid cooling battery pack and thermal Characterization experiments[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124196.
- [2] 张红松,邓辉龙,王淮阳,等.无模组动力电池包设计及其冷却性能分析[J].安徽工程大学学报,2024,39(05):17-25.

二、专利

- [1] 张红松,汪爽,等.一种无模组汽车底盘电池装置[P]. 中国: CN220474810U, 2024.02.09.

三、获奖情况

- [1] 2022 级研究生新生奖学金一等奖。
- [2] 2022-2023 学年研究生学业奖学金二等奖。
- [3] 2023-2024 学年研究生学业奖学金一等奖。
- [4] 2025 届安徽工程大学优秀毕业生。

致谢

时光荏苒，三年的研究生生涯转瞬即逝，回首过往的每一步，我深感幸运与感激。在这段充满挑战、收获与思考的旅程中，我遇到了许多优秀的导师、同学与朋友，他们的支持与鼓励让我在追求学术理想的道路上不断前行。此刻，站在学术旅程的终点，回望每一个过往的瞬间，我的内心充满感恩之情。

首先，我要感谢我的导师王建彬教授，感谢您在我研究生期间给予的悉心指导和无私帮助。在您的悉心教诲下，我不仅在学术上有了更深的理解，也在为人处事上学到了很多宝贵的经验。您的严谨治学态度、创新思维以及对科研的无限热情深深感染了我，也让我对自己的学术道路充满了信心与动力。

同时还要特别感谢我的指导老师汪爽老师和周超群老师，您不仅是我学术上的引路人，更是我人生道路上的良师益友。您严谨的学术态度、创新的研究视角以及对科学的执着追求深深感染了我。在您的指导下，我不仅学到了如何进行深入的学术研究，更学会了如何从更高的视角审视问题、拓宽思维。每一次与您讨论问题，您都耐心地倾听并引导我走向正确的方向。您的智慧与远见让我受益匪浅，您的教诲与鼓励让我在面对挑战时充满信心，勇于突破。

此外，我还要感谢我的同学与朋友们。你们是我精神上的朋友，是我学术道路上的同伴。在一起度过的日子里，我们分享知识，碰撞思想，探讨问题，互相激励。在面对困难时，我们相互鼓励，携手并肩前行。你们的存在，让这段旅程更加充实与美好。每一次在实验室里共同奋战的时光，每一次在课题讨论中激烈碰撞的思维，都是我人生中最宝贵的记忆。你们的陪伴不仅让我学到了更多的知识，也让我懂得了友情与团队合作的真正意义。

最后，我要感谢我的父母。是您们无私的支持与鼓励让我从专科到本科，再到研究生，克服了一个又一个的困难。无论在我学习还是生活中，您们始终是我最强有力的后盾，是您们的理解和关怀，让我能够全身心地投入到学业中。我永远不会忘记您们为我所付出的辛劳与牺牲。

在未来的日子里，我将继续怀揣感恩之心，勇敢前行，不辜负所有人的期望。

尚禮敏學 唯實惟新

