



学位论文题目

电动汽车电池热特性及电池组风冷散热研究

作者姓名

罗宗鸿



南昌航空大学

硕士学位论文

题目

电动汽车电池热特性及电池组 风冷散热研究

作者姓名 _____ 罗宗鸿

指导教师 _____ 李志农 教授 肖尧先 教授

学科、专业 _____ 机械工程

2018年5月

分类号: TM912; U461.5

学校代码: 10406
学号: 150308520108

南昌航空大学
硕士学位论文
(学位研究生)

电动汽车电池热特性及电池组
风冷散热研究

硕士研究生 : 罗宗鸿

导 师 : 李志农 教授 肖尧先 教授

申请学位级别: 硕 士

学科、专业 : 机械工程

所在单位 : 航空制造工程学院

答辩日期 : 2018 年 5 月

授予学位单位: 南昌航空大学

Research on Battery Thermal Characteristics and Air Cooling Heat Dissipation of Battery Packs for Electric Vehicles

A Dissertation

Submitted for the Degree of Master

On Mechanical Engineering

By **Luo Zonghong**

Under the Supervision of

Prof. Li Zhinong

Prof. Xiao Yaoxian

School of Aeronautical Manufacturing Engineering

Nanchang Hangkong University, Nanchang, China

May, 2018

摘要

本文在国家自然科学基金(No.51675258,51261024,51075372)、江西省科技计划项目(No.20141BBE50021)和鸥瑞智诺能源科技(天津)有限公司资助下,针对当前电动汽车领域,电池组在工作过程中热量积累过多、箱体内部温度过高、对环境适应能力差,致使动力电池组在热滥用条件下工作时,出现电池性能下降,循环寿命缩短等一系列问题。首先,分析了目前电池模组主要的排列方式以及电池箱体散热结构特点,有相关学者只研究了箱体进风口开设对箱体内部温度场分布的影响,却未对出风口做过多研究,本文结合圆柱电池特点,首先提出了在箱体不同位置处开设进、出风口结构;其次,运用实验结合计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)仿真的方法,采用 18650 型号的圆柱电池建立二维模型,研究了电池箱不同排列及进、出风口开设下,在同一风速时,箱体内部的温度场、速度场变化规律;最后,运用相关实验及 CFD 仿真,研究了圆柱电池三维模型在不同排列下,其风冷散热的有效性以及所存在的局限性,为后续电池组热管理系统设计提供理论指导以及可靠性依据,甚至还可以节省热管理系统开发成本等。本文研究对象为目前主流的车用锂离子电池,主要是从如下几个方面来做的研究:

1、论述了本研究方向的选题背景及研究意义,综述了电动汽车动力电池的发展、动力电池热管理系统国内外研究现状,分析了目前热管理系统所存在的优点及不足,基于此,提出了本论文的研究内容和创新点。

2、考虑到锂离子电池的结构特点,对不同结构的电池进行了生热机理分析,对其电池热物性参数进行了计算,同时,在直角坐标系及圆柱坐标系下按照动量、质量以及能量守恒定律分别建立了不同结构下的导热微分方程,为后续电池温度场研究奠定基础。

3、针对锂离子电池单体做了不同温度下的充放电容量测试以及不同放电倍率下的温升实验,从中得出环境温度对电池充放电性能的影响以及放电倍率不同对电池内部温升的影响。建立了单体热效应模型,仿真计算单体不同放电倍率(0.5C/1C/1.5C/2C)下的温升变化,在实验中通过对单体不同部位粘贴热电偶,采集实验数据与仿真结果做对比分析,验证其所建电池三维热效应模型的可行性,也同时证明对电池热管理设计的必要性。

4、在电池组平行排列、叉形排列以及梯形排列下,通过在箱体不同位置处开设进、出风口。进风口正对于电池单体或电池间隙;出风口正对于电池单体或电

池间隙，建立了 18650 型号的圆柱电池组二维热效应模型。通过横、纵向对比，得出电池组：相同排列方式下，箱体进、出风口开设最优开设方案；不同排列方式下，最优排列方案。

5、由于二维排列下，进、出风口开设在同一平面，只能看出进出风口开设对电池箱内温度场和速度场分布的影响，没能够真正反映出电池箱风冷散热的效果，这是因为在热胀冷缩效应下，受热气体膨胀，密度减小，致使热空气上升，冷空气下降所导致的，所以，有必要建立电池组三维模型，研究风冷对电池组散热的有效性。故建立了圆柱电池两种不同排列下的三维模型，利用 CFD 软件，仿真了在恒倍率放电、不同风速(0.3m/s、0.7m/s、1.5m/s)下的电池组温度场分布，并对其温升数据做了对比分析：搭建了风冷散热实验平台，通过实验研究了不同风速下风冷散热的效果，并做了数据对比分析，验证了风冷散热的有效性。

6、最后对本论文所研究的内容作了总结，并对后续的研究做了进一步说明。

关键词：电动汽车，热管理，圆柱电池，电池组，计算流体力学，风冷散热，排列方式

Abstract

In this paper, under the support of the National Natural Science Foundation of China (No.51675258, 51261024, 51075372), Science and Technology Plan Project of Jiangxi Province (No.20141BBE50021), and Original Energy Technology(Tianjin) Co.,Ltd. In view of the current electric vehicle field, the battery pack has excessive heat accumulation during operation, the internal temperature of the cabinet is too high, and the adaptability to the environment is poor. As a result, when the power battery pack is operated under thermal abuse conditions, A series of questions,such as the battery performance is degraded and the cycle life is shortened. Firstly, the main arrangement of the battery module and the characteristics of the heat dissipation structure of the battery box are analyzed. Taking into account the requirements of the protection level of the box, the layout design of the inlet and outlet of the box is proposed at different positions of the box. Secondly, Combining with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation method and experiment, using the model 18650 cylindrical battery 2-dimensional model, the variation patterns of temperature field and velocity field inside the box at different wind speeds were studied. Finally, using the relevant experiments and CFD simulations, the effectiveness and possible limitations of the air-cooled heat dissipation of the 3-dimensional model of the cylindrical battery under different arrangement are studied, which provides theoretical guidance and reliability basis for the follow-up battery thermal management system design. It can even save the development cost of thermal management systems. The object of this article is the current mainstream automotive lithium-ion battery, mainly from the following aspects to do research:

1. The background and significance of this research direction are discussed. The development of pure electric vehicle power battery, the research status of power battery thermal management system at home and abroad are reviewed, and the advantages and disadvantages of the current thermal management system are analyzed. Based on this, it is proposed. The research content and innovations of this paper.

2. Taking into account the structural characteristics of lithium-ion batteries, the heat-generating mechanism of the batteries with different structures was analyzed and the thermal properties of the batteries were calculated. At the same time, the momentum, mass, and energy conservation laws were used in Cartesian and cylindrical coordinates.

Different heat conduction differential equations were established under different structures to lay the foundation for subsequent battery temperature field research.

3. The lithium-ion battery cells were tested for their charge and discharge capacity at different temperatures and temperature rise experiments at different discharge rates. The effect of ambient temperature on the charge and discharge performance of the battery and the effect size of different discharge rates on the internal temperature rise of the battery were obtained. A single thermal effect model was established to simulate and calculate temperature rise changes at different discharge rates (0.5C/1C/1.5C/2C). Paste thermocouples on different parts of the cell were used to obtain experimental data and simulation results. The comparative analysis shows that the relative error of the two is within 3%, which verifies the feasibility of the 3-dimensional battery thermal effect model. It also proves the necessity of battery thermal management and provides theoretical basis and method guidance for the follow-up battery thermal management design.

4. In the parallel arrangement of the battery pack, fork-shaped arrangement and trapezoidal arrangement, through the pack at different locations to open the inlet and outlet. The air inlet is for the battery cell and the battery gap; the air outlet is for the battery cell and the battery gap, and a 2D thermal effect model of the 18650 model cylindrical battery is established. Through horizontal and vertical comparisons, the battery group is obtained: under the same arrangement, the optimal opening scheme for the inlet and outlet of the box is set; under the different arrangement methods, the optimal arrangement scheme is adopted.

5. Due to the 2-dimensional arrangement, the air inlet and outlet are set on the same plane, and only the effect of the inlet and outlet openings on the distribution of the temperature field and velocity field in the battery box can be seen. This does not truly reflect the cooling effect of the air cooling of the battery box. Because of the thermal expansion and contraction effect, the heated gas expands and the density decreases, resulting in hot air rising and cold air falling. Therefore, it is necessary to establish a three-dimensional model of the battery pack to study the effectiveness of the air cooling on the heat dissipation of the battery pack. Therefore, a three-dimensional model of a cylindrical battery with two different arrangements was established. Using CFD software, the temperature field distribution of the battery at constant rate discharge and different wind speeds (0.3m/s, 0.7m/s, 1.5m/s) was simulated. , and made a comparative

analysis of its temperature rise data: set up an air-cooled heat dissipation experimental platform, and studied the effectiveness of air-cooled heat dissipation under different wind speeds, and conducted comparative analysis of its data.

6. Finally, the content of the research in this paper is summarized, and the follow-up research is further explained.

Keywords: Electric vehicle, Thermal management, Cylindrical battery, Battery pack, Computational fluid dynamics, Air cooling heat dissipation, Arrangement method

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	VI
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.2 电动汽车动力电池的发展.....	2
1.3 电动汽车电池组热管理系统概述.....	4
1.3.1 电动汽车电池组热管理系统的研究意义.....	4
1.3.2 电动汽车电池组热管理系统分类及优缺点.....	5
1.3.3 电动汽车电池组热管理国内外研究现状.....	9
1.4 论文的主要研究内容及架构.....	11
1.5 论文的创新点.....	11
1.6 本章小结.....	12
第 2 章 锂离子电池热特性及 CFD 基础理论研究.....	13
2.1 锂离子电池结构特点及工作原理.....	13
2.1.1 锂离子电池的结构特点.....	13
2.1.2 锂离子电池的工作原理.....	14
2.2 锂离子电池热特性研究.....	15
2.2.1 锂离子电池的生热机理.....	15
2.2.2 锂离子电池组热特性分析.....	16
2.3 锂离子电池热特性参数的计算.....	17
2.3.1 生热速率计算.....	17
2.3.2 导热系数计算.....	18
2.3.3 比热容计算.....	19
2.4 锂离子电池温度场研究及 CFD 基础理论.....	19
2.4.1 锂离子电池温度场研究方法.....	20
2.4.2 CFD 概述及基本控制方程.....	23
2.4.3 CFD 离散方法及求解步骤.....	25
2.5 本章小结.....	26

第 3 章 锂离子电池单体温升研究及热效应建模分析.....	27
3.1 锂离子电池单体充放电温升实验.....	27
3.1.1 实验设备.....	27
3.1.2 实验方案.....	29
3.1.3 实验数据分析.....	31
3.2 锂离子电池单体温度场建模.....	36
3.2.1 锂离子电池单体热特性模型建立.....	37
3.2.2 锂离子电池单体热特性参数计算.....	38
3.3 锂离子电池单体建模.....	40
3.4 仿真条件设置及数据分析.....	42
3.4.1 仿真条件设置.....	42
3.4.2 仿真后处理分析.....	43
3.5 本章小结.....	51
第 4 章 锂离子电池组排布设计及温度场研究.....	52
4.1 引言.....	52
4.2 锂离子电池组排布模型的建立.....	52
4.2.1 国内外典型的电动汽车电池包.....	53
4.2.2 电池模组设计.....	56
4.3 锂离子电池组温度场仿真.....	58
4.3.1 电池组二维模型建立与网格划分.....	58
4.3.2 电池组二维模型仿真数据分析.....	61
4.4 本章小结.....	68
第 5 章 锂离子电池箱三维风冷散热仿真与实验研究.....	70
5.1 引言.....	70
5.2 常用的散热方法.....	70
5.3 电池箱风冷散热三维仿真研究.....	71
5.3.1 电池组平行排列下的风冷散热仿真研究.....	71
5.3.2 电池组叉形排列下的风冷散热仿真研究.....	75
5.4 电池组叉形排列实验研究.....	78
5.4.1 电池组叉形排列实验平台搭建.....	78
5.4.2 电池组叉形排列实验数据分析.....	80
5.5 本章小结.....	82
第 6 章 总结与展望.....	84

6.1 总结.....	84
6.2 展望.....	85
参考文献.....	87
攻读硕士学位期间发表的论文和参加科研情况.....	92
致谢.....	93

南昌航空大学

第 1 章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

在环境污染和能源短缺的大环境下，发展新能源已成为大势所趋，国内外都在积极规划能源发展布局。欧盟等国家对车辆节能减排十分重视，其拟定的新环保法规定，预计到 2030 年城市中燃油车数量减半，2050 年城市中禁止使用燃油车^[1]。日本早在 2009 年就开始施行绿色税制，在汽车相关税收方面做了大面积调整，来鼓励新能源车以及低排放车辆的使用^[2]。中国到目前为止也施行了多项节能减排的能源法规，如《新能源政策补贴方案》等^[3,4]，来鼓励消费者使用。

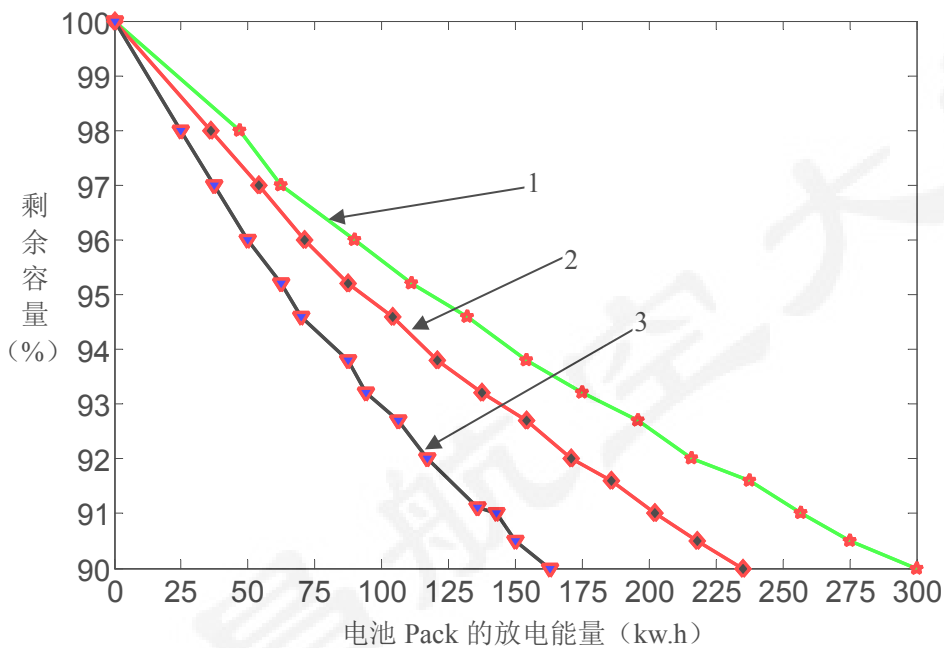
汽车节约能源，关键是看动力系统，电动汽车无疑是这方面的首选，电动汽车作为未来汽车发展的必然趋势，它以能源使用效率高、清洁低污染的优点著称，在国内外迅速得到了井喷式的发展。我国新能源汽车产业在 21 世纪初才开始发展，2001 年，国家“十五”期间“863”重大科技攻关项目中就包括了新能源汽车研究专项，在接下来一个五年期间又提出了“节能和新能源汽车的战略”。美国从 2009 年就开始投入 25 亿美元支持电动汽车领域发展^[5]。德国在电动汽车发展研究上投入了将近 5 亿欧元，计划在 2020 年电动汽车产量达到 100 多万辆，2030 年预计超过 500 万辆。

电池包作为新能源汽车的主要储存能量的装置，是新能源汽车大三电系统的核心部件，然而，由于新能源汽车电池技术方面的限制，在续航里程、加速性能、爬坡性能、安全性能以及充电时间长等方面较之传统的燃油汽车还有一定的差距，其制约了电动汽车的发展，所以，当前动力电池的研究在高安全的基础上将高功率、高容量作为其发展方向。目前，国内外所使用的动力电池主要多以锂离子电池包作为动力源，而且是由许多锂离子电池单体采用串、并联方式组成电池模组，电池组在工作时，电池内部电化学材料产生化学反应，将化学能转化为热量，由于电池组单体之间空间狭小，从而出现大量的热量累积，如果这部分热量不能进行及时传递到外界，会造成箱内模组温度场分布不均匀，致使电池模组以及组成模组的单体之间温差离散化加剧，从而影响电池单体的充放电性能、安全性以及循环寿命等，图 1-1 为国内某款锂电池组环境温度对电池循环寿命的影响曲线。

随着电池充放电过程的进行，热量在不同部位的大量积累导致电池局部温度快速上升，导致电池内部温度场变化梯度大，致使电池性能快速衰减，造成电池热

失控，甚至导致电动汽车电池发生爆炸燃烧，这也正是现阶段电动汽车所面临的
最大安全考虑因素，下图 1-2 为热失控造成的电动汽车爆燃。

基于以上电池包所存在的种种原因，对电池包温度管理已经刻不容缓，合理的
电池组热管理设计，对于延长电池包循环寿命，进而促进新能源汽车产业的发展，
具有无比深远的意义。



1、25°C下放电； 2、30°C下放电； 3、35°C下放电

图 1-1 温度对循环寿命的影响



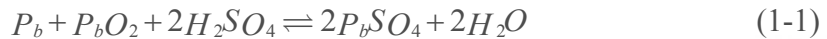
图 1-2 电池热失控造成的爆燃

1.2 电动汽车动力电池的发展

电动化是汽车转型升级的终极趋势，电动汽车是未来汽车发展的终极方向。

汽车车载电池组的发展经过了下面不同的几个阶段：铅酸蓄电池、镍氢电池、锂离子电池以及燃料电池阶段^[6]。

铅酸蓄电池是最早运用在电动汽车的二次电池，它采用 PbO_2 做正极， Pb 做负极，用 H_2SO_4 做电解液^[7]，其发生的化学反应为公式(1-1)所示：



铅酸电池技术已得到相当完善，其制造成本也比较便宜，由于电池工作时其反应过程有沉淀析出，使得电池的充放电性能受到限制，这种情况在低温下非常显著，这也是铅酸电池存在电池记忆效应的原因；而且铅酸蓄电池自放电率高、体积大、质量比能量低以及内部材料组成中有重金属会对环境污染影响很大等等，使得铅酸电池的应用范围受到显著的限制，现在只能用在客户要求不高的低端且速度不高的电动车辆上^[8]。

镍氢电池是由氢离子、金属镍化合组成，是基于其它电池的基础上开发出来的一种新型绿色电池^[9]，主要以 KOH 作为电解液，其充放电总反应为公式(1-2)所示：



镍氢电池较之铅酸电池其优势主要有：能量密度、功率密度更高以及可以进行大电流放电，不会污染环境等；但其缺点主要有：自放电率高，满电常温下存储其自放电率为 30%~50%；高温性能差，环境温度对其电池性能的影响比较大，在过充和过放时会排除气体，这些因素使得镍氢电池的发展受到限制^[10]。

锂离子电池最早是由日本 SONY 公司于 1990 年研发制造，由于其优点突出，被国内外所重视并投入大量资金研发制造，快速向量产化发展^[11]。锂离子电池具有以下优点：(1)电压高，按照正极材料的不同，标称电压分别可以达到 3.7~3.8V 以及 3.2V，其电压是镍氢电池标称电压的 3 倍，铅酸电池电压的 2 倍^[12]；(2)质量比和体积比能量大；(3)循环寿命长；(4)安全性能好，电池无记忆效应^[13]，无重金属污染其环保性能也非常好；(5)自放电率小，常温充满电环境下储存 1 个月后的自放电率为 2% 左右；(6)可快速充放电；(7)工作温度范围宽，工作温度为 $-20^{\circ}C \sim 60^{\circ}C$ 之间。目前，锂离子电池在新能源汽车领域获得了广泛的商业应用，经过电池技术不断地更新和发展，已逐渐成为市场主流，尤其是三元材料锂离子电池。

燃料电池是以电解液为媒介，利用氢气与氧气反应来提供电力的一种电化学发电器。燃料电池主要由氢氧两极以及夹在两极之间的电解质组成。其具有如下特点：(1)能量转化效率高；(2)零污染；(3)车辆性能接近燃油汽车^[14]；(4)结构简单可靠，运行平稳。然而，燃料电池在目前的技术条件下，其在应用中仍有许多不足之处需要解决，如所使用燃料种类的单一性，燃料电池需要高质量的密封性以

