



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

学校代号 10532

子 号 S150200354

分 类 号 U469.72

密 级 公开



湖南大学

HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

液冷式动力锂离子电池组热特性与散热特性研究

学位申请人姓名 杨鹏飞

培 养 单 位 机械与运载工程学院

导师姓名及职称 杨小龙 副教授

学 科 专 业 动力工程及工程热物理

研 究 方 向 电动汽车电池热管理技术

论文提交日期 2018年04月20日

学校代号：10532

学 号：S150200354

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

液冷式动力锂离子电池组热特性与散热特性研究

学位申请人姓名：杨鹏飞

导师姓名及职称：杨小龙 副教授

培 养 单 位：机械与运载工程学院

专 业 名 称：动力工程及工程热物理

论文提交日期：2018年4月20日

论文答辩日期：2018年5月17日

答辩委员会主席：刘敬平 教授

Study on thermal characteristics and heat dissipation characteristics
of liquid-cooling Lithium-ion Battery Pack

by

YANG Pengfei

B.E. (Hunan university) 2015

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Science

in

Power Engineering and Engineering Thermodynamics

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor YANG Xiaolong

May, 2018

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：杨鹏飞

日期：2018年5月28日

学位论文授权使用授权书

本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，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分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。

本学位论文属于

- 1、保密 ，在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：杨鹏飞

日期：2018年5月28日

导师签名：杨小东

日期：2018年5月28日

摘 要

锂离子电池因其能量密度高、循环寿命长、自放电率低等方面的优点成为电动汽车能源系统的首选。但电池的性能和寿命受到温度的严重影响,极端情况下还会发生热失控。锂离子电池的热问题关系到电池的性能、寿命和安全,是设计电池热管理系统的关键因素之一,因而受到了广泛关注。因此,有必要了解电池使用过程中的热行为和设计有效的热管理系统。

本文围绕锂离子电池的热问题及散热结构设计展开了研究。首先,对锂离子电池进行了充放电试验研究;然后,建立了电池单体的三维多部件热模型,并进行实验验证;之后,通过实验研究了不同充放电倍率下电池组的温度分布;最后,根据电池组的热特性,设计了液冷式电池热管理系统,并对该系统进行了仿真分析及优化。

(1)对锂离子电池单体进行了充放电试验测试,分析了其温升特性、电压特性和容量特性。基于充电试验结果,提出了锂离子电池充电过程温升特点的阶段划分方法,并总结了各阶段的特点。此外,使用热成像仪分析了不同放电倍率和放电深度时,电池单体的温度分布规律。在试验的基础上基于18650电池的结构特点建立了多部件电池单体热模型,并模拟了1C、2C和3C恒倍率放电工况。仿真与实验的温升和表面温度分布结果吻合较好,说明所建立的热模型可用于分析电池的热特性。

(2)进行了电池组充放电试验测试,分析了电池组在不同充放电倍率下的热特性。分析了1C充电和1C放电工况下电池组和电池单体的温度特性。1C充电恒流工况下,电池单体最高温度为35℃,电池组最高温度为45℃。1C放电恒流工况下,电池单体最高温度为36.6℃,电池组的最高温度为45.7℃。充电和放电工况,电池组的最大温度比单体分别高10℃和9.1℃。电池组的最大温度比电池单体高很多,表明电池组的散热性能远劣于电池单体。针对电池组散热性能差的问题,设计了一种液冷式电池散热系统。

(3)对初始液冷模型进行了仿真分析和优化。分析了不同导热板材料、冷却液类型、冷却液流速等因素对电池组温度场的影响。针对电池组温度分布不均匀的问题,提出了导热板局部加厚的优化方法,有效提高了电池组的温度均匀性。

关键词: 锂离子电池; 液体冷却; 数值仿真; 实验验证

Abstract

Lithium-ion battery has been extensively used as power source for electric vehicles due to its high energy density, long cycle life and low self-discharge rate. However, temperature has a great influence on the performance and life of batteries or even leads to batteries thermal runaway in extreme situations. Much attention has been paid to Lithium-ion battery thermal issues, which are highly related to the performance, lifetime and safety, and important factors in battery thermal management design. Therefore, it is necessary to understand the thermal behaviors of the cell during operating and design an efficient battery thermal management.

In this work, lithium-ion battery thermal behaviors and thermal management system design are mainly concerned. Firstly, the Lithium-ion battery was investigated by the charge/discharge tests. Secondly, a multi-component thermal model was built and validated by experiments. Thirdly, the temperatures distributions of the battery pack at different charge/discharge rates were experimentally studied. Finally, a battery thermal management system with liquid cooling was proposed and analyzed by numerical simulations.

(1)Temperature rise characteristics, voltage characteristics and capacity characteristics of the battery were analyzed by charging/discharging tests. Based on the charge test results, a stage division method of the temperature rise characteristics of the lithium ion battery during charging process is proposed, and the characteristics of each stage are summarized. In addition, a thermal imager was used to analyze the temperature distribution of the battery cell at different discharge rates and depth of discharge. On the basis of the experiment, a multi-component battery thermal model was established based on the structural features of the 18650 battery and the 1C, 2C, and 3C rates discharge conditions were simulation analysis using the model. The simulation results of the battery temperature data and surface temperature distributions are in good agreement with the experimental data, indicating that the modeling can be used to analyze the thermal characteristics of the battery.

(2)Thermal characteristics of the battery pack were analyzed by charging/discharging tests. The temperature characteristics of the battery pack and battery cell under 1C charging and 1C discharging conditions were compared and analyzed. Under the 1C charge condition, the maximum temperature of the battery cell

is 35°C and the maximum temperature of the battery pack is 45°C. In the 1C discharge constant current condition, the maximum temperature of the battery cell is 36.6°C, and the maximum temperature of the battery pack is 45.7°C. For the charging and discharging conditions, the maximum temperatures of the battery pack are 10°C and 9.1°C higher than the battery cell respectively. The maximum temperature of the battery pack is much higher than that of the battery cell, which means that the heat dissipation performance of the battery pack is worse than that of the battery cell. To solve the problem of poor heat dissipation of the battery pack, a liquid-cooling battery thermal management system is designed.

(3)The initial liquid cooling model was analyzed and optimized by numerical methods. The influences of different heat-conducting plate materials, coolant type, and coolant flow rate on the temperature field of the battery pack were analyzed. Aiming at the problem of non-uniform temperature distribution of the battery pack, optimization method for locally thickening the heat conducting plates was proposed, which effectively improves the temperature uniformity of the battery pack.

Keywords: Lithium-ion battery; liquid cooling; numerical simulation; experimental verification

目 录

学位论文原创性声明	I
学位论文版权使用授权书	I
摘 要	II
Abstract	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 电动汽车电池热管理研究现状	3
1.2.1 动力电池热模型研究现状	3
1.2.2 动力电池散热方式研究现状	6
1.3 本文的研究内容与全文框架	10
第 2 章 锂离子电池充放电试验研究	12
2.1 锂离子电池的介绍	12
2.1.1 锂离子电池基本结构	13
2.1.2 锂离子电池工作原理	14
2.2 锂离子电池试验研究	15
2.2.1 电池的基本参数与实验设备	15
2.2.2 充放电特性试验	17
2.2.3 内阻特性	22
2.3 锂离子电池表面热成像实验	24
2.4 本章小结	29
第 3 章 锂离子电池单体生热传热建模与仿真分析	30
3.1 锂离子电池生热机理与传热理论	30
3.1.1 锂离子电池生热机理	30
3.1.2 锂离子电池传热理论	31
3.1.3 建立单体热模型的基本假设	32
3.2 电池单体热模型的建立	32
3.2.1 电池单体热平衡方程	32
3.2.2 电池单体几何模型	33
3.2.3 电池单体生热率计算	34
3.2.4 电池单体仿真模型相关参数	35
3.3 仿真结果与分析	37
3.3.1 模型验证	37

3.3.2 各部件温升特性分析	39
3.3.3 不同对流工况下电池单体温度场瞬态分析	39
3.4 本章小结	41
第 4 章 电池组温度场试验研究	42
4.1 试验平台的搭建	42
4.1.1 试验对象	42
4.1.2 试验设备	43
4.1.3 测温点布置	45
4.2 试验步骤	46
4.3 试验结果与分析	47
4.3.1 温升特性分析	47
4.3.2 电池组与单体充放电温升对比分析	49
4.3.3 电池组表面温度分析	51
4.4 本章小结	52
第 5 章 液冷电池组仿真分析及优化	54
5.1 电池组初始液冷方案	54
5.2 计算流体力学基本理论	55
5.2.1 CFD 简介	55
5.2.2 CFD 基本控制方程	55
5.3 液冷电池组数值模型	56
5.3.1 几何模型	56
5.3.2 网格模型	57
5.3.3 边界条件设置	57
5.4 初始液冷模型的数值分析	58
5.4.1 导热板材料对电池组温度场的影响	58
5.4.2 冷却液入口流速对电池组温度场的影响	59
5.4.3 冷却液种类对电池组温度场的影响	62
5.5 液冷模型的改进分析	64
5.6 改进模型多工况仿真分析	66
5.7 本章小结	67
总结与展望	68
参考文献	70
附录 A 攻读学位期间发表的论文和获得成果	76
致 谢	77

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

进入 21 世纪以来,能源危机、环境污染等问题十分突出,燃油汽车的排放污染极为严重。据公安部交管局统计,截至 2016 年底,全国机动车保有量已达 2.9 亿辆,其中汽车 1.94 亿辆,预计这一数字到 2020 年将超过 2.5 亿辆。如图 1.1 所示,近几年来其数量增长快速,至 2016 年仅私家车总量就达 1.46 亿辆。全国有 49 个城市的汽车保有量超过百万辆,18 个城市超 200 万辆,6 个城市超 300 万辆,如图 1.2 所示为超过 200 万辆的城市。传统燃油汽车在给人们生活带来方便快捷的同时,也给环境造成了严重的污染。

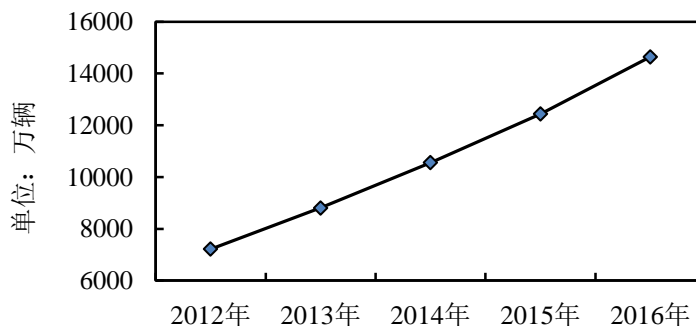


图 1.1 近五年私家车保有量

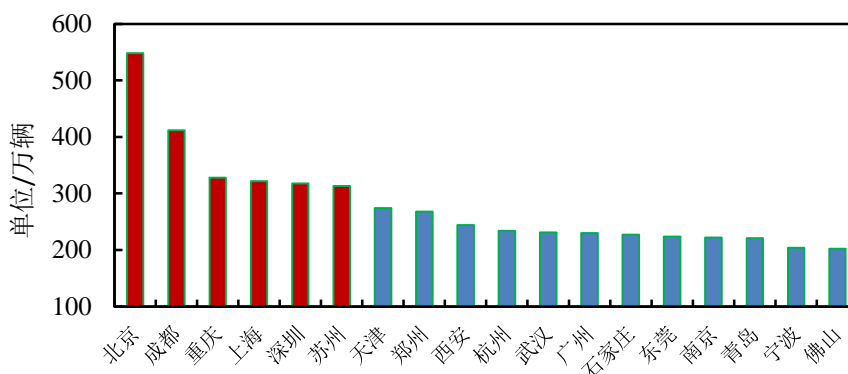


图 1.2 截至 2016 年底汽车保有量超过 200 万的城市

交通运输已成为世界燃料消耗最多的部分,占据了 49%的石油资源^[1]。车辆的石油利用的效率相当低,因此交通运输中的节能策略将有助于减少不必要的能源消耗^[2]。目前,最流行的节能理论之一是推广新能源汽车。例如,混合动力汽车(HEV)、插电式混合动力汽车(PHEV)和纯电动汽车(EV)作为降低交通碳排放量的潜在替代方案。并且纯电动汽车可实现零排放^[3]。Andersen 等人^[4]指出,电动汽车的使用,温室气体排放将减少 20%,如果电力是由可再生能源产生的,这一

数值将达 40%。Endo^[5]预测,到 2050 年,高效率车辆开发可以将二氧化碳排放量减少到 1990 年的 2/3。更重要的是,电动车发展迎来了更好的时机,美国政府为电动车发展提供 25 亿资金,中国将重点推广转向发展电动汽车相关的经济和能源政策^[6]。据中国汽车工业协会统计的相关数据,我国 2015 年新能源汽车的产量及销量分别达到 34 万辆和 33 万辆(图 1.3),同比分别增长 3.3 倍和 3.4 倍。2009~2015 年中国累计生产新能源汽车 49.7 万辆,在全球新能源汽车销量中占比超过 30%。

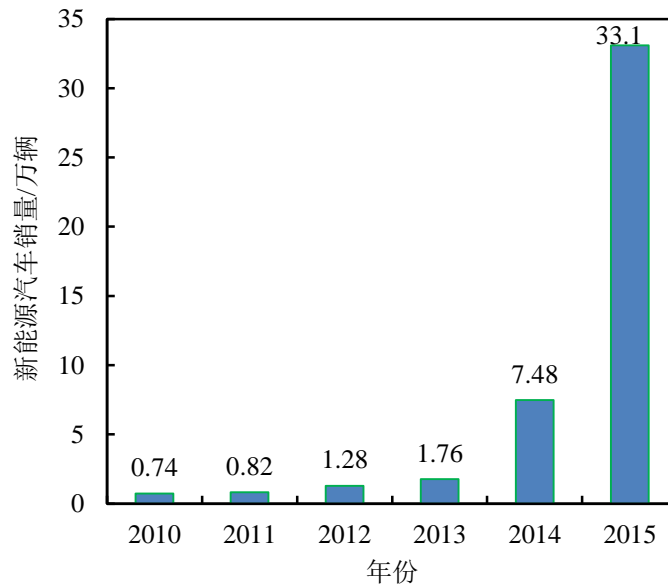


图 1.3 2010~2015 年中国新能源汽车销量

作为电动汽车的动力源,锂离子电池因其能量密度高、循环寿命长、自放电率低等优点而被广泛利用^[7]。

锂电池作为纯电动汽车动力的唯一来源,其性能对电动汽车的运行性能有着直接的影响。动力电池在充电和放电过程均伴随着化学反应过程,因此对温度的变化十分敏感^[8-9]。电池在运行过程中温度过高,将严重影响电池的性能;温度越高电池的老化速度越快,甚至有可能发生热失控的状况^[10-11]。电池温度过低,电池内部材料物理性质较为稳定、电化学反应速率变慢,内阻也会增大,充电效率和容量将会急剧下降^[12-14]。

随着动力电池在电动汽车上的广泛应用,不同因素引起的电池自燃事件,甚至是爆炸事件不断发生。动力电池的安全性是电动车发展过程中首先要考虑和解决的问题^[15]。近年来各类电动汽车事故频发,图 1.4(a)为电动汽车事故的分类及其占比的不完全统计,图 1.4(b)为电动汽车事故的起因占比的不完全统计。如图 1.5 为部分事故的照片^[16]。这类事故大多数是由电动汽车在充电或放电过程中,电池产生的热量得不到有效的散发,热量不断积聚,温度不断升高,最终导致电池热失控引起的。

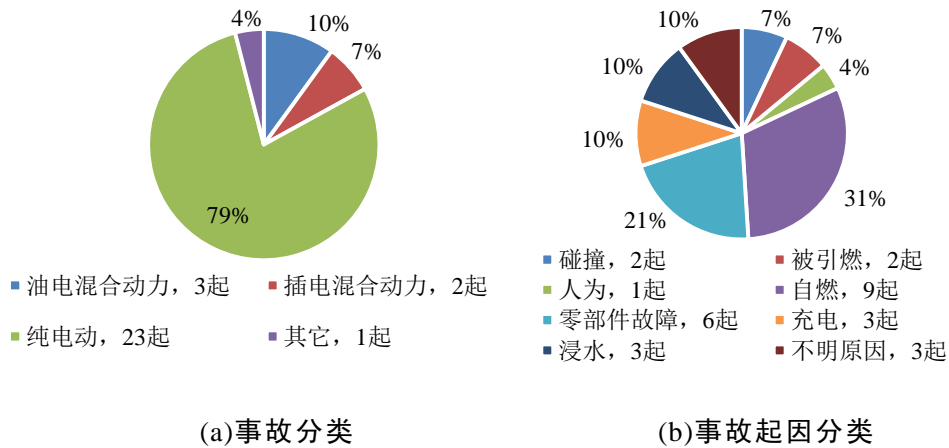


图 1.4 近年来电动汽车事故车型及起因统计



图 1.5 近年来部分锂离子动力电池事故^[16]

电动汽车对续航里程有一定的要求，因此需要较大的电量，这就需要将大量的电池单体串并联起来，以满足电动汽车的电压和容量要求。然而电池组的布置空间十分有限，电池通常处于一个密闭的空间，如果自身的产热不能有效地散发出去，内部的温度会快速升高，将极大地影响电池系统的使用性能，严重时还会导致热失控，进而引发自燃、爆炸等事故。电池的充放电性能随着工作温度的不同而不同，如果单体间的散热量不同，单体间将会产生温度差异，从而引起单体间的性能差异。即使单体温度分布不均匀也会对其安全性、性能、循环寿命和容量衰减产生很大的影响^[17-18]。

研究动力电池单体的生热及传热特性、电池组的散热规律，对估算电池组生热量，电池组温度场分布，电池组的布置方式，箱体结构的合理设计，散热方式的选择及最终热管理方案的确定都有着重要的意义。目前，国内对电动汽车上热管理方案的研究还十分有限，因此研究有效的电池热管理系统，确保电池工作在合理的温度范围和维持电池单体间较低的温度差异对电动汽车的发展具有十分重要的意义。

1.2 电动汽车电池热管理研究现状

1.2.1 动力电池热模型研究现状

(1) 电池产热的研究

电动汽车动力电池的热安全性问题多是由其内部的产热引起的，对电池产热问题的深入研究是解决电动汽车动力电池热相关问题的基础。

较早公开的文献中关于电池的产热研究并不是着重于电池本身。1958年, Sherfey^[19]研究水电解过程的产热量时选取电池为对象进行研究。Sherfey的产热模型只考虑反应结束后总的产热量,并不考虑反应过程中的实时变化量。1978年, Gibbard^[20]基于热力学定律,提出了可表示电池产热率变化过程的表达式。

Sherfey和Gibbard分析电池的产热时,均假设电池是一个浓度分布均一、反应过程无相变的系统。1985年, Bernardi等人^[21]考虑了电池系统中由于浓度不均匀性及可能存在的相变反应,提出了普遍适用于电池系统的能量守恒方程。由于其普遍适应性,经典的Bernardi生热速率模型被广泛应用于电池的研究。

1997年, Lin&Newman^[22]认为电池产热中的混合热和相变热可以忽略不计,电池的产热主要包括焦耳热与电极局部过电位的产热。据此, Rao&Newman首次提出了区分产热地点的产热模型。

2000年, Gu&Wang^[23]等人提出了电池的热-电化学耦合模型。该模型不同于上述讨论的模型,电化学模型与热模型相互影响。电化学模型可以计算产热率,热模型可以计算电池的温度,进而又可以影响电化学模型的参数,两种模型之间形成耦合关系。

以上讨论的模型均为较早提出的电池产热模型,随后的研究人员大多数是基于以上模型进行简化或者细化工作。

(2)热模型的研究现状

电池热模型主要分为电化学-热耦合模型,电-热耦合模型和热滥用模型,也可以分为一维模型、二维模型和三维模型,众多学者已经对这些模型进行了研究。

国外对电池热模型的研究较早,上个世纪90年代起一些学者对锂离子电池的热效应的研究就陆续展开。1998年, Botte等人^[24]使用集中质量模型研究单体电池的热效应,其研究表明,负极活性物质的粒径在中高倍放电速率下是影响电池温升速率的重要参数。在相对较高的温度下,碳电极的自热(由于分解反应产生)对电池总热量的贡献与欧姆热相比可以忽略不计。而阳极分解的活化能和反应热在电池的热行为中起着重要的作用。Hallaj^[25]针对某款圆柱形锂离子电池,建立了集总参数模型和一维模型,并对电池内部的温度分布进行了模拟。其结果表明,集总参数模型对于放电倍率为C/2、C/3和C/6的工况,仿真结果与实验结果吻合良好,但对于1C放电倍率,仿真结果出现了较大误差。另外,不同放电工况下,电池温度受冷却速率的影响较为明显。冷却速率较低时,电池模型表现为一个集总参数系统,具有均匀的温度。但是冷却速率较高时,电池温度表现出明显的不均匀分布,可见集总参数模型存在局限性。2001年, Sato^[26]建立了电池单体的集中质量模型,并利用模型对电池单体进行了热仿真,通过对比实验与仿真的温升数据,发现集中质量模型具有较好的仿真结果。建立的集中质量模型中考虑了反应热、极化热和焦耳热。使用模型分析充放电过程电池的热行为,仿真数据与实

验数据吻合。2002年,美国国家可再生能源实验室的 Johnson^[27]提到了 ADVISOR 软件中的集中质量热模型,将电池分成壳体和电芯两部分。Wu 等人^[28]以 Bernardi 产热速率模型为基础建立了锂离子电池二维瞬态热模型,并分析了不同散热工况下电池单体的温度分布。Wu 等人利用该模型分析了电池径向和轴向的温度分布,发现径向的温度梯度比轴向的大。Kazuo Onda^[29]通过实验测量了小型钴酸锂电池的电阻、熵变、电池热容量和电池表面的传热系数,并利用这些参数作为所建电池模型的输入条件,分析了快速充放电条件下电池的热行为。在快速充放电循环条件下,电池温度由 V-I 特性过电压电阻来计算,其计算结果与测量结果吻合。另外,发现电池中心和表面之间的温差很小。这些分析方法可以有效地预测小型电池的热行为。

一维模型和二维模型比三维模型的计算量小,但是不能很好地表征参数的空间特征。相反地,三维模型可以很好地体现电池空间上的温度分布。CHEN S C^[30]在 Bernardi 生热模型的基础上,比较了锂电池一维、二维和三维模型。结果表明,结合计算成本和计算结果两方面,认为考虑辐射和对流换热的情况,单体电池三维计算结果最为理想。通过数值模拟,讨论了电池外壳、放电倍率和放电深度等因素对电池生热和传热的影响。A.Pesaran^[31]等人利用电热耦合模型,对丰田普锐斯 2001 年与 2004 年的电池模块进行了对比研究。通过使用 ProE 建立电池模块的三维模型,并使用 ANSYS 作为有限元分析工具。通过对比仿真图像与热像图,表明该模型具有较好的热预测性能,电池模块的热成像如图 1.6(a)所示。如图 1.6(b)所示,利用该模型可以快速发现电流密度较大的位置和可能出现的热点,这为电池模块降低电阻设计提供了依据。

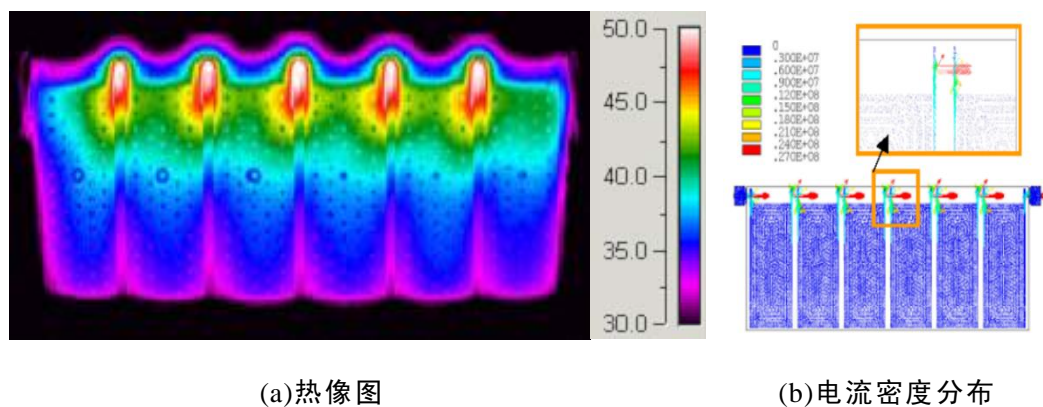


图 1.6 丰田普锐斯 Ni-MH 电池模块电流密度分布和热像图^[31]

Ma^[32]建立了 A123-26650 圆柱形锂离子电池的电-热耦合模型,通过有限元分析方法研究了电池包的热行为,仿真结果与实验结果吻合良好。所建立的模型也可以用于其它形状的电池热分析。韩国首尔大学 Dong 等人^[33]提出了圆柱形锂离子电池的瞬态和热有限元的简化模型。该模型考虑电池的焦耳热和熵变导致的热。利用该模型研究了钴酸锂电池在放电过程中的热行为,模拟的温度曲线与实

验结果具有相似的趋势。研究表明焦耳热是高倍率放电下的主要热源，而低倍率下熵变引起的热贡献更加显著。

Xu^[34]通过电池的电-热耦合关系，建立了方形 LiFePO₄ 电池的伪三维模型。通过 9 个热电偶监测电池的表面温度，并取 9 个温度点的平均值作为电池表面的平均温度，模拟平均温度与测量值对比具有较高的吻合度。对于方形电池，研究认为正极集流片和负极集流片的放置位置对电池的电位和局部反应速率的分布具有显著的影响，因此影响发热率，从而影响电池内部的温度分布。该模型在一定程度上可以较好地描述电池的热行为，但忽略了电池各层的结构。

Veth^[35]等人提出了一种用于建立大规格尺寸锂离子电池的三维电热模型的方法。这种模型能够可靠地预测电池内部温度，电流，功率损耗，SOC 和电压等内部状态值的分布和不均匀性。此外，通过该模型可以研究温度不均匀性与单体内部状态值的不均匀性之间的相互关系，但是非均匀分布的原因没有充分讨论。如图 1.7 展示了电池表面温度不均匀性分布的实验结果与仿真结果的对比。

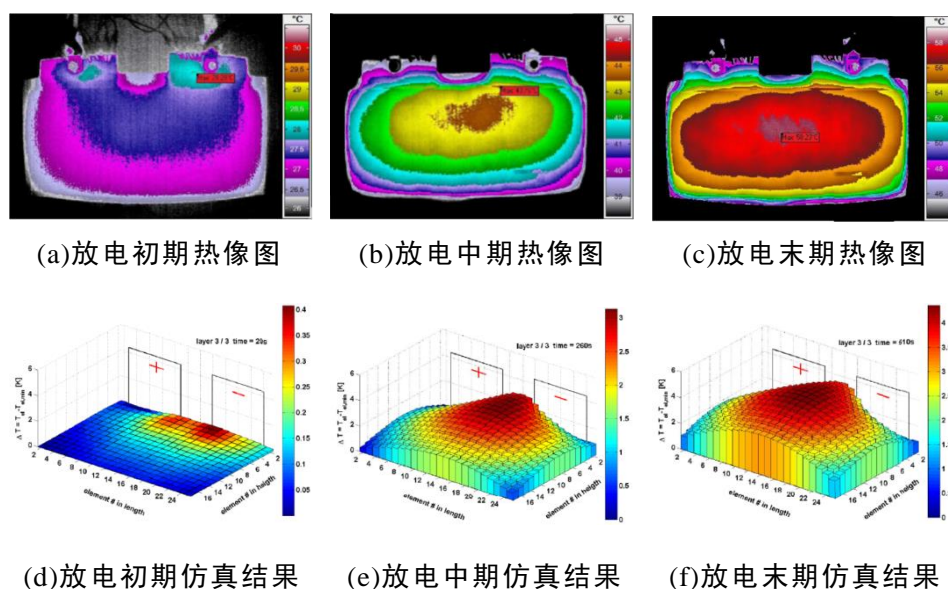


图 1.7 300A 放电各阶段电池温度不均匀性仿真结果与实验结果对比^[35]

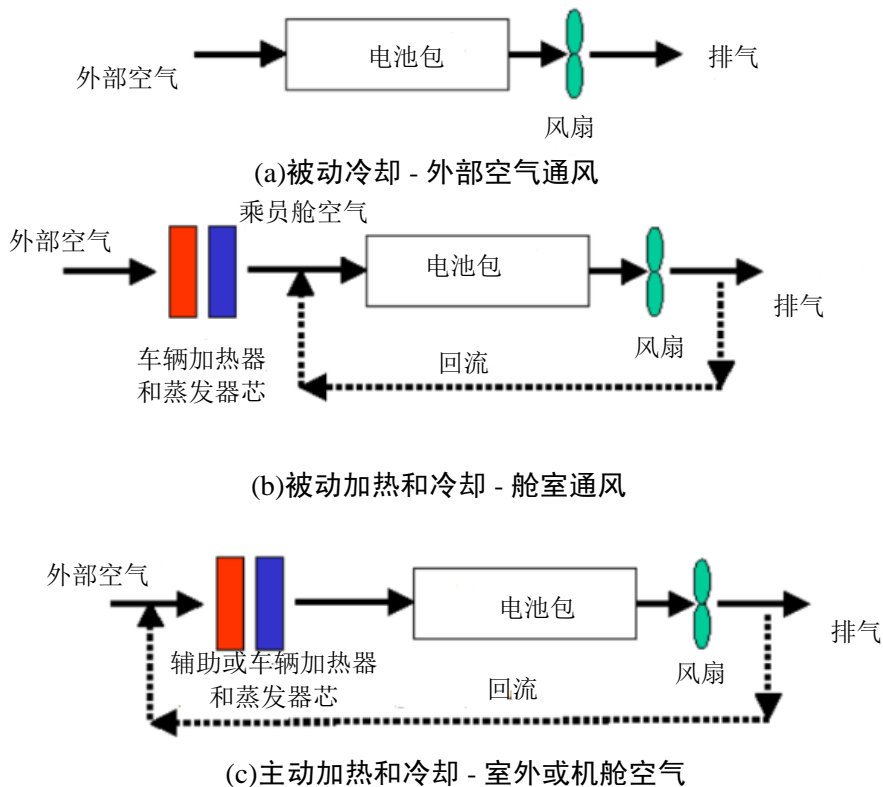
清华大学李腾等人^[36]针对大容量锂离子电池建立了三维多层多物理场模型，模型通过热成像实验进行验证，仿真的温度数据和实验数据吻合。研究认为，极耳对电池电流密度和温度场分布不一致有很大影响，建议设计电池时加厚极耳。一些研究者建立的模型，尝试在电池中引入不均匀的电阻分布^[37-38]。但是，这些模型并没有考虑 PTC 元件，这将影响电池内部温度分布模拟的准确度。

1.2.2 动力电池散热方式研究现状

目前电动汽车电池热管理系统(BTMS)的散热冷却方式主要有空气冷却、液体冷却和相变材料冷却三种方式。同时，热电冷却和冷板冷却等新型冷却方式也逐渐被应用于电动汽车电池热管理系统。此外，考虑到动力电池在低温状态下运行的工况，带有加热功能的热管理系统应运而生。

(1)空气冷却

空气冷却电池热管理分为自然冷却和强制对流冷却。图 1.8 为三种空气冷却的方式^[39],包括被动式空气冷却、被动式空气冷却/加热和主动式空气冷却/加热。**Choi&Yao**^[40]研究了铅酸蓄电池,并提出了通过自然散热或强制空气对流来缓解其温度问题。**Chen&Evans**^[41]认为,被动或主动空气冷却均不可以有效地散发大型电池的热量。**Pesaran**^[42]指出,空气冷却可以满足并联式 HEVS 的散热需求,但不能满足 EVS 和串联式 HEVS 的散热需求。**Kim&Persaran**^[43]认为,低能量密度电池使用被动式空气冷却即可满足散热需求,而对于高能量密度电池散热则需要主动式空气冷却。如果没有提供主动空气热管理,则会导致电池中心和电池组边界之间较大的热梯度。热梯度导致电池单体间不同的充电或放电容量,因此需要适当的主动空气冷却装置以获得最佳电池性能。通过强制空气冷却增加电池周围空气的传热系数是至关重要的,但这会增加系统的复杂程度和需要额外的功耗。

图 1.8 空气冷却方式^[39]

2000 款本田 Insight^[44-45]和 2001 款丰田 Prius^[44,46]从乘员舱中获得经过空调调节温度的空气对电池进行冷却,并将热量排放至环境。每个电池组(NiMH 电池)具有单独的模块布置,以减小整个电池组的温度不均性。Insight 电池组拥有类似于顺排管束的风道结构,并使用一个小风扇强迫电池间的空气对流。Prius 电池组使用并行通风方式,通过安装在驾驶员侧后轮胎上方的 12V 鼓风机进行抽风。丰田 Prius 对电池组在不同鼓风机转速与环境温度下进行了测试,表明温度差异在

4℃~8.3℃^[46]。由于只能布置有限的测温点，因此最大的温度差异是不知道的。然而，对于锂离子电池温度均匀性℃，空气并不是最好的介质，锂离子电池组存在比 NiMH 电池组更多的安全风险^[47]。

虽然空气冷却电池热管理在不断改进，但还存在众多问题。Nelson 等^[48]讨论了电池初始温度高于 66℃的情况，空气冷却的方法并不能有效地使电池的温度下降到 52℃。Lou^[49]设计了一个用于镍氢电池的梅花形电池组，目的是提高传热性能。对于空气冷却热管理方法，控制电池温度差异小于 5℃，提高靠近和远离风扇位置电池温度均匀性似乎是不可能的。最近，Mahamud&Park^[50]提出了一种往复方法，以便产生一个非常均匀的温度分布，减轻温度梯度，这已被证明比常规的单向空气冷却更好。

(2)液体冷却

与空气相反，液体拥有较高的热导率和热容，因此液体电池热管理被认为是一种较好的热管理解决方案，分为被动式和主动式。按照传热介质可分为：制冷剂冷却或冷却剂冷却(例如水，乙二醇，油或丙酮)。Pesaran^[39]和 Bandhauer^[47]在传热系数、热导率、粘度、密度和流体速度方面定性比较了空气和液体冷却。由于较低的比热和导热率，空气冷却系统的温度分布不均匀的程度相对较大。使用油作冷却介质，传热效率比使用空气高 1.5~3 倍^[39]。而使用水或水/乙二醇作为介质时的传热效率比空气高出 3 倍。也就是说，使用水或水/乙二醇作为介质，电池间温度的不均匀性将降至空气冷却的三分之一，实现较好的温度均匀分布。使用制冷剂冷却和冷却剂冷却较大的不同点是，前者不需要额外的回路冷却和加热装置。这意味着对于在冬季期间的电池预热，制冷剂将不能够有效地将热能传递到电池，因此具有较小的吸引力。文献^[39]介绍了三种方式的液体 BTM：1)在模块间布置管线或围绕模块布置夹套；2)把模块沉浸在电解质的液体中(例如硅基或矿物油)；3)将模块放置在液体加热/冷却板上。这种冷却板是指具有一个或多个流通制冷剂或冷却剂内部通道的薄金属。冬季外部可靠的加热源可以是使用电加热器加热的夹套或液体^[51-52]，例如沃尔沃 C30 Electric 使用的生物燃料加热器(14.5 升)^[53]或 Shimada 提出的沼气(甲烷)发动机^[54]。

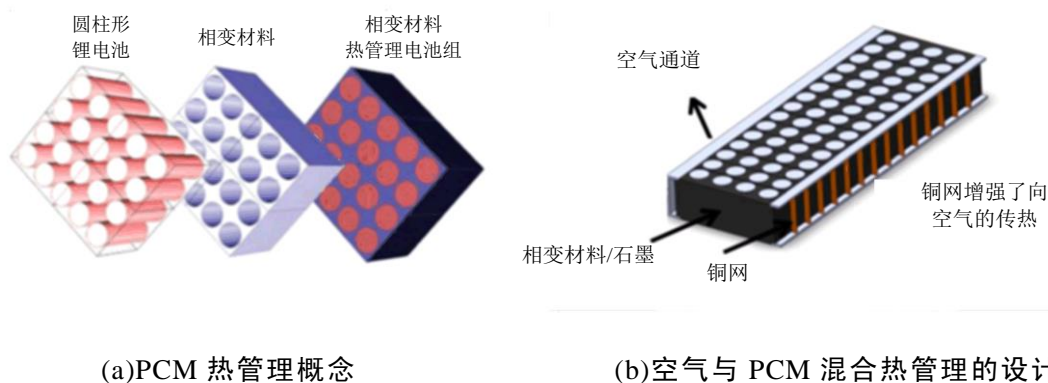
文献^[39,42]介绍了不同类型的 EV 或 HEV 液体冷却 BTM。文献^[48]研究了基于 PNGV 方法的 Gen-2 锂离子电池介质冷却/加热。文献^[55]总结了主动式液体冷却/加热在 Volt 和 Tesla 上的应用。Tesla Roadster 的电池冷却系统中冷却剂是由水-乙二醇按比例(1:1)混合而成。在冷却管中,热界面包覆成型，形成电池组下方的基座。冷却液的流动可以提供有效的冷却，因此它可作为散热器。Jarrett&Kim^[56]提出了改进的建议，他们以各种几何形状模拟蛇形通道冷却板，并得出结论“宽出口窄入口通道”能够平衡热传递以实现均匀的温度。类似地，Faass&Clough^[57]修改了冷却通道路径几何形状，其产生了高湍流区域和低压降区域。Jin 等^[58]提

出了一种新型的微通道液冷板，通过优化翅片的倾斜角度和宽度来达到冷却 EV 电池的目的。

空气式电池热管理适用于所有类型的电池，方形或软包电池适合采用冷却/加热板的液冷电池热管理。风冷式电池热管理占用更多的空间，这是由于附加的空气管道和鼓风机而增加了更多的重量，更大的压缩机功耗，并且在保持温度均匀性方面效率较低。如果电池需要更严格的温度控制，特别是在一些热负荷较大的环境中，空气冷却不如液体冷却有优势。液冷式电池热管理在冷却效率，电池温度均匀性表现较好，然而液体 BTM 需要权衡附加泵、阀、冷却器和散热器所带来的空间需求增大，重量和复杂性增加等问题。

(3)相变材料冷却(PCM)

一个好的热管理系统应该在满足质量轻、体积小和成本低等情况下，能够维持电池在一个合理的温度范围。由于鼓风机、风扇、泵、管道和散热器等附件的使用，空气热管理和液体热管理都致使整个系统复杂、质量大和成本高等^[59]。相变材料由于具有巨大的存储热量的能力而被应用于电池热管理系统中^[60]。相变热管理的原理是应用 PCM 融化(凝固)时吸收(放出)的潜热来工作的。PCM 通常具有较大的熔化潜热和理想熔点，能够存储或释放较多的热量。热传递路线从电池开始，电池产生热量传递到达 PCM，然后到达与环境空气接触的电池箱壳体。PCM 可以满足电池大多数运行期间主动冷却/加热的需要，当环境温度较低时，它延迟了电池的温升，并在炎热天气期间将电池温度维持在环境温度以下。如图 1.9^[61]所示为填充了 PCM 的商用圆柱形 18650 锂离子电池模块。PCM 是具有 40°C~44°C 的熔融温度范围和 195kJ/kg 的熔融/凝固潜热的石蜡。石蜡填充在单体之间的空隙，分别具有 822kg/m³ 和 910kg/m³ 的固相和液相密度。这反映了 PCM 的轻质优点。Rao 等人^[62]讨论了为 BTM 选择合适的 PCM 的主要标准，首先是熔点，事实上，该值应当在电池所需的工作温度范围内选择。优选具有熔融温度低于 45°C 和所需最高温度低于 50°C 的 PCM，可以实现整个电池单元的有效散热和改善温度均匀性。



(a)PCM 热管理概念

(b)空气与 PCM 混合热管理的设计

图 1.9 PCM 热管理

在 Khateeb^[59]的研究中, 数据显示使用 PCM(石蜡)冷却, 中心电池单体温度上升了 26.25℃~30℃, 而边缘单体仅上升了 18.75℃~22.5℃。这表明 PCM 的导热性差, 因此, 其熔化不均匀。在第一次放电循环期间, 靠近中心电池的 PCM 完全熔化, 但是在冷却的壁面附近的 PCM 在第三次放电循环之前没有开始熔化。如果 PCM 完全熔化, 则将在冷却流体和电池之间产生额外的热阻, 导致比直接空气冷却更糟的情况。当在寒冷环境中的电池预热时, 低导热性也变得有问题, 并且如果使用外部加热, 电池之间的温度梯度可能是巨大的。更重要的是, 熔化后的体积膨胀是不可避免的, 因此需要电池单元之间的附加体积间隔, 并且防止 PCM 液体泄漏的防漏设计是至关重要的。关于相变材料热管理, 文献^[63]完成了四种方案的实验: 1)自然对流冷却; 2)泡沫铝传热矩阵冷却; 3)相变材料冷却; 4)结合 2)和 3)的冷却方式, 研究发现第四种方案的效果最好, 且电池组具有良好的 consistency, 并通过二维模型对其进行仿真验证。Khateeb 等人^[63]以 Bernardi 生热模型为基础, 模拟分析了圆柱形锂电池的生热特性。另外, 通过实验方法研究了相变材料和泡沫铝的散热性能, 结果表明在相变材料中加入泡沫铝, 对其散热性能的提高有明显的作。Sabbah 等人^[64]利用实验和数值模拟比较了空气强制对流冷却和 PCM 冷却的效果, 说明了在 6C(10A/cell)持续大电流放电下 PCM 冷却可以把电池温度保持在 55℃以下。在寒冷的环境温度下, PCM 有显著的优势。Riza Kizile 等人^[65]认为, 在相变材料中加入石墨能够有效地提高其导热系数, 进而增大了散热系统吸收和传递热量的速率。因此, 相变材料能够很好地限制电池温度及电池包的温差在合适的范围之内, 其冷却性能优于空气。

1.3 本文的研究内容与全文框架

电动汽车动力电池工作过程对温度要求较高, 需要有效的电池热管理系统。在设计热管理系统之前, 一般需要对锂离子电池的分类、结构特点和工作原理进行深入了解, 然后根据相关参数建立准确的电池热模型。之后根据电池热模型进行电池热管理系统的前期设计分析和优化工作, 最后完成较优的电池热管理方案。本文根据这一思路开展的研究内容为:

(1)分析锂离子电池正极材料发展路线、基本结构和工作原理, 对电池进行充放电试验, 分析其温升特性, 并对充电过程温升进行阶段划分与特点总结。使用热成像仪分析不同放电倍率下电池表面温度分布情况。此外, 测量不同 SOC 下电池的内阻, 为电池热模型的生热计算奠定基础。

(2)分析电池生热和传热机理, 根据 18650 电池的结构特点, 建立电池的三维几何模型, 并将电池的生热进行区域划分, 建立电池的热模型。然后通过温升试验验证模型的温升仿真结果, 使用热成像仪验证电池表面温度分布的仿真结果, 以验证模型的准确性。

(3)搭建电池组充放电试验平台，对电池组进行充放电试验研究，分析电池组充放电过程的温度分布特点。对比充放电过程电池组与电池单体的温升特点，根据电池组的热特性，设计电池组液冷散热系统。

(4)对初始的电池组液冷模型进行数值仿真，研究导热板材料、冷却液类型和冷却液流速对电池组温度分布的影响。运用数值仿真手段，对电池组的散热结构进行改进设计和优化分析，提高液冷式电池热管理系统的散热性能及电池组的温度均匀性。

本文研究内容的框架如图 1.10 所示。

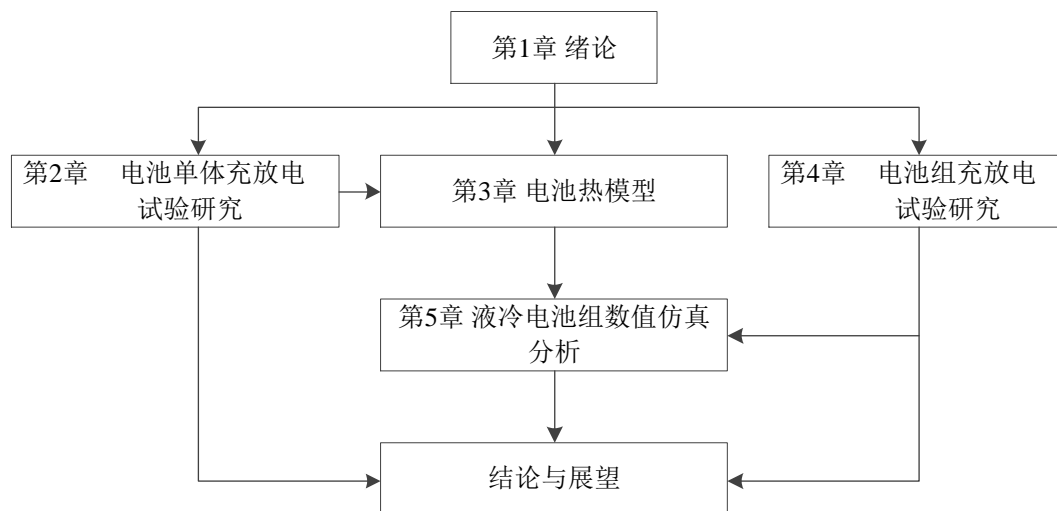


图 1.10 全文框架

第 2 章 锂离子电池充放电试验研究

电动汽车电池热管理系统的设计，要以研究电池的运行性能为基础，特别是与电池温度密切相关的性能指标。锂离子电池内部结构复杂，电池生热为非线性的复杂系统，研究电池的热特性对电池温度的管理有着重要指导意义。本文以国内某知名电芯厂商生产的某商用 2.2Ah18650 三元锂离子电池作为研究对象，研究锂离子电池在不同充放电倍率下的热特性。并通过 HPPC(Hybrid Pulse Power Characteristic)脉冲试验研究电池在不同 SOC 状态下的内阻,为建立电池单体热模型和热管理系统的设计打下基础。

2.1 锂离子电池的介绍

目前商用的锂离子电池的差异，主要在电池的正极材料和外形上。锂离子电池中对产品性能影响最大的因素是正极材料，是动力电池发展的瓶颈。如图 2.1 为锂离子电池正极材料发展的技术路线^[66]。

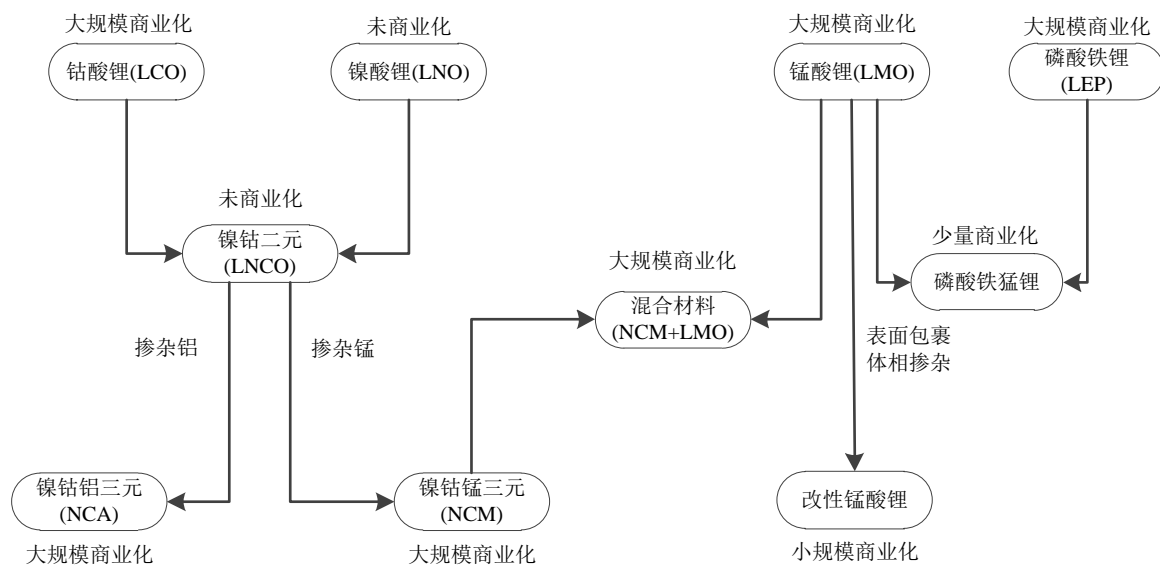


图 2.1 锂电池正极材料发展路线

近 30 年来，动力锂电池的发展主要分为三个时期^[66]。第一代：20 世纪 90 年代早期投入市场的锂电池的正极材料以钴酸锂为主；第二代：以锰酸锂和磷酸铁锂为代表，在 21 世纪初开始商业化；第三代：锂电池的性能得到提升，成本进一步下降，近几年得到了快速的发展，正极材料涵盖镍钴锰三元、镍钴铝三元、改性锰酸锂、磷酸铁锰锂和混合材料。

锂电池有三种外形：圆柱形、方形和软包，如图 2.2 所示。

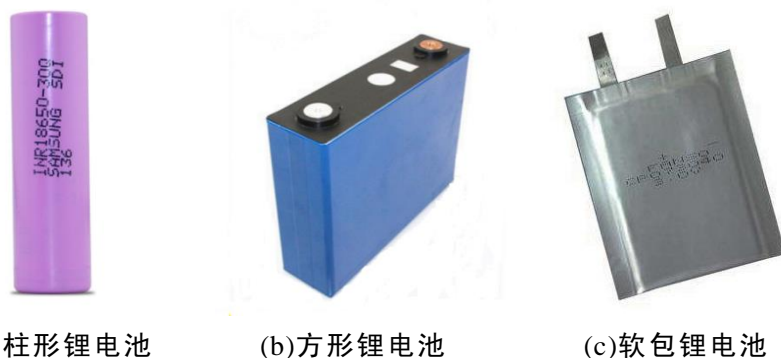


图 2.2 锂电池的类型

表 2.1 总结了各种类型锂电池的特点^[66]。

表 2.1 几种典型锂电池的特点

圆柱形锂电池	方形锂电池	软包锂电池
<ul style="list-style-type: none"> • 自动化生产工艺成熟，产品率高，一致性好； • 电池小、电池模组散热面积大，散热性能优于方形电池； • 成组工艺复杂，组成系统之后可靠性低。 	<ul style="list-style-type: none"> • 壳体采用铝合金、不锈钢等材料，结构强度高，承受机械载荷能力好； • 壳体较重导致电池组能量密度受到一定限制； • 工艺复杂，产品良率低，一致性较差。 	<ul style="list-style-type: none"> • 安全性能相对较好，不容易发生爆炸； • 能量密度高，延展性好，外形多变 • 一致性较差，承受机械载荷能力差，容易破损和漏液。成本较高；

2.1.1 锂离子电池基本结构

根据不同的制造形状，锂离子电池可以分为卷绕式锂电池和层叠式锂电池。一般圆柱形锂电池为卷绕式，方形锂电池为层叠式，如图 2.3 所示。

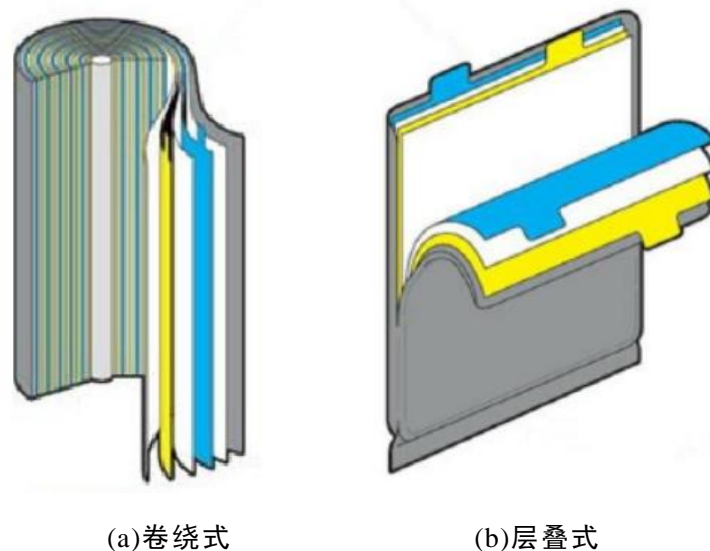


图 2.3 锂电池结构示意图

本文的研究对象是一款圆柱形三元锂离子电池。该款电池的内部基本组成结构如图 2.4 所示。锂离子电池的核心部分主要由正极集流体、正极、隔膜、负极、负极集流体和电解液等部分组成。此外，还包括一些具有导电、绝缘、安全或者保护功能的部分，如正极引线、负极引线、绝缘垫、PTC 元件、保护阀、排气孔和外壳等部分。本文研究对象的正极引线的材料为铝，负极引线的材料为镍。

正负极是电池内部活性物质发生化学反应产生电能的场所。正负极集流体是正负极材料与外电路的中间导体，本文研究的对象正极集流体的材料为铝，负极集流体的材料为铜。电解液是具有高导电性的液体，是正负极间电荷转移的载体，常用的电解质盐类有 LiPF_6 、 LiClO_4 、 LiBF_4 、 LiAsF_6 等。隔膜的作用是将正负极隔开，防止发生内短路，它允许离子通过，但是没有导电性，其制作材料主要是聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP)。另一个较为重要的元件是 PTC (Positive Temperature coefficient)，温度较高时，它的阻值迅速上升，限制了电池电流的变大，从而控制电池在大电流情况下的温升。

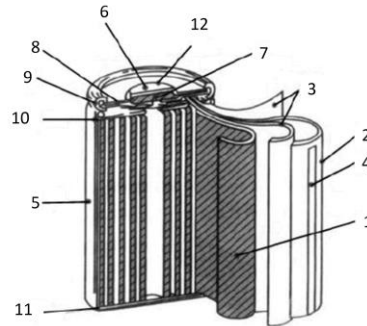


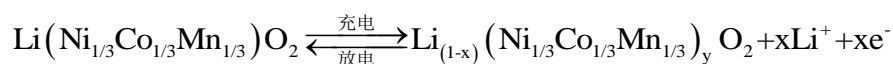
图 2.4 圆柱形锂电池内部结构示意图

图中，代号分别表示：1、正极；2、负极；3、隔膜；4、负极引线；5、外壳；6、正极接线柱；7、安全阀；8、PTC 元件；9、密封圈；10、绝缘板；11、绝缘板；12、排气孔

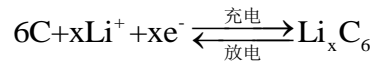
2.1.2 锂离子电池工作原理

锂离子电池在使用过程中，锂离子在正负极中嵌入或脱出，并通过电解液进行传输。充电时，锂离子从正极材料中脱落，经过电解液，穿过隔膜，然后嵌入到负极多孔碳材料上。充电过程中，正极锂离子数量逐渐减少，出现“贫锂”状态，负极锂离子数量逐渐增多，出现“富锂”状态。放电时，锂离子从负极上脱落，通过电解液穿过隔膜，最终到达正极并嵌入到正极材料中。锂离子电池充放电过程工作原理如图 2.5 所示。

以本文研究的三元锂电池为例，充放电过程中的电化学反应方程式为：
正极反应：



负极反应:



总反应式:

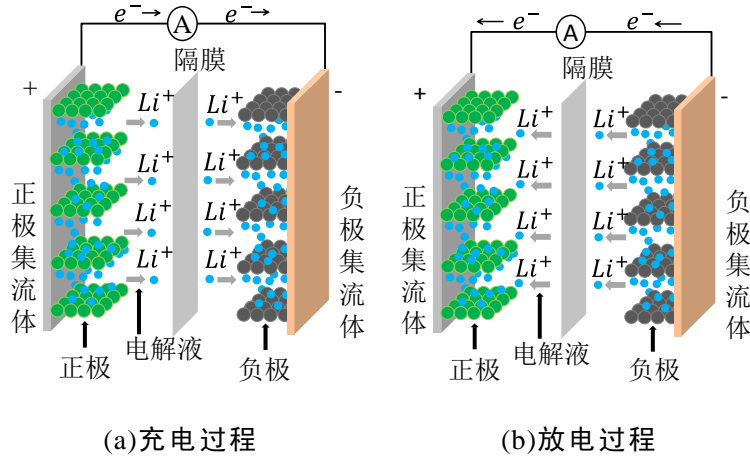
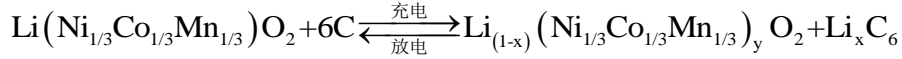


图 2.5 锂电池工作原理示意图

2.2 锂离子电池试验研究

2.2.1 电池的基本参数与实验设备

了解电池的基本参数是进行电池测试实验的前提，进行各项测试前需要根据电池的规格与一些测试标准拟定试验方案。本文使用的研究对象镍钴锰三元锂离子电池的基本参数列出于表 2.2。电池单体的基本尺寸见图 2.6。

表 2.2 电池单体基本参数

电芯类型	18650 三元锂电池(NCM)
充电截止电压(V)	4.2
标称电压(V)	3.7
内阻(mΩ)	≤30
标称容量(mAh)	2600
放电终止电压(V)	2.75
电芯单体质量(g)	45±2
自放电率(月)	≤5%
循环寿命(剩余容量≥80%)	1500 cycles
最大充电电流(A)	2.2
最大恒流放电电流(A)	15

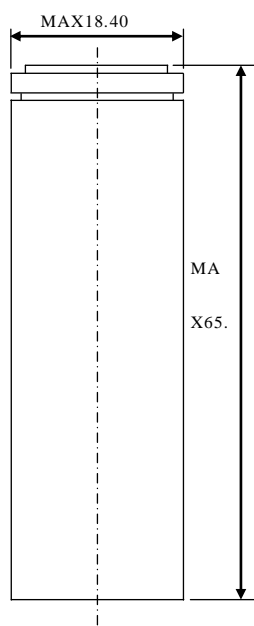


图 2.6 电池单体外形尺寸示意图

本文所进行的试验用到的设备是电池单体充放电机和红外热成像仪,如图 2.7 所示。图 2.7(a)为动力电池单体充放电机电,型号为 BTS20.5V/4*200A。该充放电机电具有四路通道,能够同时进行独立的充放电实验,可以实现恒流、恒压、恒功率和脉冲等多种充放电模式,最大充放电电流可达 200A,能够满足多种电池试验要求。图 2.7(b)为市售 Fluke 热成像仪,型号为 Tix520。Tix520 热成像仪的温度量程为 $-20^{\circ}\text{C}\sim+850^{\circ}\text{C}$ 满足实验要求。它可以检测 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 范围内的红外光。在校准范围内, Tix520 的噪声等效温差(NETD)为信号-音调比的测量值,约为 50mK(过滤模式下为 40mK),它的图像捕获频率为 9Hz。使用 Fluke 厂商提供的 SmartView 软件分析图像、组织数据和信息以及制作专业报告,软件的界面如图 2.8 所示。



(a)德普动力电池单体充放电机电



(b)Fluke 红外热成像仪

图 2.7 实验设备

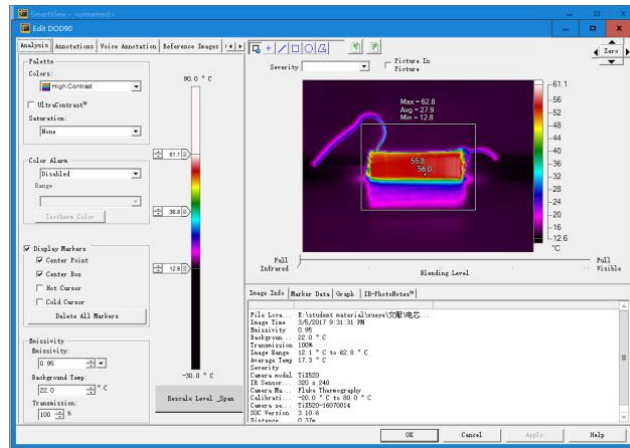


图 2.8 SmartView 软件界面

2.2.2 充放电特性试验

首先进行的温升试验是南方地区冬季和夏季自然散热条件及不同充放电倍率条件下的温升情况。由于电池单体的体积较小，因此采用单点热电偶测温，热电偶布置于电池单体表面的中心位置。实验环境在温控室内进行，温控室可以将室温维持在 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，实验将室温始终调节为 25°C ，室内的温度和湿度可以通过电子显示屏实时显示。