及比功率还需要进一步的提高，还有就是燃料电池制作成本太高以及需要配备辅助电池系统等存在的问题需要解决。

1.3 电动汽车电池组热管理系统概述

1.3.1 电动汽车电池组热管理系统的研究意义

电动汽车在驾驶过程中，动力电池组放电电流大小是个瞬时值。汽车在不同行驶工况(启动、制动、怠速、加速以及匀速等)下，电流瞬时变化致使电池单体生热不均匀^[87]。随着电动汽车发展，消费者对动力系统要求越来越高，在快速充放电的要求下，使得电池在大倍率放电时产生很多热量，热量的聚集使得箱内不同单体以及由单体组成的每个模组之间，出现了特别严重的温度场不均匀分布，最后导致单体间性能离散化加剧，甚至损坏模组及其内部的部分单体。

电动汽车电池包是以串并联成组的方式为车辆提供驱动能源，在电池包工作时，其放出的总能量并不是由简单的每个单体电池的能量相加得到。若电池组在运行过程中，未对温升进行热管控，则温度的升高对纯电动汽车电池有着双重的影响：(1)使其电池内部阻抗减小，电池单体的充放电性能提高；(2)会加剧单体里面产生的有害化学反应速率，进而损坏电池包结构，缩短其使用循环寿命，致使技术人员频繁的更换模组或单体，从而增加了车辆使用成本^[15]。而电动汽车电池组的安全问题，是电动汽车得以推广和使用的关键^[89]。有研究显示电池箱内部温度每增加10℃，将会使得单体、模组内部的电化学反应速率上升1倍。当镍氢电池工作在45℃环境下时，其循环寿命大概降低了60%^[16]。当电池大倍率工作时，温度每上升5℃，会使得电池循环寿命减半^[17]。黎火林等^[18]通过研究发现当锂离子电池容量衰减率为30%时，其在45℃下的循环寿命为3323次，而在60℃下，只有1037次。文献[19]研究发现，电池模组内部的产热量使得在内部的单体温度可以达到100℃，在电池模组过充时可以升高到199℃与模组外侧温度差可以达到90℃。

电池单体间性能的均匀性、模组间性能的一致性是影响电池包性能的主要因素，即便是模组刚组装时单体之间的均匀性非常好，但是在工作进程中，如果不进行热管控，将使得单体之间以及模组之间温差进一步被拉大，如果不尽早解决，这种现象会随着工作时间的增加，使得模组温度场离散化程度加剧，从而致使电池充放电整体性能降低，最终会影响到电池组的使用循环寿命和安全性能，甚至为电池包的安全埋下了严重隐患^[20]。

基于以上分析，电动汽车由工作过程中电池组产生的温升所导致的问题主要

有：(1)不论电池在高温环境下工作还是大倍率充放电所引起的高温，都会使得电池整体性能衰减，出现一些无法预知的安全隐患；(2)电池单体生热不均匀、电池模组各单体之间温度场分布不一致，都会致使电池组整体的循环使用寿命下降，最终使得整车动力性能严重降低；(3)低温环境下电池充放电效率低，电池放电深度与动力电池性能不一致，使得纯电动汽车在低温环境下应用受到限制^[86]。

总之，为了能使电池包在最理想的温度区间内工作，同时，保证各模组间有非常好的温升一致性，对电池箱温度管控显得尤为重要。热管理的主要目的是通过散热系统、加热系统以及保温系统三者结合的方法，保证电池组工作环境处于在合理的温度范围内，使得单体间具有较好的温度场均匀性。基于以上温度所带来的种种问题，必须针对电动汽车其有限的安装空间对应设计所装动力电池的结构以及热管理系统，来确保电池组的安全性能以及循环使用寿命，这也使得热管理系统成为了电动汽车电池组不可或缺的一部分，随着电动化的不断推进，电池热管理技术的不断提升，将会是一种必然趋势。

1.3.2 电动汽车电池组热管理系统分类及优缺点

电池组热管理系统从大的方向可分为两类：(1)主动式、被动式热管理系统；(2)以空气、液体、相变材料为介质的电池热管理系统以及冷板、热管等以制冷或制热为原理的热管理系统^[21]。在实际环境中，根据不同的工况条件、电池类型、电池结构、汽车结构尺寸和功率要求，有时或采用几种散热方式耦合集成在一起使用。

1、主动式风冷散热的散热过程其热量交换方式主要是强制对流，因此，若电池模组空间允许，可以安装散热装置来提供冷风，其散热过程如图 1-3 所示。该散热方式弱化了对于电池包的密封性要求，可运用在比较复杂的热管理设计中，在整车上电池的布置不受安装位置的限制，对整车的结构设计要求不大^[22]。

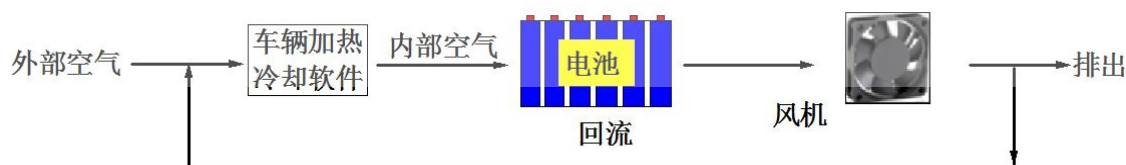


图 1-3 主动加热和散热 — 外部和内部空气流通

主动式液冷散热中采用整车自身冷却设备，电池组产生的热量通过液-液互换方式散去，其原理如图 1-4 所示。

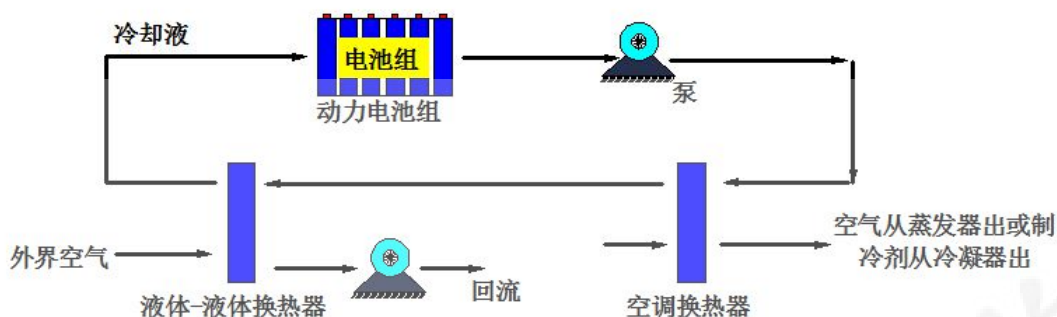


图 1-4 主动散热—液体循环

2、被动式风冷散热一般是指不借助外界能量，只利用车的行驶速度产生的自然风将电池的温度降低^[23]，如图 1-5、图 1-6 所示。该方法简单可靠，成本低，过程中热量的传递多以自然对流为主。但为了散热更好，电池模组、电池密封的外形都需要采用特别的结构设计以及特殊材质^[85]，或者是设置合理的流道空间，以增大电池的散热面积^[24]。

被动式液冷系统中，使用液态流体与外界冷却空气进行热对换的方法将电池产生的热量散去^[25]，其散热过程原理如图 1.7 所示。

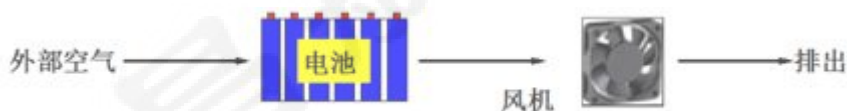


图 1-5 被动散热—外部空气流通

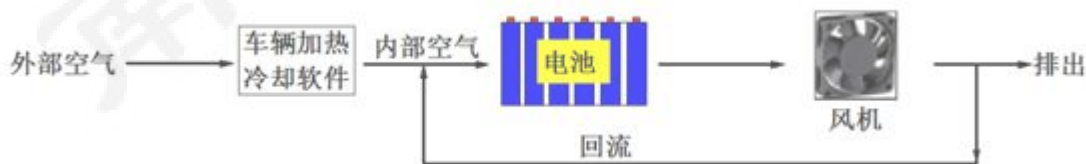


图 1-6 被动加热或散热—内部空气流通

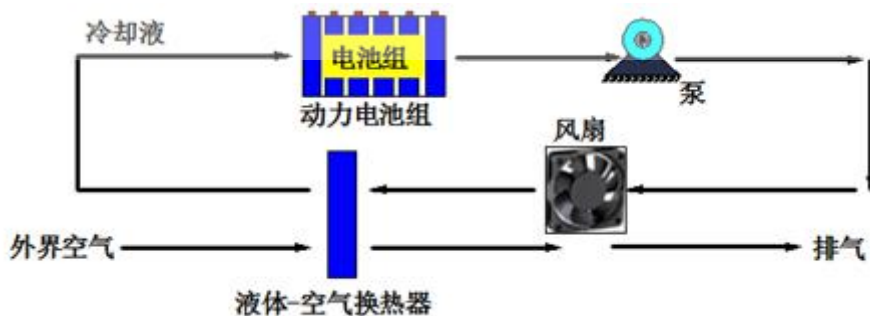


图 1-7 被动散热液体循环

3、以空气为冷却介质的电池组热管理系统，就是直接把空气导入使其流过模组表面以达到热管理的目的。不同单体之间的温差与电池模组的排列有非常大的关系，通常状态下，中心区域电池模组温度高，外围区域由于空气流通好，温度相对较低。因此，在设计电池模组散热排布时，应尽可能确保单体散热的一致性，根据空气流通方式，风冷式电池散热主要分为串行通风、并行通风两种，其流通原理如下图所示：

图 1-8 所示为串行风冷，冷却空气从左边进入，右边流出电池模组，空气在流通过程中逐渐被加热，冷却气体与单体以及模组的温差不断减小，冷却气体与电池表面的对流换热系数降低，冷却气体的温度不断升高，温度梯度逐渐增大^[81]。因此右边模组的散热效果比左边模块的差，电池模组温度场分布易出现右高左低的情况。

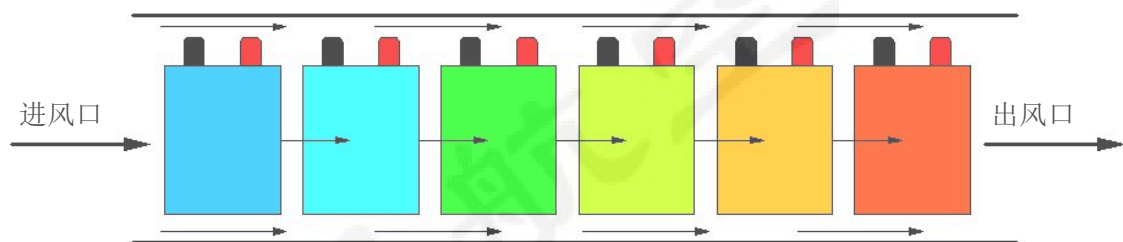


图 1-8 串行通风方式

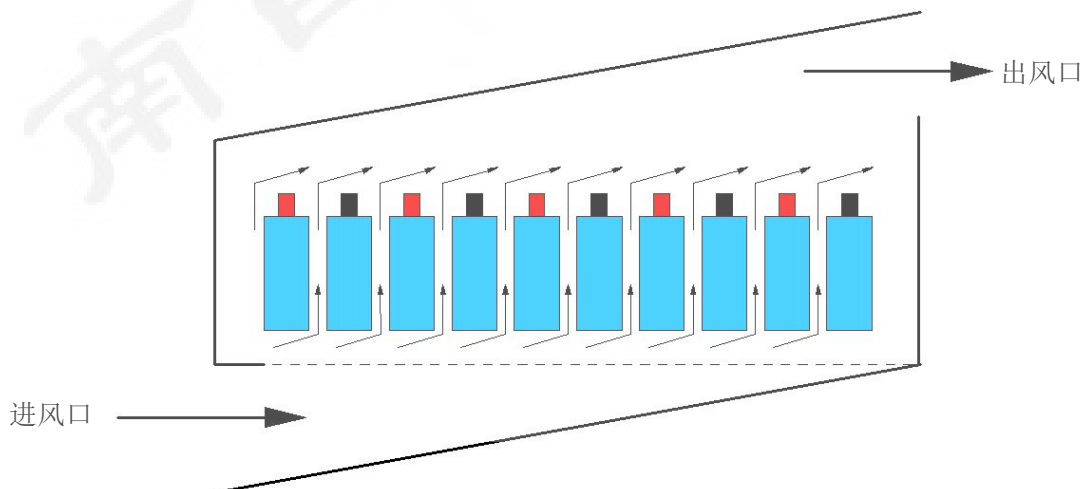
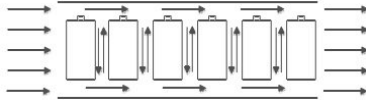
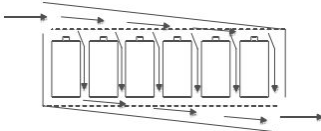


图 1-9 并行通风方式

图 1-9 所示为并行通风散热设计，能够保证扫过不同模组冷却风量的均匀性，设计了不同的进风与出风风道，来改变电池组不同位置处风道的进风量和压力角度，使流过单体、模组表面的风量均匀，实现电池模组温度场分布的均匀性。表

1-1 为风冷为介质的两种散热方法比较。

表 1-1 风冷为介质的两种散热方式比较

散热方式	示意图	适用单体类型	优点	缺点
串行通风		圆柱电池	换热系数高	进出口压差大
并行通风		方壳形电池	温度场一致性 好	换热系数低

4、以液体为介质的热管理系统。液体为冷却介质的热管理是指介质间接或直接与电池模组接触为其散热。根据模组与介质接触方式的不同，以液体为介质的散热系统可分成直接、间接接触式这两大类：

第一类散热系统，冷却介质直接与模组或单体表面接触，所采用的介质一般是与电绝缘或导热率高的液体，它能够非常好的处理模组之间温度均匀性的问题。其缺点主要有绝缘液体粘度系数大，致使液体流速通常不高，从而换热效果受到了局限。其影响散热能力的因素主要有介质的导热率、流体速度以及粘度等 [26]。

第二类散热系统，冷却介质在装置中流动，采用冷板等介质与单体或模组直接进行接触，把热量传导给冷板，再通过液体流动把热量带走，从而实现电池散热的目的，对于圆柱形电池，可布置成环形夹套式结构，由于没有绝缘及流速要求限制，可选择使用导热率高的液体，来改善换热效果。然而，在温度的一致性方面，不如直接接触液冷散热，而且间接接触散热时，为了预防漏液及电池内部短路，对管道的质量要求非常高 [27,28]。

以液体为介质的电池散热的优点主要有：(1)由于液体的导热系数较高，与电池表面间的对流换热系数高，散热能力强，冷却效率高；(2)散热系统结构体积小，符合电动汽车空间紧凑型的要求。

5、以相变材料为介质的热管理系统。相变材料 (Phase Change Material, PCM) 是指随着外界温度的变化来改变材料状态并能储热、放热的材料。PCM 由固态吸热变为液态或由液态放热变为固态的过程称为相变，每种 PCM 它有一个相变温度范围，低于或高于其阈值，就会发生相变反应。在电池工作过程中，PCM 作为散热介质时，电池单体或模组可直接与 PCM 完全接触，通过 PCM 相变过程时吸收和放出的热量对电池进行散热 [29]。当以空气、液体散热成本太高以及设计比较复杂

杂等问题变得难以解决时，PCM 在电池散热、加热以及保温方面的优势就变得难能可贵^[12,88]。

6、热管散热是指主要依靠介质的相变来传导热量。其工作原理为：当热管的蒸发端有热量产生时，管内介质受热蒸发在压力差作用下流向另一冷凝端，然后蒸汽在冷凝端散热重新变为液体，冷凝端的液体靠吸液芯材料的毛细作用或重力作用，使得产生的液体流回到蒸发端。基于上面的工作原理，电池充放电产生的热量在热管蒸发端被吸收储存在管内介质中，借助介质性能把热量传到冷凝端，冷凝端再将热量传到外界，以达到散热的效果。在热管内部介质可以不间断的循环，将模组或单体产生的热量持续不断地传到空气中，从而确保小温差下大电流充放电，使模组或单体温度迅速降低^[30]。

但总体上，上面所述的热管理系统都或多或少的存在着不足：(1)采用空气为介质做散热设计，有学者通过改变风速大小分析了空气强制冷却的有效性，但对于锂离子三元材料电池，由于其导热率低、导热时间长，仅使用空气冷却是不能够满足设计要求。而且随着电池箱体内部单体数量的增多，电池箱内热量积累速度大于风冷散热速度，也使得风冷散热受到局限；(2)采用液体为介质做散热设计，能够实现对电池组的有效冷却，也能实现单体电池温度的均匀分布；但这样做，就需要增加额外的循环系统以及散热装置，结构复杂，系统体积与重量过大，而且还有漏液隐患；(3)以相变材料为介质做散热设计，优点前面小结已提到，其缺点主要有：它只能在相变温度范围内起作用，还是属于一种被动散热方法，必须与其它方法耦合使用；(4)采用热管制冷原理做散热设计，不仅增加了系统的复杂程度，而且由于热管单向传热的特性，作用有点单一，限制了电池组低温环境下加热的问题。

1.3.3 电动汽车电池组热管理国内外研究现状

随着电动汽车在国内外的快速发展，动力电池热安全问题也日益突出，动力电池热管理逐渐成为制约电池发展的关键技术之一，在基础理论和实际应用等方面都取得了较大的进步，受到了国内外高校学者和公司企业的特别关注。

国外对于电动汽车的研究起步较早，在 1873 年，英国就首次在马车基础上造出了一辆电动三轮车，它由铁锌一次电池提供动力^[31]，而与电池热管理相关的研究最开始出现于 20 世纪 80 年代^[32,33]。从 20 世纪 80 年代起陆续就有专门的实验室分别对主流的电动汽车电池（铅酸电池、镍氢电池以及锂离子电池）进行了建模仿真及实验研究。Bernardi 等^[34]根据电池单体内部的生热现象结合热力学三大守

恒定律，构建了电池单体的生热机理模型，该模型的建立为后续电池生热速率的研究提供了重要参考。美国可再生能源实验室与伊利诺理工大学都把电池包热管理的研究工作作为重点研究方向，可再生能源实验室通过锂离子电池充放电实验、热效应模型以及 Ansys 仿真软件对电池组的热管理设计进行了大量的研究^[35]，并对电池箱整体的结构设计研究取得了突破性的进步^[36]。

当前，国外一些热管理技术比较成熟的车企主要有：美国特斯拉电动汽车公司车型 Model S、Roadster 等采用夹套式液冷散热系统，其冷却液为 50%的乙二醇和 50%的水组成，能将箱体内的温度差控制在 5℃之内；日产 leaf 采用被动式电池热管理系统，在温度比较低的环境下，有加热元件，其电池组经过电极优化设计，降低了内阻，减小了生热速率；通用 Volt 的电池组采用液冷式热管理系统，其冷却介质和 Tesla 相同，单体间布置了金属散热片，其上设有流道槽，冷却介质在内部流动带走热量。国外也对一些新型的散热方法做了电池组热管理研究，如前几节提到的 PCM 散热，直接接触式油冷散热等，文献[37]对常规的风冷散热与相变材料散热温度场做了对比分析，文献[38]则是新一代汽车合作计划(Partnership for a New Generation of Vehicles, PNGV)汽车使用风冷和油冷的散热能力比较，文献[39]是韩国现代汽车公司研究了一种特殊的强制风冷散热模型，运用理论分析以及数值模拟相结合，对不同进出风口结构进行了模拟，根据模拟结果，相应对其结构做了改善设计。

国内相关高校以及学者对其电池的热管理方法进行了大量研究，其大量集中在电池组温度场的仿真计算、温度场的散热优化、散热介质选择以及箱体结构的优化设计等方面。我国最早开展热管理的研究始于国家“八五”电动汽车科技攻关项目^[40]，国内高校以及科研院所其研究方向主要集中在电池包核心部件的热设计分析以及优化热管理系统散热方法。