对放电速率的定义符合 IEC61434 标准的定义^[67]：

$$I_d = \frac{C}{1h} \quad (2.1)$$

式中， I_d 表示电池的充电或放电电流，A；C 表示电池的额定容量，Ah。

该电池的规格书给出了标准充电方法：以 C/3 倍率进行恒流充电至电池电压达到 4.2V，再以 4.2V 的恒定电压进行充电，当充电电流降低至 72.6mA 时充电结束。

(1) 实验步骤

充电：

- 1) 以 C/3 倍率进行放电，直至截止电压 2.75V；
- 2) 静置至电池温度降至室温；
- 3) 以 0.33C 对电池进行恒流充电直至截止电压 4.2V；
- 4) 以 4.2V 的电压进行恒压充电，直至电流减少到 72.6mA；
- 5) 将步骤 1) 中的充电倍率分别调整为 0.5C、1C 和 1.5C，重复以上步骤。

放电：

- 1) 以上述提到的标准充电方式将电池充至满电状态；
- 2) 静置至电池温度降至室温；
- 3) 以 1C 放电至截止电压 2.75V；
- 4) 将步骤 3) 中的放电倍率分别调整为 2C、3C 和 5C 后，重复以上步骤。

(2)实验结果分析

测试过程中动力电池单体充放电机的信息采集系统会自动采集电池充放电过程的电流、电压和温度等信息，并实时记录这些数据。如图 2.9 为动力锂离子电池不同充电倍率下，电池的温度随时间的变化曲线。从图 2.9 可以看出，充电倍率对电池温升有着重要的影响，不同充电倍率的温升曲线有着明显的差异。在相同的环境温度和初始温度下，电池的温升呈现随着充电倍率的增大而增大的趋势。电池的初始温度和环境温度均为 25°C 时，以 0.33C 、 0.5C 、 1C 和 1.5C 进行充电时，电池的最高温度分别达到 26.84°C 、 28.63°C 、 33.36°C 和 37.59°C 。电池的最大温升如图 2.10 所示。从图中可以看出， 0.33C 和 0.5C 充电时，电池的温升非常小，分别为 1.84°C 和 3.63°C 。当充电倍率增大为 1C 和 1.5C 时，电池的温升有所增加，分别为 8.36°C 和 12.59°C ，比 0.33C 和 0.5C 大很多。可见充电倍率对电池的温升影响较大。

从整个充电过程温升的变化曲线分析， 0.33C 充电倍率下，电池的温升非常缓慢，之后基本维持稳定不变，充电末期没有明显的下降趋势。这是因为小倍率充电时，电池的生热很小，温升缓慢，散热速率很快与生热速率达到平衡状态，以致电池温度在较长的时间维持稳定值。由于电池与环境温差很小，因此并不会出现温度快速下降的现象。 0.5C 充电倍率下， $0\text{s}\sim 2500\text{s}$ 段，温升较快； $2500\text{s}\sim 6100\text{s}$ 段，由于电池生热率与散热率达到动态平衡，温度基本不变；充电时间大于 6100s 之后，电池的温度不断下降，这是因为电池进入恒压充电阶段后，充电电流下降较快，生热速率下降。充电倍率为 1C 和 1.5C ，电池充电初期的温升速率明显高于 0.33C 和 0.5C ，可见充电倍率的增大将严重影响电池的生热。值得注意的是， 1C 和 1.5C 倍率下，整个充电过程电池的温度并没有出现一个“稳定期”。这是因为较大的充电倍率下，电池的生热率较大，温升明显，本文将该阶段称为温度“上升期”；但是较大的充电倍率下，电池很快从恒流充电阶段进入恒压充电阶段，恒压充电阶段电流值下降明显，电池生热率也跟着迅速下降，散热速率从小于生热速率直接变为大于生热速率，因此跳过电池温度“稳定期”直接进入温度“下降期”。

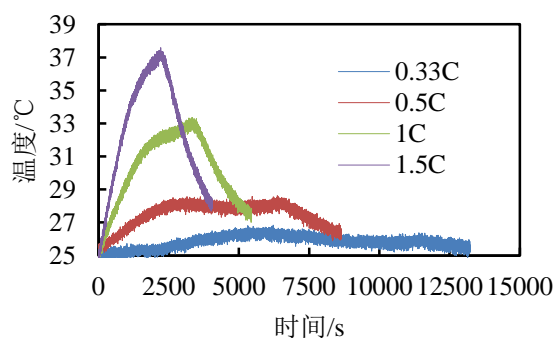


图 2.9 不同充电倍率下锂离子电池温度随时间的变化曲线

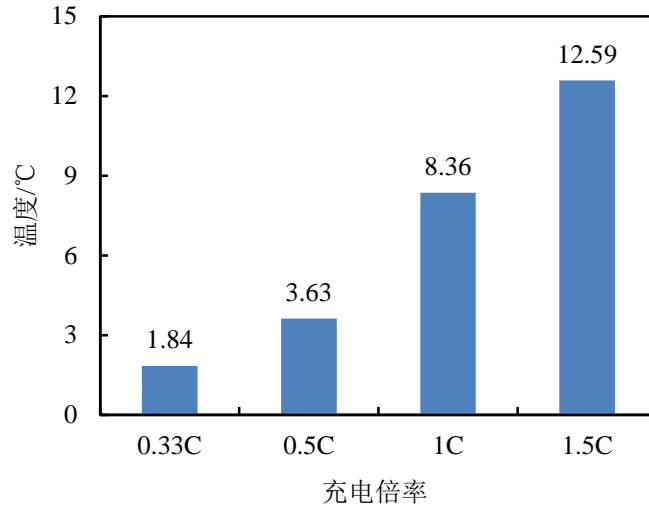


图 2.10 不同充电倍率下锂离子电池的最大温升

根据以上的分析，针对恒流-恒压的充电模式，本文将所研究的 18650 三元锂离子电池充电过程的温升规律总结为三个阶段，阶段的划分原理如图 2.11 所示，这三个阶段的命名和特点如表 2.3 所示。

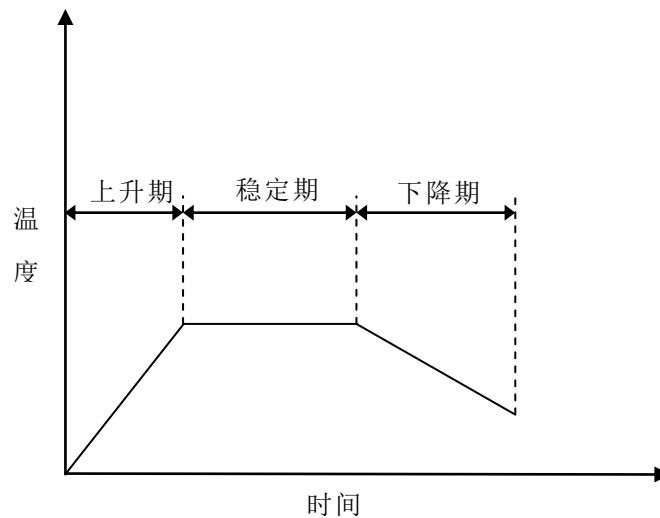


图 2.11 圆柱形三元锂离子电池充电温升阶段划分示意图

表 2.3 圆柱形三元锂离子电池充电过程温升特征阶段划分与特点

阶段	名称	特点
I	上升期	电池处于恒流充电阶段，生热速率大于散热速率，电池温度不断增大。
II	稳定期	电池处于恒流充电和恒压充电过渡阶段，电池的生热速率基本等于散热速率，电池的温度基本不变；该阶段在小倍率充电时较为明显，大倍率情况下有可能不会出现该阶段。
III	下降期	电池处于恒压充电阶段，生热速率小于散热速率，电池温度不断减小。

图 2.12 为单体锂离子电池在室温(25℃)条件下不同倍率放电过程的温升特性。从图 2.12 中可以看出,不同的放电倍率,电池的表面温度均随时间的变化而增大,放电电流越大电池的温升越快,这是因为发热功率基本与电流的平方成正比。在放电末期,电池的极化现象加强,内阻增大,发热功率增大,出现温升加剧的现象。建议动力锂离子电池使用过程中避免深度放电。放电结束时,1C、2C、3C 和 5C 放电倍率下,电池的温度分别达到了 34.03℃、44.49℃、53.70℃和 74.7℃。室温下,3C 以上的放电倍率,电池的温度超过了适宜的使用温度范围,因此需要进行电池热管理,以防止热失控的发生。图 2.13 为电池的最大绝对温升,1C、2C、3C 和 5C 倍率放电结束时的绝对温升分别是 9.10℃、19.49℃、28.81℃和 49.91℃。可见,绝对温升受倍率的影响较大,随着倍率的增大,绝对温升的增长明显。因此在实际使用过程中尽量避免高倍率放电,以保护电池。

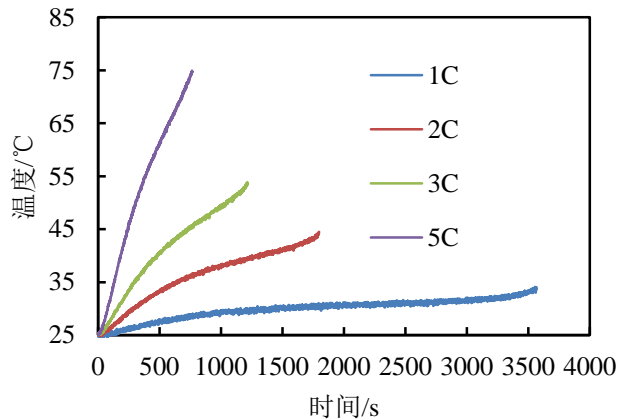


图 2.12 不同放电倍率下锂离子电池温度随时间的变化曲线

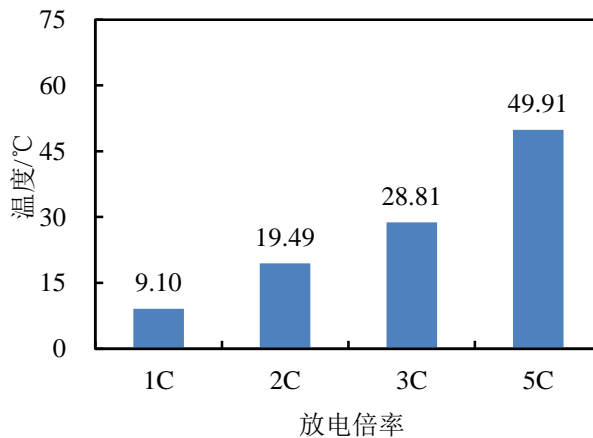


图 2.13 不同放电倍率下锂离子电池的最大绝对温升

图 2.14 为室温下不同充电倍率时电池单体的电压随充电容量的变化图。从图中可以看出,在恒流阶段,充电倍率越大,电池的端电压越高。充电倍率对充电容量也有较大的影响,如图 2.15 所示,充电倍率越大充电容量越大。但是充电倍率越小,所需的充电时间越长,因此在工程上会综合多方面因素选择充电倍率。

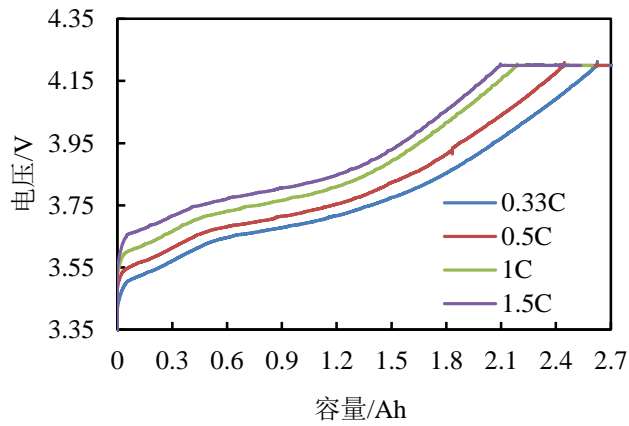


图 2.14 不同充电倍率下锂离子电池电压-容量曲线

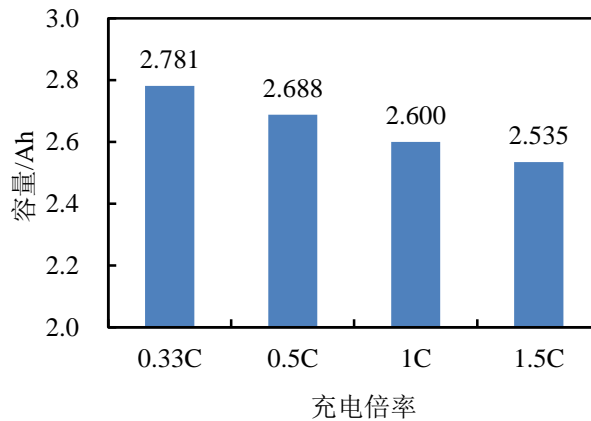


图 2.15 不同充电倍率下锂离子电池的充电容量

图 2.16 为室温下，锂离子电池放电电压随放电容量的变化曲线。可以看出，放电倍率越大，电池的平台电压越低，这是因为放电倍率越大，电池的内阻分压越大，端电压也就越低。从图 2.17 可以看出，放电倍率对该锂离子电池的放电容量影响较小。放电容量并没有表现出如文献^[68]所描述的现象：放电倍率越大放电容量越小，这是因为电池的放电容量不仅受到放电倍率的影响，还受到温度的影响。电池放电倍率较大时，温度也相应的增大，有助于提高放电容量，因此表现出大倍率比小倍率放电容量大的现象。

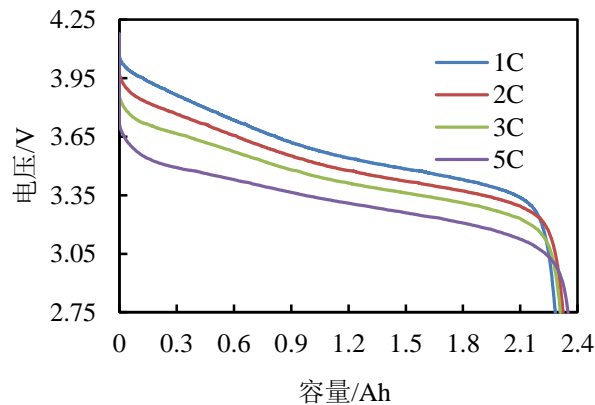


图 2.16 不同放电倍率下锂离子电池电压-容量曲线

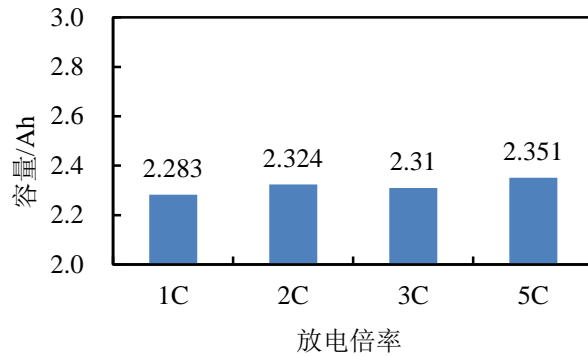


图 2.17 不同放电倍率下锂离子电池的放电容量

2.2.3 内阻特性

锂离子电池的内阻通常可以分为欧姆内阻与极化内阻，是锂电池最重要的参数之一。欧姆内阻是指由电解液、隔膜、电极材料电阻及各部件间的接触电阻等组成，与电池的结构、装配、尺寸等有关。电极有电流通过时，电极电势将偏离平衡的电极电势，这种现象被称作电极的极化。极化内阻是电池负极与正极发生电化学反应时由于极化而引起的内阻。准确地测量电池的内阻是研究电池生热率的重要前提之一。电池的内阻在不同的 SOC(State of Charge)状态下的阻值是有差异的，测量电池的内阻随 SOC 的变化值，并利用表达式表示内阻与 SOC 之间的关系，对计算电池的瞬态生热率有着重要作用。

本文采用《PHEVs 电池测试手册》中的混合脉冲功率特性阶跃法(HPPC)^[69]来研究随 SOC 变化的电池内阻。

电池内阻的测试原理如图 2.18 所示。给电池加载一个脉冲功率，电池的电压会立即响应，出现一个阶跃变化，HPPC 电池内阻测试原理就是利用了该特性。

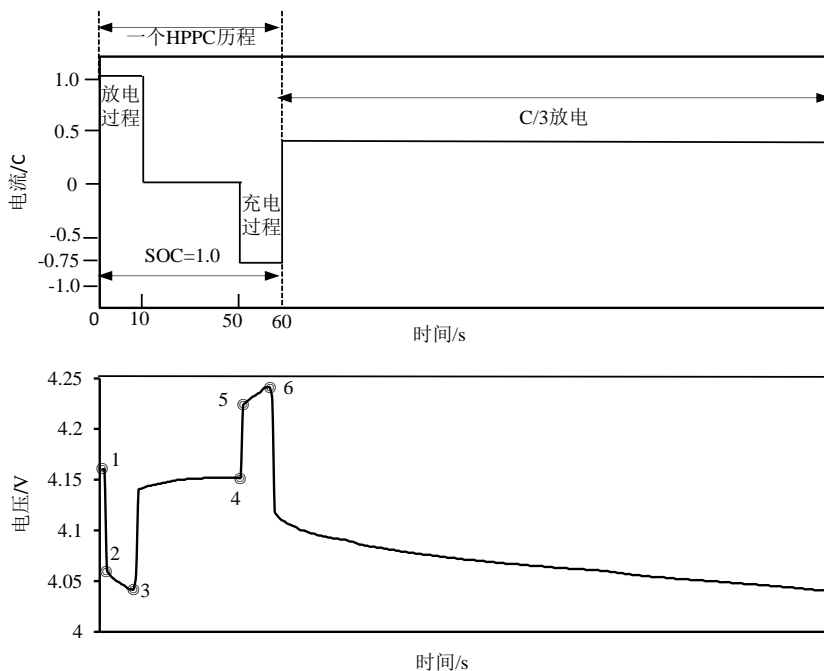


图 2.18 HPPC 测试原理图

如图 2.18 所示 1-2 段为放电瞬间电压的阶跃变化，4-5 段为充电时电压的阶跃变化，该电压的变化是由电池的欧姆内阻引起的。2-3 段和 5-6 段的电压变化缓慢，该电压的变化是由极化内阻引起的。由欧姆定律可知，已知脉冲充放电时电池的电流变化量及电压变化量就可以求出电池的欧姆内阻和极化内阻。欧姆内阻和极化内阻之和就是电池的总内阻。

锂离子电池内阻的测试步骤为：

- 1) 以标准的充电方法将电池充电至 SOC=100%，静置 1 小时；
- 2) 在 SOC=100% 状态下进行一次 HPPC 脉冲试验，记录该过程流过电池的电流和电池两端电压的变化，可以得到 SOC=100% 状态下计算电池的欧姆、极化内阻和总内阻的数据。
- 3) 以 C/3 倍率对电池进行放电，逐渐将 SOC 调整至 0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3、0.2、0.1、0 附近并静置 1h 后进行 HPPC 脉冲试验，这样就可以得到各个 SOC 状态下的内阻。

根据图 2.18 所示的混合脉冲功率特性阶跃法电池内阻测试原理及欧姆定律可以得出电池充电过程的欧姆内阻 R_{ohm}^c 、充电过程的极化内阻 R_p^c 、充电过程的总内阻 R_t^c 、放电过程的欧姆内阻 R_{ohm}^d 、放电过程的极化内阻 R_p^d 和放电过程的总内阻 R_t^d 的计算公式：

$$R_{ohm}^c = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} = \frac{U_5 - U_4}{\Delta I_c} \quad (2.2)$$

$$R_p^c = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c} = \frac{U_6 - U_5}{\Delta I_c} \quad (2.3)$$

$$R_t^c = R_{ohm}^c + R_p^c = \frac{U_6 - U_4}{\Delta I_c} \quad (2.4)$$

$$R_{ohm}^d = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} = \frac{U_1 - U_2}{\Delta I_d} \quad (2.5)$$

$$R_p^d = \frac{\Delta U_d}{\Delta I_d} = \frac{U_2 - U_3}{\Delta I_d} \quad (2.6)$$

$$R_t^d = R_{ohm}^d + R_p^d = \frac{U_1 - U_3}{\Delta I_d} \quad (2.7)$$

式中， ΔU_c 、 ΔU_d 、 ΔI_c 和 ΔI_d 分别表示电池脉冲充放电时的电压变化量和电流变化量； U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 和 U_6 分别对应图 2.18 中标记点的电压值；根据实验记录的数据计算得到电池充放电过程锂离子电池的欧姆、极化和总的内阻数据如表 2.4 所示。锂离子电池充放电过程欧姆、极化内阻及总内阻随 SOC 的变化如图 2.19 所示。

表 2.4 锂离子电池内阻

SOC		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
充 电	欧姆内阻(mΩ)	24.2	23.0	23.0	22.4	23.0	23.0	25.5	24.2	27.3	30.9	35.8
	极化内阻(mΩ)	18.8	18.8	20.0	20.6	20.6	17.0	15.2	18.2	18.8	27.3	60.6
	总内阻(mΩ)	43.0	41.8	43.0	43.0	43.6	40	40.6	42.4	46.1	58.2	96.4
放 电	欧姆内阻(mΩ)	36.8	36.4	35	34.1	35	34.5	36.4	36.4	40.5	47.7	56.8
	极化内阻(mΩ)	17.3	17.7	20	22.3	20.9	14.1	13.2	15.5	19.1	61.8	102.2
	总内阻(mΩ)	54.1	54.1	55	56.4	55.9	48.6	49.5	51.8	59.5	109.5	159.0

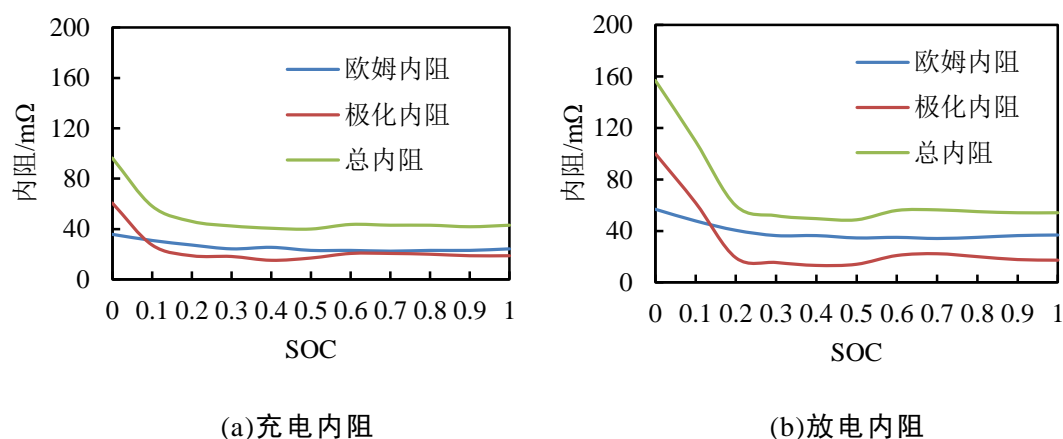


图 2.19 锂离子电池内阻特性曲线

从图 2.19 可以看出,充电内阻和放电内阻变化趋势基本一致,但 SOC 在 0~0.2 范围时,放电过程比充电过程的内阻大,这是因为在较低的 SOC 状态下,放电极化现象比充电极化现象严重,因此放电过程比充电过程极化内阻大。不管是充电内阻还是放电内阻,当 SOC 值在 0.2~1 范围时,内阻的值基本不变。当 SOC 值小于 0.2 时,随着 SOC 值的减小,电池内阻均迅速增大。极化内阻的变化比欧姆内阻变化明显,这是因为锂电池的极化内阻受 SOC 的影响较大。

2.3 锂离子电池表面热成像实验

使用热电偶监测充放电过程中电池的温度有一定的局限性,只能得到离散的温度点,不能很好地表征电池表面的温度分布。为了分析单体放电过程中的温度分布情况,使用市售 Fluke Tix520 热成像仪对单体表面温度进行图像记录。实验平台如图 2.20 所示,通过 Fluke 热成像仪记录放电过程中电池表面的温度分布情况,通过充放电可以获得电压、电流、温度等参数。

实验在环境温度为 13℃ 下进行。在每次实验前,将电池单体以电池制造商建议的标准充电方式将电池充满电,并静置 1h,直到电池温度与环境之间的热交换达到平衡。使用充放电设备将电池单体分别以 1C、2C、3C 和 5C 的放电倍率放电,直至单体电压降至 2.75V 时停止放电。



图 2.20 实验平台

图 2.21 为锂电池以 1C、2C、3C 和 5C 放电结束时的表面热成像图。从图 2.21 可以看出，放电倍率越大，放电结束时电池的表面温度越高。电池表面温度分布并不均匀，存在着温度梯度，展现出电池正极端温度高，负极温度低的趋势。这是因为 18650 锂离子电池正极有 PTC 安全装置，增大了该区域的内阻，因此发热量也相应较大。

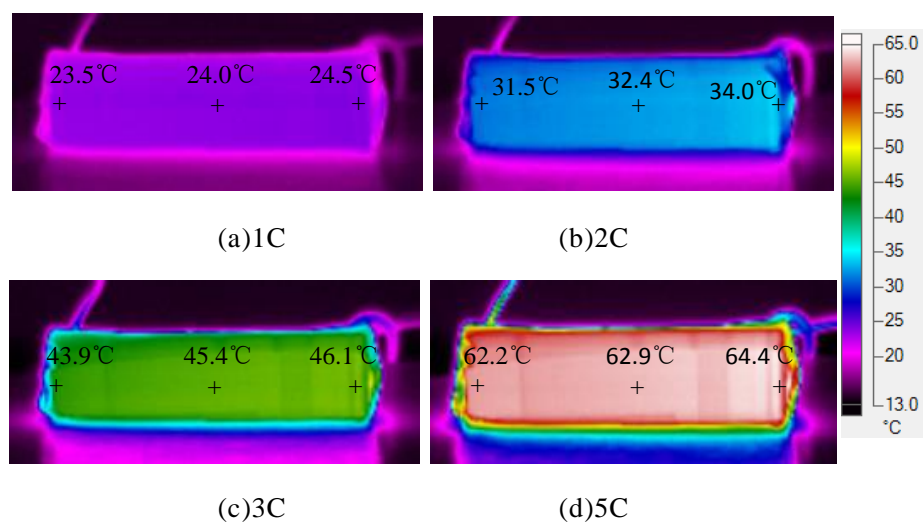


图 2.21 不同倍率放电结束时电池表面热成像图

为了了解不同放电深度(depth of discharge, DOD)电池表面的温度分布情况，这里使用热成像技术评估了电池高倍率放电下(5C)表面温度随放电深度的变化过程。电池被水平放置，正极端向右，负极端向左。开始放电前(DOD=0)，电池与环境热交换达到了平衡。实验结果如图 2.22 所示。可以看到 DOD=0.1 时，包裹电池帽的电池表面出现了高温区(近 27°C)，电池绕卷与电池帽的连接处出现了明显的温度梯度。这种现象是由电池盖的体积生热速率远比电池绕卷的体积生热速

率大引起。随着电池放电深度的增加，温度不断上升，电池正极端与负极端的温差呈现减小的趋势。这是因为电池内部存在热传导，这种导热作用可以减小电池不同位置的温度差异。放电结束时($V_d=2.75V$)，电池表面的温度差异已经变小，但电池的最大温度达到了 $65^{\circ}C$ 。相反地，整个放电过程电池负极端没有出现类似的温度梯度，这是因为负极端没有类似于 PTC 安全装置这种具有高内阻的部件。

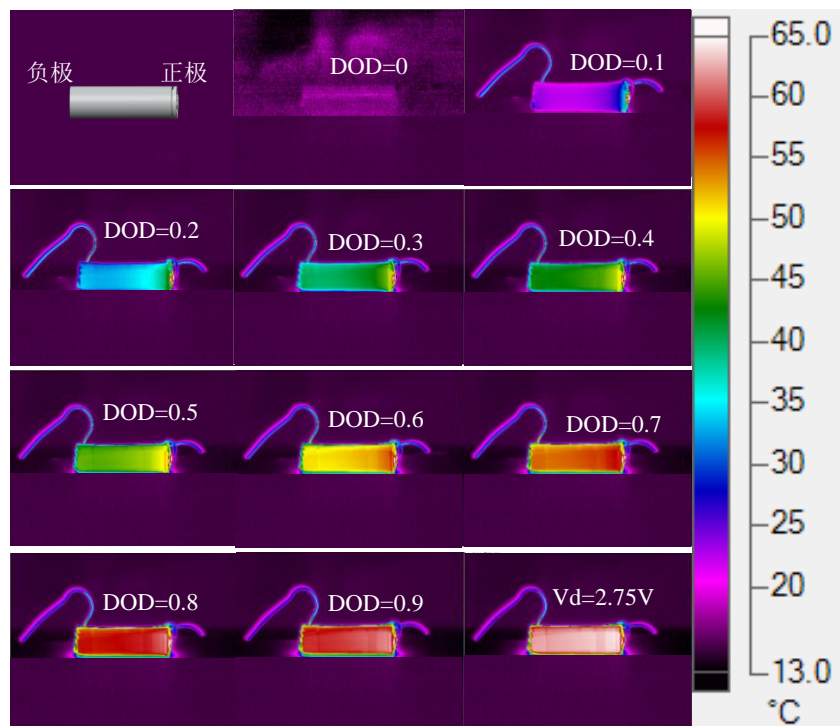


图 2.22 5C 放电过程电池表面热成像图

为了研究电池表面轴线方向温度随放电深度的变化，提取了不同放电倍率不同放电深度时，如图 2.23 所示标记线的温度数据。结果如图 2.24 所示，以电池温度作为电池位置的函数，电池表面的温度沿着轴线方向有着明显的变化。沿着轴线，越靠近电池正极的区域，观察到越明显的温度梯度。这意味着，电池帽较大的阻值产生的焦耳热足够引起这种温度梯度。随着放电倍率的增加，这种温度梯度越明显。这是由于放电倍率越高，电池帽的生热率与电池其它部分生热率差异将越大。

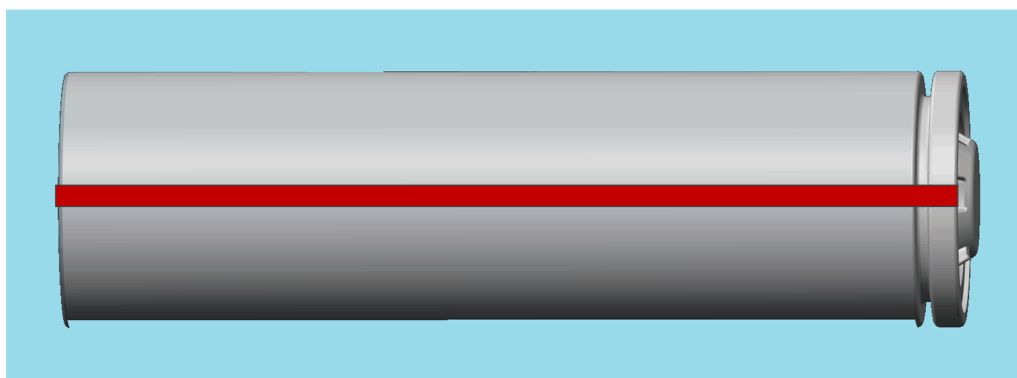


图 2.23 记录温度的位置标记线

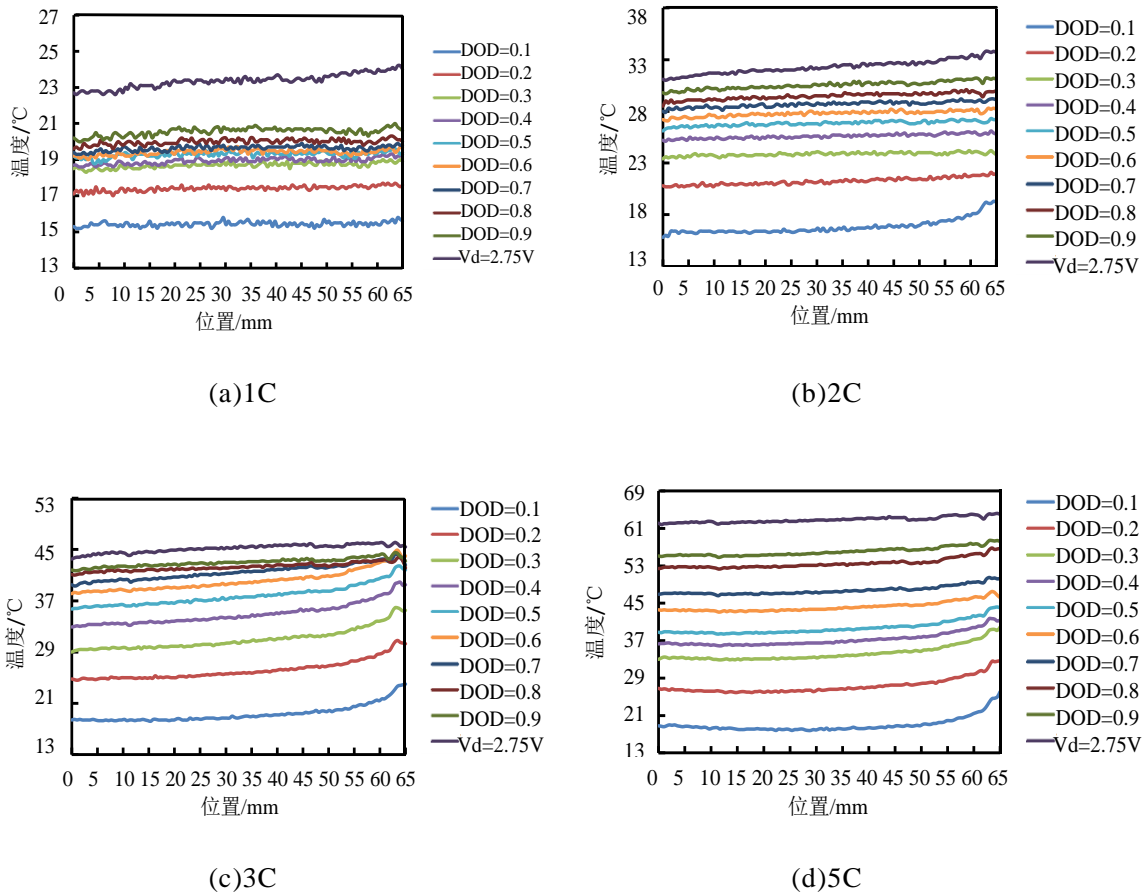


图 2.24 不同放电倍率及放电深度下电池表面轴线方向温度分布

此外，还研究了 1C、2C、3C 和 5C 放电倍率下电池的位置 1、2 和 3 处的温度演变过程，位置标记点如图 2.25 所示。如图 2.26 所示，随着放电深度的增加，电池表面的温度不断升高，位置 1、位置 2 和位置 3 的温度呈现出相似的变化规律。在放电初始阶段，不同放电倍率下，电池温度均快速上升。特别地，1C 放电过程出现较为平坦的温度变化段，这是因为电池的散热量与生热量逐渐趋于平衡。在 1C 放电末期，电池温度快速上升，而在 2C、3C 和 5C 的放电倍率下没有观察到类似现象。这是由于在低倍率放电下，电池的温升比大倍率放电时小，因此在相对较低的温度下放电末期随着 SOC 的减小内阻迅速增加，焦耳热也随之增加。

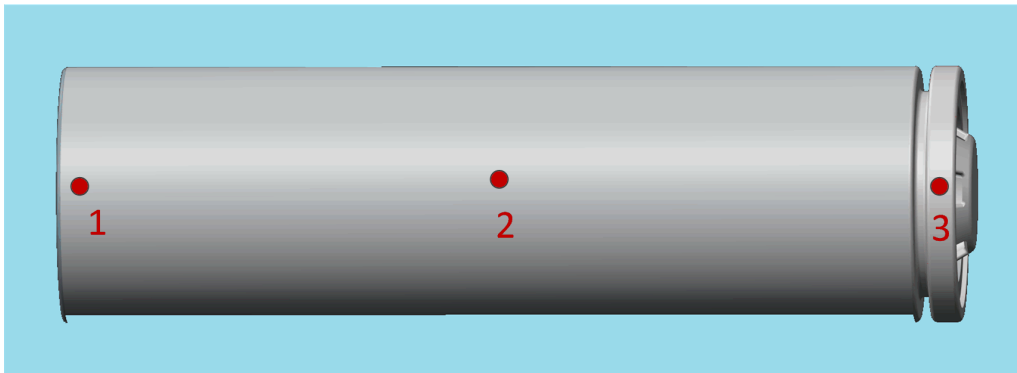


图 2.25 记录温度的位置标记点

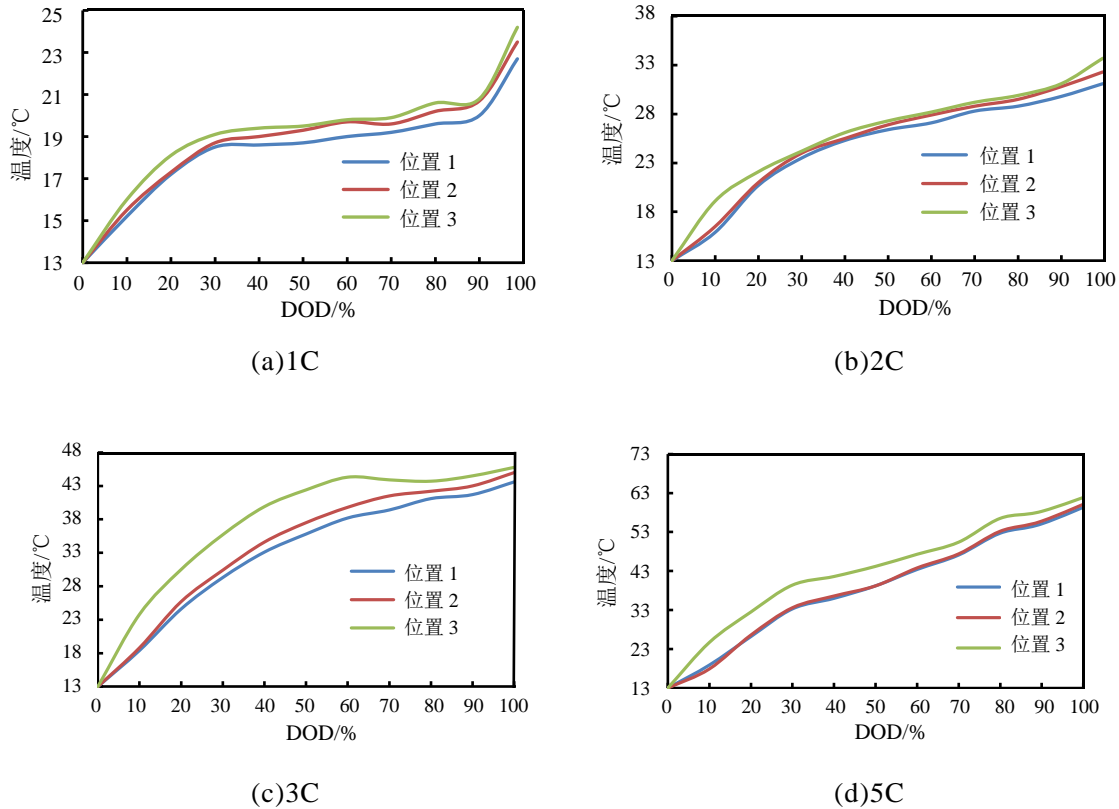


图 2.26 不同放电倍率下标记点位置温度随放电深度的变化曲线

对不同放电倍率下电池的温差随放电深度的变化过程也进行实验研究。如图 2.27 所示, 可以看到, 放电初始阶段, 电池表面温差不断增大, 达到波峰点后开始下降。在这一阶段, 放电倍率越大, 温差增大速率越大。小倍率放电时(1C,2C), 电池表面最大温差不超过 3°C 。然而, 大倍率放电下(3C,5C), 电池的最大温差均超过了 6°C 。随后, 温差在低倍率(1C,2C)放电与高倍率(3C,5C)呈现出不同的变化趋势。放电中后期, 倍率较小时(1C,2C), 电池温差迅速下降后保持在一个相对稳定的值(分别为 0.5°C , 1°C)。放电中后期, 倍率较大时(3C,5C), 电池表面温差随放电深度的增加而不断减小。造成这种差异的原因是, 相对于小倍率放电, 大倍率放电时, 电池帽的生热率比电池卷绕的大很多, 温升速率比其它部分大, 因此温差先增大, 随后由于内部导热与外界的换热增加, 电池帽温升速率变小, 与其它部分的温差逐渐减小。

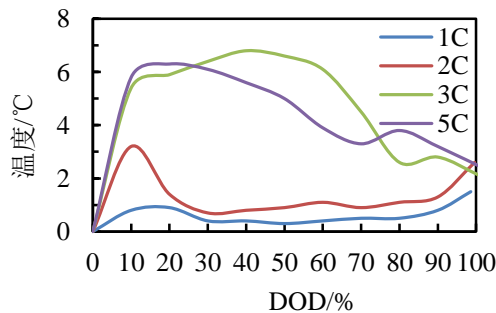


图 2.27 不同放电倍率下电池表面温差随放电深度的变化曲线

2.4 本章小结

首先,介绍了锂离子电池的分类及特点、基本结构和工作原理。然后,通过锂离子电池的充放电测试,分析了充放电过程锂离子电池的温升特性、电压特性和容量特性。并提出了基于恒流-恒压充电法的锂离子电池温升特点的阶段划分方法,并总结了各阶段的特点。最后,使用热成像仪分析了不同放电倍率和不同放电深度锂离子电池的温度分布规律。电池表面温度表现出正极温度高,负极温度低的分布特点。小倍率放电时(1C,2C),电池表面最大温差不超过 3°C 。大倍率放电下(3C,5C),电池的最大温差均超过 6°C 。温差在低倍率(1C,2C)放电工况与高倍率(3C,5C)放电工况呈现出不同的变化趋势。放电中后期,倍率较低时(1C,2C),电池温差迅速下降后保持在一个相对稳定的值(分别为 0.5°C , 1°C),倍率较高时(3C,5C),电池表面温差随放电深度不断减小。

第 3 章 锂离子电池单体生热传热建模与仿真分析

动力锂离子电池在大倍率充放电过程中会产生大量的热，应用时需要考虑电池的散热设计问题，特别是大倍率放电工况，产热量很大，对其自身的性能和安全性影响均很大。预测锂离子电池在放电过程中的热行为对电池热管理系统的设计至关重要。建立电池单体热模型可以有效地预测不同工况下电池内部和外部的温度场，从而为电池组散热设计提供基础条件。

本章以 Bernardi 生热理论为基础，考虑电池帽、正极引线、负极引线和电池绕卷的焦耳热，建立 18650 三元锂电池的多部件热模型。该模型通过模拟电池各区的生热来预测电池放电过程中的温度。利用该模型预测电池在不同放电条件和对流换热条件下的瞬态热行为及温度分布特征。

3.1 锂离子电池生热机理与传热理论

3.1.1 锂离子电池生热机理

圆柱形锂离子电池结构复杂，其生热也是一个复杂的过程。根据研究，电池的生热通常可以分为四个部分：化学反应热 Q_r ，极化热 Q_p ，欧姆热 Q_j 和由于充放电、自放电以及电解质分解的副反应热 Q_s ^[70]，其表达式为：

$$Q = Q_r + Q_p + Q_j + Q_s \quad (3.1)$$

反应热为锂离子在嵌入和脱出过程中产生的热量，充电时为吸热，放电时为放热，其计算公式为：

$$Q_a = \frac{nmQ_e I}{MF} \quad (3.2)$$

式中， n 为摩尔数； m 为电极质量； Q_e 为电化学反应热，J； F 为法拉第常数，值为 96484.5C/mol； I 为充放电电流，A； M 为摩尔质量，g/mol。

电池在充放电过程中，会出现电极偏离平衡电极电位的极化现象，电池的极化会产生分压，这部分分压产生的热量称为极化热。极化热在充电和放电过程均为正。

欧姆热是由电池的欧姆内阻产生的，只要有电流通过电池就会产生欧姆热。欧姆热是标量，无论是充电过程还是放电过程，欧姆热均为正值，是不可逆热。

锂离子电池在充放电过程中，伴随着化学反应过程，由电解液分解反应和电极分解等引起的产热称为副反应热。在正常充放电条件下，副反应热占总热量很小的一部分，通常可以忽略不计。因此电池的生热计算又可表示为：

$$Q = \Delta G + T\Delta S + W_{el} \quad (3.3)$$

$$\Delta G = -nFE_{eq} \quad (3.4)$$

$$\Delta S = -nF \frac{dE_{eq}}{dT} \quad (3.5)$$

$$W_{eq} = -nFE \quad (3.6)$$

$$Q = I \left[(E_{eq} - E) + T \frac{dE_{eq}}{dT} \right] \quad (3.7)$$

式中, I 为电流, A; G 为吉布斯自由能, J; ΔS 为电池内部的熵变化; W_{eq} 为外界对于电池所做的功, J; n 为参与化学反应的电子转移个数。式(3.7)就是经典的Bernardi生热速率计算模型, 第一项包括焦耳热和极化热, 第二项为反应热。当电池放电倍率不小于1C时, 反应热占总生热量很小的一部分, 通常可忽略不计^[71]。电池焦耳热可以通过等效的欧姆内阻 R_j 和极化内阻 R_p 计算, 其方程为:

$$q = I^2 R_j + I^2 R_p \quad (3.8)$$

3.1.2 锂离子电池传热理论

锂离子电池的传热分析是建立电池热模型的基础, 对电池的散热设计至关重要。锂离子电池的传热分析主要包括电池的生热、传热和散热过程的分析。电池的生热已经讨论过, 根据传热学原理, 电池的传热方式主要是热传导、热辐射和热对流^[72]。

(1) 热传导

对于圆柱形锂电池, 内部的生热主要来源是电池内核、正负极引线、PTC装置等。内部的传热方式主要是热传导, 电池内部的对流换热和辐射非常小, 可以忽略不计。电极、电解液和隔膜等都是热导体^[73]。热传导遵守傅立叶导热定律:

$$q_f = -K_f \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.9)$$

式中, q_f 热流密度, J/(m²·s); K_f 为导热系数, W/(m·°C); $\frac{\partial T}{\partial n}$ 表示等温面法线方向的温度梯度, °C/m。

(2) 热辐射

只要物体的温度高于绝对零度就会存在热辐射, 物体的温度越高。辐射能量越大。电池的表面会向周围的低温物体辐射能量, 高温物体也会向电池辐射能量。对于锂离子电池单体的辐射换热可以用Stefan-Boltzmann^[74]公式描述。如式(3.10)所示。

$$Q_w = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_0^4) \quad (3.10)$$

式中, Q_w 为辐射的热量, J; ε 为热辐射率; A 为辐射散热面积, m²; T 为电池表面的温度, °C; T_0 为外界的环境温度, °C。

(3) 对流换热

当流体流过固体的表面时,会发生热量的交换,该过程称为对流换热。电池表面与空气间即为对流换热。对流换热符合牛顿冷却公式:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T - T_{\infty}) \quad (3.11)$$

式中, λ 是物体的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_{∞} 为外界流体温度;其中, h 表征固体与流体换热能力的一个特征量,它与固体的表面形状、流体的性质、流体流速和固体与流体间的温差密切相关。

3.1.3 建立单体热模型的基本假设

锂离子电池的生热和传热是一个复杂的过程,建立电池单体热模型需要进行一定的简化,但又必须保证模型的精度,需要根据电池具体的特点进行一定的假设。以下根据本文的研究对象进行了5项基本假设。

(1)假设电池单体简化成的几个部分:电池绕卷(内芯)、正极引线、负极引线、电池帽和外壳的材料的热物性参数恒定不变且均匀分布。

(2)假设不考虑电池热辐射。动力锂离子电池成组后与周围的电池温度较为接近,通过辐射换热的量占总的换热量的比例很小,因此可以忽略不计。

(3)假设电池绕卷为实体且与外壳不存在间隙,即不考虑电池内部对流换热。

(4)假设电池绕卷、正极引线、负极引线和电池帽的产热均匀分布,在同一电流下,除电池绕卷的生热率随电池放电深度而变化外,其它热源均为恒定值。

(5)假设仿真过程中电池的各部分材料的热物性参数均为恒定值,不随温度的变化而变化。

3.2 电池单体热模型的建立

3.2.1 电池单体热平衡方程

(1)控制方程

从3.1.2分析可知,电池传热方式主要有热传导、热对流和热辐射,通常辐射传热可忽略不计。电池生热散热过程是一个典型的三维、内热源的非稳态导热过程,可以利用三维常物性、非稳态、第三类边界条件下的导热微分方程进行描述。电池内部主要是热传导过程,其热平衡方程可用傅里叶导热微分方程描述^[75]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (3.12)$$

式中, T 为电池的温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s ; ρ 、 C 和 λ 分别为电池的密度,比热容和热导率,单位分别为 kg/m^3 、 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; q_v 为电池的生热速率, W ; r 为电池的径向, φ 为电池的周向, z 为电池的轴向。

(2)第三类边界条件

$$\begin{cases} r=0, \frac{\partial T}{\partial r}=0; r=r_0, -\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r}=h_r(T-T_\infty) \\ z=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0; z=z_0, -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}=h_z(T-T_\infty) \end{cases} \quad (3.13)$$

式中， r_0 为电池的半径，m； z_0 为电池中心到端面的长度，m； h_r 、 h_z 分别为电池圆柱面和端面的对流传热系数。

(3)初始条件

$$t=0, T(r, \varphi, z, t)=T_0 \quad (3.14)$$

3.2.2 电池单体几何模型

为了建立电池单体准确的三维模型，将电池进行了拆解，如图 3.1(c)所示。通过测量获得电池内部各部件尺寸，然后对部分结构进行简化后建立了如图 3.1(b)所示的三维(three dimensional, 3D)几何模型。本文将电池简化为五个部分：电池帽、正极引线、电池绕卷、负极引线及电池外壳。

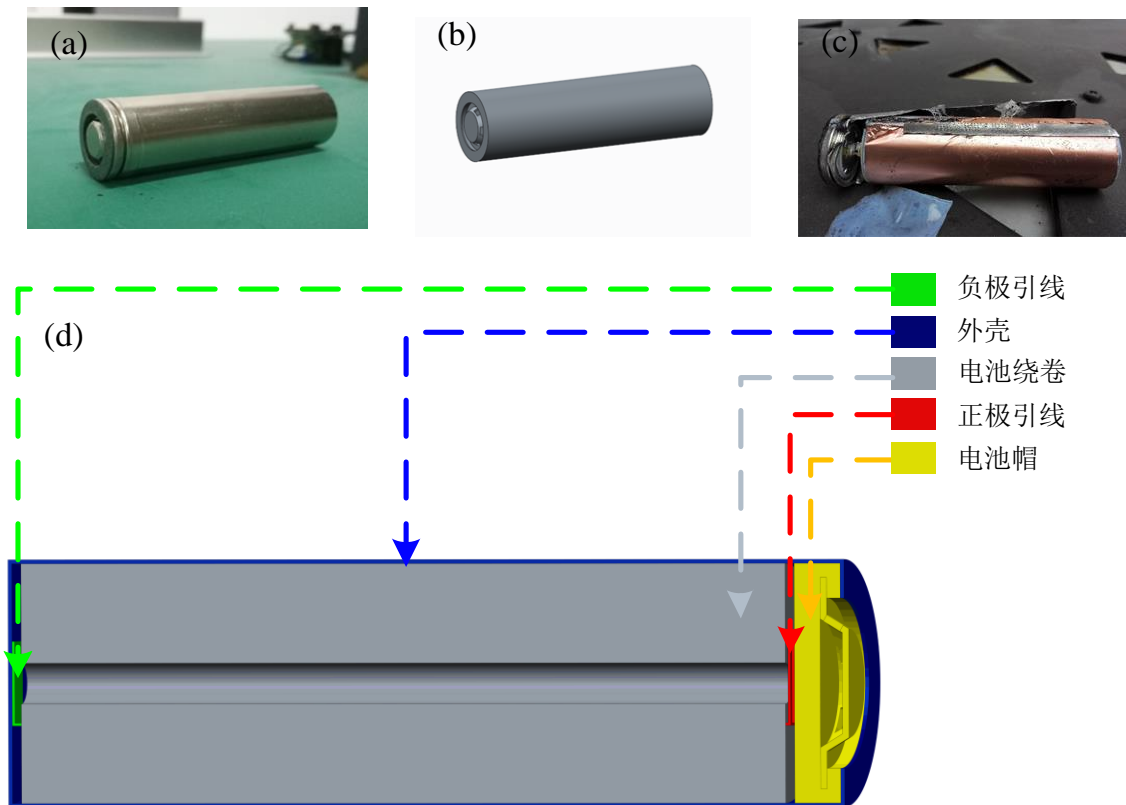


图 3.1 电池几何模型：(a)18650 电池外观；(b)电池 3D 模型；(c)电池的内部结构拆解；(d)电池模型内部结构

3.2.3 电池单体生热率计算

本文采用分区的方法对电池模型进行了适当的简化。电池内部各部分结构存在较大的生热速率差异，如果对整个电池直接划分成一个区域进行仿真容易带来较大误差。因此，本文采用分区建模的方法，并提出了电池多部件生热模型。

电池的内阻分类方法如图 3.2 所示。根据以上建立的分区 3D 模型，将电池内部生热划分为四个区域：电池帽、正极引线、电池绕卷和负极引线，即：电池帽欧姆内阻 R_{cap} 引起的焦耳热；正极引线欧姆内阻 R_{pos} 引起的焦耳热；电池绕卷的欧姆内阻 R_{jr_ohm} 引起的焦耳热和极化内阻 R_{jr_p} 引起的极化热；负极引线欧姆内阻 R_{neg} 引起的焦耳热。因此，电池总的生热速率方程可表示为：

$$q_v = q_{cap} + q_{pos} + q_{jelly_roll} + q_{neg} \quad (3.15)$$

$$q_{jelly_roll} = q_{jr_ohm} + q_{jr_p} \quad (3.16)$$

$$q_v = I^2 R_{cap} + I^2 R_{pos} + I^2 R_{jr_ohm} + I^2 R_{jr_p} + I^2 R_{neg} \quad (3.17)$$

式中， q_{jelly_roll} 为电池绕卷总的生热率，W。

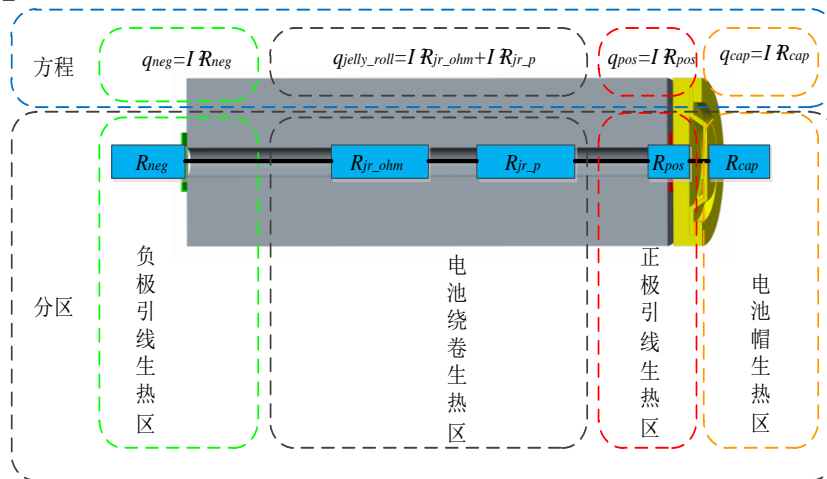


图 3.2 分区热模型

根据图 3.2 的分区原理，可以得到电池内部各区之间及电池与环境之间的等效传热模型(如图 3.3 所示， R_{z1} 、 R_{z2} 和 R_{z3} 代表轴向等效导热热阻， R_{r1} 、 R_{r2} 和 R_{r3} 代表径向等效导热热阻， R_{c1} 和 R_{c2} 代表与外界等效对流传热热阻)，这样便建立了分区热模型(包括生热与传热模型)。

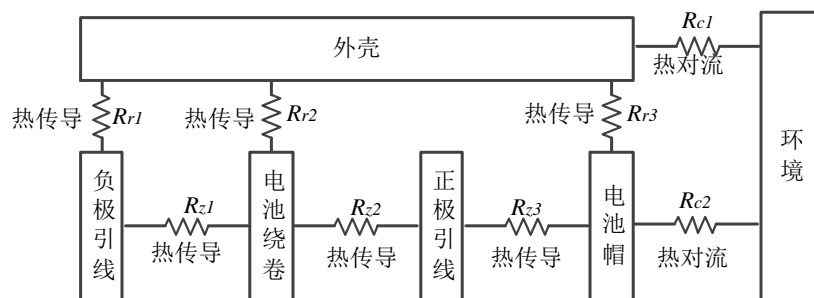


图 3.3 热网络模型

3.2.4 电池单体仿真模型相关参数

在建立电池的仿真模型之前，必须要知道各部件的热物性参数、质量和内阻等。部分为已知参数，其他参数通过实验和理论计算获得。

(1) 内阻获取

电池放电过程总的欧姆内阻 R_{ohm} 和极化内阻 R_p 通过 HPPC 实验获得，电池总内阻与各部件内阻的关系可表示为式(3.18)。电池帽的内阻 R_{cap} 通过实验测得，即通过放电实验，测得流经电池帽的电流及两端电压，然后通过式(3.19)计算得到，实验原理如图 3.4 所示。正、负极引线的材料分别为铝和镍，其内阻 R_{pos} 、 R_{neg} 通过式(3.20)计算得到，电池各部分内阻的结果见表 3.1。

$$R_{ohm} + R_p = R_{cap} + R_{pos} + R_{jr_ohm} + R_{jr_p} + R_{neg} \quad (3.18)$$

$$R_{cap} = \frac{\Delta V}{I_d} \quad (3.19)$$

$$R_i = \rho_i \frac{l_i}{S_i} \quad (3.20)$$

式中， ρ_i 为相应材料的电阻率， Ω/m ； l_i 为长度，m； S_i 为截面积， m^2 。

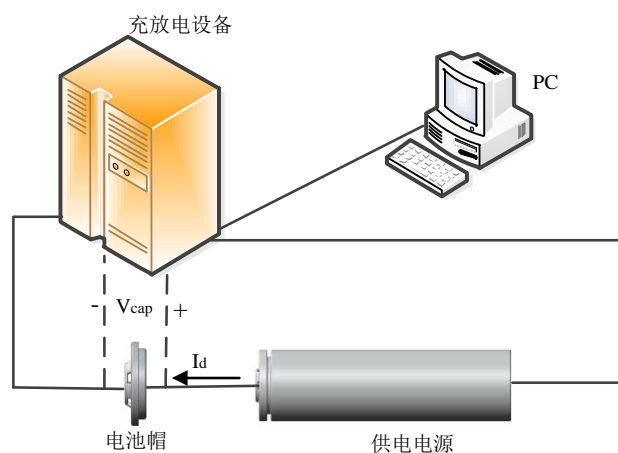


图 3.4 电池帽内阻测试原理图

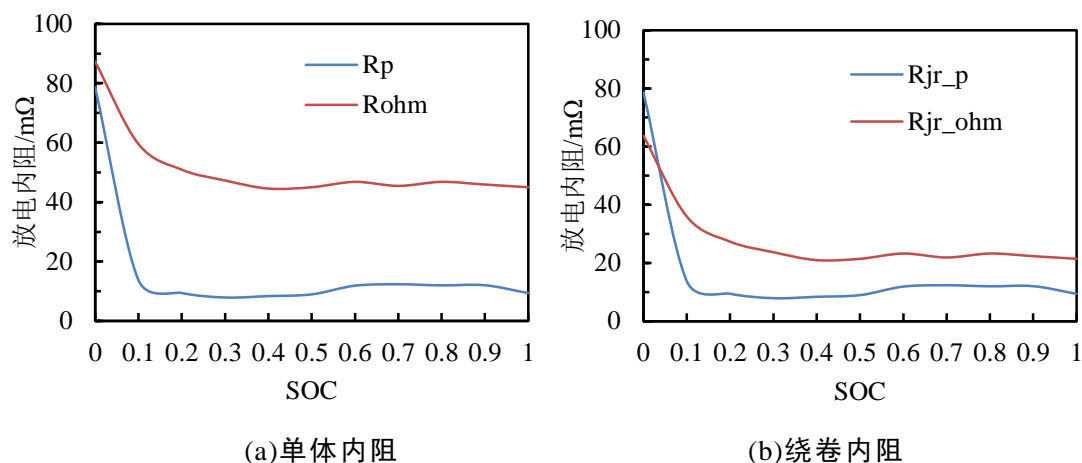


图 3.5 电池内阻随 SOC 的变化

表 3.1 各部件内阻

内阻	值
R_{ohm}, R_p	见图 3.5(a)
R_{cap}	22.5mΩ
R_{pos}	0.442mΩ
R_{jr_ohm}, R_{jr_p}	见图 3.5(b)
R_{neg}	0.633mΩ