眭艳辉等^[41]通过圆柱镍氢电池三种不同的排列方式对其进行了实验研究和仿真温度场分析，主要研究了梯形排列下的风冷散热效果。饶中浩等^[42]基于实验与数值模拟分析研究了相变材料的散热能力以及散热优势，验证了当环境温度较高时，其模组之间的温差在相变材料的控温下，能够保持在一个适宜的温度下。张国庆等^[43,44]研究了一种纯电动和混合动力的车用电池组液冷散热系统，运用镍氢电池进行了数值仿真，其结果表明，当液体矿物油流速在 2m/s 时，温差恒定在了 1℃之内。徐晓明等^[45]通过冷板式液冷系统的同侧开了双进、出的流道口对 2P12S 的电池模组做了散热研究，发现随着进出口流道的增加，冷板的速度一致性越好，其冷板散热能力越强^[46]。天津大学的 Liu 等^[47]对电池组采用硅基油为冷却介质对

其散热。清华大学承接了国家“八五”电动汽车攻关项目，对其电动汽车锂离子电池组热管理系统全面展开了研究，其装有热管理系统样车在路面上进行了测试，效果显著，后期的各方面优化设计，目前在进行当中^[48]。

1.4 论文的主要研究内容及架构

本文主要通过实验对比分析和 CFD 仿真相结合的方法，分别建立了圆柱电池二维、三维模型，主要研究了电动汽车电池组的热特性以及风冷散热方法的有效性，其主要研究步骤是：首先通过电池单体实验以及电池组实验，发现环境温度以及电池自身发热所产生的温度，对电池充放电性能产生的影响，通过利用 Fluent 软件，仿真了电池单体、模组自然对流下的温度场分布，通过温度场分布为风冷散热、电池模组布置以及电池箱结构提供设计指导，本论文的主要研究工作如下：

(1)通过查阅相关文献了解锂离子电池的结构特点、充放电原理，对电池温度特性做了研究分析，而且针对电池不同的结构特点，在直角坐标系、圆柱坐标系下根据质量、动量以及能量守恒定律分别建立了导热微分方程，为后续的温度场研究奠定基础。

(2)在不同条件下，搭建了电池单体实验平台，对单体做环境温度异同下的充放电容量测试以及不同放电倍率下的温升实验；建立了不同单体结构热效应模型，通过仿真数据与实验结果做对比分析，验证其所建模型的有效性。

(3)在箱体进出风口位置不同开设下以及模组不同排列方式下，建立了 18650 型号的圆柱电池组二维热效应模型。按照不同对比参照下获得温度场数据和速度场数据，通过横、纵向对比，获得箱体进、出风口位置不同开设下的最优设计；不同排列方式下，圆柱电池组最优的排布方式。

(4)建立了平行排列、叉形排列下的圆柱电池组三维模型，在电池单体相同的生热速率，不同的风源下，做了风冷散热仿真对比分析，探究其风冷散热的有效性以及某些环境条件下的局限性。搭建了风冷散热实验平台，使用了两速挡的轴流风扇提供风源，设置无散热措施下的对比实验，验证其风冷散热的有效性以及所存在的不足。

1.5 论文的创新点

本论文的创新点体现在以下 4 个方面：

1.对电池箱体散热结构做了改善，有相关学者只对箱体进风口开设做了研究，

本论文对进、出风口不同位置的开设都做了针对性的研究；进风口正对于电池间隙或正对于电池几何中心；出风口正对于电池间隙或正对于电池几何中心，给电池箱内空气流速以及空气压差造成了很大的影响，二者反映到温度场分布层面，就凸显了电池箱散热能力的强弱，与传统风冷散热方法相比，改善后的箱体进风口开设，其温度场一致性更好，最大温差更小，散热效果显著。

2.按照圆柱电池不同的排布方式，结合创新点1，研究了电池模组平行排列、叉形排列以及梯形排列，进出风口在不同位置开设下的箱内温度场、速度场分布情况，获得了不同排布方式与进、出风口开设位置下的最优设计，不同进风口开设结合不同排列方式为电池包设计提供了可靠性设计依据，

3.建立了平行排列和叉形排列下的CFD三维散热仿真模型，制作了3并9串叉形圆柱模组，采用两速挡的轴流风扇对其模组进行了风冷散热实验，并设置了无散热措施下的对比实验，通过温升数据对比，验证了风冷散热的有效性。

4.设计了同放电倍率，不同风速下的电池箱风冷散热仿真模型，并相应的搭建了实验平台，初步验证了风冷散热在某些环境条件下的局限性，为后续电池箱热管理设计提供了重要参考。

1.6 本章小结

本章节首先对锂离子电池组热管理系统的背景做了了解，认识到了热管理系统研究的必要所在，随后对纯电动汽车动力电池的发展及现状得到了进一步的认识，通过查阅相关文献总结了目前所存在的电池组热管理散热方法及其优缺点，而且对国内外一些车企、科研院所以及学者关于电池热管理系统的研究做了进一步补充说明，为后续的电池组热管理设计提供指导及借鉴意义。

第2章 锂离子电池热特性及CFD基础理论研究

2.1 锂离子电池结构特点及工作原理

2.1.1 锂离子电池的结构特点

锂离子电池按照单体的外壳，分成硬壳、软包两种类型。其硬壳材料又分为钢壳及铝壳两种类型，而软包使用独有的铝塑膜复合材料。硬壳按照内部结构不同又分成圆柱形及方形，如图2-1所示。



图 2-1 锂离子电池单体分类

到目前为止，国内外出现的动力电池按结构特点划分主要有三种类型：软包电池、圆柱电池以及方壳电池。

圆柱电池是一种很传统的结构类型，在镍氢电池、三元材料电池中获得了较长时间的使用，行业内也积攒了许多生产制造经验。圆柱电池的主要优点包括制造成本低、技术成熟以及生产制造效率高等，其缺点主要有圆柱形状使得空间利用效率低、径向导热性能差，致使散热不好设计等。

软包电池是由多层正、负极片堆叠而成，其主要优点有：(1)厚度薄，所以散热性能较好；(2)正、负极片多，在充放电时，使得电流密度在极片上一致性好；(3)外形为薄片，成组易设计，空间利用率高；(4)铝塑膜密封，使得单体质量轻，在抽成真空后与电池内核能够紧密贴合，有利于降低多余的质量以及空间。其缺点主要有：(1)铝塑膜封装的可靠性在较长时间内很难保证；(2)电池内核较软，极

耳之间的接触电阻在焊接后较大，需在串并联成组层面加以解决；(3)相较与圆柱电池，生产制造效率偏低^[49]。

方壳电池借鉴了软包电池的外形结构特点和圆柱电池的极片制造方式，达到了空间利用率高以及散热好的优势，然而，这种结构设计也是三种电池类型中最为复杂的，设计时需要考虑的不定因素非常多，还需要把壳体与电池单体间的配合问题考虑进去。

由于方形锂电池（方壳电池和软包电池）可以根据产品的需求尺寸进行定制生产，所以市场上有许多不同类型，而正是因为存在的种类广泛，制造技术方面很难得到一致。方形电池适合用在定制化的电器产品上面，通过不同的安装空间，进行针对性的箱体结构设计，但对于需要批量化生产的企业设备用品，使用圆柱电池是首选，这样不仅制造工艺、技术及其生产的效率有保障，而且还能够很方便找到可更换的电池。三种不同制造工艺的锂离子电池结构及技术特性对比分析如下表 2-1 所示。

表 2-1 技术特性对比分析

制造工艺	优点	缺点	备注	代表企业
圆柱形 圆柱卷绕	小尺寸； 串并联成组灵活； 成本低； 工艺成熟； 一致性好；	成组后散热不好设计； 质量重； 比能量低；	部分采用钢壳（如松下 18650）； 铝壳（A123 的 32100）；	松下
方壳形 方形卷绕	散热好； 成组易设计； 可靠性好； 更安全，含防爆阀； 高硬度	尺寸比较固定； 成本高； 型号多；	早期钢壳多， 现在以铝壳居多；	宁德时代 比亚迪 三星 力神
软包形 方形层叠	尺寸变化灵活； 比能量高； 重量轻； 内阻小；	机械强度差； 封口工艺难； 成组结构复杂； 散热设计不易； 无防爆装置； 易漏液； 一致性差； 成本高	铝塑膜作外包装， 更适合固态电池；	万向集团 LG 化学

2.1.2 锂离子电池的工作原理

锂离子电池是一种通过 Li^+ 在正、负极间来回往复运动工作的二次电池。我们将这种在正、负极之间的移动来完成电池充放电工作而且还有特殊工作方式的二次电池俗称为“摇椅或不倒翁电池”，其电池内部反应原理如图 2-2 所示。电池以

碳（石油焦炭和石墨）结构材料为负极，以含锂的化合物作为正极，内部包括电解液以及电解质隔膜，由铝箔与电池的正极连接，正负极之间为隔膜，隔膜的特点是让 Li^+ 可以通过，阻止 e^- 通过。

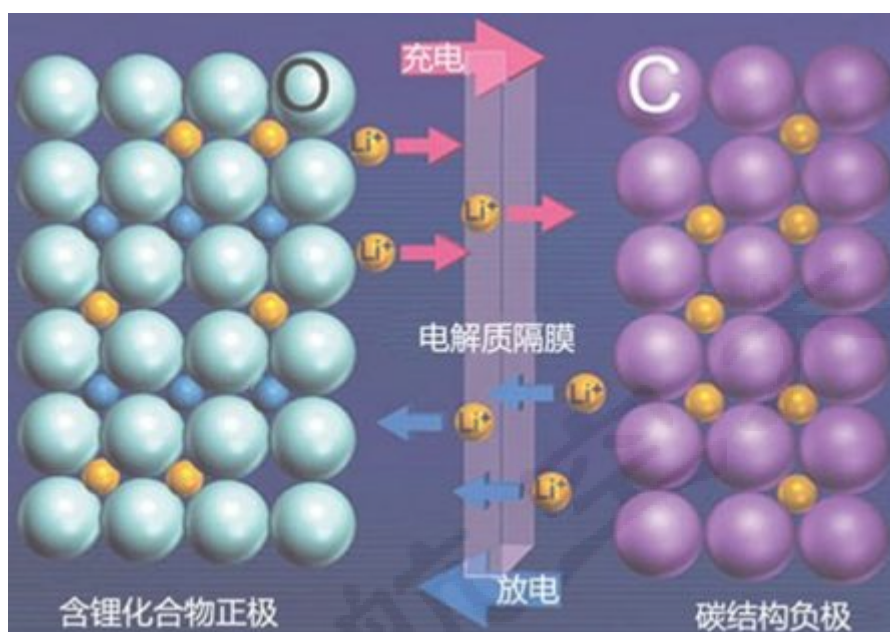


图 2-2 锂离子电池工作原理

锂离子电池的工作原理为：当电池在充电模式时，其正极含锂化合物上会有锂离子(Li^+)生成， Li^+ 从正极化合物脱嵌，经过电解液通过电解质隔膜抵达负极。由于负极的材料为层状结构，它有许多碳孔，抵达负极的 Li^+ 就嵌入到材料的碳孔当中，嵌入的 Li^+ 越多，就表示其电池充进的容量越多。同样的；当电池进入放电模式时，嵌在负极碳层里面的 Li^+ 脱嵌，又经过电解液穿过电解质隔膜运动到正极，回到正极的 Li^+ 越多，就表示电池放出来的容量越多^[50]。

2.2 锂离子电池热特性研究

2.2.1 锂离子电池的生热机理

锂离子电池体内生成的热量总体上有四部分构成：电化学生成热 Q_r 、极化反应生成热 Q_p 、欧姆内阻热 Q_j 和副反应热 Q_s ^[51]。则电池内部总发热量可由下式表示：

$$Q_z = Q_r + Q_p + Q_j + Q_s \quad (2-1)$$

电化学生成热 Q_r 是由电池体内各种材料在工作过程中产生化学反应所释放（或吸收）的热量，与反应中的熵变有关^[52]，其在充电时为正值，放电时为负值。

$$Q_r = Q / (3600 \cdot F \cdot I) \quad (2-2)$$

上式中： Q 指电池正、负极生热量的总和，单位为 J ； F 指法拉第常数，取 $96484.5C/mol$ ； I 为充放电电流，单位为 A ^[53]。

极化反应热 Q_p 与锂离子电池的极化内部阻抗以及极化电压有关，是指电池在工作过程中，由电池的极化放出的热量，这部分热量在工作过程中均为正值^[54]。

$$Q_p = I^2 R_p \quad (2-3)$$

式(2-3)中： I 为充放电电流，单位为 A ； R_p 指极化内阻，单位 Ω 。

欧姆内阻热 Q_j 是由于电池内核各部分组成材料存在内部阻抗而生成的，在电池工作过程中这部分热量都为正值^[55]，是不可逆反应热。

$$Q_j = I^2 R_j \quad (2-4)$$

上式中： I 为充放电电流，单位为 A ； R_j 指欧姆内阻，单位 Ω 。

副反应热 Q_s 是指电池不在正常工作状态下充放电时，所生成的热量，比如自放电导致的电极分解，过充和过放电时电解液的分解、SEI的分解等等所产生的分解热。由于副反应热比较小，在一般计算时都可不做考虑。

所以，锂离子电池内部总的生热量为：

$$Q_z = Q_r + Q_p + Q_j = Q / (3600 \cdot F \cdot I) + I^2 R_p + I^2 R_j \quad (2-5)$$

事实上，当锂离子电池内部温度达到不同程度时，其以上各部分产热所占的比例也不一样。当内部温度超过电池所规定上限温度值时，此时反应热在总产热量中占比最大；而在低于所规定的电池温度上限时，电池内部发热主要以欧姆内阻热为主，而在电池正常工作情况下，发热量主要以极化热和欧姆内阻热组成。

$$Q_z = I^2 R_z = Q_p + Q_j = I^2 R_p + I^2 R_j \quad (2-6)$$

$$R_z = R_p + R_j \quad (2-7)$$

上式中， R_z 为电池工作过程总的内阻，单位 Ω 。

目前，测试电池产热量的方法很多，其中美国国家可再生能源实验室采用相关设备及仪器测试了不同充放电环境下的产热量；文献[56]通过电池内部电化学反应计算获得了电池产热量；在电池内部粘贴温度传感器通过温度的变化来测试生热量^[57]；通过对电池内部的材料简化为电阻，运用等价电路法，结合热力学守恒定律，对其电池生热量进行计算^[58]。

2.2.2 锂离子电池组热特性分析

由传热学热能传递基本理论可知，动力锂离子电池组内部在工作过程中产生的热量会和所遇到的介质进行热量传递，这个传递有三种基本方式：热传导、热对

流、热辐射^[59]。

热传导指材料各部位间不出现相对位移时,通过微观粒子的布朗运动而出现的能量传递。锂离子电池内部主要发生的是热传导,其电池内部的正负极材料、电解液、电解质隔膜以及集流体等都是很好的导热材料,将电池组看作一个整体,电池内部产生的热量向电池表面传递,用傅里叶定律表示为^[60]:

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

上式中 ϕ 为热流量,单位为 W ; λ 是导热系数,单位为 $W/(m \cdot K)$; A 为换热面积,单位为 m^2 ; $\frac{dt}{dx}$ 是温度梯度,单位为 K (开尔文)。

$$q = \frac{\phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (2-9)$$

上式中 q 为热流密度,其单位为 W/m^2 。“—”意思是导热方向与温度上升方向相反^[61]。式(2.8)、(2.9)是傅里叶定律在一维稳态导热下的表达式。

热对流是指由于流体介质的宏观运动而引起的介质各部位间发生相对移动,冷、热流体互相掺杂混和所致使热量传递的过程。动力电池内部生成的热量经过热传导传递到模组或箱体表面,再与所接触到的冷却介质进行对流换热,这个过程,即受到热传递方式的影响,又受到介质流动规律的影响,是一个复杂的物理换热过程。热对流的计算公式为牛顿冷却公式:

$$q = h(t_w - t_f) \quad (2-10)$$

上式中 q 为热流密度,单位为 W/m^2 ; h 为对流换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot K)$; t_w 为壁面温度,单位为 $^{\circ}C$; t_f 为流体温度,单位为 $^{\circ}C$ 。

热辐射是指物体因内部生热的原因而产生热量辐射的现象,一般在锂离子电池外表面产生辐射传热,斯忒藩—玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律是辐射传热计算的基础,其公式描写如下:

$$\phi = \varepsilon_1 A_1 \delta (T_1^4 - T_2^4) \quad (2-11)$$

上式中 ϕ 为物体自身向外辐射的热流量; ε_1 为发射率; A_1 为辐射有效面积,单位为 m^2 ; δ 为斯忒藩—玻尔兹曼常数; T_1 为电池温度,单位为 K ; T_2 为环境温度,单位为 K 。

2.3 锂离子电池热特性参数的计算

2.3.1 生热速率计算

当前,国内外对动力锂离子电池生热速率的计算总体上有两种方式:实验和理论计算,由于电池单体的种类非常多、实验测试的环境条件以及方法的不统一,导致实验所测得的生热速率误差比较大,所以通过实验方式直接获取准确的生热速率难度比较大;理论计算可分为两种情况:

(1) 电池平均生热速等于产生的总热量除以工作的总时间,用公式可表示为:

$$v = Q / t \quad (2-12)$$

上式中, v 为平均产热速率,单位为 W ; Q 为电池工作时间下的总产热量,单位为 J ; t 为电池工作时间,单位为 s 。

(2) Bernardi 构建的生热速率电池模型,其模型用公式可表示为^[62]:

$$\dot{q} = \frac{I}{V} (E - U - T \frac{dE}{dT}) \quad (2-13)$$

上式中, \dot{q} 为生热速率; I 为电池工作时的电流,充电为正,放电为负; V 为电池单体体积; E 为电池开路电压; U 为电池工作电压; T 为电池初始温度; $\frac{dE}{dT}$ 为模组或单体的开路电压与随温度变化的温度系数。

从理论上来说,电池在工作当中,各部位由于材料的堆叠方式不同,致使电池在各部位通过的电流密度分布也不尽相同,造成锂离子电池各位置产热速率各有不同^[63], (1) 中计算的平均生热速率 v 适合于稳态问题; (2) 中计算的生热速率 q 模型适合于瞬态问题,更贴近于锂离子电池实际工作过程的生热机理。

同样的,由于锂离子电池正负极耳所用材料不同,所以电池进行工作时,正负极上面的生热速率各有差异,一般锂离子电池用铝做正极材料,铜做负极材料,故两极上的生热率为:

$$q_{\text{正}} = \frac{Q_{\text{正}}}{V_{\text{正}}} = \frac{I^2 R_{\text{正}}}{V_{\text{正}}} \quad (2-14)$$

上式中, $q_{\text{正}}$ 为正极生热率; $Q_{\text{正}}$ 正极发热量; $V_{\text{正}}$ 正极体积; $R_{\text{正}}$ 为正极电阻; I 为充放电电流。

$$q_{\text{负}} = \frac{Q_{\text{负}}}{V_{\text{负}}} = \frac{I^2 R_{\text{负}}}{V_{\text{负}}} \quad (2-15)$$

上式中, $q_{\text{负}}$ 为负极生热率; $Q_{\text{负}}$ 负极发热量; $V_{\text{负}}$ 负极体积; $R_{\text{负}}$ 为负极电阻; I 为充放电电流。

2.3.2 导热系数计算

导热系数是指在稳态导热前提下, $1m$ 厚度的材料,其两侧表面的温差为 $1(K, ^\circ C)$, 在 $1s$ 内, 经过 $1m^2$ 面积传递的热量, 单位为瓦/米·度 ($W / m \cdot K$), 此

处为 K 为开尔文为温度的单位，也可用 $^{\circ}\text{C}$ 代替，导热系数越大说明该材料的导热性能越好。

导热系数与锂离子电池材料的组成、结构、密度、电解液含水率、温度等因素有关。第一章中提到锂离子电池是由多层正负极材料隔膜层叠或卷绕而成，所以在锂离子电池单体中导热系数在各个方向上都各不相同。

导热系数是通过实验方法测试出来的，其测试的方法主要有稳态法和非稳态法两种，傅里叶导热定律是稳态法测试的基础，导热系数的值是由其定律的数学表达式写出：

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{\left| \frac{\partial t}{\partial x} \vec{n} \right|} \quad (2-16)$$

上式中， λ 为导热系数，单位为 $\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$ ； \vec{q} 为热流密度，单位为 W / m^2 ； $\frac{\partial t}{\partial x} \vec{n}$ 为单位温度梯度。