(2) 物性参数

电池绕卷由正极材料、隔膜、负极材料及集流体等各层材料卷绕而成，其周向和径向的导热率并不相同。绕卷的比热容和热导率计算方法可参考文献^[76]，比热容的计算式为：

$$c_{jr} = \frac{\sum m_i c_i}{m_{jr}} \quad (3.21)$$

式中， m_i 和 c_i 表示绕卷各层的质量和比热容； m_{jr} 和 c_{jr} 表示绕卷的质量和比热容。此外，电池绕卷轴向和周向的热导率不同于径向，轴向和周向热导率的计算式为：

$$\lambda_z = \lambda_\varphi = \sum_i \frac{\lambda_i \delta_i}{r} \quad (3.22)$$

式中， r 表示电池绕卷的半径，m； δ_i 表示各层的厚度，m； λ_i 表示各层导热率，W/(m·℃)。电池绕卷的径向导热率计算式为：

$$\lambda_r = \frac{r}{\sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (3.23)$$

电池绕卷的密度通过密度计算公式(3.24)进行计算。

$$\rho_{jr} = \frac{m_{jr}}{V_{jr}} \quad (3.24)$$

式中， m_{jr} 为电池绕卷的质量，kg； V_{jr} 为绕卷的体积，m³。

(3) 网格划分与初始工况设定

对模型进行结构体网格划分，相对于非结构体网格，结构体网格在保证网格质量的前提下，可减少网格的数量，降低计算量。如图 3.6 所示为电池的网格模型，网格单元数 345296，节点数 309782。

电池绕卷的内阻是随着 SOC 变化而改变的，因此生热率也是变化的，应用仿真软件中的用户自定义功能定义电池绕卷随 SOC 而变化的生热率。其他各部件的内阻不随 SOC 而改变，生热率为恒定值。固体与空气的对流换热系数 h 的取值范围一般在 $5\text{W m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1} \sim 25\text{W m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 之间，考虑到电池在大空间的环境下实验，在使用热电偶采集温度实验中，本文取 $h=15\text{W m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ^[25]。在使用热成像仪记录电

池表面温度实验中，需要在电池表面缠绕上一圈黑色的胶带，对流换热系数有所降低，在此取 $h=10\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

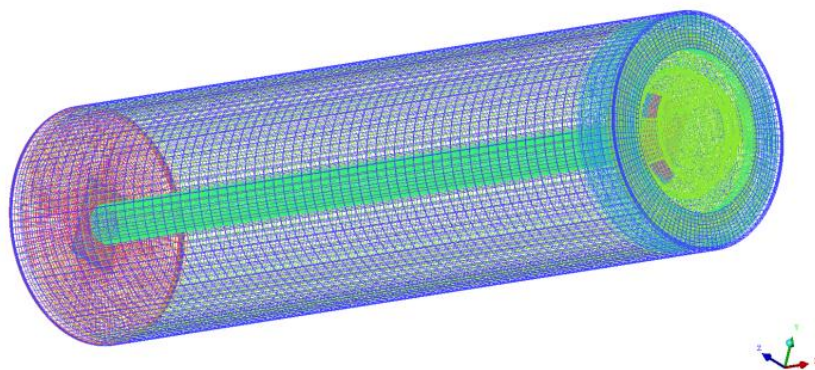


图 3.6 电池网格

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 模型验证

根据以上理论与参数建立的三维有限元模型，模拟环境温度在 13°C 以及自然对流边界条件下 1C、2C 和 3C 放电时电池表面温度分布。实验采用单体充放电机 (BTS 20) 配备的热电偶来检测电池表面的温升。使用热成像仪记录电池表面温度分布图。

图 3.7 展示了电池表面平均温升数据的仿真值与实验值比较。可以发现，由于受到自然散热的影响，电池表面温度上升速率逐渐减小。在放电末期，电池表面温度快速上升。仿真结果与实验结果吻合良好。另外，如图 3.8~图 3.10 所示，放电结束时，电池表面温度分布仿真结果与实验结果表现出良好的一致性，表明所建模型的准确性。

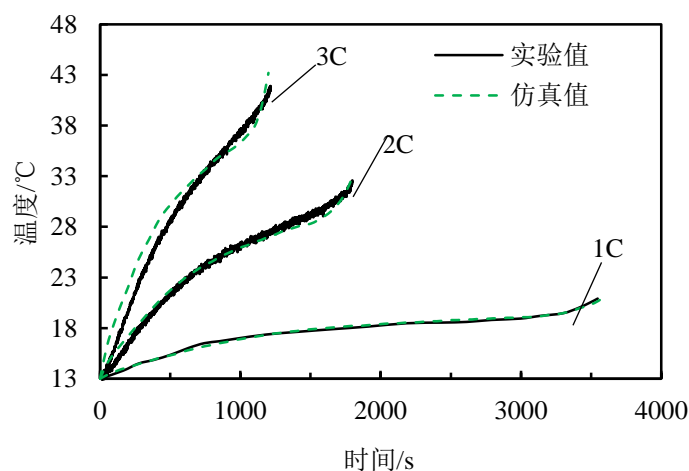


图 3.7 电池表面温度仿真结果与实验结果的对比曲线

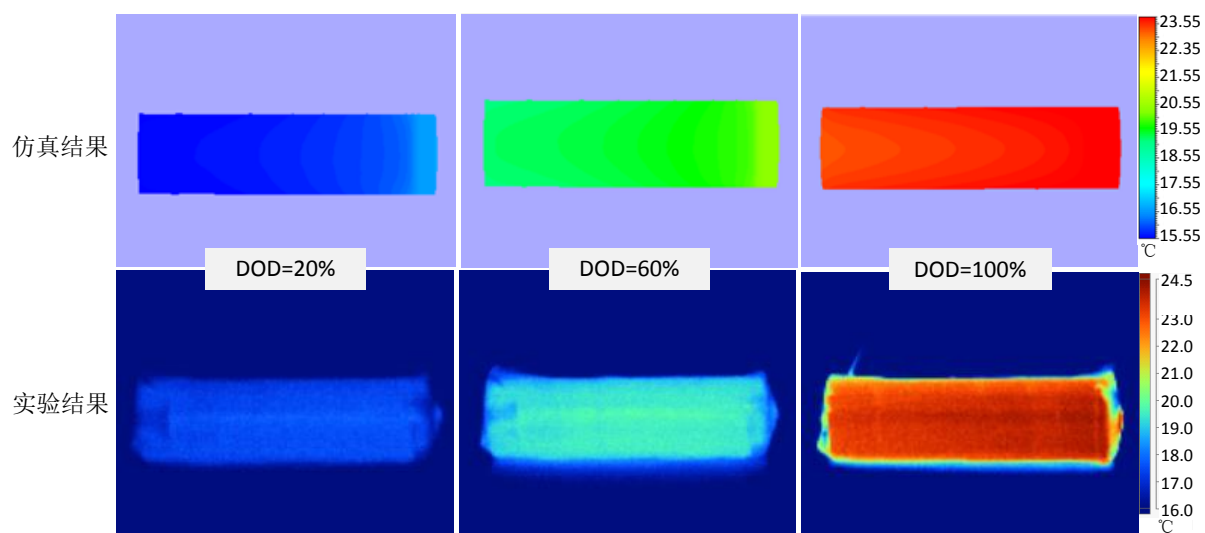


图 3.8 1C 放电条件下电池表面温度分布仿真与实验对比

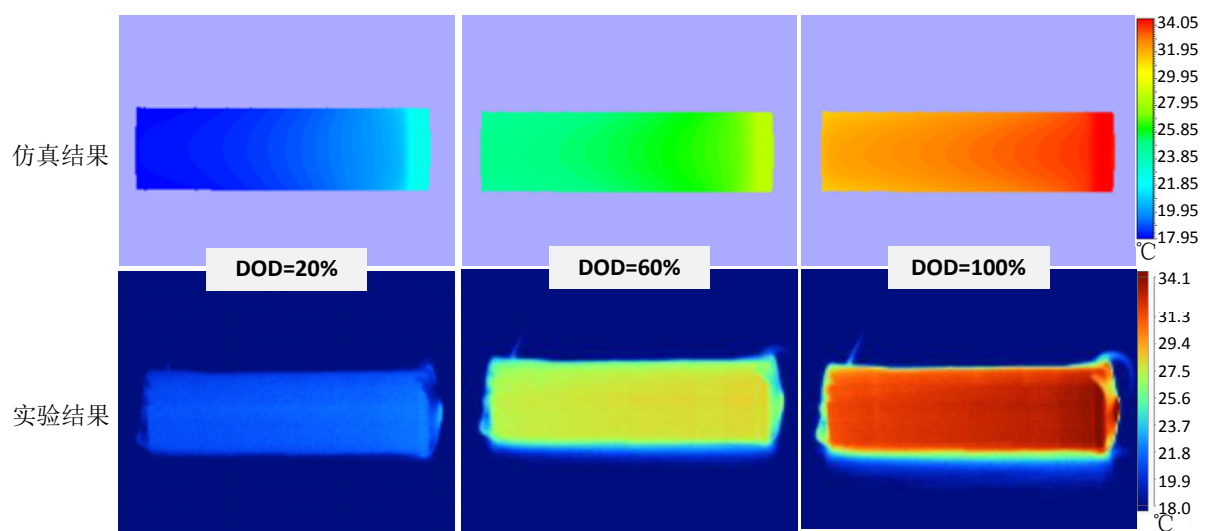


图 3.9 2C 放电条件下电池表面温度分布仿真与实验对比

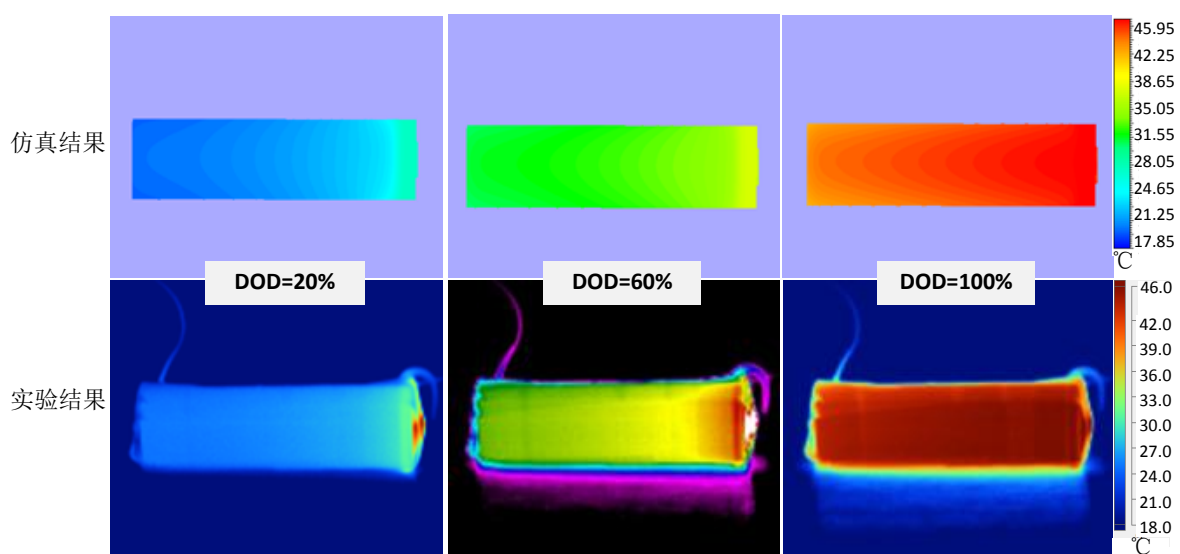


图 3.10 3C 放电条件下电池表面温度分布仿真与实验对比

3.3.2 各部件温升特性分析

如图 3.11 为 1C 和 2C 放电倍率下电池各部件平均温度随放电时间的变化过程。各部件的平均温度随着放电时间的增加而不断上升。从图中可以明显地看到，平均温升并不是呈线性变化的。这是因为，电池的生热量是随放电深度的变化而变化的。另外一个因素是，电池与外界存在着热量交换，并且热交换量是随放电深度不断变化的。另外，电池帽和正极引线的平均温升明显高于电池绕卷、负极引线和外壳的平均温升，电池绕卷、负极引线和外壳的平均温升趋势基本相同。相比 1C 放电过程，2C 放电过程各部件的温升速率更大，且最大温度达到了 40℃，比 1C 大 18.5℃。

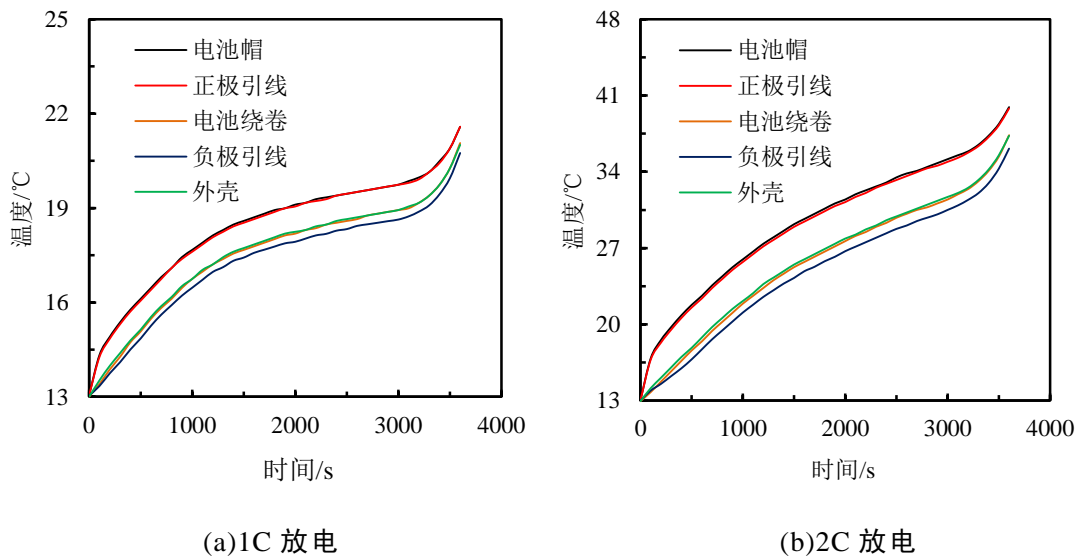


图 3.11 放电过程电池各部件平均温升曲线

3.3.3 不同对流工况下电池单体温度场瞬态分析

通过以上的分析，电池单体在放电过程中伴随着热量的释放与自身温度的上升，良好的散热条件可以控制电池的温度，因此研究电池单体的散热影响因素对后续电池组的散热结构与改进有着重要的意义。固体的自然对流换热系数 h 范围为 $5\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}\sim 25\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ ，强制对流换热系数的范围为 $15\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}\sim 250\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ [76]。以下选取绝热工况(即 $h=0\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$)，自然对流工况 $h=5\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $h=15\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $h=25\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ ，强制对流工况 $h=100\text{W m}^{-2}\text{·}^\circ\text{C}^{-1}$ ，并使用数值方法分析了室温下(25℃)以 2C 放电时这些工况下电池的瞬态温度特性。如图 3.12 为不同对流换热工况下电池的表面平均温度随放电时间的变化过程。从图 3.12 可以看出，对流换热的强弱对电池的温升影响特别明显。在绝热条件下，整个放电过程除了放电末期由内阻的急剧增大而温升加剧外，电池的温度基本为线性变化，最大温度达到了 69℃。随着对流的强化，电池的温度得到了有效的控制。在强制对流工况下，电池从放电开始至 300s，温度上升到 27.5℃；300s~1500s 这段时间

电池的温度基本不变，1500S 之后温度又开始上升。在强化对流情况下，电池的最高温度下降至 29.9°C ，绝对温升只有 4.9°C 。

电池表面温度场如图 3.13 所示，在绝热工况下，电池的温度场随着时间的变化非常明显，可以看出电池正极端温度较高，整个表面的温度分布并不均匀。随着对流换热系数的提高，电池的温度场变化逐渐变慢，不均匀性不断减小。在强制对流工况下，电池的温度场基本不变，表面温度分布较为均匀。可见，强化换热可以有效地限制电池的温度升高及降低电池单体的表面温差。

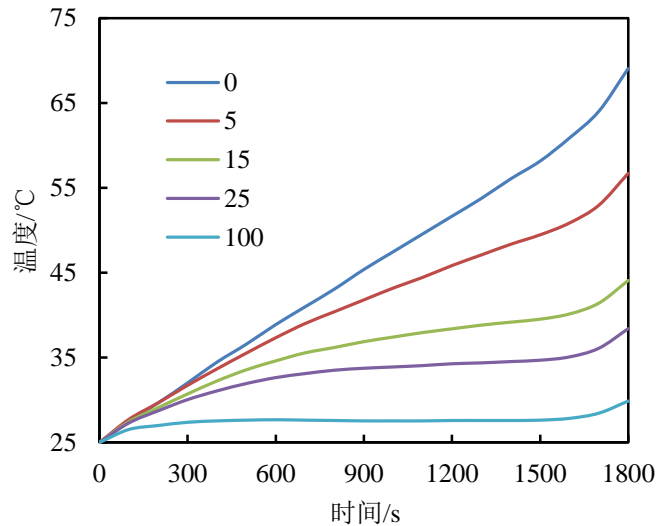


图 3.12 2C 放电不同对流换热系数电池表面平均温度随时间的变化

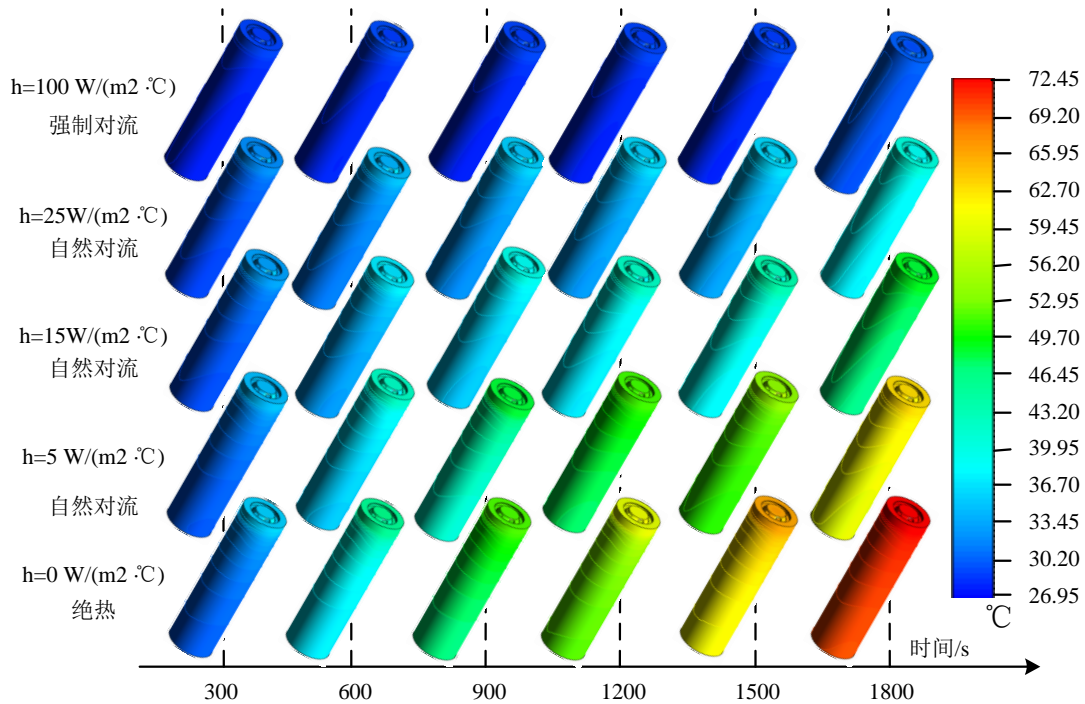


图 3.13 不同对流工况下电池表面瞬态温度场

3.4 本章小结

本章分析了锂离子电池的生热和传热机理,并根据其结构特点,从几何分区、内阻分区、生热分区和传热分区方面考虑建立了电池单体的多部件热模型。在基于该模型模拟了电池单体的温升特性及温度场,通过实验方法验证了热模型的准确性。利用该模型进行数值仿真,分析了 1C 和 2C 放电倍率下电池各部件平均温度特性和不同对流工况下 2C 放电时的温升特性及温度场,为电池组的散热结构设计打下基础。主要结论有:

(1)在 1C、2C 和 3C 放电工况下,热模型仿真结果与实验结果吻合良好,验证了考虑电池帽、正极引线、电池绕卷和负极引线多热源的分區建模方法的准确性。

(2)1C 和 2C 放电倍率下,电池帽和正极引线的平均温升明显高于电池绕卷、负极引线和外壳的平均温升,电池绕卷、负极引线和外壳的平均温升趋势基本相同。相比 1C 放电过程,2C 放电过程各部件的温升速率更大,且最大温度达到了 40℃,比 1C 大 18.5℃。

(3)强化对流换热可以有效改善电池的散热性能。2C 放电工况,在绝热条件下,电池最大温度达到了 69℃,而强制对流工况 $h=100\text{W m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$, 电池的最高温度下降至 29.9℃,绝对温升只有 4.9℃。

第 4 章 电池组温度场试验研究

锂离子电池单体不能满足车辆的电压和能量需求，因此需要将多个电池单体进行串并联，组成动力电池组，以满足电动汽车对电压和容量的需求。电池单体成组后，充放电过程散热环境与单体存在差异，因此其温度特性与单体存在着差异。研究动力电池组在充放电过程中的温度特性是设计电池散热系统的基础。

4.1 试验平台的搭建

4.1.1 试验对象

本章研究的动力电池组是通过 512 个 18650 三元锂离子动力电池以 64P8S(64 个并联成一个模块后，8 个模块再串联起来)方式得到。电池的串并联是通过镍带实现，镍带与电池间的焊接方式是激光焊，焊接牢固，满足试验要求。如图 4.1 为实验所用到的动力电池组，电池组的基本参数如表 4.1 所示。该电池组的散热方式是自然冷却。



图 4.1 动力电池组

表 4.1 动力电池组参数

项目	参数
标称电压	30V
最大电流	422A
能量容量	4.17kWh
放电峰值功率	12.5kW
电池单体总数	512(64P8S)
冷却方式	自然冷却

4.1.2 试验设备

为了测试电池组充放电过程中的温升特性，需要的设备有整包充放电机、电压巡检仪、热成像仪。试验用到的动力电池整包充放电机如图 4.2 所示，型号为：BTS2000-750V/2*200A/300kW，其参数规格如表 4.2 所示。电池组充放电机有较宽的额定电压输出范围：30V~750V 范围的直流电压，满足试验要求。额定输出电流为-200A~+200A。



图 4.2 动力电池组综合测试系统

表 4.2 动力电池组综合测试系统参数

项目	参数
规格型号	BTS2000-750V/2*200A/300kW
额定输入电压	3*380V+N+PE
额定输出电压	30V~750V DC
额定输出电流	2(-200A~+200A)

BTS2000 系列充放电测试设备配备了便捷的上位机软件，可以方便用于与充放电机的交互。以下从两个方面介绍测试设备的软件功能。

(1) 网络连接拓扑图

BTS2000 系列充放电测试设备的网络结构分为两层：以太网和 CAN 总线网络。网络连接拓扑图如图 4.3 所示。上层通讯采用以太网，用于工艺控制器与上位机之间的数据交换，以及工艺控制器从单体巡检设备获取单体电压、单体温度等数据；下层通讯采用 CAN 通讯，每个工艺控制器具备 2 个 CAN 通讯接口：1 个用于设备内部并联协调控制等(不对用户开放)，另一个 CAN 接口开放给用户，用于对接 BMS 等 CAN 通讯设备使用。

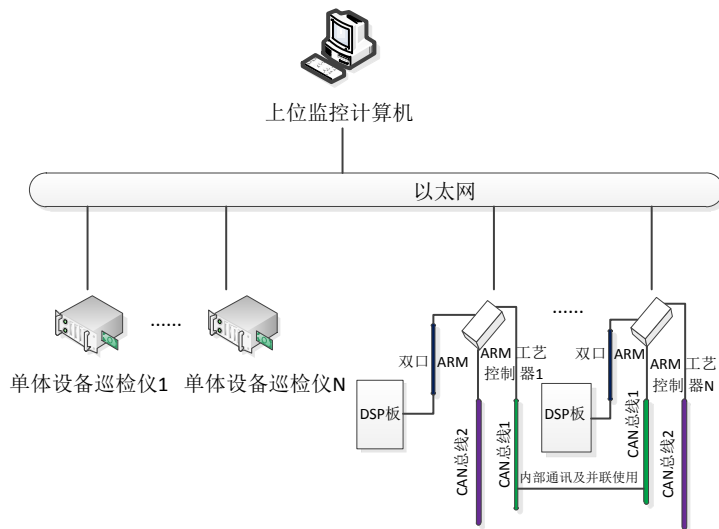


图 4.3 网络连接拓扑图

(2) 功能概述

BTS2000 系列充放电测试设备上位机监控软件包括四个方面的功能：设备监控、设备管理、工艺管理类和记录管理。设备管理包括设备的主通道和辅助通道的实时参数信息显示、设备的启停控制管理和工艺上载下载管理等；设备管理包括设备的参数设置、设备的添加删除管理以及辅助通道的设置等；工艺管理包括工艺文件的编辑，修改以及模拟工况的工艺转换等。记录管理包括记录查询、记录查看、曲线显示和数据导出等。

另一个设备是电压巡检仪，型号是 XNY-YJY001。电池组在充放电温升试验中，需要检测多点温度，及监控多个并联模块的电压。XNY-YJY001 电压巡检仪均有 36 路温度监测和 36 路电压巡检功能，可以配合 BTS2000 进行充放电测试，用于监测单体电池电压、采集点温度，如图 4.4 为电压巡检仪。



图 4.4 电压巡检仪

虽然使用电压巡检仪可以监测电池组的点温度,但不能表征电池组的温度场。Tix 520 热成像仪可以记录电池组的温度场,其具体参数在第二章已经介绍过,此处不再赘述。

4.1.3 测温点布置

为了对电池组的温度场有较为准确的描述,布置了 36 个测温点,如图 4.5 所示。每个电池模块布置 4 个测温点,分别布置于电池模块的中心、顶部、底部及侧部位置。电池组正负极汇流排在中部和顶部分别布置了测温点。电池组测温点布置的实物如图 4.6 所示。电池组的试验平台如图 4.7 所示。

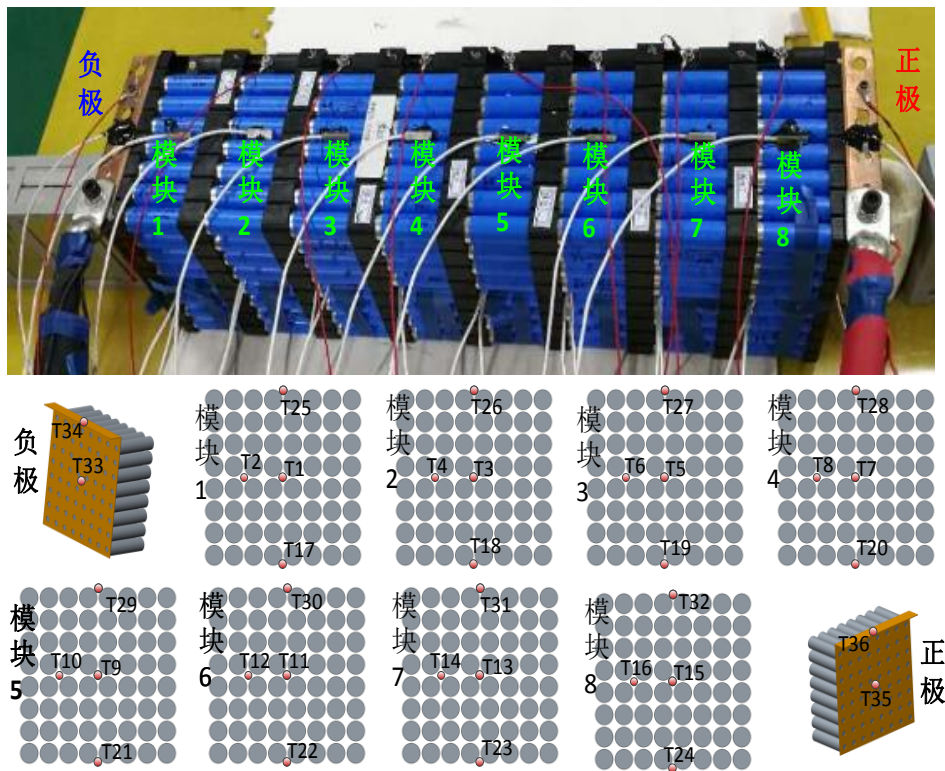


图 4.5 温度点布置原理

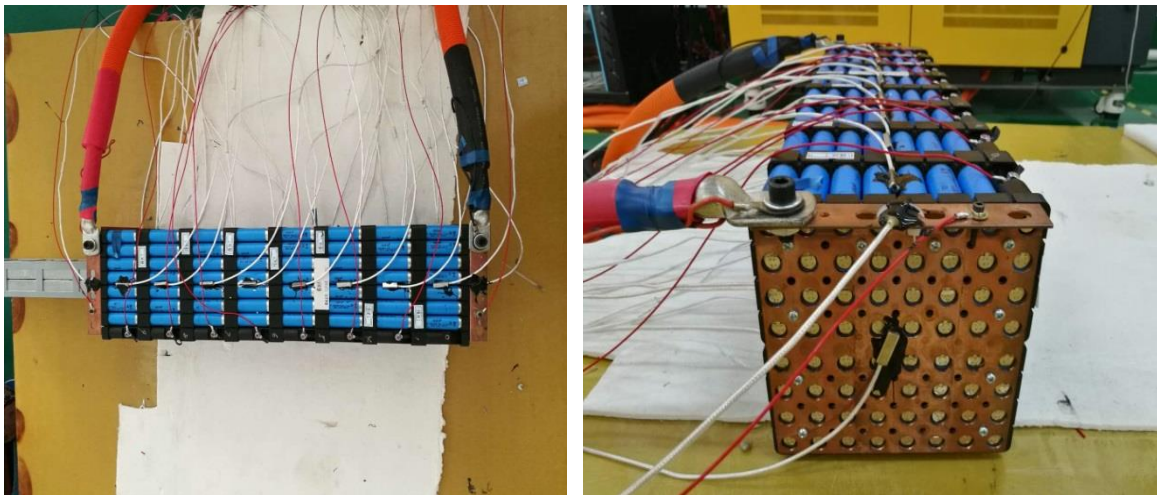


图 4.6 电池组测温点布置现场



图 4.7 电池组温升特性试验平台

4.2 试验步骤

搭建好电池组测试平台后就可以进行相应的充放电测试。温升测试包括电池充电测试与放电测试。热电偶可以记录电池组整个充电或放电过程测温点的温度值，热成像仪则可以记录某一瞬间电池组的表面温度场。