由于电池层叠结构导致的单体内部导热系数各向异性，程昀等^[64]运用公式(2.17)并联平均导热公式和(2.18)串联平均导热公式计算了单体方壳形电池内部材料各方向上的导热系数值。

$$\lambda_x = \lambda_z = \frac{\lambda_p L_{X_p} + \lambda_n L_{X_n} + \lambda_s L_{X_s}}{L_y} \quad (2-17)$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{\frac{L_{X_p}}{\lambda_p} + \frac{L_{X_n}}{\lambda_n} + \frac{L_{X_s}}{\lambda_s}} \quad (2-18)$$

上式中， λ_x 、 λ_y 和 λ_z 是锂离子单体内部组成材料在 x、y、z 方向上的导热系数值； λ_p 、 λ_n 和 λ_s 分别为锂离子单体内部正、负极极耳以及电解质膜的导热系数值。

2.3.3 比热容计算

锂离子电池的比热容可以运用加权法来计算，其计算公式如公式(2-19)所示：

$$\rho C = \frac{\sum_i \rho_i C_i V_i}{\sum_i V_i} \quad (2-19)$$

上式中， ρ 为电池单体的密度； C 为锂离子电池单体平均比热容； ρ_i 为单体内部各组成材料的密度； C_i 为单体内部各组成材料的比热容； V_i 为单体内部各组成材料所占的体积。

2.4 锂离子电池温度场研究及 CFD 基础理论

2.4.1 锂离子电池温度场研究方法

由传热学相关理论可知, 电池温度场研究的基础就是导热微分方程以及相应的初始条件与边界条件相结合。为了得到锂离子电池组热效应模型的温度场分布数学关系式, 必须结合能量守恒定律和傅里叶定律来构建电池内部产生的温度应该满足的数值关系, 这种关系在传热学理论中被称为是导热微分方程, 导热微分方程是所有导热介质的温度场分布都需要满足的基础方程^[59]。在热传导一维过程中, 热流密度的表示式为:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-20)$$

上式中, q 为热流密度, 单位为 W/m^2 ; $\frac{\partial T}{\partial x}$ 为 x 方向上的温度变化量。

而对于三维的锂离子方壳电池在工作时, 内部生热可简化成为一个热源 $\dot{\phi}$, 在直角坐标系下, 任意选取电池单体内部一个单元体, 如下图 2-3 所示:

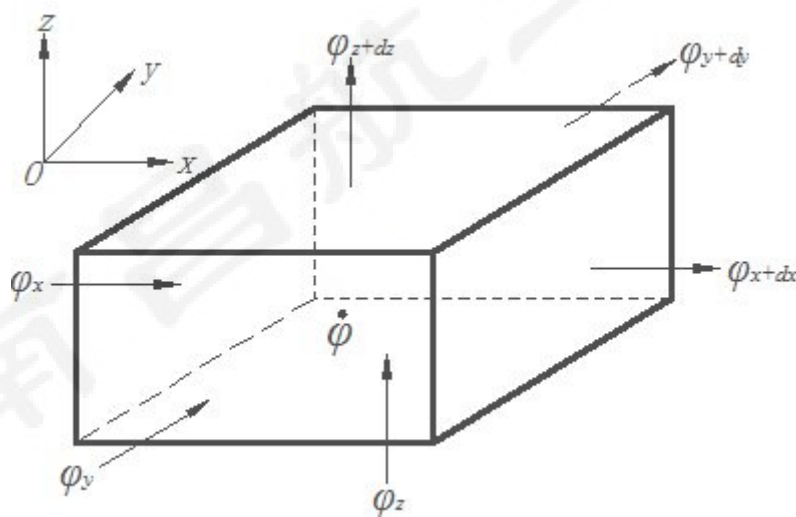


图 2-3 单元体的导热平衡分析

其不同方向上传递进单元体的热量用傅里叶定律可写为:

$$(\varphi_x)_x = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dydz \quad (2-21)$$

$$(\varphi_y)_y = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_y dx dz \quad (2-22)$$

$$(\varphi_z)_z = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z dx dy \quad (2-23)$$

上面三式中, $(\varphi_x)_x$ 为热流量在 x 方向上的分量 φ_x 在 x 点的值, $(\varphi_y)_y$ 、 $(\varphi_z)_z$ 同理。在不同方向上导出的热流量用傅里叶定律可表示为:

$$(\varphi_x)_{x+dx} = (\varphi_x)_x + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} dx = (\varphi_x)_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dydz \right] dx \quad (2-24)$$

$$(\varphi_y)_{y+dy} = (\varphi_y)_y + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} dy = (\varphi_y)_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_y dxdz \right] dy \quad (2-25)$$

$$(\varphi_z)_{z+dz} = (\varphi_z)_z + \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} dz = (\varphi_z)_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_z dxdy \right] dz \quad (2-26)$$

对于所选取的单元体来说,按照能量守恒定律,在任意时刻区间内都会有:传递到单元体的总热量与单元体内部热源产生的热等于导出单元体的总热量与单元体内能的增量,在能量的转化和转移过程当中,其总量始终保持恒定不变。单元体内能的增量为 $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz$; 单元体里面热源的生成热为 $\dot{\varphi} dxdydz$; 上面两个表达式中 ρ 为单元体的密度, c 为单元体的比热容, $\dot{\varphi}$ 为单元体单位时间、体积中,内部热源的产生的热量, T 表示温度, t 表示时间。

将上面所述的公式以及表达式整理代入到能量守恒关系中,可得到锂离子方壳形电池在三维直角坐标系下非稳态导热微分方程的一般形式为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\varphi} \quad (2-27)$$

对于锂离子圆柱电池,其电池内部导热微分方程需要在柱坐标系下求解,与上面直角坐标系相同,在锂离子圆柱电池内部任意选取一个单元体,如下图 2-4 所示:

则柱面坐标为:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{cases} \quad (2-28)$$

$$\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dxdydz = \iiint_{\Omega} T(r, \theta, z) r dr d\theta dz \quad (2-29)$$

在单位时间内不同方向上传递进单元体的热量用傅里叶定律可写为:

$$(\varphi_r)_r = \left(-\lambda A \frac{\partial T}{\partial r} \right)_r = -\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial r} \right)_r \quad (2-30)$$

$$(\varphi_{\theta})_{\theta} = \left(-\lambda A \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_{\theta} = -\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_{\theta} \quad (2-31)$$

$$(\varphi_z)_z = \left(-\lambda A \frac{\partial T}{\partial z} \right)_z = -\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial z} \right)_z \quad (2-32)$$

上式中, $A = r dr d\theta dz$ 为导入单元体的热流量的表面积,所以由上面公式可推出不同方向上导出的热流量用傅里叶定律写出如下:

$$(\varphi_r)_{r+dr} = (\varphi_r)_r + \frac{\partial \varphi_r}{\partial r} dr = (\varphi_r)_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[-\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial r} \right)_r \right] dr \quad (2-33)$$

$$(\varphi_\theta)_{\theta+d\theta} = (\varphi_\theta)_\theta + \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial \theta} d\theta = (\varphi_\theta)_\theta + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[-\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)_\theta \right] d\theta \quad (2-34)$$

$$(\varphi_z)_{z+dz} = (\varphi_z)_z + \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} dz = (\varphi_z)_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \left(A \frac{\partial T}{\partial z} \right)_z \right] dz \quad (2-35)$$

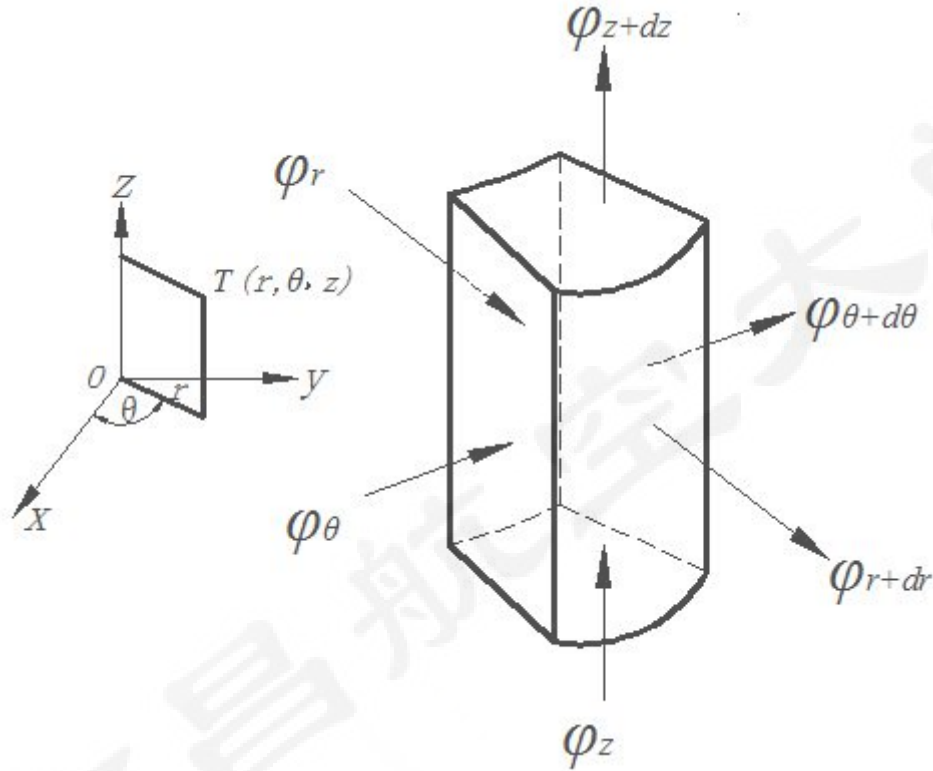


图 2-4 单元体的热平衡分析

按照能量守恒定律，热流量导入、导出的过程当中遵守一定的热平衡关系，以及前面在直角坐标系下推导所提到的热流量导入和导出的过程中单元体内能的增量以及伴随内热源的生成热等关系，将公式(2-28)~(2-35)，整理得出锂离子圆柱电池在柱坐标系下的导热方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\varphi} \quad (2-36)$$

公式(2-27)、(2-36)都是根据能量守恒定律在直角坐标系以及圆柱坐标系下推导出的导热微分方程，这两种方程对锂离子方壳形电池以及圆柱电池的温度场研究起到了决定性的作用。两公式中等量关系左边的项为单元体内能的增量，该项为非稳态项，随时间而变化。而等量关系右边前面三项的和为热流体穿过介质截面导热使得单元体在与左边相同时刻内增加的能量，该项为扩散项，最后一项为内热源项。

对于求解某一具体与热传递相关问题的温度场分布。还必需由特定的边界条件

以及导热时间作为限制, 才能得到某一具体问题的解, 这些边界条件以及所用时间就称作定解条件。而稳态与非稳态导热问题的定解条件各不相同, 针对后者, 定解条件主要包含初始状态温度场分布以及导热介质边界上温度或换热状况的边界限制条件; 对于稳态的导热问题, 其定解条件里面只有边界条件, 而无初始条件^[59]。

边界条件是为了说明介质在其边界上与外界环境间在热互换层面的连续性以及所存在的关系^[65], 涉及到锂离子电池方面, 主要发生在锂离子电池对流散热, 冷却介质流过锂离子电池表面所发生的热交换, 通常被划归在第三类边界条件, 下面给出主要的三类边界条件的定义:

第一类边界条件: 设置了边界条件上的温度值, 也可称之为温度边界条件。这个设置的值可以是个常数(不随时间以及位置变化), 也可以是个随温度或随位置变化的变量。对于温度边界条件随时间而变化的, 给出了以下关系式:

$$t > 0 \text{ 时, } T=f(t) \quad (2-37)$$

第二类边界条件: 设定了边界条件上的热流密度的值, 可称为热流边界条件^[66]。设置的这个值可以是个常数(不随时间以及空间位置变化), 也可以是个随温度或随空间位置变化的变量。对于热流密度在边界条件随时间或空间位置变化的热力学问题, 有以下关系式可表示:

$$t > 0 \text{ 时, } q_w = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = f(t) \quad (2-38)$$

上式中 n 为表面 A 的法线方向

第三类边界条件: 设置了边界条件上介质与其周围其它流体之间的对流换热系数 h 以及周围流体的温度 t_f ^[67], 其用公式可表示为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \quad (2-39)$$

上式中, 在非稳态导热时, h 及 t_f 为时间的函数, 上式中 h 为对流换热系数, λ 为导热系数; t_w 为壁面温度, t_f 为环境温度; n 为换热时所处表面的外法线。

2.4.2 CFD 概述及基本控制方程

伴随着计算机硬件和算法的不断进步, 其计算速度得到了飞速提高, 使得使用计算机对工程现象进行数值模拟仿真分析成为了可能。计算流体力学 (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) 是运用计算机进行数值模拟, 研究流体的流动以及传热等具体物理问题的技术。借助 CFD 软件, 可运用计算机仿真来模拟流场中出现的现象, 使得能在短期内看到流场分布以及变化。CFD 可以为实验研

究提供指导以及为电池系统热管理设计提供参考，也可以辅助研究流体力学等问题，从而节省大量成本和时间。

CFD 是多类学科背景下的产物，它所覆盖到的学科主要有传热学、数值分析、流体力学以及一些偏微分方程的数学理论等。CFD 作为辅助研究流体力学的一部分，目前为止，国内外研究流体力学问题的方法综合下来主要有 3 种：实验研究法；理论分析法以及 CFD 仿真法。实验研究法的数据更为直观可信，关于流体力学具体问题的研究主要建立在其基础之上。CFD 算法的可靠性和理论分析的可行性都需要具体的实验研究来做验证。但是，在多数情况下，实验测量耗时长、成本高，而且常常由于测量方法以及测量硬件设备的局限，会对真实的流场造成测量偏差，使得从实验测量中获取某些详细数据变得较为困难；理论分析法得出的结论一般具有普遍性，它为实验研究设计和 CFD 算法的可实现性提供了理论基础。但是，每一次提出新理论，都会伴随着大量新研究的开展；CFD 仿真法总结了实验测量法和理论分析法的优点及缺点，在二者的基础上实现了新的突破，克服了二者所存在的某些缺点，使得 CFD 仿真法耗时短、成本低，能够比较容易的获得流场中的数据。

对流体的研究必须要满足三大定律其分别是能量守恒、动量守恒以及质量守恒定律，其中能量守恒已在计算锂离子电池组导热微分方程应用到，而质量、动量守恒定律在流体应用中的体现就是连续性方程和 Navier-Stokes 方程，这两大方程为 CFD 仿真法的基本控制方程。

连续性方程：任取流场空间中的一单元体，取其一表面为单元面，介质流进单元面 C_1 ，从另一单元面 C_2 流出，在介质流进 C_1 与流出 C_2 的过程中介质的质量会产生变化，由质量守恒定律可得到：流入与流出的介质质量之差与单元体质量的增量相等，所以连续性方程用积分形式可写为：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} \rho dx dy dz + \oiint_C \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (2-40)$$

上式中， Ω 表示单元体； C 表示单元面；左边第一项为单元体内部质量的增量，第二项为通过单元面流入单元体的净通量。

根据高斯公式，在坐标系异同下，连续性方程用微分形式可写为：

$$\text{直角坐标系下: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-41)$$

$$\text{圆柱坐标系下: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_{\theta})}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2-42)$$

Navier-Stokes 方程是为了描述黏性介质动量守恒的运动方程，简称为 N-S 方

程。这个方程最初由 Navier 于 1827 年写出,但仅仅只能用在不可压缩的流体上;Poisson 在 1831 年给出可以用在压缩介质的流动上的运动方程;Saint-Venant 和 Stokes 分别在 1843 年和 1845 年,分别给出了粘性系数为常量的方程,到目前为止都统称为 Navier-Stokes 方程。在不同使用条件下,其运动方程也不相同^[68]。

当用于黏性且可压缩的流体时,其运动方程可写为:

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial \mu}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \dots \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \right] \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \dots \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\} \right] \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \dots \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \right] \end{aligned} \quad (2-43)$$

上式为 x 、 y 和 z 方向的运动方程。

当运用于黏性系数为定值时的流体运动方程矢量形式可写为:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad}p + \frac{\mu}{3} \text{grad}(\text{div}\vec{v}) + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2-44)$$

当介质的密度和粘性系数都为定值时,其运动方程的矢量形式可写为:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad}p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2-45)$$

当介质为理想流体(黏度等于零的流体)时,其基本方程称为欧拉方程,其运动方程可写为:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f_x - \frac{\partial p}{\rho \partial x} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = f_y - \frac{\partial p}{\rho \partial y} \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{\partial p}{\rho \partial z} \end{aligned} \quad (2-46)$$

2.4.3 CFD 离散方法及求解步骤

CFD 按照微分方程离散方式的不同, 主要分成: 有限差分法、有限元法以及有限体积法等等。有限差分法是数值分析方法中最典型的方法之一, 发展非常早, 运用也相对成熟; 有限元法适合用于模型及物理环境等问题相对比较复杂的场合, 但是该方法求解问题的速度相比其它两种较慢, 在当前的 CFD 使用中还不太广泛; 有限体积法的优点是计算速度快, 在当前 CFD 仿真中得到了普遍应用。有限体积法(*Finite Volume Method, FVM*): 是把所求介质区域划分成许多不重叠的微元体, 并确保每一个网格节点外围有一个微元体, 把需要求解的微分方程在每一个微元体下进行积分处理, 就分别获得了一组方程, 对其求解计算。

CFD 求解计算问题的步骤分为 3 步: 模型前处理、求解计算以及后处理。

前处理: 前处理是建立计算仿真区域并根据其区域来相应的划分网格。计算区域就是 CFD 分析流体流动的整个区域, 合理处理并划分计算区域, 可以很好的降低计算量; 网格就是对计算区域划分的微元体, 网格的划分质量和数量对求解计算过程以及结果显示有着重要的影响, 所画网格数目不能过多, 也不能过少, 过多浪费计算资源且花费大量时间, 过少不能确保迭代计算的收敛性以及不能够准确描述流动过程。对计算域划分好网格后, 就可设置定义边界条件, 这样就完成了前处理。

求解: 求解器读入前处理生成的文件后, 首先对网格质量以及计算域单位等检查, 接着设置好各种热物性参数和材料类型等, 就可以进行对划分区域初始化及迭代运算。

后处理: 是对已经计算收敛的模型进行图像以及数据处理, 得到其直观清晰、便于分析的数据和图表, 如温度云图、速度云图以及速度流线云图等等。

2.5 本章小结

本章节首先查阅文献了解了锂离子电池的结构特点和工作原理, 根据结构特点对电池做了系统的归类及优缺点总结, 同时, 对锂离子电池进行了生热机理分析, 而且在不同坐标系下按照质量、动量及能量守恒定律分别建立了导热微分方程, 为下面的几章关于锂离子电池单体、模组以及系统的温度场研究奠定了基础。

第3章 锂离子电池单体温升研究及热效应建模分析

3.1 锂离子电池单体充放电温升实验

3.1.1 实验设备

本研究课题所用的电池单体是由鸥瑞智诺能源科技(天津)有限公司提供,该公司拥有新能源领域核心技术,主要从事锂离子电池技术及系统研发,主要产品为动力型锂离子电池、硅能电池、汽车动力总成系统、储能系统、风光互补发电系统、分布式能源、光伏建筑一体化系统的研发等。在新能源汽车领域,目前主流电池单体主要有:磷酸铁锂电池、三元材料电池(18650圆柱电池)、钛酸锂电池、超级电容等,其性能参数如下表3-1所示:

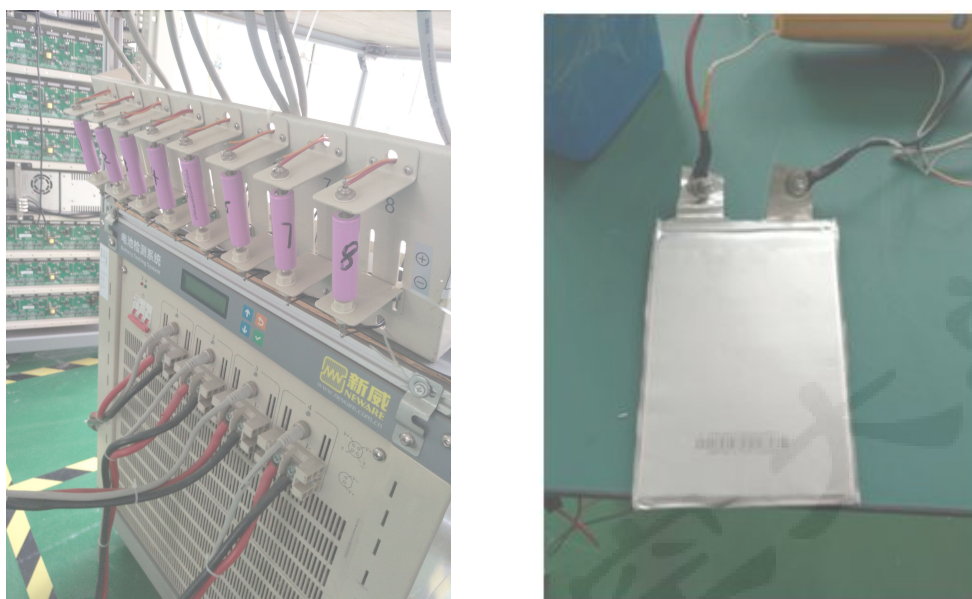
表3-1 主流电池单体主要参数

	磷酸铁锂电池	三元材料电池	钛酸锂电池	超级电容
额定电压(V)	3.2	3.7	2.3	3
额定容量(A.h)	30	2.6	20	1.43
充电电压上限(V)	3.65	4.2	2.7	2.2
放电电压下限(V)	2.5	2.75	1.5	3.8
放电截止电流(A)	1.5	0.2	1	1
工作温度(°C)	充电: 0~45	充电: 0~45	-20~60	-30~65
	放电: -20~55	放电: -20~60		

表3-1中,放电截止电流会根据实验中放电倍率的不同会有变化,放电倍率1C指所用电池的容量1小时放电完全,称为1C放电。放电倍率是放电速度快慢的一种量度,电流倍率大小=工作电流大小/标称容量。

电池充放电实验需要专门的测试平台,平台主要有软硬件两部分组成,软件使用BTSDA(*Battery Testing System Data Analysis*)电池检测系统数据分析软件,硬件主要有:计算机、动力电池测试柜、电池单体、多路温度监测仪、恒温恒湿试验箱、万用表、钳流表等硬件装置,图3-1为电池单体充放电实验平台,图(a)为动力电池单体测试柜,其功能可以满足单体电池(软包电池和方壳电池)5V100A、(圆柱电池)5V10A测试,上面的数值都为测试量程最大值;图(b)为电池单体测试连接装置,测试柜正负极与电池单体正负极采用螺栓连接,并用绝缘胶带粘贴在接

触端，做绝缘安全保护。



(a) 动力电池测试柜

(b) 单体测试连接

图 3-1 单体充放电实验平台

电池单体温升实验所用到的动力电池测试柜为新威(Neware) 5V/100A 设备，如图 3-2 中的(a)图所示，该测试系统有四个独立控制的通道，其特点是恒流源与恒压源使用双闭环结构，每个通道其工作电压测量范围为 10mv~5V，每个通道充放电电流输出范围为 200mA~100A，单通道输出功率最大为 500W，其电流到 100A 的响应时间为 20ms；这个检测系统的充电模式主要有：恒流、恒压、先恒流后恒压以及恒功率充电；放电模式主要有：恒流、恒功率以及恒阻放电；充放电截止条件可以以电流、电压上下限、延时时间为参数设定安全保障条件，电压、电流测试采样，采用四线制连接。

图 3-2 中的(b)图为东莞贝尔恒温恒湿试验箱，该箱的操作温度范围为 -40°C ~ $+150^{\circ}\text{C}$ ，其温度的显示精度为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度范围为：20%~98%，温升速度为：平均 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，降温速度为：平均 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

图3-2中的(c)图为BTSDA (Battery Testing System Data Analysis) 电池检测系统数据分析软件，该软件首先要根据电池单体参数设置工步，如：恒流充电、恒流放电以及搁置等，其次设置充放电电流大小、电压大小以及两个工步之间搁置的时间，最后也是非常重要的设置电池充放电安全保护条件。

后面章节所说的18650型号圆柱电池，是指直径为18mm，电池高为65mm，0表示圆柱电池。



(a) 新威 5V/100A 电池检测系统



(b) 东莞贝尔恒温恒湿试验箱

图 3-2 硬件设备平台

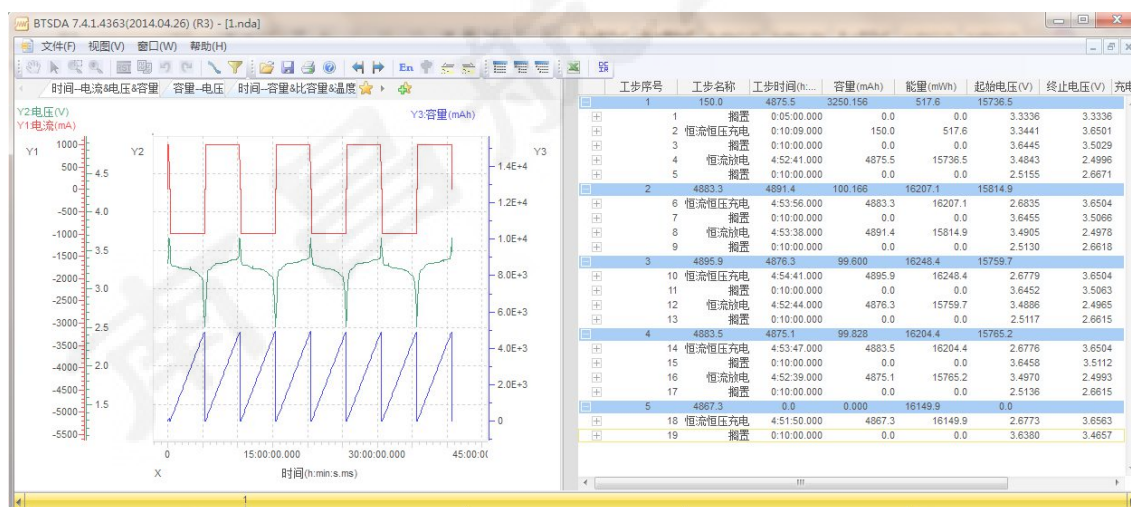
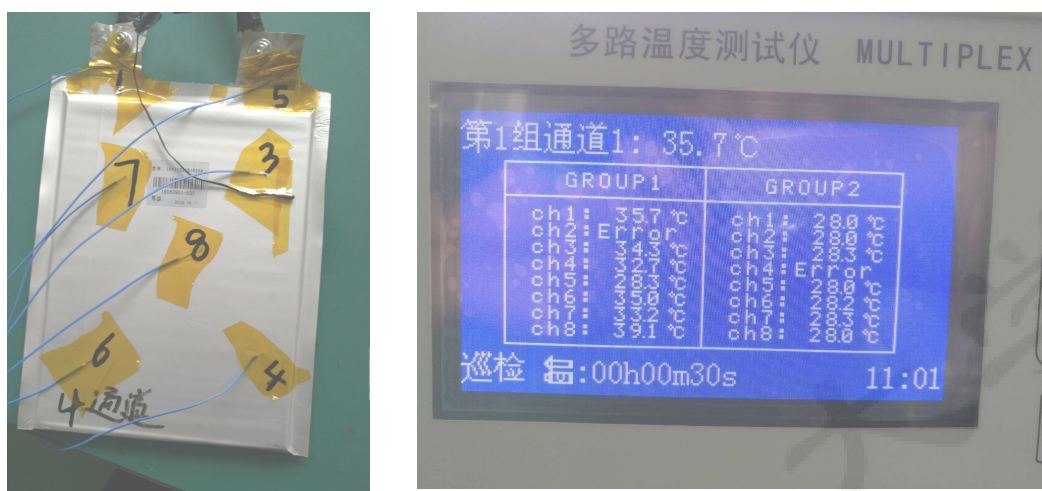


图 3-3 BTSDA 软件

3.1.2 实验方案

首先选取容量为 30A.h、额定电压为 3.2V 的磷酸铁锂软包电池，将软包电池与动力电池测试柜连接好以后，放在贝尔恒温恒湿试验箱中，设置不同的环境温度条件：-20℃、-10℃、0℃、25℃、45℃、60℃，在 BTSDA 软件系统中设置测试工步，用多路温度测试仪 GROUP1 其中的 7 个热电偶测试端子，用高温胶带粘在所测磷酸铁锂软包电芯的 7 个不同部位，其热电偶粘贴位置如图 3-4(a)所示，

路温度测试仪显示屏如图 3-4(b)所示，每隔 30 秒巡检采集一次温度数据。



(a) 热电偶粘贴位置

(b) 多路温度测试仪显示屏

图 3-4 电芯温升实验硬件平台

为了温升数据在不同温度下具有更好的可对比性，使得测试数据更好的反映出环境温度对电池工作时容量的影响效果以及放电倍率不同对温升速率的影响大小，单体测试方案分为 3 组，3 组方案都在恒温恒湿试验箱内进行，其分别为：

(1)同充电倍率，不同环境温度下，电池充电容量测试实验

在温度 25℃ 下，对所测电池恒流放电完全后，在不同温度而充放电倍率相同的情况下做恒流恒压充电实验，该组方案测试工步如下表 3-2 所示：

表 3-2 电池单体恒流恒压充电工步

工步名称	工作环境及模式	所需时间
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
恒流放电	环境温度 25℃ 下，1C 放电至截止电压 2.5V	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	30min
恒流恒压充电	环境温度 -20℃ 下，0.5C 充电至截止电流为 0.05C	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
停止	环境温度 25℃ 下，停止	-----

表 3-2 中只列出了环境温度 -20℃ 下的恒流恒压充电工步，其它温度 (-10℃、0℃、25℃、45℃、60℃) 下充电工步测试和表 3-2 相同。

(2) 同放电倍率，不同环境温度下，电池放电容量测试

在温度 25℃ 下，对所测电池恒流恒压充满电以后，在不同温度而放电倍率相

同的情况下，做恒流放电实验。该组方案测试工步如表 3-3 所示：

表 3-3 电池单体恒流放电工步

工步名称	工作环境及模式	所需时间
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
恒流恒压充电	环境温度 25℃ 下，0.5C 充电至截止电流为 0.05C	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	30min
恒流放电	环境温度 -20℃ 下，1C 放电至截止电压为 2.5V	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
停止	环境温度 25℃ 下，停止	-----

表 3-3 中只列出了环境温度 -20℃ 下的恒流放电工步，其它温度 (-10℃、0℃、25℃、45℃、60℃) 下恒流放电工步和表 3-3 相同。

(3) 同环境温度，不同放电倍率下，电池温升测试

在温度 25℃ 下，所测电池在同一温度下恒流恒压充满电以后，在同温度不同放电倍率 (0.5C/1C/1.5C/2C) 下做恒流放电温升实验。该组测试方案工步如表 3-4 所示：

表 3-4 电池单体不同倍率放电工步

工步名称	工作环境及模式	所需时间
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
恒流恒压充电	环境温度 25℃ 下，0.5C 充电至截止电流为 0.05C	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	30min
恒流放电	环境温度 25℃ 下，0.5C 放电至截止电压为 2.5V	-----
搁置	环境温度 25℃ 下，搁置	10min
停止	环境温度 25℃ 下，停止	-----

表 3-4 中只列出了在常温下，0.5C 充电，0.5C 放电的工步。其它工步流程：0.5C 充电，1C 放电；0.5C 充电，1.5C 放电；0.5C 充电，2C 放电工步依次进行。由于电池单体放电完全以后，电池内部及表面温度比较高，需要电池散热完全以后，再进行下一组倍率放电实验，所以每一组倍率放电实验间隔时间都比较长。

3.1.3 实验数据分析

按照3种不同方案得到测试完成的数据如下各表所示：

(1)表3-5为同充电倍率，不同温度下的充电容量数据

表3-5 同充电倍率不同温度下充电数据

环境温度	充电倍率	充电容量	充电时间
-20℃	0.5C	10.5542A.h	2小时20分钟39秒
-10℃	0.5C	20.6579A.h	2小时15分钟43秒
0℃	0.5C	23.8051A.h	1小时52分钟23秒
25℃	0.5C	28.6426A.h	1小时57分钟11秒
45℃	0.5C	31.8402A.h	2小时08分钟33秒
60℃	0.5C	32.2211A.h	2小时09分钟59秒

由表3-5分析可知，温度越低，充进电池单体的容量越少；充电容量随温度的升高而增加。其原因是温度较低时，磷酸铁锂电池正极本身电子导电性能比较差，低温环境下容易产生极化，从而降低电池容量；还有受低温影响，石墨嵌进、嵌出锂离子速度降低，容易在负极表面析出金属锂，金属锂无法全部嵌入石墨内部，锂离子嵌入石墨内部数量的多少，在宏观上就表示充电容量的多少；还有在低温下，电解液黏度系数的增加，也会导致锂离子迁移阻抗的增大，即电池单体内阻增大，也会降低电池充电容量。

由表3-5可看出，低温下充电所用时间高于常温以及高温下的充电时间，由于充电模式为恒流恒压充电，从充电过程来看，该充电模式又分为先恒流充电后恒压充电，低温环境下充电时：电池很容易达到电压截至上限，致使恒流充电过程时间短，恒压充电过程时间特别长；常温以及温度比较高的环境下充电时：恒流充电所需时间长，恒压充电所需时间短。导致表3-5数据反应出的低温环境充电时间高于高温充电时间。

将表3-5中的环境温度数据和充电容量数据进行了数据拟合，下图3-5所示为拟合曲线，也根据拟合曲线关系获得电芯充电容量与温度变化的函数关系式，如公式(3-1)所示：

$$y = -3.5 \times 10^{-6} \times x^4 + 3.6 \times 10^{-4} \times x^3 - 1.2 \times 10^{-2} \times x^2 + 0.28 \times x + 24 \quad (3-1)$$

上式中 x 为环境温度，单位为℃； y 为充电容量，单位为 A.h。

从拟合公式以及拟合曲线可以看出：最高阶系数为负值，存在最大值，在一定温度允许范围内，环境温度越低，充电容量越少，环境温度越高，其充电容量越多。在拟合曲线上，充电容量在某一温度处达到最大值，低于或高于这个温度点，充电容量都在减小。这也说明了充电容量不是无限制的减少，也不会无限制的增

加。温度过低时，锂离子嵌入到石墨层的数量特别少，大量的锂离子在负极表面析出变成金属锂枝晶，随着锂枝晶的增大，会刺穿固态电解质膜，导致电池内部短路，这是非常危险的^[69]；温度过高甚至超过工作温度上限时，电池内部的反应物的化学活性比较大，电解液粘度降低，内阻减小，锂离子迁移速度增加、迁移阻抗降低，锂离子充电容量增加，但相应的电池内部电解液、极耳以及 SEI 膜等副反应速率成倍增加，电解液蒸发速度加快，电池的极化加剧，容易出现电池过充现象，致使电池出现析气、鼓胀、热失控甚至爆炸等安全隐患。

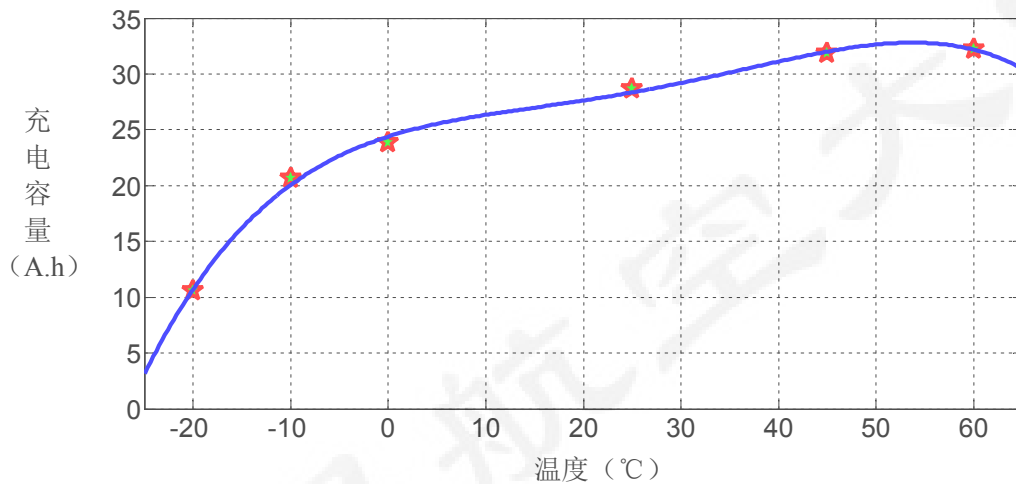


图 3-5 充电容量与温度变化的关系

(2)表 3-6 为同放电倍率，不同温度下的放电容量数据

表 3-6 同放电倍率不同温度下放电数据

环境温度	放电倍率	放电容量	放电时间
-20℃	1C	11.3928A.h	22 分钟 47 秒
-10℃	1C	22.5946A.h	45 分钟 11 秒
0℃	1C	27.9386A.h	55 分钟 52 秒
25℃	1C	31.7152A.h	1 小时 03 分钟 26 秒
45℃	1C	31.8552A.h	1 小时 03 分钟 42 秒
60℃	1C	31.8501A.h	1 小时 03 分钟 41 秒

表 3-5 所列数据分析可知，在一定温度区间内，放电容量随环境温度的升高而增大，温度越低，其放电容量越少；温度越高，放电容量越多。由于放电模式为恒流放电，而且：放电容量=放电时间×放电倍率，所以放电倍率相同的情况下，放电容量和放电时间成正比关系，不存在低温放电时间高于常温以及高温放电时间。将表 3-6 中环境温度与放电容量进行了数据拟合，下图 3-6 所示为拟合曲线，

根据拟合曲线变化关系获得电池单体放电容量与环境温度的函数关系式，如公式(3-2)所示：

$$y = -2 \times 10^{-6} \times x^4 + 2.9 \times 10^{-4} \times x^3 - 1.6 \times 10^{-2} \times x^2 + 0.38 \times x + 28 \quad (3-2)$$

上式中 x 为环境温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ； y 为放电容量，单位为 A.h 。

由拟合曲线以及拟合函数关系式可直观的看出，在一定温度范围内放电容量随温度的升高而增加，这与实验方案 1 中的充电容量与温度的关系比较相似。在某一温度点处，放电容量达到最大值，低于或高于这个温度点，放电容量都在不同程度的减小，如 45°C 下的放电容量大于 25°C 和 60°C 下的放电容量。这也从侧面说明了电池放电性能需要在一定适宜的环境温度范围内进行，高于或低于这个温度范围，电池单体的放电性能会不同程度的衰减。低温下，电池放电效率下降主要是因为受环境温度影响电解液的浓度变大，锂离子从负极材料脱嵌出来的速度变慢，同时由于电池单体的内阻增大，导致电池放电平台下降迅速，提前达到其放电保护电压，所以放电容量下降，放电性能降低^[70,71]。