充电测试步骤：

- 1) 电池组以 0.33C 倍率的电流放电至某一电池模块的电压到达截止电压 2.75V 时停止放电；
- 2) 电池组搁置 24h，以保证每个电池单体的温度与环境温度一致；
- 3) 以 0.5C 倍率电流对电池组进行恒流充电，当任一电池模块的电压达到充电截止电压 4.2V 时，以 33.6V 的电压对电池组进行恒压充电，当充电电流减小到 0.033C 时充电结束；
- 4) 通过电池组测试系统的上位机软件记录和保存测试过程中的温度数据，通过热成像仪记录电池组温度场数据；
- 5) 将步骤 3) 中的恒流充电倍率 0.5C 改为 1C 后，重复以上所有步骤。

放电测试步骤：

- 1) 以 0.33C 倍率电流对电池组进行恒流充电，当任一电池模块的电压达到充电截止电压 4.2V 时，以 33.6V 的电压对电池组进行恒压充电，当充电电流减小到 0.033C 时充电结束；
- 2) 电池组搁置 24h，以保证每个电池单体的温度与环境温度一致；
- 3) 电池组以 0.5C 倍率的电流放电至任一电池模块的电压到达截止电压 2.75V 时停止放电；
- 4) 通过电池组测试系统的上位机软件记录和保存测试过程中的温度数据，通过热成像仪记录电池组温度场数据；
- 5) 将步骤 3) 中的恒流放电倍率 0.5C 改为 1C 后，重复以上所有步骤。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 温升特性分析

(1) 电池组正负极汇流排温度分布特性

汇流排可以将多个电池的电流汇集起来，形成满足电动汽车需求的大电流。汇流排不仅对电池组的生热有影响，而且对电池组的散热也有影响。汇流排的材料是铜，铜是良好热导体，有利于电池组的热量传导和散热，因此在设计电池组散热系统时也会考虑这些连接附件。图 4.8 和图 4.9 对比了电池组正负极汇流排监测点温度与电池组最高和最低的单体温度。可以看出，正负极汇流排的温升曲线与电池的温升曲线趋势一致。并且汇流排的温度与电池组最小的单体温度相近。电池的最高温度在充放电中后期与汇流排的温差随着时间逐渐增大，并且随着充放电倍率增大而增大。汇流排的温度相对电池低的原因是，其散热面积大，铜的导热系数高，因此散热良好，限制了温度的快速升高。

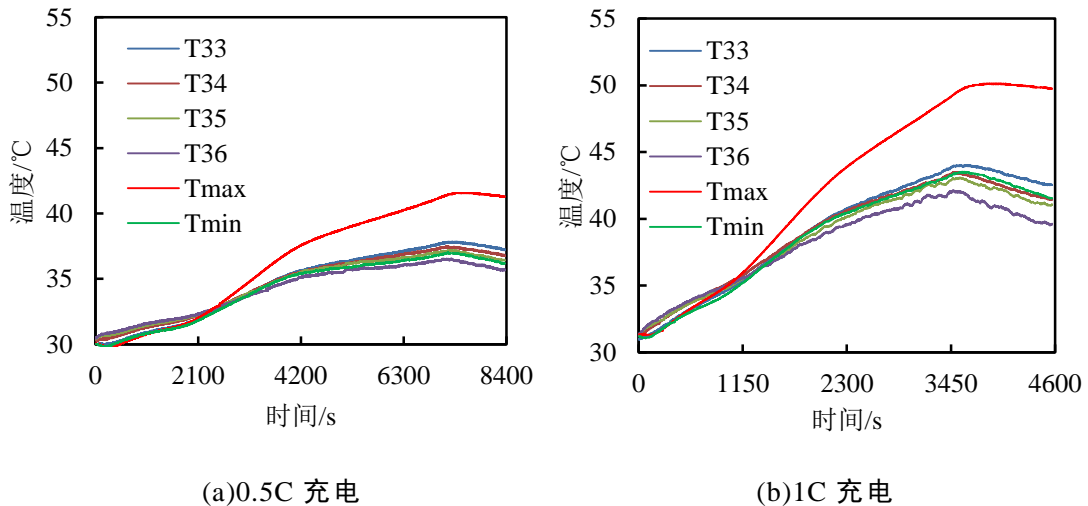


图 4.8 充电过程汇流排及最高、最低单体温升曲线

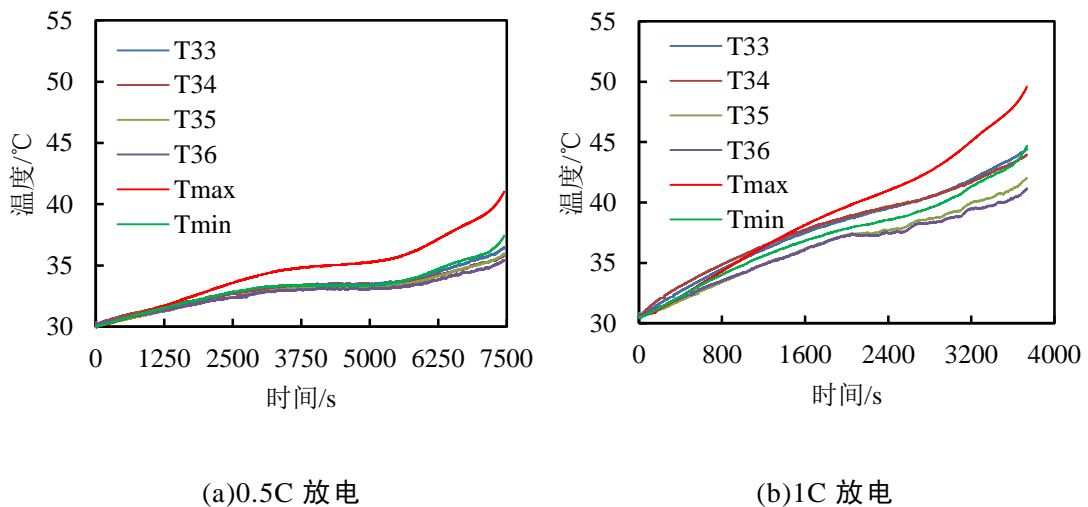


图 4.9 放电过程汇流排及最高、最低单体温升曲线

(2) 电池组纵向和横向温度分布特性

研究电池组不同方向上的温升特性有利于了解电池组的温差分布特点。定义电池组平行于电池轴线的方向为纵向，垂直于电池轴线的方向为横向。以 1C 充电为例进行了纵向和横向温度分析。电池组的纵向温度分布选取各个模块的中心测温结果进行分析，如图 4.10(a)所示。电池组的横向温度分布特性通过同一个模块的不同点测温结果分析，如图 4.10(b)所示，选取了模块 4 作为研究对象。可以明显看出，电池组的中间温度较两侧温度高，其纵向和横向的温差随着时间逐渐增大。充电初始阶段，各温度点都有一小段下降的过程，这是由于充电开始时存在着吸热反应，吸热量大于放热量。充电结束后，纵向最大温差为 2.8℃，横向最大温差比纵向最大温差大，达到 4.3℃。这是因为电池组的纵向比横向尺寸大很多，且电池本身的导热系数轴线方向比径向大，纵向散热较好，横向散热较差。

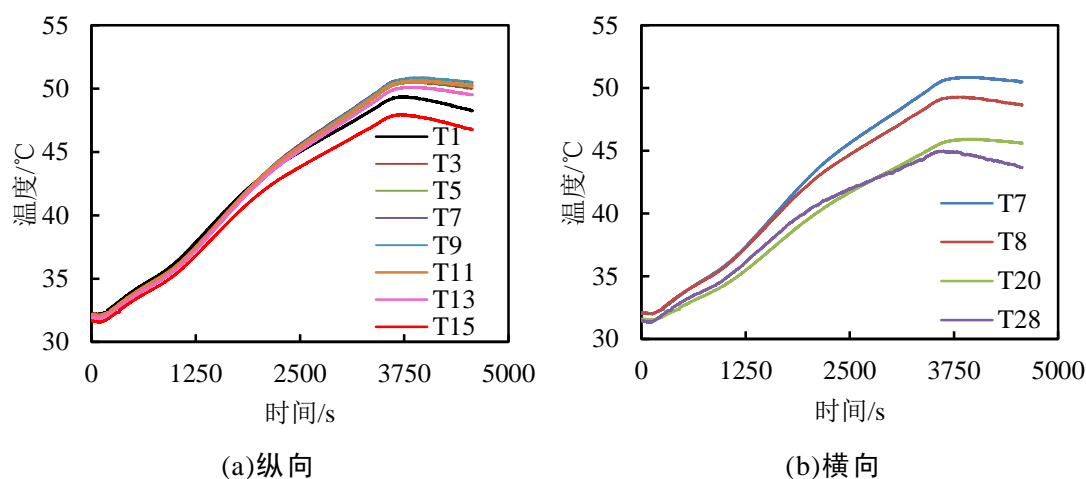


图 4.10 1C 充电倍率电池组测温点温升曲线

对于放电过程，电池组的温度分布特点与充电过程类似，只是末期的变化趋势有所差别。如图 4.11 所示，1C 放电结束后，电池组纵向温差为 2.1℃，横向温差为 4.9℃，与充电情况相近。

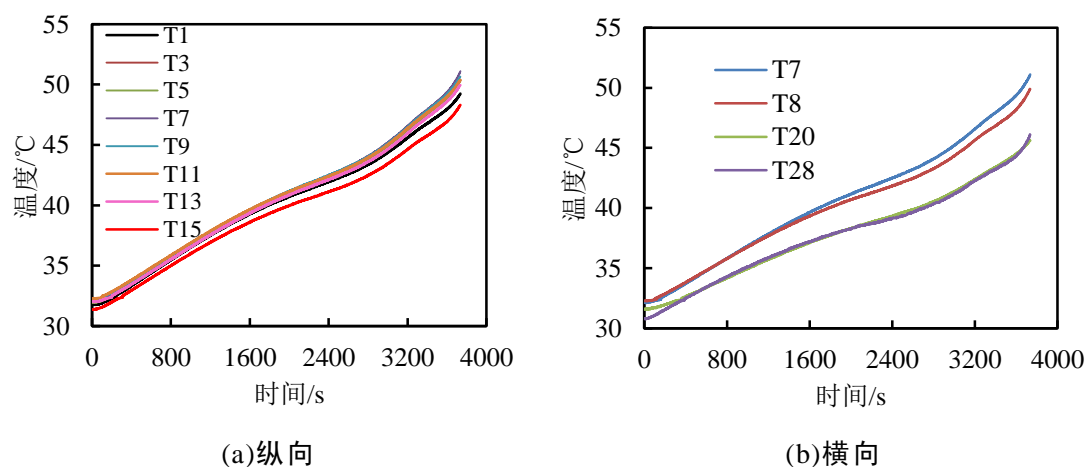


图 4.11 1C 放电倍率电池组测温点温升曲线

(3) 电池组内部温度分布特性

电池组充放电结束后，温度都比较高，且由于产热和散热不均匀的原因而在温度差异。电池单体间温度有较大差异时会影响电池性能的一致性，从而影响其使用寿命。因此分析无冷却情况下电池组内部温度分布对后期设计散热系统有着重要意义。图 4.12 和图 4.13 分别为充电和放电结束时整个电池组的温度分布统计图。从图中可以看出相同倍率下，充电和放电的温度分布基本相同。可以看出，相同模块内的温度不均性比不同模块间的大。电池组呈现中间模块温度高两边模块温度低的规律。充放电倍率越高，温度不均匀性越大。

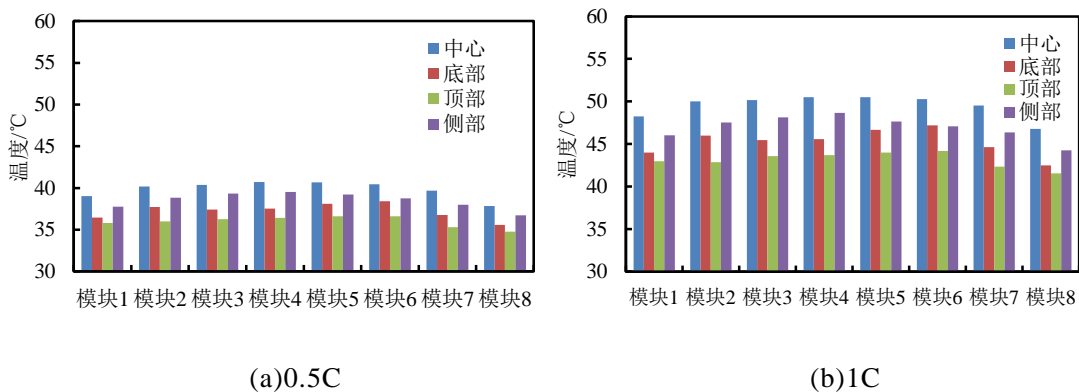


图 4.12 充电截止时电池组温度分布

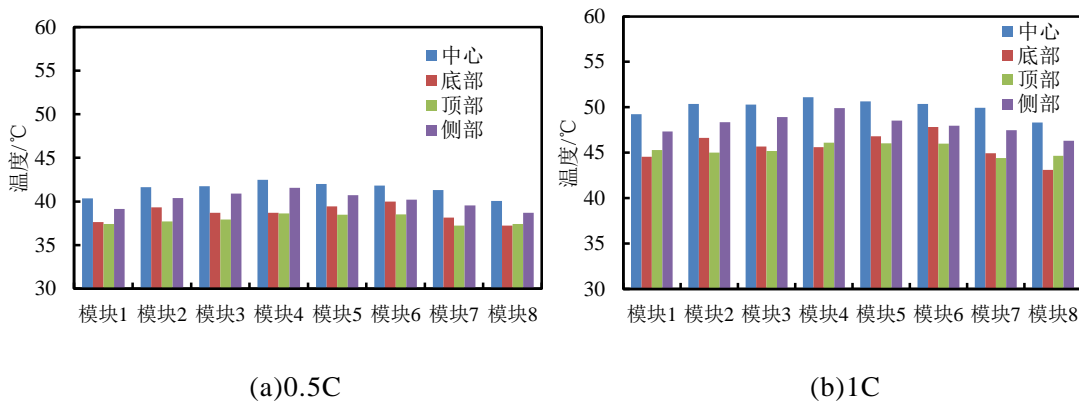


图 4.13 放电截止时电池组温度分布

4.3.2 电池组与单体充放电温升对比分析

通过第 2 章锂离子电池单体的温升实验及第 3 章电池单体的热仿真分析可知，电池单体在高倍率放电时即使是在良好的自然对流环境下也有较大的温升。电池单体应用于电动汽车上时，往往是以大量的电池单体串联和并联形成的电池组的形式出现。因此，电池组与电池单体的散热环境是有差别的。为了保证电池组占用较小的空间，单体与单体之间的间隙将被设计得非常小，这种情况使得电池的散热条件变的非常差，工作环境相比单个电池更加恶劣。此外，电池单体成组后，产热也将有别于单体本身。电池单体的并联和串联将用到许多镍带和铜排，这无疑增加了产热的电阻。

为了分析电池单体与电池组在充放电过程中的热行为差异，进行了电池单体与电池组的充放电温升实验。电池单体的温升试验方法在第 2 章已经介绍过，电池组的测温点与上述介绍的一致。为了更好地描述整个电池组的温升过程，取 32 个测温点温度的平均值作为电池组的平均温度。试验选取的充电和放电倍率均为 1C，试验环境温度为 30℃。图 4.14 为 1C 倍率充电过程电池单体温度及电池组平均温度随时间的变化过程。可以明显地发现，从充电开始至 800s 左右，单体温度与电池组的平均温度基本一致。充电的初始阶段，单体与电池组的温度与环境温度相差不大，散热量都比较小，因此温度差别不大。当温度达到 33℃ 时，二者的温度曲线开始分离，温差随着时间推移不断增大。从变化趋势方面来分析，单体电池的温升速率随着时间的增大而不断减小，2400s 后生热与散热基本平衡，温度基本不变。单体电池进入恒压充电阶段后，电流逐渐减小，温度随着生热的减小而降低。在恒流充电阶段，电池组的温度几乎呈线性增大，这是因为各个单体间相互传热，阻碍了电池的散热。特别是电池组中间位置的电池，由于其与周围电池的温度接近，其周围空气受到周围电池的“加热”，空气温度与电池温度接近，导致中间电池单体处于一个类似于“绝热”的环境。电池组进入恒压充电阶段后，电流下降较快，生热量迅速下降，电池组边缘的单体散热较快，因此平均温度也逐渐降低。电池单体的最高温度为 35℃，绝对温升 5℃。电池组的平均温度最大值出现在充电第 3600s，即恒流充电转恒压充电的时间点 3422s 之后。电池组的最大平均温度为 45℃，绝对温升达 15℃，比单体的温升大了 10℃。

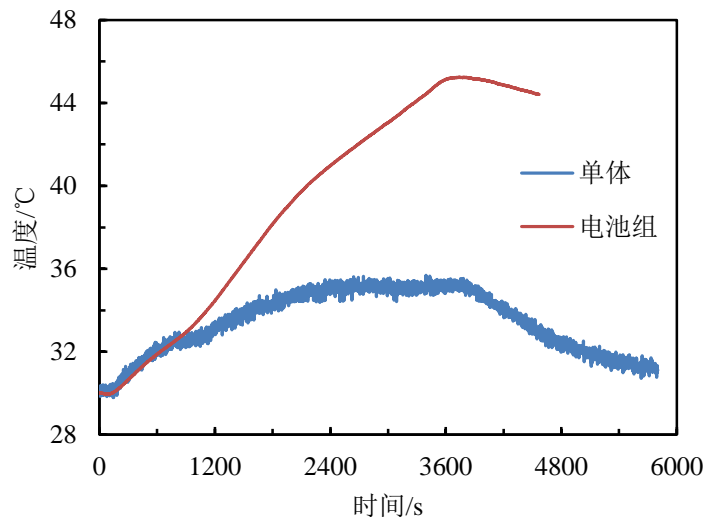


图 4.14 1C 充电过程电池单体表面温度与电池组平均温度随时间的变化曲线

图 4.15 为 1C 倍率放电过程电池单体温度及电池组平均温度随时间的变化过程。在 800s 之前，电池单体与电池组的平均温度变化一致，二者温升曲线开始分离的温度值与充电时相同，也是 33℃，可见电池处于恒流充电过程与放电过程的生热速率差别不大。有别于电池充电的 SOC 变化，放电过程 SOC 是逐渐降低的，因此内阻也不断增大，导致放电末期电池单体和电池组的温升均加剧。放电结束

后，电池单体的最大温度为 36.6°C ，绝对温升为 6.6°C 。电池组的最大平均温度达到了 45.7°C ，绝对温升达 15.7°C 。可见，1C 放电结束后，电池单体成组后比单体的绝对温升高 9.1°C 。通过对比电池单体与电池组充放电的温升特性，可知电池组的散热条件远差于电池单体，因此，电池成组后需要增加良好的散热系统。

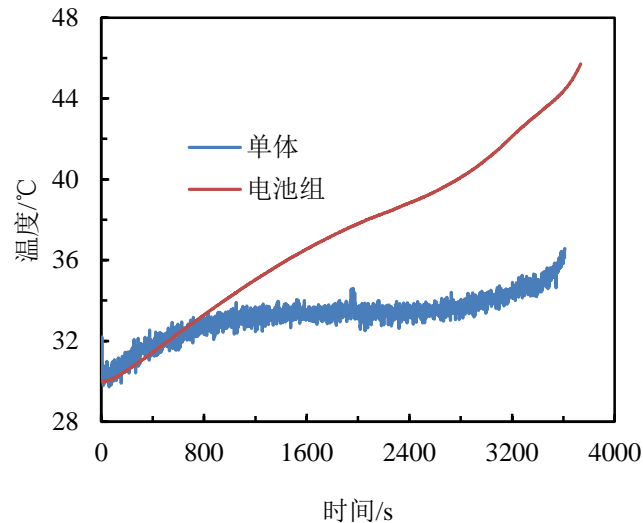


图 4.15 1C 放电过程电池单体表面温度与电池组平均温度随时间的变化曲线

4.3.3 电池组表面温度分析

研究电池组的表面的温度分布有利于分析单体间的温差差异，通过热成像实验更能了解电池组实际充放电过程中的温度场状态。实验记录热成像图的表面如图 4.16 所示，即电池组的侧面。当充电或放电结束时，立刻使用热成像仪记录此刻电池组侧面的热图像。记录的图像，通过 Fluke 提供的后处理软件 SmartView 进行相应的结果处理。

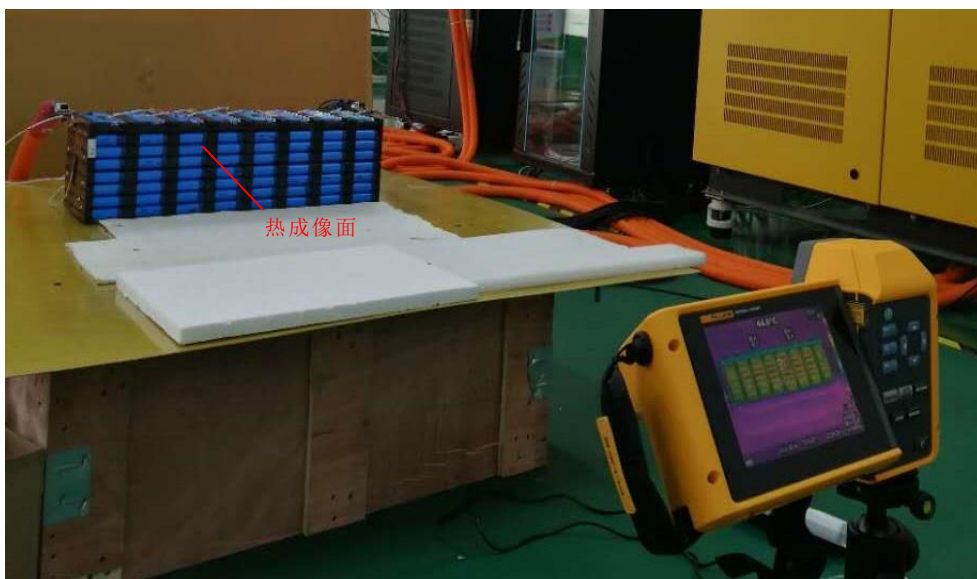
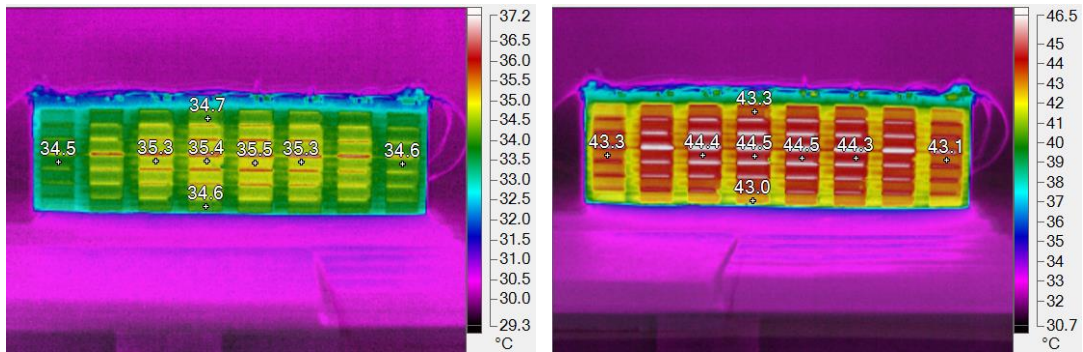


图 4.16 电池组热成像的表面定义

图 4.17 是倍率为 0.5C 和 1C 充电结束时，电池组侧面的热像图。电池组的温度呈现中间温度高边缘温度低的对称分布规律。0.5C 倍率充电结束时，中部的温

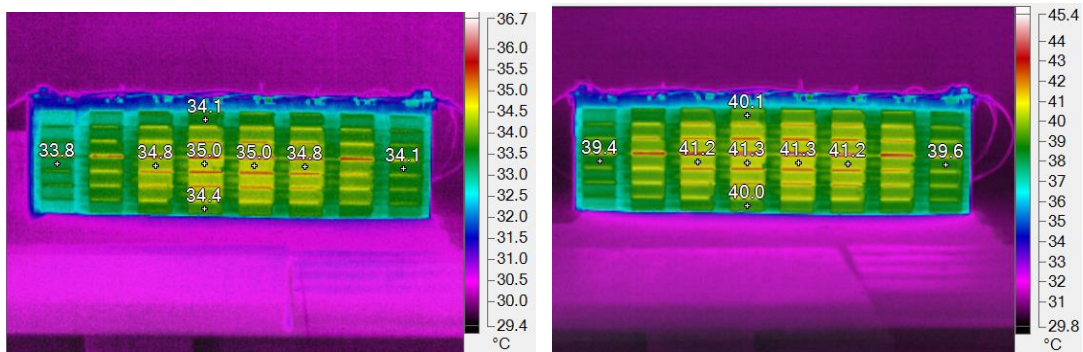
度大约在 35.5°C ，边缘的温度大约在 34.5°C ，相差 1°C 。这是由于该表面的电池处于电池组的边缘散热条件较好，因此温差不大。当充电倍率提高到 1C 时，温度场的分布规律没有改变，只是整个电池组温度有所升高，整体温度比 0.5C 倍率高 9°C 左右。温度场中可以看到细长的条形状的高温区，这是透过电池间的间隙看到电池组的内部温度。图 4.18 为放电过程的温度场，其分布规律与充电过程类似，但温度相对充电过程有所下降。 0.5C 倍率下，放电结束时中部温度为 35°C ，比充电过程低 0.5°C 。倍率提高到 1C 后，放电结束温度场中部的温度为 41.3°C ，比充电结束时 44.5°C 低了 3.2°C 。可见，提高充放电的倍率电池组温差也会变大。充电过程由于时间比放电过程长，因此温度相对高些。



(a)0.5C 充电

(b)1C 充电

图 4.17 充电结束时电池组热像图



(a)0.5C 放电

(b)1C 放电

图 4.18 放电结束时电池阻热像图

4.4 本章小结

本章进行了动力电池组的温度场试验，分析了电池组在不同充放电倍率下的温升特性及温差现象。然后对比了电池组与单体在 1C 充电及放电工况下的温升特性，通过分析发现，在相同充放电倍率下，电池组的温升比单体的大，需要设计辅助散热系统。

(1)正负极汇流排的温升与电池的温升趋势一致。并且汇流排的温度与电池组最低单体温度相近。正负极汇流排为高导热的材料铜所制，散热良好，因此温度较低。

(2)在 1C 倍率充电和放电工况下，电池组的纵向温差比横向温差小。充电结束时，电池组纵向最大温差为 2.8℃，电池组横向最大温差为 4.3℃；放电结束时，电池组纵向最大温差为 2.1℃，电池组横向最大温差为 4.9℃。

(3)充放电过程，电池组温度呈现中间温度高、边缘温度低的对称分布规律。随着充放电倍率的提高，电池组的最大温升和最大温差均增大。

(4)1C 倍率充电和放电过程，电池组的最高温度比单体的分别高出 10℃和 9.1℃，可见，电池成组后，散热性能下降。

第 5 章 液冷电池组仿真分析及优化

根据第 4 章的分析可知, 电池成组后散热性能比单体差很多, 容易积聚热量, 形成高温。因此, 需要设计电池组的液体冷却系统。电池组温度受到多种因素的影响, 如导热板材料、冷却液种类、冷却液流速等, 因此有必要对这些影响因素进行仿真分析, 并基于仿真结果对初始模型的不足提出改进方案, 完成液冷模型的优化设计。

5.1 电池组初始液冷方案

由以上的电池组温度场实验可知, 电池组的自然散热能力很差, 热量容易积聚, 致使充放电时的温升比电池单体高很多。因此, 需要设计动力电池热管理系统来管理电池的温度。针对以上的电池组, 本文设计了一种液体冷却式电池散热结构。液体的对流换热系统比空气的高, 液冷式电池热管理系统便是利用了这一特性对电池进行冷却, 因此可以很好地限制电池温度过高, 并有效限制电池间的温差。该冷却结构如图 5.1 所示, 主要由两部分组成, 一部分是将电池产生的热量导出到电池组两侧的导热板; 另一部分是冷却导热板的液冷板。导热板有许多半圆弧凹槽, 其内径与电池的外径相等, 刚好与电池贴合。电池单体间的间隙只有 2mm, 因此导热板的厚度不能超过 1mm。液冷板的材料是铝, 内部有蛇形流道, 用于冷却液的流动。电池组散热原理如图 5.2 所示, 电池产生的热量一部分被自身吸收, 另一部分通过导热板被传递到液冷板, 之后热量被液冷板内的冷却液带走。这种间接接触式液冷散热结构, 降低了电池内部漏液产生的短路风险, 同时也满足散热需要。

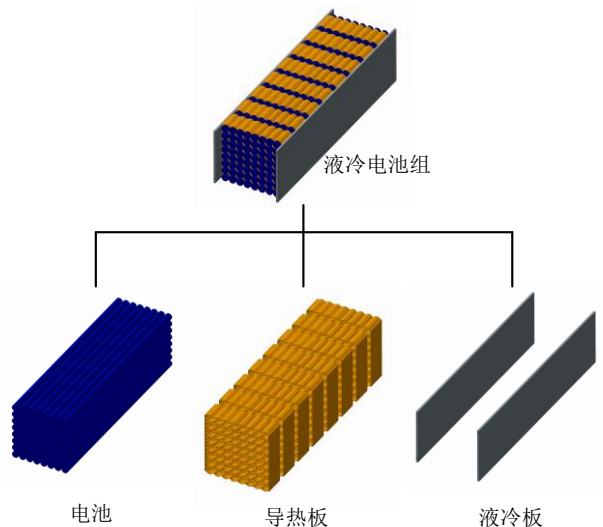


图 5.1 液冷电池组结构示意图

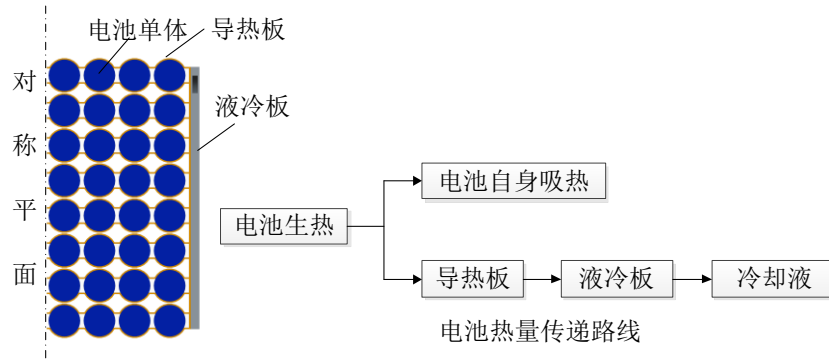


图 5.2 电池组冷却原理图

5.2 计算流体力学基本理论

5.2.1 CFD 简介

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)是一种利用计算机求解流体运动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具。计算流体力学是由流体力学、数学及计算机科学交叉而形成的一门全新学科。随着科学的发展, CFD 在工程上得到了广泛的应用^[77]。比如航天航空、汽车工业、涡轮机设计和生物医学等领域。工程上, 实验法和分析法都存在计算困难、无法求解或成本高等问题, 而 CFD 具有能够模拟设计上复杂或理想的过程, 并且成本低, 周期短。

5.2.2 CFD 基本控制方程

CFD 遵守流体流动和传热的三大定律(质量、动量和能量守恒定律)。本文研究的液冷方案, 设计的流体为低速流动状态, 可以视为不可压缩流体。因此可以认为冷却液的密度、导热系数、比热容和动力粘度等物性参数均不随温度和压力的变化而变化, 即视这些参数为常数。

(1) 质量守恒

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (5.1)$$

式中, u, v, w 为流体速度矢量分别在 x, y, z 方向上的速度分量; t 为时间, s ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 。

(2) 动量守恒

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (5.2)$$

式中, F_x , F_y , F_z 为流体单元质量力 F 在 x , y , z 方向上的分量; P 为微元流体压力; μ 为运动粘度系数;

(3) 能量守恒

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho UT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T\right) + S_T \quad (5.3)$$

式中, T 为温度; λ 为传热系数; c_p 为定压比热容; S_T 为粘性耗散项。

5.3 液冷电池组数值模型

5.3.1 几何模型

如图 5.3 为液冷电池组的三维模型图。液冷电池组具有对称性结构, 为了减小计算量, 提高计算效率, 只分析了电池组的一半。图 5.4 为液冷板的结构示意图, 液冷板的外形尺寸为 $588\text{mm} \times 151\text{mm} \times 5\text{mm}$, 材料为铝。液冷板内部设计有流道, 流道为蛇形结构, 流道宽 3mm , 高 10mm , 两流道间的距离为 32.75mm , 且均为等距离。

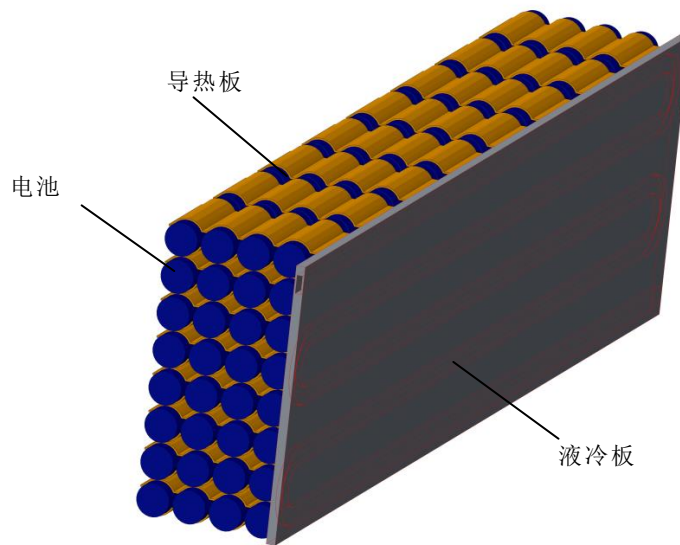


图 5.3 电池组液冷结构组成

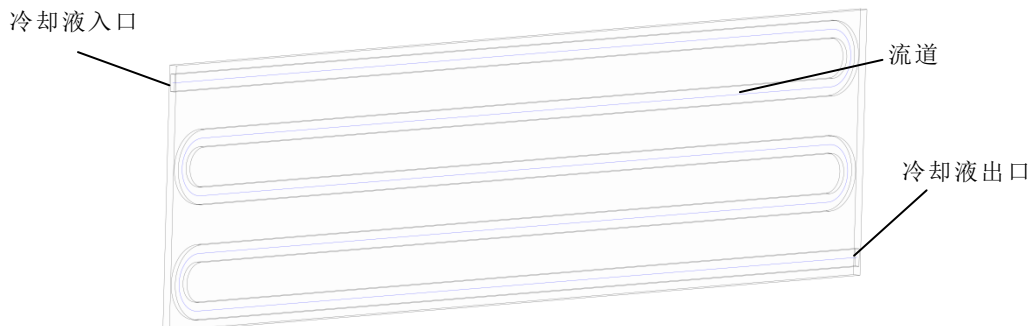


图 5.4 液冷板结构

5.3.2 网格模型

半电池组液冷模型的网格包括四个部分：电池、导热板、液冷板和冷却液。由于模型比较规则，采用了结构化网格方法对模型就行网格划分。相对于非结构体网格，结构体网格大大减少了仿真时间。如图 5.5 为半液冷电池组的网格模型，总网格数 4733159，总节点数 3946032。

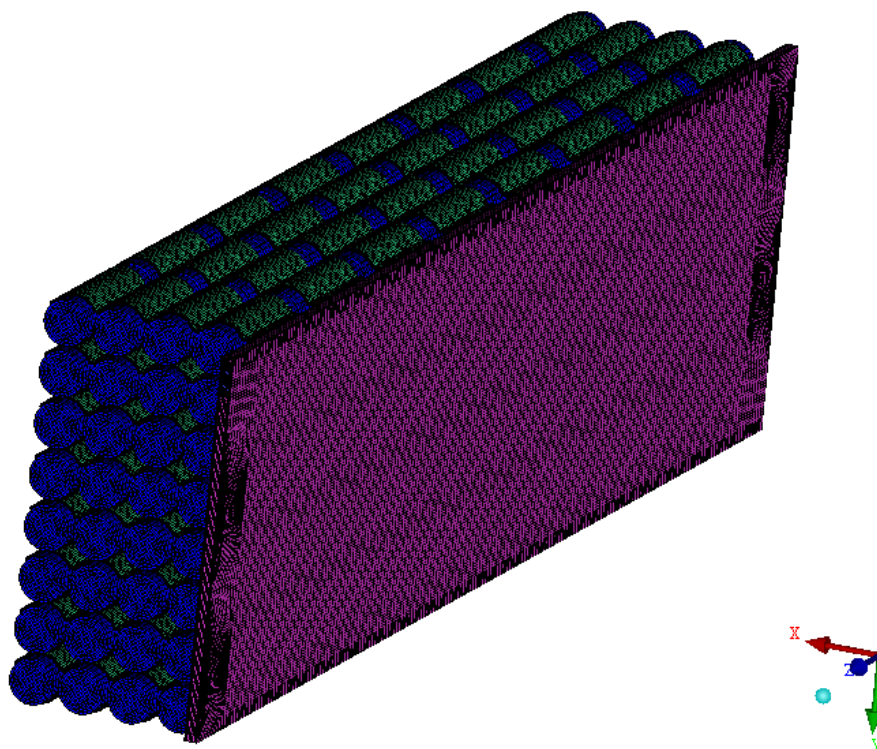


图 5.5 电池组网格模型

5.3.3 边界条件设置

(1) 壁面边界设置

电池成组后对流换热非常小，并且通常有电池箱体包裹，但是电池并不是绝对绝热，考虑到电池圆柱面被导热板包裹，因此对流换热只考虑两极的端面，设置为 $3\text{W m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ 。

(2) 耦合面设置

本仿真模型有三组耦合面，第一组是电池与导热板的“固固耦合面”，第二组是导热板与液冷板的“固固耦合面”，第三组是液冷板与冷却液的“流固耦合面”。

(3) 进出口边界设置

入口边界设置为速度入口，初始值为 0.05m/s ，温度为 25C ；出口边界设置为压力出口；冷却液为水。

(4) 求解设置

本文采用 SIMPLE 算法进行计算。

5.4 初始液冷模型的数值分析

5.4.1 导热板材料对电池组温度场的影响

从以上设计的液冷模型可知，电池产生的热量需要通过导热板才能传递到液冷板，因此导热板的热物性参数直接影响着电池组的散热效率。研究导热板材料对电池组温度场的影响，有助于设计散热系统时选择合适的导热材料。这里进行了四种导热材料的对比研究，分别是是：铜、铝、钢和导热硅胶。为了比较这四种材料对系统散热性能的影响，将模型在相同的边界条件下进行了仿真，得到了不同导热材料的电池组温度场、不同导热材料电池组平均温度变化曲线和不同导热材料电池组温差变化曲线，分别如图 5.6、图 5.7 和图 5.8 所示。

从图 5.6 可以看出，靠近液冷板一侧的电池温度较低，电池组中间部分温度相对较高，这符合热量由温度高的物体传递到温度低的物体的热力学基本定律。当导热材料选用铜或铝时，电池的均匀性较好；当导热材料为钢或导热硅胶时，电池组的温度不均匀性非常明显。这是因为铜和铝的导热系统比钢和导热硅胶高很多，散热效率较高，减小了电池组温度的不均性。

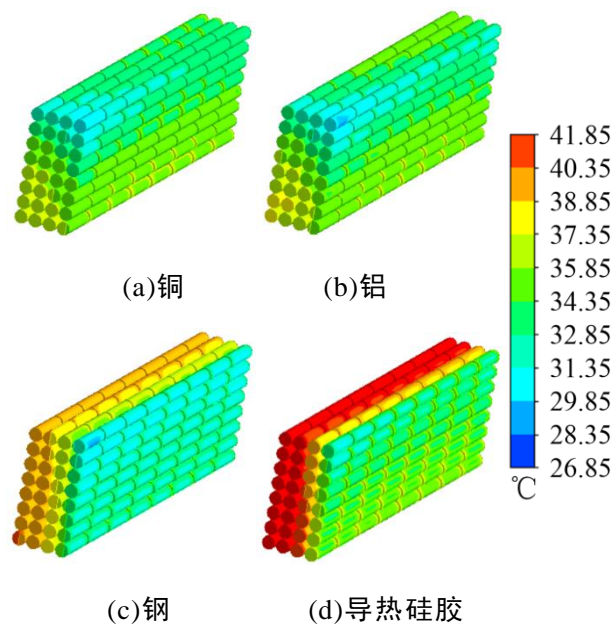


图 5.6 不同导热材料电池组温度分布对比

从图 5.7 和图 5.8 可知，当导热材料为铜时，电池组的温度及温差最低，其最大温度为 34.9°C ，最大温差为 7.7°C ；整个放电过程 80% 的时间，温差均在 5°C 以下，但在放电末期内阻上升生热量剧增，导致温差增大。导热材料为铝时，仿真结果与铜的非常相近，电池组的最大平均温度为 35.3°C ，只比铜的大 0.4°C ，最大温差为 8.7°C ，比铜的大 1°C 。整体而言，铜和铝的散热性能相差不大。导热材料为钢时，电池组的最大温升为 37.6°C ，最大温差达到 10.9°C ，温度分布不均性变差，可见，钢并不是良好的热导体。导热材料为硅胶时，电池组最大温度增加

到了 40.7℃，最大温差竟达到了 14.3℃，其温度分布极其不均匀，可见硅胶不适合做路径较长的导热设计。

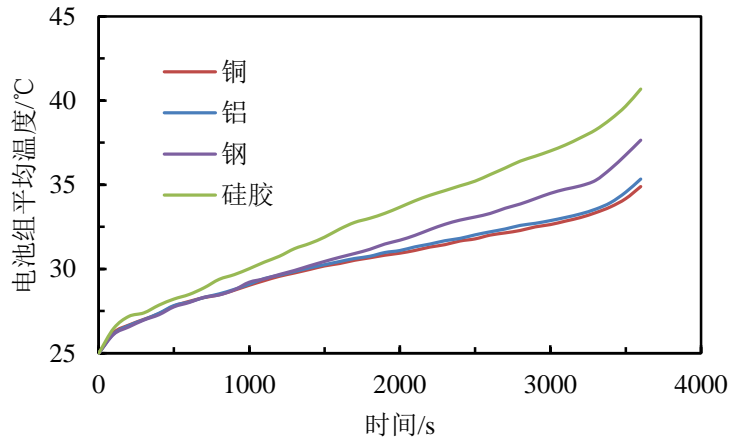


图 5.7 不同导热材料放电过程电池组平均温度变化

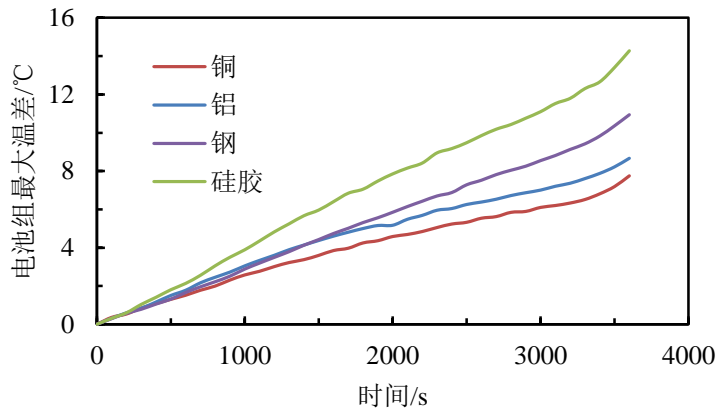


图 5.8 不同导热材料放电过程电池组温差变化

通过以上分析，四种导热材料中铜和铝都具有良好的散热性能。铜有良好的导热系数，但是铜的价格昂贵，作为导热材料必会增加成本。铝是良好的导热材料，原材料丰富，成本相对较低，相比之下铝更适合作为导热材料。当铝是导热材料时，最大温升比铜的高出很小，可以保证系统良好的散热性能。同时，铝材易成型，价格适中。综上分析，选用铝作为导热板的材料最为合适。

5.4.2 冷却液入口流速对电池组温度场的影响

液冷系统冷却液流速是影响电池组温度的重要参数之一。在环境温度和电池组温度为 25℃时，其它参数保持不变，改变冷却液的入口流速，对模型进行了仿真，得到不同冷却液入口流速下电池组温度值。在此计算了放电倍率为 1C 时，冷却液流速从 0.05m/s~0.5m/s 的变化对电池组温度场、最高温度、平均温度、最大温差的影响，如图 5.9~图 5.14 所示。

图 5.9 为放电结束时电池组的温度场，可以看出，靠近液冷板冷却液入口的区域冷却效果较好，温度较低，电池组中部(即模型的对称面一侧)远离冷却液入

口的区域温度较高。随着冷却液流速的增大，电池组温度不断下降，温度均匀性也有明显的改善。可见，冷却液流速的提高对电池组的散热有明显的促进作用。冷却液流速从 0.05m/s 增加到 0.2m/s 时，电池组温度下降较为明显，继续增大流速，电池组温度场变化不大，说明流速并不是越大越好，流速过高冷却效果改善并不明显，反而会增加系统额外的功耗。

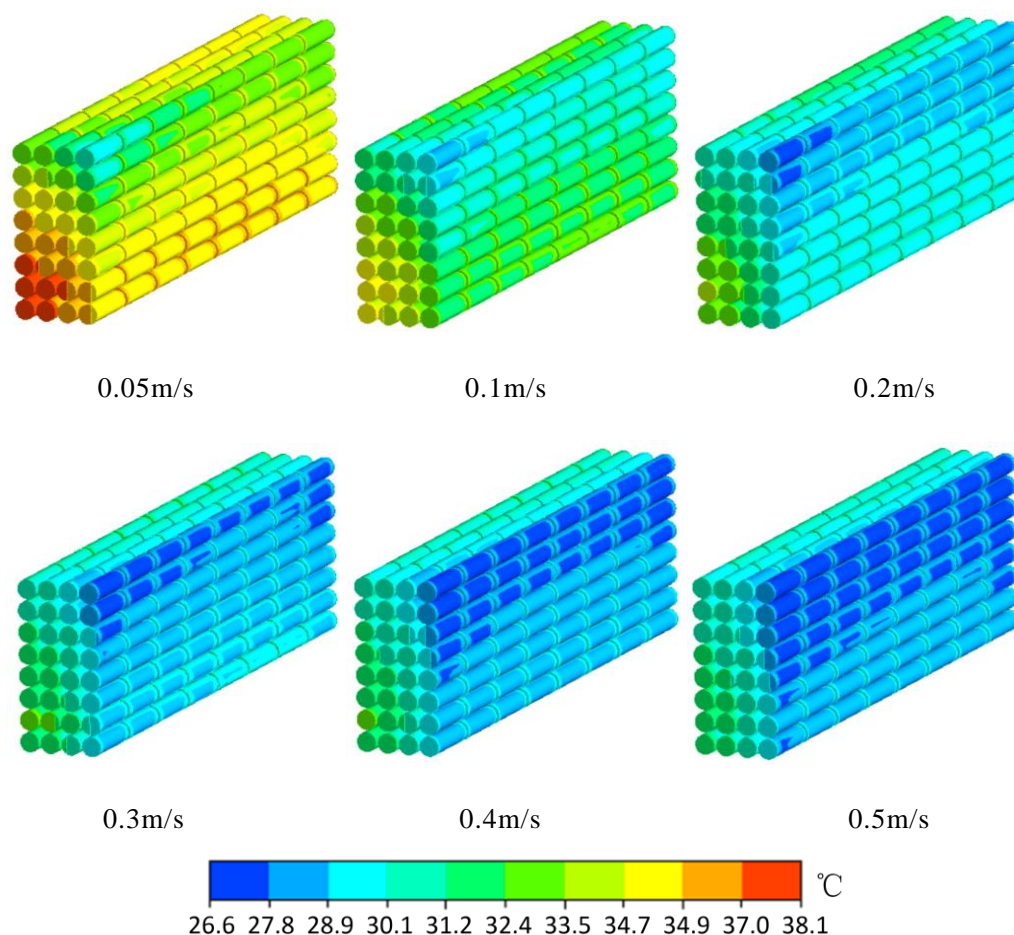


图 5.9 不同冷却液流速下电池组温度分布对比

不同冷却液流速下电池组的最高温度随时间的变化如图 5.10 所示，可以看出，放电时间在 900s 之前，流速对电池组温度的影响较小。放电时间大于 900s 后，流速对温度的影响较为明显，随着时间的增加，温差不断增大。这是因为放电开始时电池与冷却液的温差较小，不同冷却液流速下散热量差异也较小。电池组最高温度为 38.35°C ，对应的流速是 0.05m/s ，在合理的温度范围内。冷却液流速对电池组平均温度和温差的影响与最高温度类似，如图 5.11 和图 5.12 所示。不同的是，放电开始 600s 后，流速对平均温度有明显的影响。冷却液流速对温差的影响则出现的较晚，在放电开始 1400s 之后。冷却液流速为 0.4m/s 和 0.5m/s 时，放电深度小于 80% ，电池组温差均小于 5°C ，满足电动汽车动力电池电量使用范围内的温差要求(通常放电至 $\text{DOD}=80\%$ 停止放电，以保护电池)。其它流速下，电池温差均超过了 5°C ，最大达到了 8.5°C ，即后期仍需进一步优化散热系统。

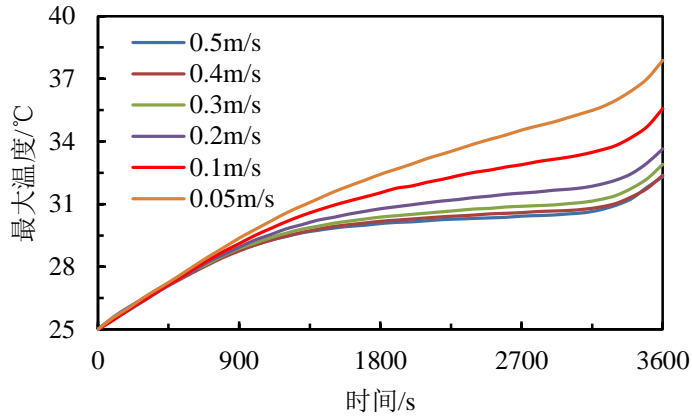


图 5.10 不同冷却液流速下电池组最大温度的变化

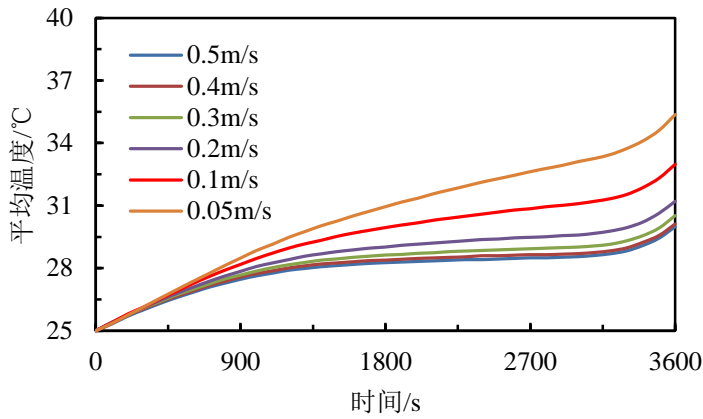


图 5.11 不同冷却液流速下电池组平均温度的变化

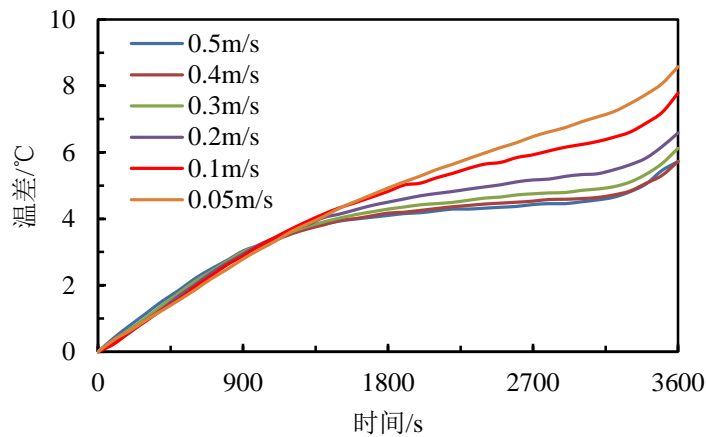


图 5.12 不同冷却液流速下电池组温差的变化

冷却液对电池组放电结束后的最大温度、平均温度和最小温度的影响如图 5.13 所示。电池组的最大温度、平均温度和最小温度均随流速的增大而减小。当流速大于 0.4m/s, 电池组的温度几乎不受流速的影响。由图 5.14 可知, 当 DOD 大于 0.4 时, 流速对温差才会产生明显的影响, 流速越小, 电池组温差越大。可见, 电池在使用过程中, 可以通过提高冷却液流速的方法来减小电池间温差。

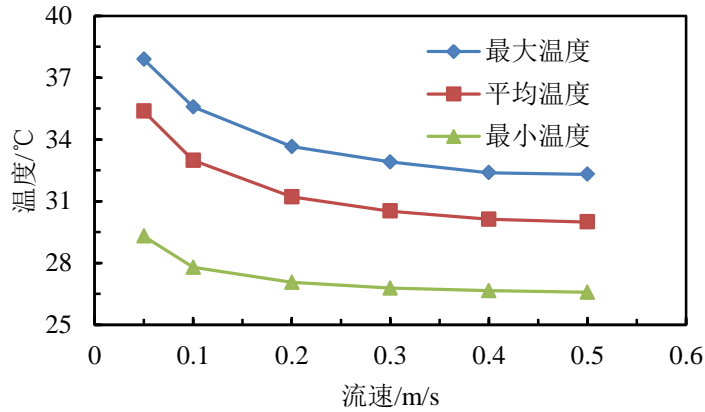


图 5.13 电池组最大、平均和最小温度随冷却液流速的变化

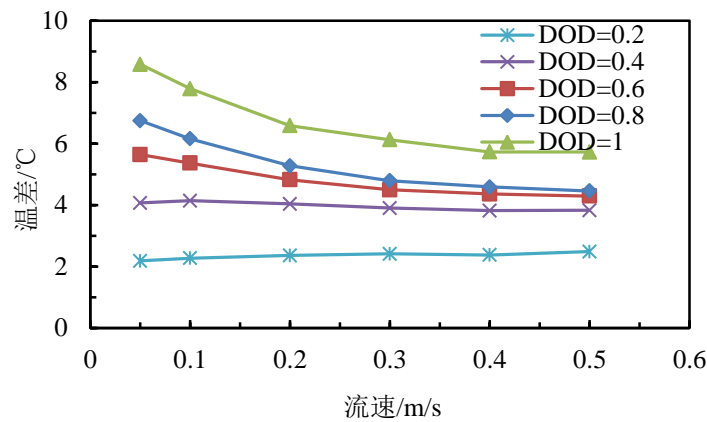


图 5.14 不同放电深度下电池组温差随冷却液流速的变化

5.4.3 冷却液种类对电池组温度场的影响

电池产生的热量最终通过冷却液带走，因此冷却液的性质对系统的散热有着重要的影响。在其它仿真条件不变的前提下，在此，研究了水、50%乙二醇水溶液和#45 变压器油三种不同类型的冷却液对系统散热的影响，冷却液的热物性参数如表 5.1 所示，仿真结果如图 5.15~图 5.17 所示。

表 5.1 冷却液的热物性参数

物质\物理属性	密度(kg/m^3)	比热容($\text{J kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)	导热系数($\text{W m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$)
水	997	4179	0.609
50%乙二醇水溶液	1071	3300	0.384
#45 变压器油	895	2100	0.128

由图 5.15 可见，水的冷却效果最佳，50%乙二醇水溶液次之，#45 变压器油冷却效果最差。从图 5.16 可以看出，水和 50%乙二醇水溶液的冷却效果相近，对应的电池组平均温度最大值分别为 35.3°C 和 36°C，而冷却剂为#45 变压器油时，电池组的平均温度最大值为 38.5°C，比前两种情况分别高出 3.1°C 和 2.5°C。由图

5.17 可见，冷却液种类对电池组温差的影响与对最高温度的影响不同，当冷却液为#45 变压器油时，温差最小，50%乙二醇水溶液次之。当冷却液为水时的电池组的温差最大。可见，并不是选取冷却效果最好的冷却液最佳，有可能由于局部冷却过度，温度偏低，导致整个电池组温差较大。因此，在选择冷却液时既要考虑散热性能，也要考虑对电池组温度均匀性的影响。

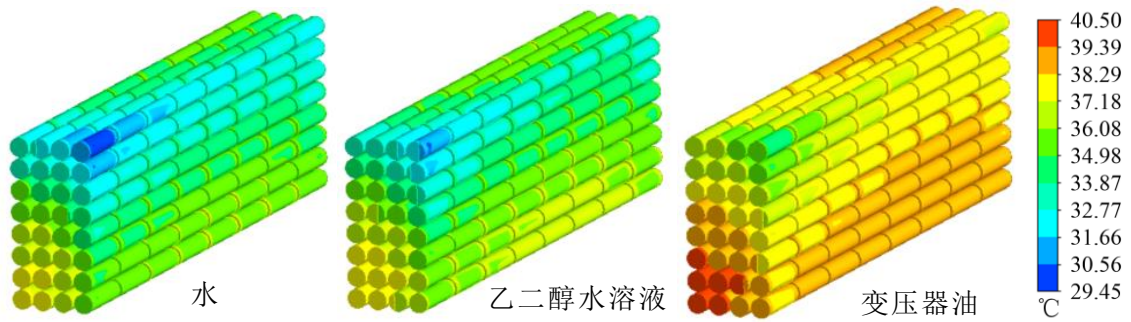


图 5.15 不同类型冷却液条件下电池组温度场对比

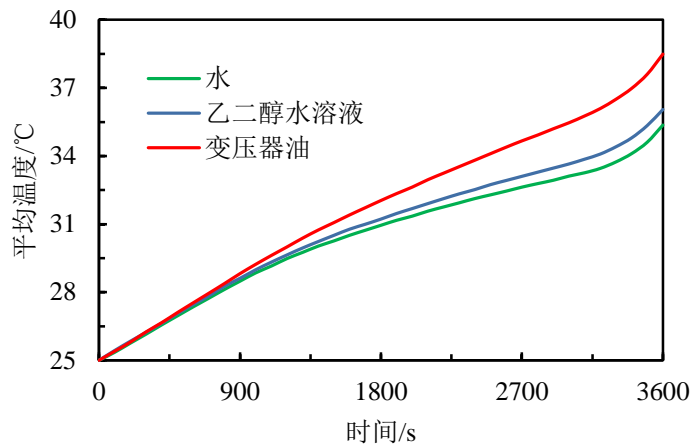


图 5.16 不同类型冷却液条件下电池组平均温度的变化

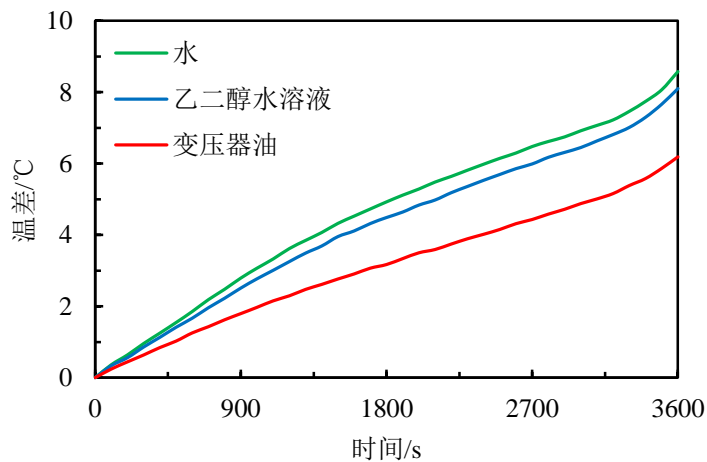


图 5.17 不同类型冷却液条件下电池组温差的变化

5.5 液冷模型的改进分析

液冷板优化后,其温度均匀性得到了一定的提高,但仍存在上部分(靠近入口端)温度较低、下部分(靠近出口端)温度较高的问题,势必会影响电池组上、下部分的温度分布,如图 5.18 所示。