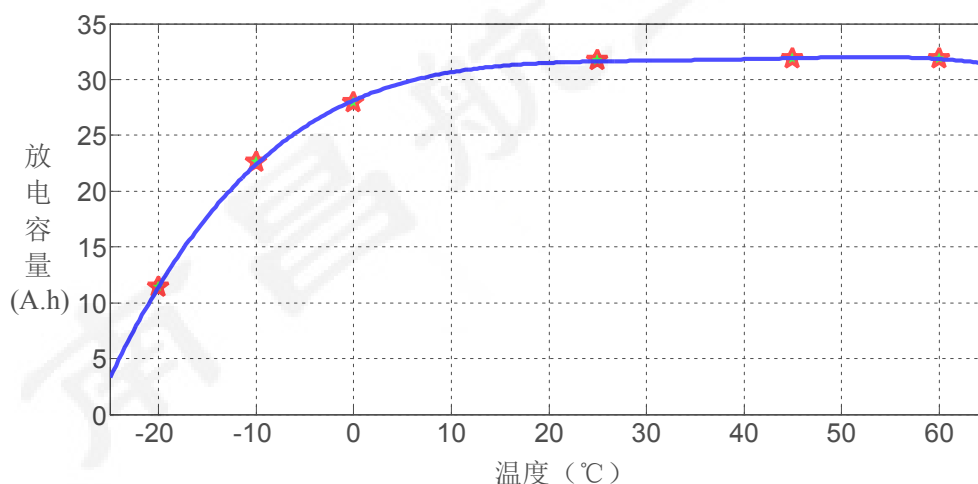


图 3-6 放电容量与温度变化的关系

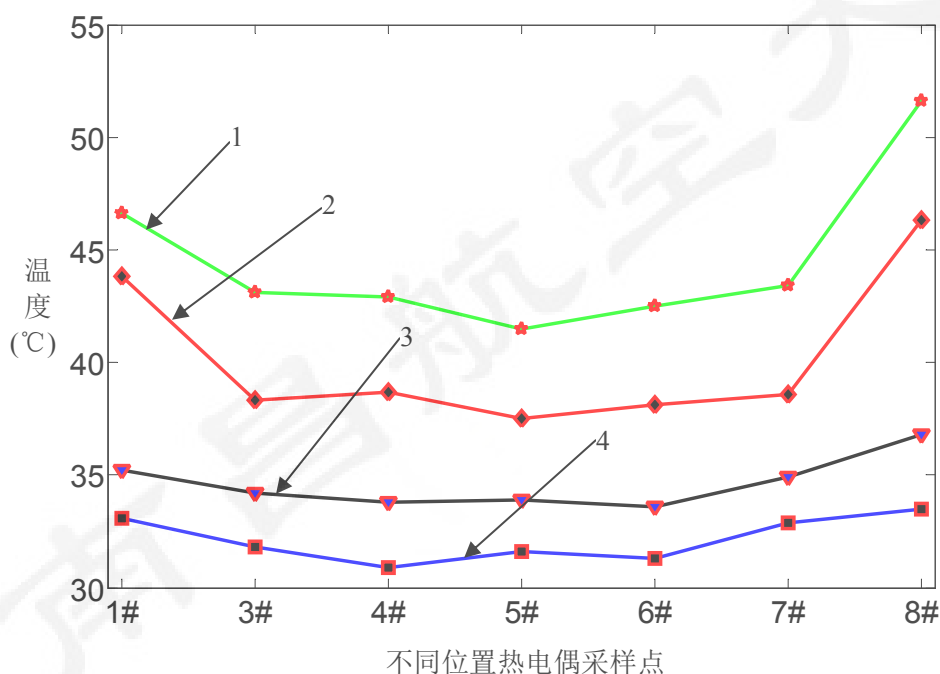
(3) 同环境温度，不同放电电流倍率下，电池温升测试。

在前面图 3-4(a)中可看到，软包电池不同位置处粘贴了温度采集端子，在环境温度 25°C 、不同放电倍率(0.5C/1C/1.5C/2C)下，下表 3-7 为各位置放电完成以后的最终温度数据。根据四种放电倍率下各测试点温度变化的情况可看出：8#采集端在不同倍率放电完全后，其温度测试值都是最高的，8#采集端对应部位是电池单体的中心区域，这也从实验角度可得出：电池工作时，其中心区域生热速率、积累热量速率以及温度升高速度是最快的，产生的热量也是最多的，这也为后续的电池包热管理设计提供了散热方向。

表 3-7 电池不同位置的温升数据

	1#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
0.5C	33.1℃	32.8℃	31.9℃	32.6℃	32.3℃	33.2℃	33.5℃
1 C	36.2℃	35.2℃	34.8℃	34.9℃	34.6℃	35.9℃	36.8℃
1.5C	45.7℃	44.3℃	44.7℃	43.5℃	44.1℃	45.9℃	46.3℃
2 C	50.3℃	49.6℃	48.9℃	48.5℃	49.1℃	50.9℃	51.6℃

图 3-7 为 7 个不同位置采集点，在不同放电倍率下的，其放电完全后，最终温度的变化趋势图。



1、2C 放电； 2、1.5C 放电； 3、1C 放电； 4、0.5C 放电

图 3-7 不同采集点温度变化趋势

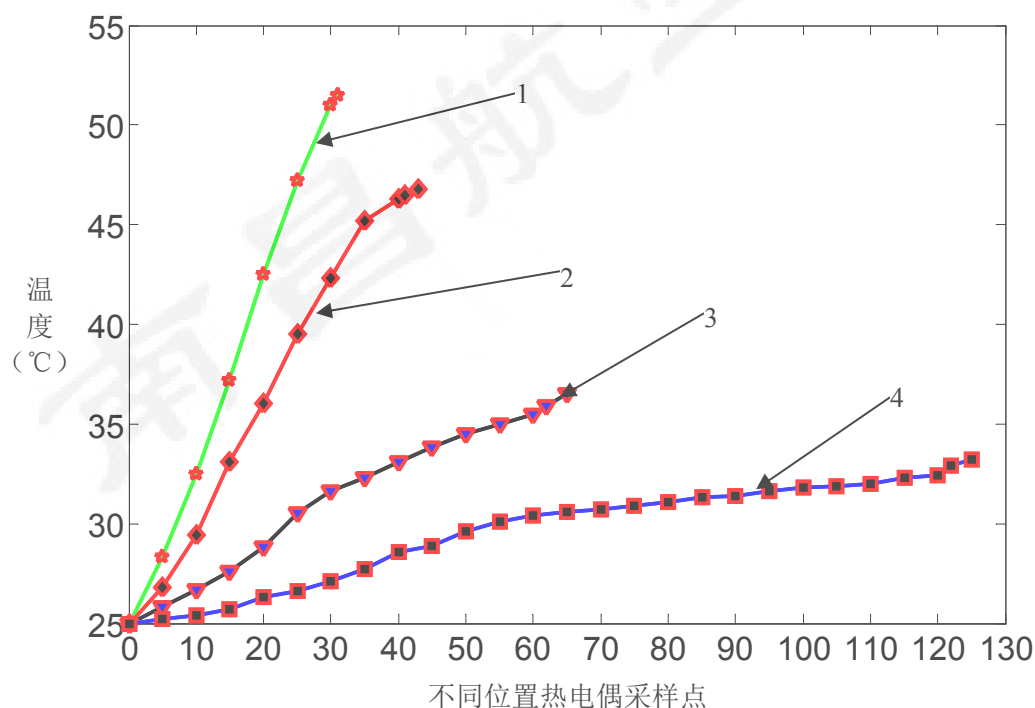
从图 3-7 可看出，随着软包电池放电倍率的线性增加，各采集点的温度变化幅度基本相似。从 0.5C 到 1C，各采集点温度升高幅度比较平稳，从 1C 到 1.5C 以及 1.5C 到 2C，各采集点温度变化幅度加剧，这是因为随着放电倍率的增加，电池内部参加电化学反应的材料越来越多，不论是吸热反应还是放热反应，其热量积累速度大于其反应速率，出现上述现象。

在环境温度 25℃、不同放电倍率(0.5C/1C/1.5C/2C)下，图 3-4(a)中 8#的热电偶端子所采集的温度数据，如表 3-8 所示：

表 3-8 8#温升测试数据

环境温度	放电倍率	最终温度	放电时间
25℃	0.5C	33.5℃	2 小时 08 分钟 47 秒
25℃	1 C	36.8℃	1 小时 06 分钟 33 秒
25℃	1.5C	46.3℃	44 分钟 52 秒
25℃	2 C	51.6℃	31 分钟 26 秒

选取 8#号测试端在不同放电电流倍率下的 4 组数据，以放电所用时间为横轴，温升变化为纵轴，得到图 3-8 所示的 8#在不同倍率下的温升变化图，可以很直观的看到随着放电倍率的线性增加，温升速度在不同程度的升高。从 0.5C 增加到 1C，温度有所升高，但变化幅度不是太大；从 1C 增加到 1.5C、1.5C 增加到到 2C 的过程中，温度升高的幅度有所加剧，温度最大值已快接近电池工作温度上限，如果继续增大放电倍率，不进行电池热管理，将会造成电池热失控爆炸的发生，这也是需要电池热管理必须存在的意义。



1、2C 放电； 2、1.5C 放电； 3、1C 放电； 4、0.5C 放电

图 3-8 8#测试点温升变化趋势

3.2 锂离子电池单体温升建模

电池热特性分析的方法有很多种，第二章部分章节已提到，一般常用的有实验

法和数值模拟法,其中数值模拟法中最常规的分析软件以及分析方法有计算流体力学软件以及有限元法,电池产热特性的数学模型或数值模型,通常情况下有三部分组成:(1)能量守恒方程;(2)导热微分方程或称电池生热方程;(3)连续性方程,包括线性或非线性方程、热传递(热传导、热对流和热辐射)方程等。目前国内外学者通过许多电池模型来描述温度场或者用来预测温度随时间变化分布等现象。

Inui Y^[72]等根据锂离子电池数值模型详细模拟了二维和三维的圆柱电池和方壳锂离子电池,得到了电池内部温度场分布。

姬芬竹^[73]等人利用 Bernardi 产热速率模型构建了单体电池内部正、负极集流体、极板的热效应耦合模型以及电池模组的导热模型。

Al-Hallaj S^[74]等运用一种简化的一维集中参数热数学模型,仿真了索尼 18650 型号的圆柱电池内部温度云图分布。

Wu M S^[75]等计算了二维圆柱电池模型的径向以及轴向导热系数,建立了圆柱电池二维非稳态生热模型,并模拟了电池内部温度云图分布。

Kim G H^[76]等建立了锂离子电池三维热滥用数值模型,该模型主要侧重研究电芯产热急剧加大的情况下的热失控行为,尤其是电池内部电-热化学反应机理。

3.2.1 锂离子电池单体热特性模型建立

锂离子电池在充放电过程中产生的热量致使电池包内环境温度产生变化,所以研究单体电池的生热量是进行电池包热效应分析的基础。第二章已说明,单体电池在充放电过程中,产生的热量主要由4部分构成,这里不再重提。

目前,研究电池热效应的数值模型有很多,归类一下,主要有6类:(1)集中参数热数值模型^[90];(2)一维简化的热数值模型^[91];(3)一维热-电-化学耦合模型^[92];(4)圆柱电池二维瞬态传热模型;(5)三维锂离子电池热效应模型;(6)二维方壳锂离子电池 CFD 模型^[93]。

单体建立热效应模型的目的是获得其内部温度场的分布以及分析在不同工况下温升数据的变化情况;单体表面温度分布不能够直观反映电池内部的热分布状况,须要根据锂离子电池的热物性参数构建对应的热效应数值模型来仿真单体内部温度云图分布;电池内部任意单元体的温度场都可以运用电池热效应模型来计算^[77]。热效应模型的计算需要相应的电池热物性参数、电池内部的生热速率以及边界条件等,再配合 CFD 仿真,来得到单体内部温度场分布状况。

本章主要根据磷酸铁锂软包电池和 18650 型号的圆柱电池两种异同结构的热

物性参数，进行热效应模型建立以及仿真分析，为后面章节电池包的热管理结构设计提供方法指导。

由第一章可知电池单体内部主要包括正负极极片、集流体、电解液以及电解质隔膜等。每一种结构材料性能各不相同，所以常规构建单体的热效应数值模型相对有点困难，需要在建模前，须对模型一定的简化设置，来降低单体内部温度场分布的复杂程度。其模型设置如下：(1)把电池单体内核和外壳看成一整体，电池在充放电前后，其质量、体积不变，故其密度也不发生变化；(2)电池产生的热量和充放电容量的变化，不会影响电池内部各种材料的物性参数的变化，如导热系数、比热容等；(3)电池内部的介质材料均衡分布，同种材料的比热容不变且在同一方向上导热系数相等；(4)电池在充放电阶段，其内部各单元体处生热率相同，电流密度一致性均匀；(5)热量在电池内部是均匀产生的。其软包电池的数值模型为：

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-3)$$

上式中 λ_x , λ_y , λ_z 分别是软包电池单体在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数； T 表示单体内部的温度； q 表示电池单位体积的生热速率； ρ 表示电池单体的密度； c_p 表示电池单体的比热容； t 为时间。

圆柱电池的数值模型，根据在第二章公式(2.36)推导，可写出模型内部单元体的导热微分方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{\phi} \quad (3-4)$$

上式中： ρ 为密度； c 为比热容； T 为温度； t 为时间； r 、 θ 、 z 表示柱坐标系的坐标轴； λ_r 、 λ_θ 、 λ_z 为圆柱电池在三个方向的导热系数； $\dot{\phi}$ 为单元体的内热源。公式左右各部分构成，在公式(2.36)已说明。

3.2.2 锂离子电池单体热特性参数计算

第二章 2.3.1 节运用到美国伯克利大学的 D.Bernardi 提出的模型公式(2-13)来计算电池生热率，公式(2-13)可改写为公式(3-5)所示：

$$\dot{q} = [I(E - U) - IT \frac{dE}{dT}] / V_b \quad (3-5)$$

上式中 \dot{q} 为生热率，单位为 W/m^3 ； I 为充电电流，充电时取正，放电时取负，单位为 A ； E 为电池开路电压，单位为 V ； U 为电池充放电时的瞬态电压，单位为 V ； T 为电池温度，单位为 K (开尔文)； V_b 为电池单体体积，单位为 m^3 ； $I(E - U)$ 表示

电池工作过程中产生的欧姆热，单位 J ； $IT \frac{dE}{dT}$ 表示由化学反应温度变化产生的热量，单位为 J 。

由(3.5)式可知，电池单体产热速率是一个瞬态值，在电池工作过程中，无时无刻都在变化，为了建模方便，减少电池内部的不定影响因素，假设生热速率 \dot{q} 是一个定值， T 为电池单体初始温度，取常温 298K(25℃)。因为电池放电过程属于恒倍率放电，电流 I 取定值，所选电池单体体积可计算得到， $\frac{dE}{dT}$ 为温度系数，通过查资料在 20℃~60℃ 之间软包电池可取定值为：0.5 mV/K，圆柱电池可取值为 0.22 mV/K。

以上都给出了获得公式(3-5)生热率所必须的参数值。根据所选软包电池和圆柱电池的充放电性能，以及前面两章所分析的锂离子电池放电生热量高于充电的生热量，反映在宏观温度变化层面，就是放电时锂离子电池的发热程度高于其充电时。所以，选取软包电池放电时所允许的放电电流大小来计算，该软包电池单体放电，其标准规定为 0.5C，最大放电倍率大小为 3C(不超过 30 秒)，故选取软包电池在 0.5C、1C、1.5C、2C 时的电流大小，计算生热速率，其中 1C=30A；选取 18650 型号的圆柱电池在 0.5C、1C、2C、3C 下的放电电流大小，其 1C=2.5A，将所有参数代入(3-5)式，获得不同放电倍率下的生热率值，进行仿真计算。

单体电池的热物性参数可以通过查技术手册以及第二章列出的相关公式计算可获得。其热物性参数值如表 3-9 和表 3-10 所示：

表 3-9 软包电池内部各材料热特性参数

材料	平均密度(kg/m^3)	平均比热容($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
正极极耳 铝	2701.5	870	238.6
负极极耳 镍	8900	461	88
单体内核 组成材料	1353	134	$\lambda_x = 1.8, \lambda_y = 1.5, \lambda_z = 0.6$
单体外表 铝塑膜	960	2100.5	8

表 3-10 圆柱电池内部组成材料热特性参数

材料	平均密度(kg/m^3)	平均比热容($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
单体内核 组成材料	2236.3	1125.6	$\lambda_x = \lambda_y = 1.38, \lambda_z = 32.56$
单体外壳 聚乙烯膜	1080	1451	0.21

3.3 锂离子电池单体建模

所选软包电池单体的外形尺寸如表 3-11 所示，软包电池外形与其性能参数如下图 3-9 和表 3-12 所示。

表 3-11 磷酸铁锂软包电池的外形尺寸

参数	长度(L)	宽度(W)	厚度(T)	极耳宽度	极耳中心距	极耳厚度
尺寸(mm)	260	173	9.3	50	90	0.2



图 3-9 软包单体外形

表 3-12 3.2V30A.h 软包电池性能参数

规格参数	额定值
铝塑膜	
额定容量	30A.h
额定电压	3.2V
截止电压下限	2.5V
截止电压上限	3.65V
最大充电电流	30A(1C)
最大放电电流	90A(3C, ≤30sec)
充电工作温度范围	0°C~45°C
放电工作温度范围	-20°C~55°C
电芯内核	
储存温度	0°C~35°C
重量大约为	775g
尺寸	260×173×9.3

所选 18650 圆柱电池单体外形如图 3-10 所示，有正极、负极、电池内核以及聚乙烯膜外壳组成，表 3-13 为 18650 型号的圆柱锂离子电池性能参数。



图 3-10 18650 型号圆柱电池外形

表 3-13 18650 型号圆柱电池性能参数

规格参数	额定值
电池型号	INR18650-25EA
额定容量	2.5A.h
额定电压	3.65V
内阻范围	$\leq 25\text{m}\Omega$
截止电压下限	2.75V
截止电压上限	4.20V
最大充电电流	1.25A(0.5C)
最大放电电流	7.5A(3C)
充电工作温度范围	0℃~45℃
放电工作温度范围	-20℃~55℃
储存温度	0℃~35℃
重量大约为	45~48g
高度尺寸	65.1±0.15mm
直径尺寸	18.25±0.15mm

运用 CFD 软件 Fluent，在 Fluent 前处理器 Gambit 中构建软包电池单体的三维模型，对其三维模型做了简化设置，略去了正负极极耳，如图 3-11(a)所示，网格划分如图 3-11(b)所示，图 3-11(c)为网格划分局部放大图显示。由于计算机性能及内存的限制，为了提高软件计算时的速度，对软包电池模型所划分网格主要以六面体结构化网格单元组成，网格节点之间间隙尺寸设置为 2，单体外表设置为 WALL，材料属性为铝塑膜；单体内核设置为 SOLID，材料属性设置为混合材料。

同样的，由于圆柱单体内部结构复杂以及空间密集，组成部分包括正负极、正负极引线、正负极集流体、电解质隔膜、电解液、正负极端、壳体以及 PVC 膜等^[78]。各部分所占体积尺寸都比较小，所有部件建立模型计算都比较困难，考虑到单体内部结构的复杂度对整个圆柱电池模型温度场仿真没有特别大的影响，所以本论文将圆柱电池结构做简化处理，简化后主要包括两部分：单体内核和单体外壳。通过查表获得圆柱电池内部各种结构的物性参数，结合第二章所列出的公式，算出了电池内部的平均热物性参数，表 3-10 所列，图 3-12(a)为 18650 圆柱电池模型，3-12(b)为圆柱电池网格划分。

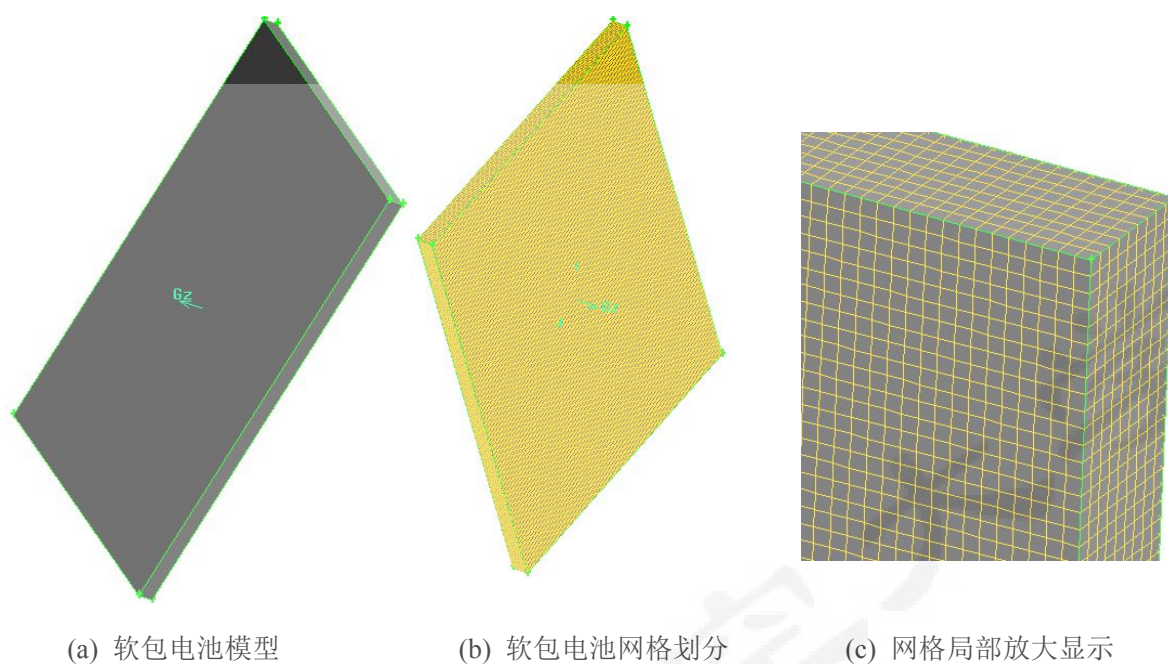


图 3-11 30A.h 软包电池建模

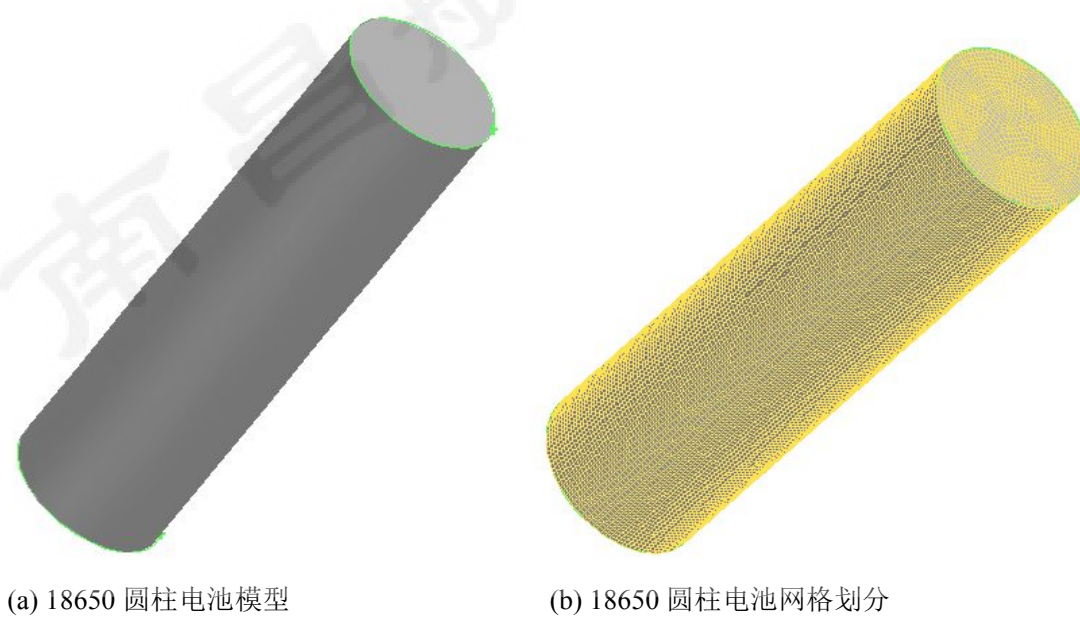


图 3-12 18650 圆柱电池建模

3.4 仿真条件设置及数据分析

3.4.1 仿真条件设置

启动 FIUENT 求解器，其模型仿真步骤设置如下：

(1) 网格质量和尺寸检查。导入在 Gambit 创建的网格划分模型，对其模型进行网格质量和尺寸检查，主要是看网格划分计算域是否存在负体积的出现，若存在，就必须重新对模型网格划分。

(2) 求解器以及算法的选择。计算选择稳态法求解，选取绝对速度方程，其中压力-速度耦合算法选择 SIMPLE。

(3) 选择物理计算模型。由于本章主要研究软包电池和圆柱电池模型的内部温度场分布及其影响因素，考虑到电池都是以内部生热为主，电池内部各材料之间能量传递主要以热传导为主，电池与环境温度之间能量传递主要以热对流为主，所以选取能量模型，启动能量方程。

(4) 电池内部材料物性参数设定。本章为了简化模型计算，将软包电池热源以及圆柱电池热源定义为了常数，其不同倍率下的放电生热率值可用公式计算得出，其它材料物性参数设置以表 3-9 和表 3-10 为主。

(5) 模型仿真边界条件设定。初始温度设定为 298K(25℃)，软包电池和圆柱电池与外界环境之间能量传递主要以热对流为主，则对流换热系数在自然环境下取 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，软包电池铝塑膜厚度 0.2mm 和圆柱电池聚乙烯膜厚度 0.3mm, 能量方程收敛精度设置为 10^{-6} ，其它方程收敛精度设置为 10^{-3} 。

(6) 求解计算初始化设置。计算选择“all-zones”（整个流场区域），其它选择默认设置，设定迭代步数 200 和报告间隔为 1，点击“Iterate”，进行迭代运算。

3.4.2 仿真后处理分析

1、软包电池后处理分析

图 3-13 所示 30A.h 软包电池在不同放电倍率下，放电完全以后(剩余电量为零)的温度场分布情况。(a)、(b)、(c)、(d)分别为软包电池在(0.5C、1C、1.5C、2C)倍率放电下，整体的温度场云图分布；从(a)/(b)/(c)/(d)四图可看出，放电倍率不同，而温度场的分布趋势都基本相同，主要原因是：在不同放电倍率下，软包电池内部导热材料相同，电池在不同方向上的导热系数也相同，所建模型尺寸大小相同，这样使得在不同放电倍率下，温度云图的分布趋势也趋于相似；随着放电电流的增大，软包电池温度云图的最高、最低温度及最大温差都在相应的增大，这是因为随着放电电流的增大和放电深度的增加，电池内部的剩余电量降低，导致电池极化和欧姆阻抗的加剧，致使电池内部产热量急速增加；受到电池散热边界条件的影响，软包电池内部中间温度升高要明显快于电池边缘部分，致使电池内部产

生了较大的温度梯度，最终在电池表面表现为温度的变化幅度随放电电流的增大而升高。而且，在不同放电倍率下，软包电池的最高温度都出现在电池的几何中心处^[79]，最低温度出现在离电池几何中心最远处，并且温度从电池的内部到边缘逐渐降低。

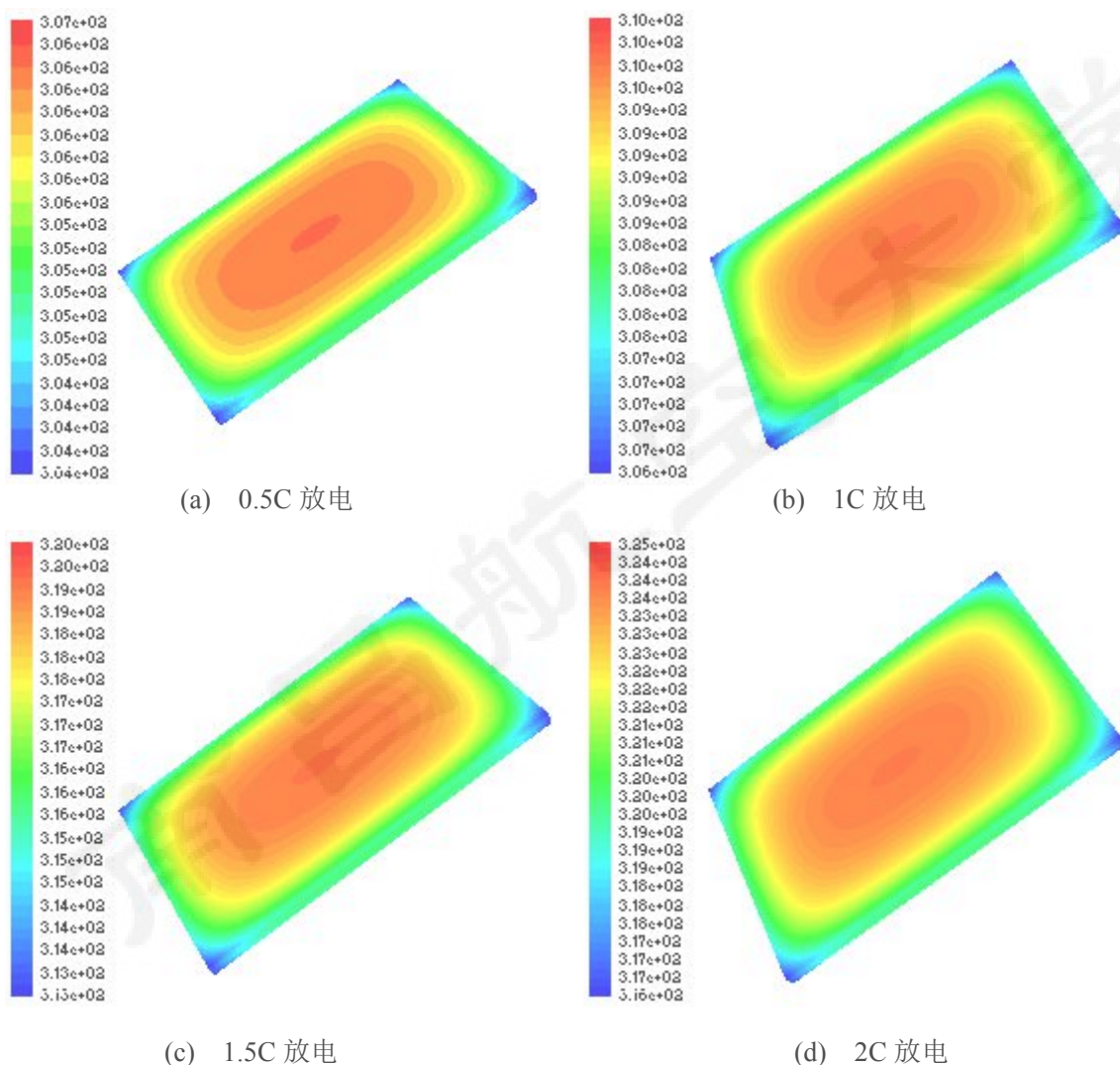


图 3-13 不同放电倍率下，软包电池温度场分布

图 3-14 为软包电池在不同放电倍率下， $z=0$ 截面上的温度云图分布，可清晰直观的看出，随着放电倍率的增大，电池单体内部的温度梯度逐渐增大，单体几何中心处温度最高，并逐渐向四周递减。后面出现的温度云图左边的标尺表示温度的大小，越往上温度越高，越向下温度越低，速度云图同理。

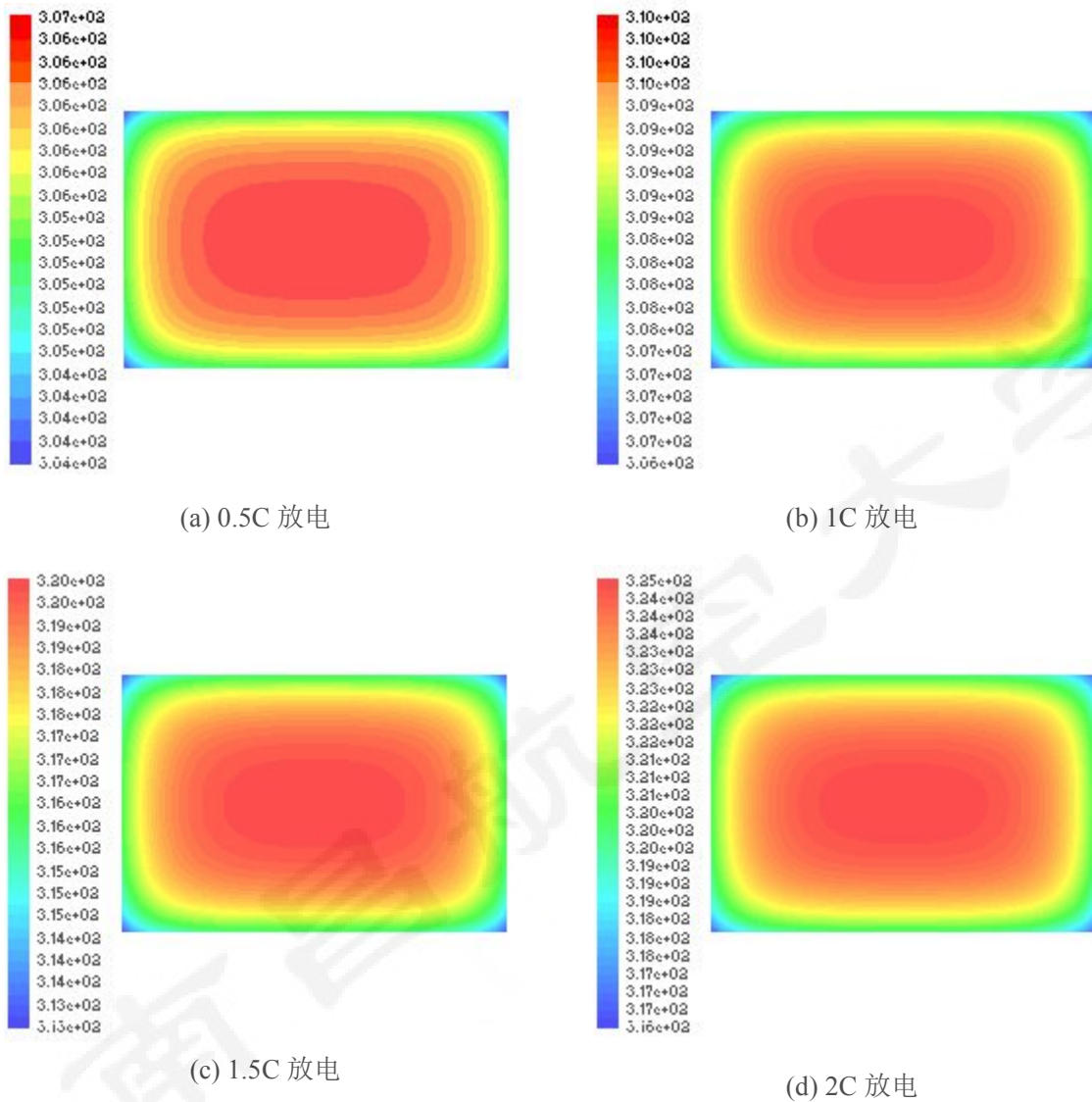
图 3-14 不同放电倍率下, $z=0$ 截面上温度云图分布

表 3-14 不同放电倍率下, 温度仿真数据

放电倍率	最低温度(K)	最高温度(K)	最大温差($^{\circ}$ C)
0.5C	303.9	306.6	2.7 $^{\circ}$ C
1 C	306.4	310.2	3.8 $^{\circ}$ C
1.5C	313.1	319.8	6.7 $^{\circ}$ C
2 C	316.4	324.8	8.4 $^{\circ}$ C

表 3-14 为软包电池在不同放电倍率下, 图 3-13 和图 3-14 中温度场仿真数据汇总。下图 3-15 为(a)、(b)、(c)、(d)温度云图仿真温升数据, 其最低、最高温度数据对比分析。

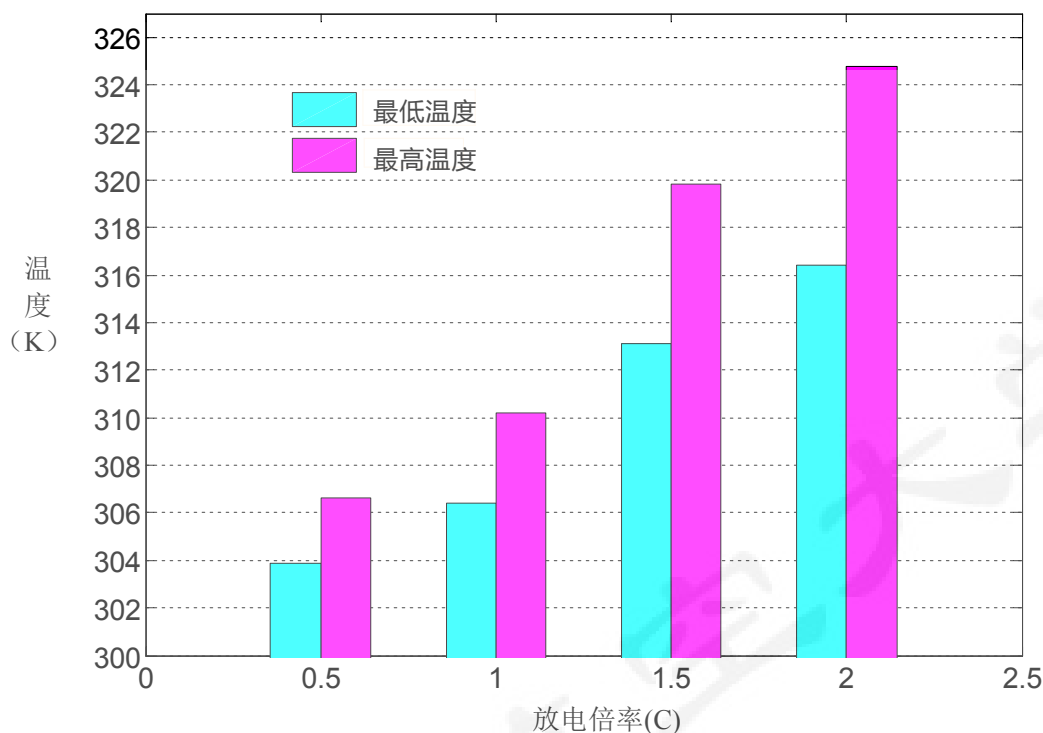


图 3-15 不同放电倍率下，软包电池温度场仿真的最低温度和最高温度对比

从图 3-15，可直观看出：随着放电倍率的线性递增，最高、最低温度以及最大温差都在不同幅度的升高，放电倍率越大，其变化幅度越剧烈。为验证本章所构建的软包电池三维模型的可行性，表 3-15 提供了在 5 个温度测试点(3#/4#/6#/7#/8#)的实验所测数据与仿真计算数据，并计算了相对误差。从中可看出，软包电池仿真温度数据与其实验所测数据在不同放电倍率下，变化趋势相似，虽然有一定的温度差异，但其所计算的相对误差，始终保持在 3% 之内，相对比较稳定，可说明该软包电池热效应模型满足研究电池热特性的需要^[80]。而且，从表中还可看出。仿真计算所得的温度数据基本上要大于实验所测得的温度数据，分析原因可能有以下 2 种：

(1) 实验所测温度数据的方法，主要是把热电偶测温端子粘贴在电池表面，这时所测的数据其实为电池表面的数据，其所测最大值和最小值都为电池表面的温度数据，而没有获得电池工作时真实的内部温度场分布数据。而仿真计算所得的温度数据，是软包电池内外部温度数据汇总以后的分布，所以就出现实验温度值小于仿真值的现象。

(2) 温升实验过程，虽然在恒温恒湿箱内进行，但不能保证完全的绝热环境，软包电池产生的热量有一些传递到空气中是不可避免的。

表 3-15 软包电池实验值与仿真值数据对比

采样位置	测试温度(°C)	仿真温度(°C)	相对误差
0.5C-3#	32.8	32.2	1.8%
0.5C-4#	31.9	32.0	0.3%
0.5C-6#	32.3	31.8	1.5%
0.5C-7#	33.2	33.3	0.3%
0.5C-8#	33.5	33.6	0.2%
1 C-3#	35.2	35.8	1.7%
1 C-4#	34.8	34.9	0.3%
1 C-6#	34.6	34.3	0.8%
1 C-7#	35.9	36.2	0.8%
1 C-8#	36.8	37.2	1%
1.5C-3#	44.3	45.5	2.7%
1.5C-4#	44.7	44.9	0.4%
1.5C-6#	44.1	45.2	2.5%
1.5C-7#	45.9	46.1	0.4%
1.5C-8#	46.3	47.4	2.4%
2 C-3#	49.6	50.5	1.8%
2 C-4#	48.9	49.5	1.2%
2 C-6#	49.1	49.3	0.4%
2 C-7#	50.9	51.2	0.6%
2 C-8#	51.6	51.8	0.4%

2、圆柱电池后处理分析

图 3-16 所示为 18650 圆柱电池在不同放电倍率下，放电完全以后的温度场分布。图 3-16(a)所示为 0.5C 放电倍率下，圆柱电池整体的温度场分布，仿真温度值最低为 303.28K，最高为 305.06K，最大温差为 1.78°C；(b)所示为 1C 放电倍率下，圆柱电池的整体温度云图分布，其温度值最低为 307.90K,最高为 311.13K，最大温差为 3.23°C；(c)所示为 1.5C 放电倍率下，电池整体温度云图分布，温度最低为 311.86K，温度值最高为 316.52K，最大温差为 4.66°C；(d)所示为 2C 放电倍率下，圆柱电池整体的温度云图分布，温度值最低为 318.46°C，最高为 325.38°C，最大温差为 6.92°C。从整体来看，在不同放电倍率下，圆柱电池温度场整体分布趋于