如图 5.19 所示,将液冷板划分为两个部分:相对低温区,即区域 1;相对高温区,即区域 2。将区域 1 和区域 2 对应的电池分别记为 batteries-1 和 batteries-2,由于电池组所用的电池运行工况均相同,因此 batteries-1 和 batteries-2 的生热率相同,即:

$$q_1 = q_2 \quad (5.4)$$

式中, q_1 、 q_2 分别为 batteries-1 和 batteries-2 对应的生热率。

根据传热学理论,导热热流的计算可以通过式(5.5)。

$$q = \frac{T_h - T_l}{R} \quad (5.5)$$

式中, q 为热流密度, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; T_l 、 T_h 分别表示低温物体温度和高温物体温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为物体的热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。假设 batteries-1 和 batteries-2 的平均温度分别为 T_{bats1} 和 T_{bats2} ,液冷板的区域 1 和区域 2 的平均温度分别为 T_1 和 T_2 ,根据式(5.4)和式(5.5)可得式(5.6):

$$\frac{T_{bats1} - T_1}{R_1} = \frac{T_{bats2} - T_2}{R_2} \quad (5.6)$$

式中, R_1 为 batteries-1 至液冷板的区域 1 的导热热阻; R_2 为 batteries-2 至液冷板的区域 2 的导热热阻。

电池组温度的一致性是热管理的控制目标,即 $T_{bats1} = T_{bats2}$ 。从图 5.19 可以看出 $T_1 < T_2$,结合式(5.6)可知,需要满足 $R_1 > R_2$ 。在初始方案中,导热板厚度是均匀的,即 $R_1 = R_2$ 。理论上,减小高温区域的导热热阻可提高电池组温度均匀性。

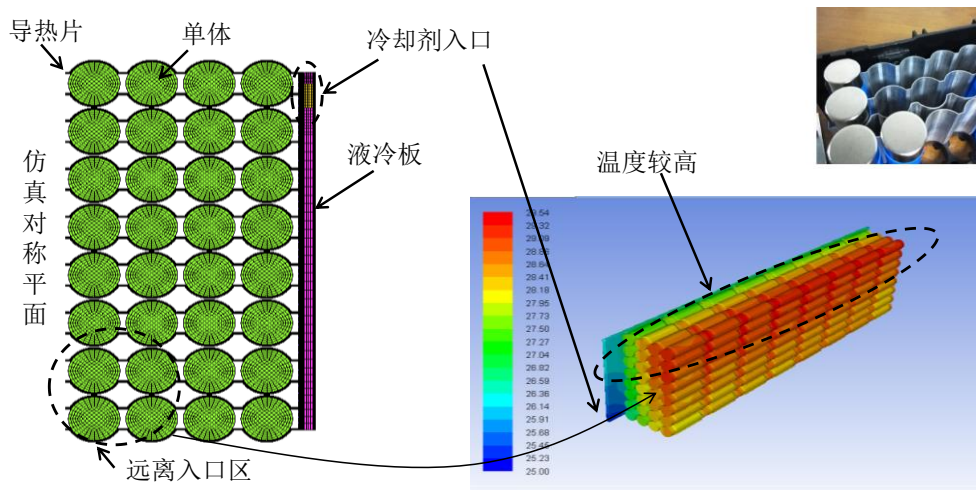


图 5.18 电池组散热结构示意图

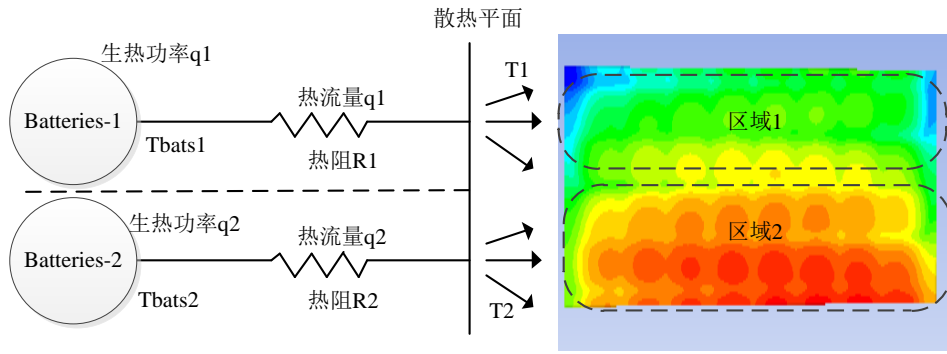


图 5.19 系统散热原理

为达到减小 R_2 的目的，将导热板的局部进行了加厚，如图 5.20 所示。导热板局部加厚的地方为区域 2，对应液冷板的高温区，这样可以弥补由于 batteries-2 与液冷板的区域 2 温差相对较小而引起散热不足的问题。

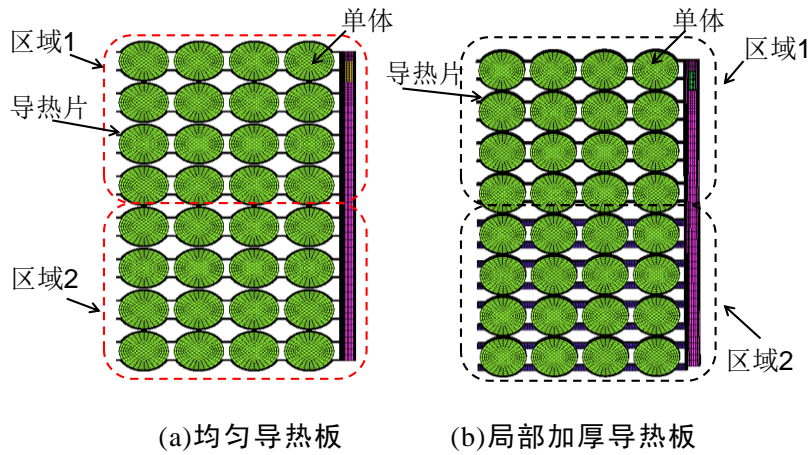


图 5.20 导热板的结构优化

对优化前后的模型就进行了数值仿真计算，得到了冷却速 0.05m/s 、 1C 放电倍率下电池组的温度分布情况，如图 5.21 所示。可以发现，对导热板进行局部加厚处理后，电池组的温度分布更加均匀了。相比于优化前，优化后电池组的最高温度从 38.35°C 降低到了 33.14°C ，最大温差从 8.5°C 降低到了 4.9°C 。可见，对导热板进行局部加厚处理，有效地提高了系统散热性能及温度一致性。

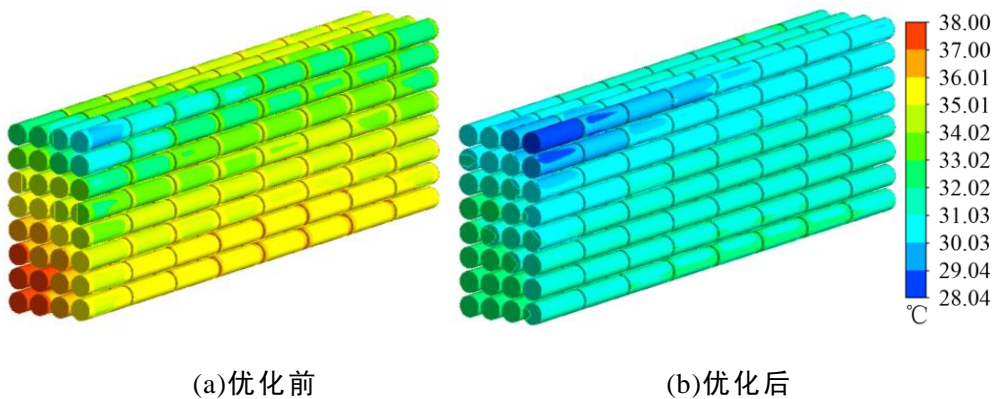


图 5.21 1C 放电倍率下优化前后电池组温度场对比

5.6 改进模型多工况仿真分析

使用优化后的模型进行了室温下电池组放电倍率为 0.5C 和 1C，冷却液流速为 0.05m/s、0.1m/s 和 0.2m/s 几种工况的仿真研究，仿真结果如图 5.22 和图 5.23 所示。从图 5.22 可见，0.5C 放电倍率下，即使是在低流速下，电池组的温度一致性依然很好。当放电倍率提高到 1C 时，电池组最大温度和最大温差有所增加，但仍然保持在合理的范围。

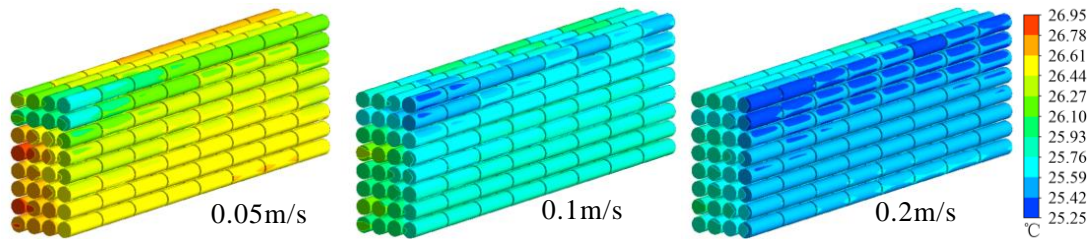


图 5.22 0.5C 放电倍率下不同冷却液流速电池组温度分布

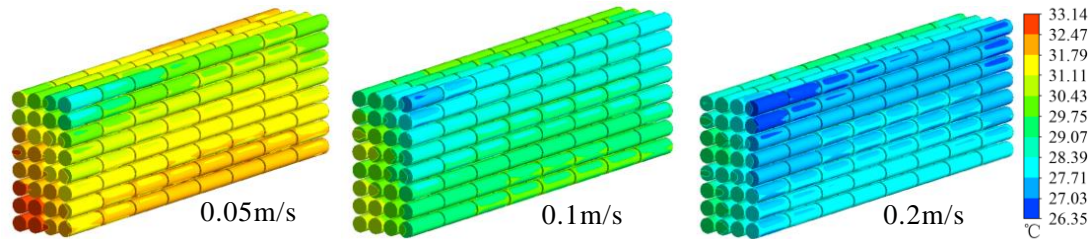


图 5.23 1C 放电倍率下不同冷却液流速电池组温度分布

图 2.24 统计了电池组最大温度数据，在 0.05m/s 的冷却液流速下，0.5C 和 1C 放电工况电池组的最大温度分别为 26.95°C 和 33.14°C，均低于 45°C，说明在该流速下，就可满足散热要求。图 2.25 为统计的电池组温差数据，可以看出，在这几种仿真工况下，电池组的温差均小于 5°C。总体而言，改进后冷却系统散热性能有了很大改善，并且能维持电池组良好的温度均匀性。

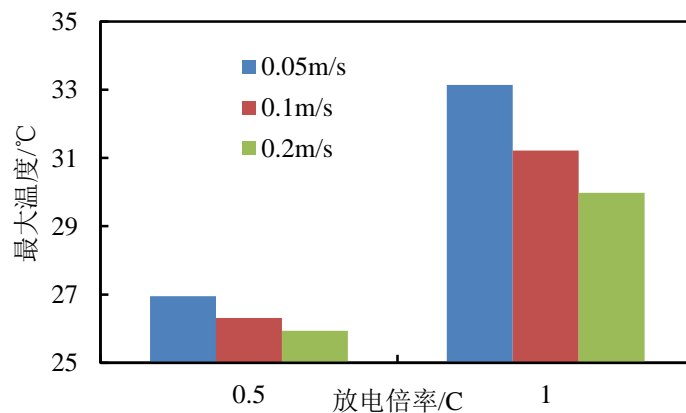


图 5.24 电池组最大温度统计

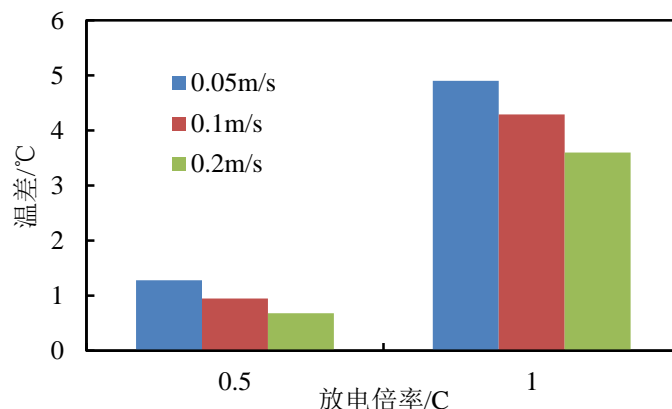


图 5.25 电池组温差统计

5.7 本章小结

本章建立了电池组的液体冷却模型，研究了导热板材料、冷却液类型、冷却液流速等因素对电池组散热性能的影响。并针对初始液冷结构存在电池组温度均匀性差的问题，提出了导热板局部加厚的优化措施。

(1)铜、铝、钢和导热硅胶四种导热板材料中，铜和铝散热性能良好，钢和导热硅胶散热性能较差，考虑到成本和加工性能等因素，认为铝为最佳的导热板材料。

(2)水、50%乙二醇水溶液和#45 变压器油的冷却性能依次递减，但在电池组温度均匀性上的表现却逐渐变好，因此在选择冷却液的时候需要综合考虑。

(3)增大冷却液流速可以有效降低电池组温度和提高了电池组温度均匀性，但当冷却液流速大于 0.2m/s 时，增大流速对降低电池组温度和减小电池间温差的作用不大。

(4)加厚导热板局部的方法，可有效改善电池组温度均匀性。

总结与展望

锂离子电池作为纯电动汽车动力的唯一来源，其性能直接影响着车辆的性能和安全性。温度作为影响锂离子电池性能的重要参数，直接影响着电池的可充放电容量、内阻、老化速率和安全性等。因此，研究锂电池热特性、建立相关热模型、设计合理的散热系统对电动汽车的安全高效运行具有重要意义。

本文以 18650 三元离子电池为研究对象，在详细分析国内外电动汽车电池热模型及电池热管理研究现状和发展趋势的基础上，讨论了锂离子电池的结构特点及工作原理，研究了电池的热特性，建立了相应的电池热模型并通过实验加以验证。通过试验，研究了电池组的热特性，针对电池组散热不良等问题设计了液冷式电池热管理系统。然后，使用数值仿真方法研究了液冷系统在多工况下的散热性能并对系统的结构进行了优化设计。以下为具体的研究内容：

(1) 查阅了大量的文献资料，介绍了课题研究的背景，详细分析了电动汽车和电池热管理的研究现状和发展趋向。

(2) 对 18650 锂离子电池进行充放电试验研究。分析了充放电过程锂离子电池的温升特性、电压特性和容量特性。并提出了基于恒流-恒压充电法的锂离子电池温升特点的阶段划分方法，并总结了各阶段的特点。使用热成像仪分析了不同放电倍率和不同放电深度下电池的温度分布规律。

(3) 根据 18650 锂离子电池的生热、传热、散热机理及其结构特点，考虑电池帽、正极引线、负极引线和电池卷绕的欧姆热，建立了圆柱形三元锂离子电池的多部件热模型。进行了单体电池的数值仿真，研究了不同放电倍率下电池的温度变化及温度分布规律，并通过实验验证了模型的准确性。

(4) 进行了电池组温度场试验，研究了电池组不同充放电倍率下的温度分布，对比分析电池组纵向和横向的温度分布特点。1C 倍率充电结束时，纵向最大温差为 2.8℃，横向最大温差比纵向最大温差大，达到 4.3℃。1C 放电结束后，电池组纵向温差为 2.1℃，横向温差为 4.9℃，与充电情况相近。对于 1C 倍率的充电和放电过程，电池组的最高温度比单体的分别高出 10℃ 和 9.1℃。通过对比电池单体与电池组充放电的温升特性，可知电池组的散热条件远差于电池单体，因此，电池成组后需要增加良好的散热系统。

(5) 基于建立的电池组液冷模型，使用数值方法研究了导热板材料、冷却液类型、冷却液流速等因素对电池组散热性能的影响。并针对初始液冷结构存在电池组温度均匀性差的问题，提出了导热板局部加厚的优化方法。仿真结果表明：铜、铝、钢和导热硅胶四种导热板材料中，铜和铝散热性能良好，钢和导热硅胶散热

性能较差,考虑到成本和加工性能等因素,认为铝为最佳的导热板材料;水、50%乙二醇水溶液和#45 变压器油的冷却性能依次递减,但在电池组温度均匀性上的表现却逐渐变好,因此在选择冷却液的时候需要综合考虑;增大冷却液流速可以有效降低电池组温度和提高电池组温度均匀性,但当冷却液流速大于 0.2m/s 时,增大流速对降低电池组温度和减小电池单体间的温差作用不大;采用加厚导热板局部的方法,可有效改善电池组温度均匀性。

本文虽然对三元锂离子电池的热特性、热模型和散热结构进行了一定的研究,也取得了一些成果,但是由于受到时间、试验条件等的限制,仍然存在不足之处,许多后续工作需要进一步展开。

(1)应该考虑环境温度对电池内阻、充放电容量和温升等的影响,在热模型的计算中,考虑温度对生热速率的影响,建立更加准确的电池生热速率模型。

(2)在分析液冷电池热管理系统时,仅考虑电池组的冷却,没有包括电池低温环境下的加热,而在实际使用过程往往包括高温和低温工况。因此,后续工作可以围绕电池组的加热展开研究。

(3)由于受到时间及条件的限制,并没有进行液冷电池组的试验研究,后续工作可以增加液冷电池组的试验测试,以验证液冷模型的可行性。

参考文献

- [1] Amjad S, Neelakrishnan S, Rudramoorthy R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(3): 1104-1110.
- [2] Oikonomou V, Becchis F, Steg L, et al. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4787-4796.
- [3] Wada M. Research and development of electric vehicles for clean transportation[J]. *环境科学学报(英文版)*, 2009, 21(6): 745-749.
- [4] Andersen P H, Mathews J A, Rask M. Integrating private transport into renewable energy policy: the strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(7): 2481-2486.
- [5] Endo E. Market penetration analysis of fuel cell vehicles in Japan by using the energy system model MARKAL[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(10-11): 1347-1354.
- [6] Brown S, Pyke D, Steenhof P. Electric vehicles: the role and importance of standards in an emerging market[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(7): 3797-3806.
- [7] Oh K Y, Epureanu B I. A novel thermal swelling model for a rechargeable lithium-ion battery cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 303: 86-96.
- [8] Hu X, Jiang J, Cao D, et al. Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse bayesian predictive modeling[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2645-2656.
- [9] Wang C Y, Zhang G, Ge S, et al. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures[J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 515-518.
- [10] Yang Y, Hu X, Qing D, et al. Arrhenius equation-based cell-health assessment: application to thermal energy management design of a HEV NiMH battery pack[J]. *Energies*, 2013, 6(5): 2709-2725.
- [11] Grolleau S, Delaille A, Gualous H, et al. Calendar aging of commercial graphite/LiFePO₄ cell—predicting capacity fade under time dependent storage conditions[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 255(6): 450-458.

- [12] Jaguemont J, Boulon L, Dube Y. Characterization and modeling of a hybrid electric vehicle lithium-ion battery at low temperatures[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 65(1): 1-14.
- [13] Ji Y, Zhang Y, Wang C Y. Li-ion cell operation at low temperatures[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, 160(4): A636-A649.
- [14] Jaguemont J, Boulon L, Dubé Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 99-114.
- [15] 陈薪, 杨裕生. 动力电池安全性不容小觑[J]. *低碳世界*, 2012(8): 38-41.
- [16] 何向明, 冯旭宁, 欧阳明高. 车用锂离子动力电池系统的安全性[J]. *科技导报*, 2016, 34(6): 32-38.
- [17] Li Z, Lu L, Ouyang M, et al. Modeling the capacity degradation of LiFePO₄/graphite batteries based on stress coupling analysis[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(22): 9757-9766.
- [18] Sarasketa-Zabala E, Gandiaga I, Rodriguez-Martinez L M, et al. Calendar ageing analysis of a LiFePO₄/graphite cell with dynamic model validations: towards realistic lifetime predictions[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 272(February 2015): 45-57.
- [19] Sherfey J M, Brenner A. Electrochemical calorimetry[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1958, 105(11): 665-672.
- [20] Gibbard H F. Thermal properties of battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1978, 125 (3): 353-358.
- [21] Newman, Bernardi, Pawlikowski. A general energy-balance for battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [22] Lin R, Newman J. Heat-generation rate and general energy balance for insertion battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1997, 144(8): 2697-2704.
- [23] Gu W B, Wang C Y. Thermal-electrochemical modeling of battery systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(8): 2910-2922.
- [24] Botte G G. Influence of some design variables on the thermal behavior of a lithium-ion cell[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, 146(3): 914.
- [25] Hallaj S A, Maleki H, Hong J S, et al. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 1999, 83(1-2): 1-8.

- [26] Sato N. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2010, 99(1): 70-77.
- [27] Johnson V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [28] Wu M S, Liu K H, Wang Y Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 160-166.
- [29] Kazuo Onda, Takamasa Ohshima, Masato Nakayama, et al. Thermal behavior of small lithium-ion secondary battery during rapid charge and discharge cycles [J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 157: 17-25.
- [30] Chen S C, Wan C C, Wang Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 140(1): 111-124.
- [31] Bharathan D, Pesaran A, Vlahinos A, et al. Improving battery design with electro-thermal modeling[C]// Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference. IEEE, 2005.
- [32] Ma Y, Teng H, Thelliez M. Electro-thermal modeling of a lithium-ion battery system[J]. Sae International Journal of Engines, 2010, 3(2): 306-317.
- [33] Dong H J, Baek S M. Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(8-9): 2973-2981.
- [34] Xu M, Zhang Z, Wang X, et al. A pseudo three-dimensional electrochemical-thermal model of a prismatic LiFePO₄ battery during discharge process[J]. Energy, 2015, 80: 303-317.
- [35] Veth C, Dragicevic D, Pfister R, et al. 3D electro-thermal model approach for the prediction of internal state values in large-format lithium ion cells and its validation[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(14): A1943-A1952.
- [36] 李腾, 林成涛, 陈全世. 锂离子电池三维多层多物理场模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012(7): 995-1000.
- [37] Wu B, Yufit V, Marinescu M, et al. Coupled thermal-electrochemical modelling of uneven heat generation in lithium-ion battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2013, 243(6): 544-554.
- [38] Jiang F, Peng P, Sun Y. Thermal analyses of LiFePO₄/graphite battery discharge processes[J]. Journal of Power Sources, 2013, 243(6): 181-194.
- [39] Pesaran A A. Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and Solutions[J]. Battery Man, 2001.

- [40] Choi K W, Yao N P. Heat transfer in lead-acid batteries designed for electric-vehicle propulsion application [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1979, 126(8): 1321-1328.
- [41] Chen Y, Evans J W. Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(7): 1833-1837.
- [42] Pesaran A A, Burch S, Keyser M. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs[C]// In: Proceedings of the Fourth vehicle thermal management systems conference and exhibition, 1999.
- [43] Pesaran A A, Kim G H. Battery thermal management system design modeling[C]// In: Proceedings of the 22nd international battery, hybrid and fuel cell electric vehicle conference and exhibition. Yokohama, Japan, 2006.
- [44] Kelly K J, Rajagopalan A. Benchmarking of OEM hybrid electric vehicles at nrel: milestone report[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [45] Kelly K J, Mihalic M, Zolot M. Battery usage and thermal performance of the toyota prius and honda insight during chassis dynamometer testing[C]// Battery Conference on Applications and Advances, 2002, the Seventeenth. IEEE Xplore, 2002: 247-252.
- [46] Zolot M, Pesaran A A, Mihalic M. Thermal evaluation of toyota prius battery pack[C]// Future Car Congress. 2002.
- [47] Bandhauer T M, Garimella S, Fuller T F. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(3): R1.
- [48] Nelson P, Dees D, Amine K, et al. Modeling thermal management of lithium-ion PNGV batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 349-356.
- [49] 楼英莺. 混合动力车用镍氢电池散热系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [50] Mahamud R, Park C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(13): 5685-5696.
- [51] Vlahinos A, Pesaran A A. Energy efficient battery heating in cold climates[C]// Future Car Congress. 2002.

- [52] Pesaran A A, Vlahinos A, Stuart T A. Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles[C]// In: Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference. Hawaii Island, Hawaii, 2003.
- [53] Volvo C30 electric equipped with three climate systems; bioethanol heater [EB/OL].<http://www.greencarcongress.com/2011/03/c30-20110328.html>, 2011-3-28.
- [54] Shimada M. A vehicle driven by electricity, designed for chill and snowy areas[J]. *Sensors&Actuators A Physical*, 2013, 200: 168-171.
- [55] Rugh J P, Pesaran A, Smith K. Electric vehicle battery thermal issues and thermal management techniques[J]. Office of Scientific&Technical Information Technical Reports, 2013.
- [56] 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.
- [57] Faass A, Clough E. Battery module with integrated thermal management system: US, US8906541[P]. 2014.
- [58] Jin L W, Lee P S, Kong X X, et al. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management[J]. *Applied Energy*, 2014, 113(1): 1786-1794.
- [59] Khateeb S A, Farid M M, Selman J R, et al. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. *Journal of Power Sources*, 2004, 128(2): 292-307.
- [60] 张国庆, 饶中浩, 吴忠杰, 等. 采用相变材料冷却的动力电池组的散热性能[J]. *化工进展*, 2009, 28(1): 23-26.
- [61] Al-Hallaj S. Safety and thermal management for Li-ion batteries in transportation applications[R], presented at the EV Li-ion Battery Forum Europe. Barcelona, Spain, 2012.
- [62] Rao Z, Wang S, Zhang G. Simulation and experiment of thermal energy management with phase change material for ageing LiFePO₄ power battery[J]. *Energy Conversion & Management*, 2011, 52(12): 3408-3414.
- [63] Khateeb S A, Amiruddin S, Farid M, et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 142(1): 345-353.
- [64] Sabbah R, Kizilel R, Selman J R, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs:

- limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 630-638.
- [65] Kizilel R, Sabbah R, Selman J R, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(2): 1105-1112.
- [66] 王芳,夏军. 电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M]. 北京:科学出版社, 2016: 23-24.
- [67] Omar N, Daowd M, Hegazy O, et al. Standardization work for BEV and HEV applications: critical appraisal of recent traction battery documents[J]. Energies, 2012, 5(1): 138-156.
- [68] Pendergast D R, Demauro E P, Fletcher M, et al. A rechargeable lithium-ion battery module for underwater use[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(2): 793-800.
- [69] Battery test manual for plug-in hybrid electric vehicles[R]. Idaho Falls: U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Program, 2008.
- [70] 王峰,李茂德. 电池热效应分析[J]. 电源技术, 2010, 34(3): 288-291.
- [71] Lu W, Prakash J. In situ measurements of heat generation in a Li/mesocarbon microbead half-cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2003, 150(3): A262-A266.
- [72] 楼英莺,王文,娄豫皖,等. 镍氢电池充放电传热过程模拟[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(3): 457-460.
- [73] 田爽. 锂离子电池的热特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [74] 陈鑫,刘莉,李昱霖,等. 高超声速飞行器翼面气动加热、辐射换热与瞬态热传导的耦合分析[J]. 弹道学报, 2014(2): 1-5.
- [75] FPIE Al. Fundamentals of heat and mass transfer 6th Ed.[M]. Wiley, 2007.
- [76] 冯旭宁, 车用锂离子动力电池系统热失控机理、建模与防控研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [77] 吴民生, 段文广. 计算流体动力学(CFD)在流体机械领域的应用[J]. 装备制造技术, 2008(12): 36-37.

附录 A 攻读学位期间发表的论文和获得成果

1.发表的学术论文:

[1] Xiaolong Yang*, **Pengfei Yang**, Zeping Zhang et al. Experimental and numerical study on thermal performance of Li(NixCoyMnz)O₂ spiral-wound lithium-ion batteries. Applied Thermal Engineering, 2018, 138: 446-455.

2.专利和软件著作权:

[1] **杨鹏飞**, 杨小龙, 张泽坪, 李斌. 车用动力电池参数在线检测与预警软件 V1.0. 著作权登记号: 2018SR258847.

[2] 朱浩, 邓元望, 杨小龙, 江银锋, **杨鹏飞**, 张泽坪. 一种电池模组. 中国专利. 206992179U, 2018-02-09.

致 谢

在本人读研期间，恩师杨小龙副教授在学习上和生活上给予了很大的帮助与支持，在此特别感谢杨老师3年来对我学业上的辛勤付出。

从最初研究方向的选择，到论文的选题、开题、研究过程到最终的撰写，杨老师在每个阶段都给予了细心的指导与帮助。杨老师渊博的专业知识、严谨的治学态度为我树立了榜样。在研究生期间，参加校外的学术交流活动也得到了杨老师的大力支持，使我的知识得到了进一步的拓展。再次，衷心地感谢杨老师！

感谢湖南宏迅亿安新能源科技有限公司给予的实习机会，感谢公司在实验方面给予的帮助，使我的论文得以顺利完成。

同时感谢张泽坪师兄、杨功正师兄和张家馨师兄在学术上给予了我很大帮助。感谢我的同门胡继浩三年的学业与生活相伴。也要感谢段永康、贺灵明、张家峰、李斌、胡昱、胡圣贤和龚政师弟及霍梦梦师妹对我的帮助和关心。

特别感谢我的本科同学郑宝均、胡涛、严南华、徐思鹏和高亚新，感谢你们给予我学业上的鼓励与支持，使我有不断战胜困难的勇气。

感谢清华大学任东生学长对我长期以来的帮助，从本科期间节能赛场经验的分享到研究生期间论文投稿的指导都给予我很大的帮助。

特别感谢我的家人，你们的支持和关心是我完成学业的最大动力。父母为了支持我的学业，辛劳一生，对于你们的恩情，我无以为报，学业的顺利完成是给你们最大的安慰。

最后，衷心感谢参与我论文评审和答辩的各位老师。

杨鹏飞

2018年4月于桃子湖畔之湖南大学