相似。

图 3-17 为不同放电倍率下，圆柱电池内部 $x=0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$ 截面上的温度云图分布，可看出：在电池表面，圆柱电池两端正负极的温度要高于电池其它部位；在电池侧面，中部区域的温度要高于侧面两端的温度，这与实验中所测温度分布趋势吻合。

结合图 3-16 与图 3-17，可看出：最高温度出现在电池几何中心处，电池温度从中心向四周传递，随着放电倍率的增大，圆柱电池整体的温升数据出现不同程度的升高，在放电倍率 2C 时，电池内部最高温度已达到 52°C ，已快超过电池工作温度范围上限，如果继续增加放电倍率或是升高环境温度，而不进行必要的电池散热措施，很容易出现圆柱电池热失控爆炸的风险，这也是必须需要电池热管理对其电池温度管控的原因。

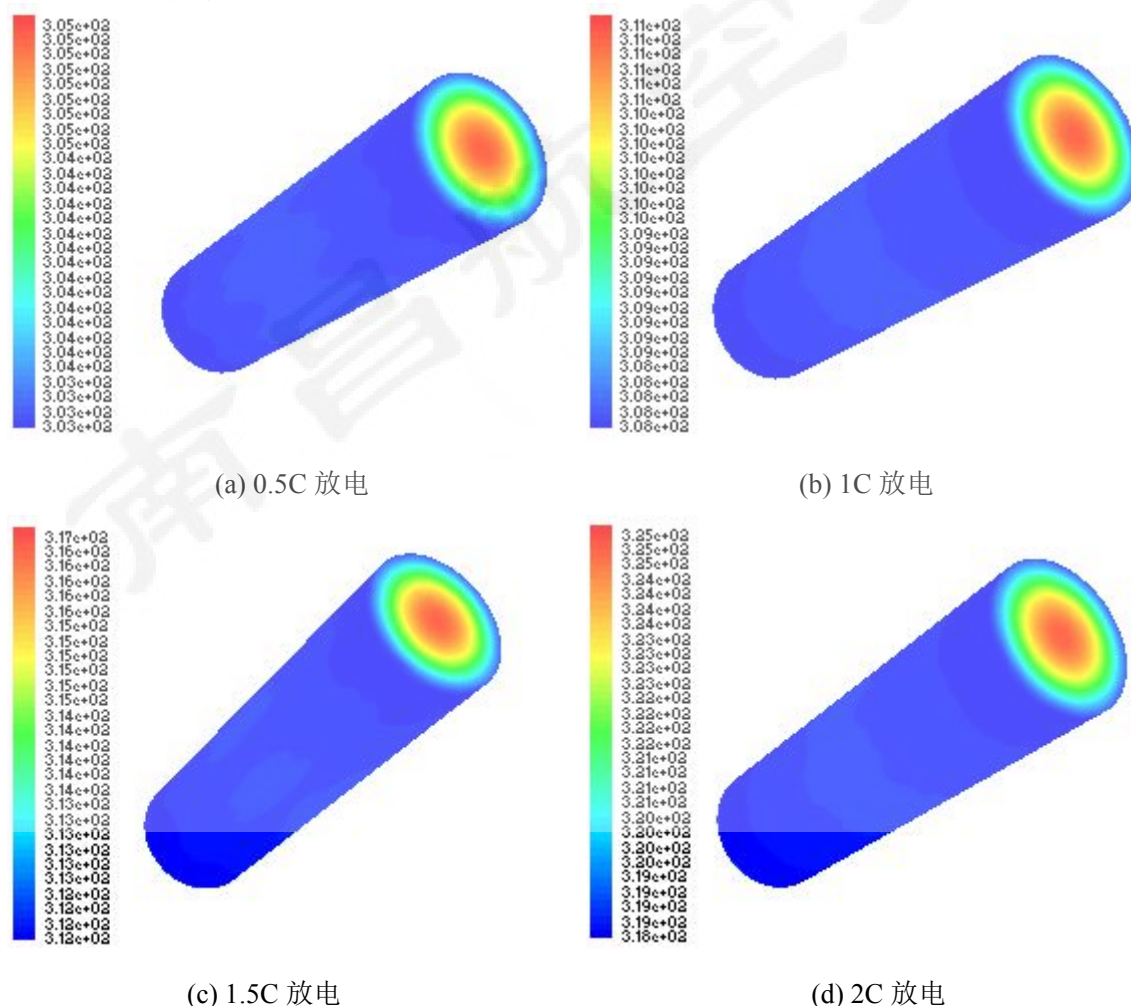


图 3-16 不同放电倍率下，圆柱电池整体温度场分布

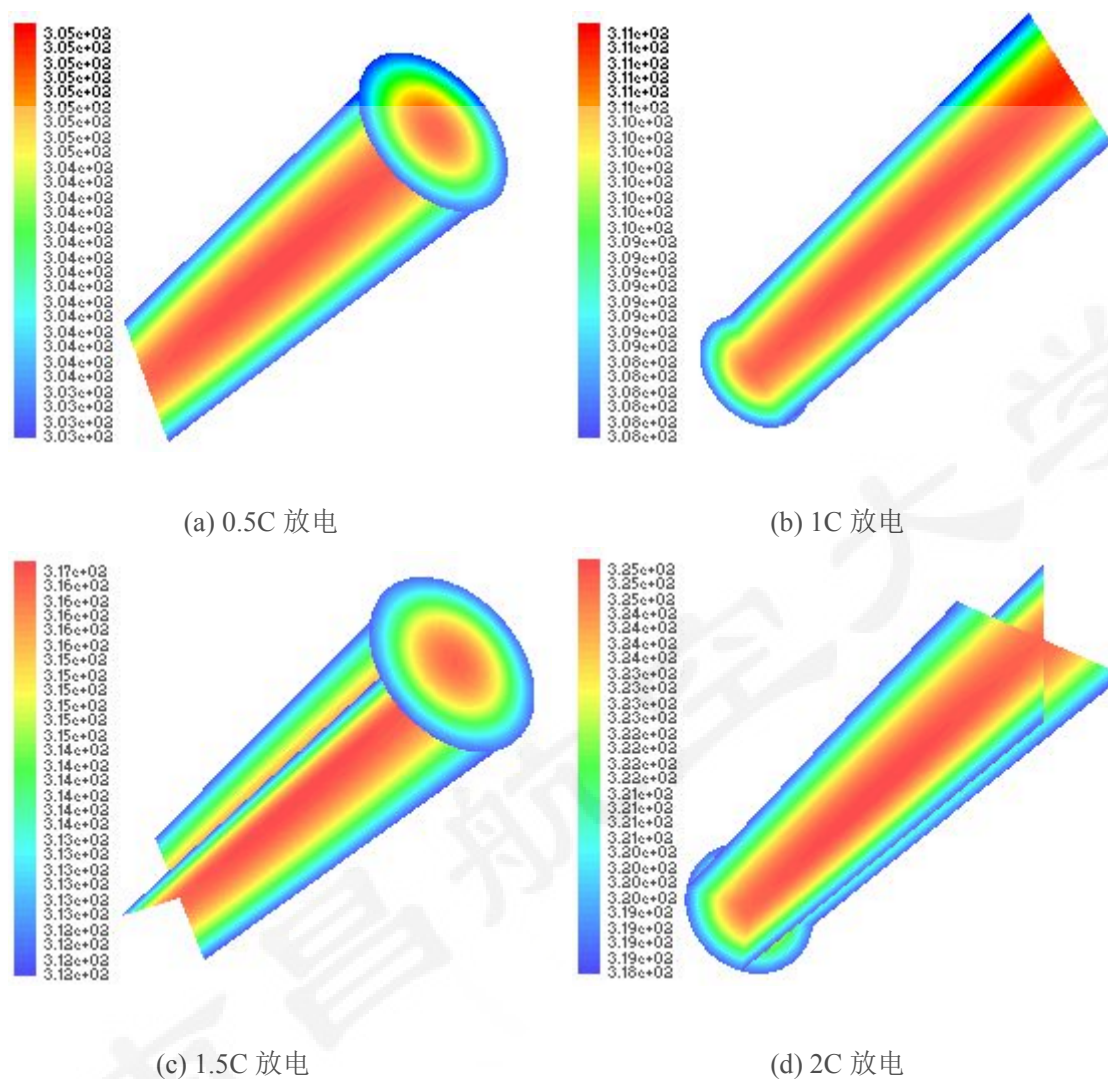
图 3-17 圆柱电池内部 $x=0$ 、 $y=0$ 及 $z=0$ 截面上温度场分布

表 3-16 为圆柱电池，在不同放电倍率下的温升数据汇总。图 3-18 为随着放电倍率的线性增加，仿真数据温度最高值和最低值之间的对比，可直观看出，放电倍率的不同导致的温度场的变化，放电倍率增大导致最大温差离散化加剧。

表 3-16 不同放电倍率下，温度场数据对比

放电倍率	最低温度(K)	最高温度(K)	最大温差($^{\circ}$ C)
0.5C	303.28	305.06	1.78 $^{\circ}$ C
1 C	307.90	311.23	3.23 $^{\circ}$ C
1.5C	311.86	316.52	4.66 $^{\circ}$ C
2 C	318.46	325.38	6.92 $^{\circ}$ C

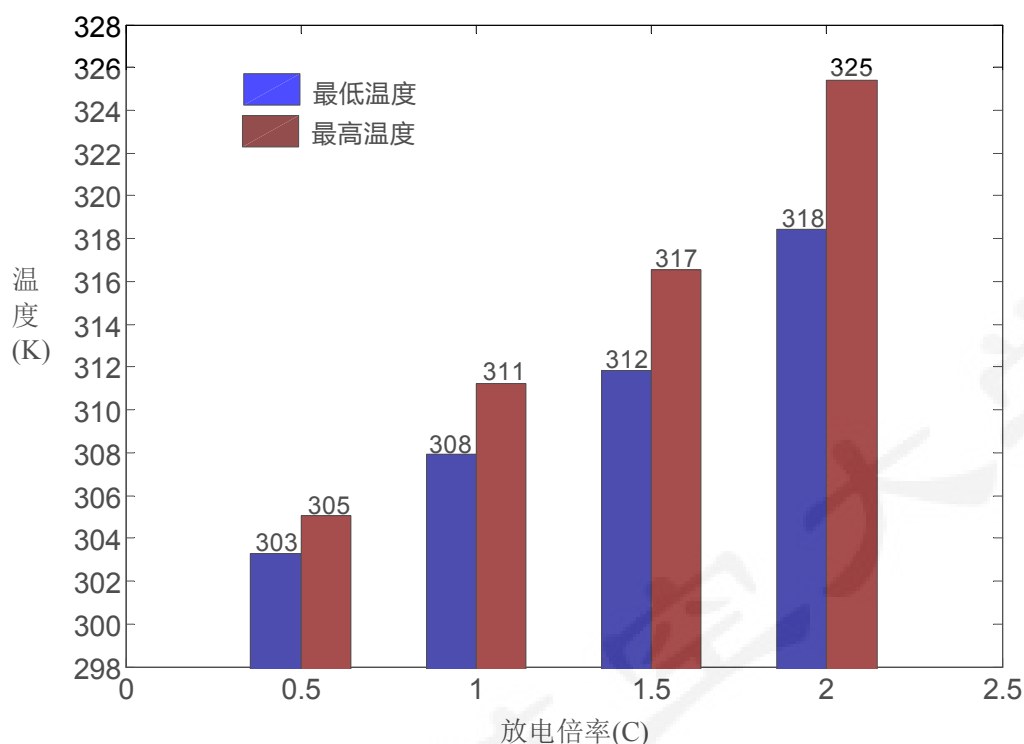


图 3-17 不同放电倍率下，圆柱电池温度场仿真的最低温度和最高温度对比

和软包电池研究一样，为了探究所建立圆柱电池三维模型的实际可行性，表 3-17 提供了在 3 个温度测试点(顶部、中部以及底部)的实验所测数据与仿真计算数据，并计算了相对误差。从中可看出，圆柱电池仿真温度数据与其实验所测数据在不同放电倍率下，变化趋势相似，虽然稍微有一定的差异，但其所计算的相对误差，始终保持在 3% 之内，相对比较稳定，可说明该圆柱电池热效应模型满足研究电池热特性的需要。而且，从表中还可看出：放电倍率较小时，仿真计算所得的温度数据基本上要大于实验所测得；放电倍率较大时，仿真计算所得温度数据小于实验所测的温度数据，其可能的原因是：放电倍率较小是主要以欧姆热为主，仿真建立模型时考虑到这一点了，但是恒温恒湿箱内绝热环境无法保证，导致圆柱电池表面热量的部分散逸，致使实验所测数据偏小；放电倍率较大时，随着温度的上升，电池内部材料化学活性增大，引起了一些副反应产热，这是仿真模型欠缺考虑的，导致放电后期：实验值略大于仿真值。

表 3-17 圆柱电池实验值与仿真值数据对比

采样位置	测试温度(°C)	仿真温度(°C)	相对误差
0.5 C-顶部	29.8	30.6	2.6%
0.5 C-中部	31.7	32.0	0.9%
0.5 C-底部	29.5	30.3	2.7%
1C-顶部	35.2	35.5	0.8%
1C-中部	36.8	37.6	2%
1C-底部	34.9	35.1	0.5%
1.5 C-顶部	40.0	39.8	0.5%
1.5 C-中部	41.9	43.1	2.8%
1.5 C-底部	39.3	39.2	0.3%
2C-顶部	47.1	46.4	1.5%
2C-中部	50.9	51.7	1.6%
2C-底部	46.5	45.8	1.5%

3.5 本章小结

本章做了以下两方面的工作：

1.对锂离子单体进行了不同温度下的充放电容量测试以及不同放电倍率下的温升实验。实验数据表明：(1) 在锂离子电池所允许的工作温度区间内，温度越高，充放电可用容量越多；温度越低，充放电可用容量越少；(2) 在放电倍率允许的范围内，放电倍率越大，温升越高，放电倍率越小，温升越低。随着放电倍率的线性变化，电池单体各个部位的温升变化幅度也在不同程度的增大。

2.对锂离子单体两种不同结构：软包电池和 18650 型号的圆柱电池，进行了热效应模型构建并对其做了仿真计算，仿真了不同放电倍率(0.5C/1C/1.5C/2C)下的温升变化，随着放电倍率的逐渐增大，单体温度场的温升数值都在不同幅度的升高，而且对仿真结果与实验结果进行了对比分析，仿真值与实验所测值温度相对误差在 3% 以内，验证了所建三维热效应模型的有效性，也同时证明了电池热管理的必要性，为后面的电池热管理设计研究提供了重要依据。

第4章 锂离子电池组排布设计及温度场研究

4.1 引言

第三章通过建立软包电池与圆柱电池三维热效应模型,仿真计算了电池单体整体的温度场分布,在锂离子单体所允许的工作温度范围内,验证了所建模型对研究单体热行为的可行性。然而在电动汽车上应用的不是锂离子单体电池,而是由许多单体并联组成的模组,再由若干模组串联组成的电池系统。所以,电动汽车的性能并不仅仅是由单体电池决定,绝大多数情况下是由成组模组的一致性和电性能参数所决定的。

所以,我们不但要通过研究获得单体内部温度场的分布,而且还要研究模组的排列以及箱体的设计是如何影响温度云图分布的。从电动汽车的性能需求出发,随着其技术的创新,对电池技术要求越来越高;为了制造高能量、高功率的电池包来满足客户需求,电池包需要通过串、并联来获取高电压以及高容量,所以就有了多支单体并联,多块电池模组串联的设计结构^[94]。这样致使电池组在大功率(起步、爬坡以及加速等)下工作时,出现很多的热量累积,致使热量在箱内的分布极不一致,使得电池组温度场的分布离散化加剧,一致性降低。而且,电池组温度场长时间不均衡分布也会导致单体电池性能的不均衡,尤其是分布在高温区域的电池老化速率会明显快于低温部位;随着时间的累积,各单体之间的性能差异将更加突出,从而使得单体间的一致性变差,甚至发生提前失效,缩短了整个电池组系统的寿命^[82]。

锂离子电池组的性能会直接影响电动汽车的整车性能,因此,动力锂离子电池组设计作为电动汽车三电系统设计中不可忽视的一部分,在有限的车体安装空间中设计合理的电池组排列方式以及最佳的热管理方案是必不可少的,这样才能确保电池组工作在合适的温度区间内,降低电池组性能的衰减速度并消除相关的潜在安全隐患,延长电池包的使用循环寿命。

基于此,本章节通过18650型号的圆柱电池组在不同的排列方式下,研究进、出风口开设对温度场的影响效果,为电池组箱体散热结构设计提供指导。

4.2 锂离子电池组排布模型的建立

电池包是由多个电池模组串联构成，电池模组的排列既影响电池包内部有限空间的利用，其模组之间的间隙设计，也直接影响到电池包内部流场分布、温度场分布、机械安全以及电气安全等性能。而电池模组主要以单体电池、模组连接构件等构成。

电池模组设计需要考虑所选电池单体类型、模组所需能量、电流大小、外部尺寸、机械连接接口、电器连接接口、模组散热或加热以及隔热等因素，需要满足绝缘、针刺、重物重击、热冲击、温度循环等方面要求。对于电动汽车所使用电池，通常应该优先使用技术相对成熟的电池，同时，尽量使用类型单一的电池模组方案进行方案布置，这样更有利于电池的设计、零部件的供应、生产制造以及售后更换等，从而使产品技术开发风险、开发周期以及成本降低。下图 4-1 为两种不同结构的电池模组，(a)图为软包电池 10 并 30 串模组，(b)图为圆柱电池模组。

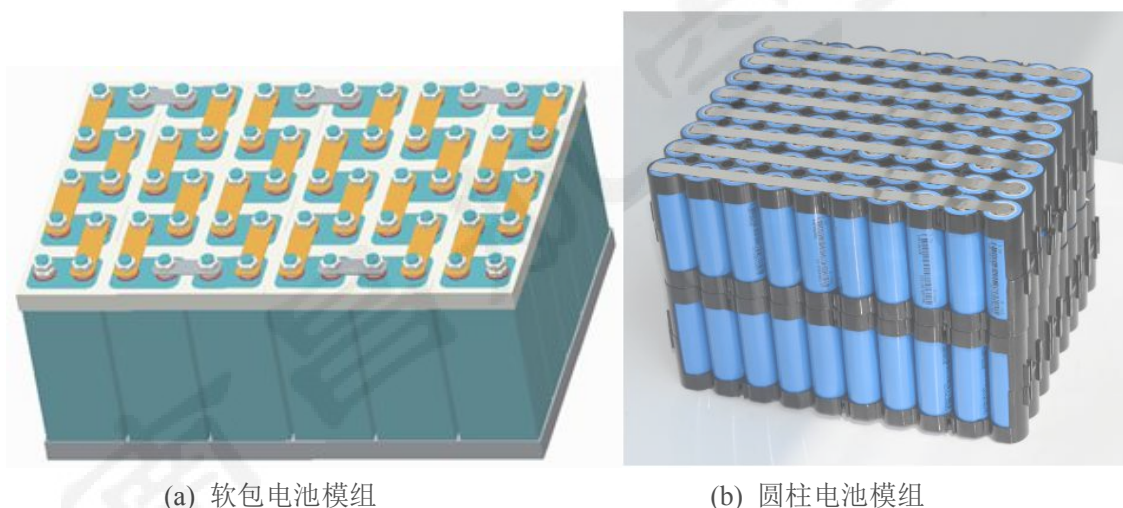


图 4-1 两种不同结构的电池模组

4.2.1 国内外典型的电动汽车电池包

由于种种原因，新能源汽车领域动力电池模组还没标准化，电池厂家会根据车企的要求来定制电池包，所以导致了每家车企所使用的电池模组尺寸和大小各不相同，致使电池包的设计要根据整车企业对电池包所能达到的要求(功能要求、性能要求、尺寸要求、重量要求、接口要求、IP 防护要求等)，来确定合适的箱体设计和电池包内部的电池模组设计、电连接设计等。

图 4-2 为 Tesla Model S 电池包，Tesla Model S 电动汽车使用 18650 圆柱电池，其电池包由 16 块模组串联而成，并且每组电池组有 444 节圆柱电池单体，每 74

节并联而成，即电池组板为 74 并 96 串，所以 Model S 电池包由 7104 节 18650 圆柱电池组成。

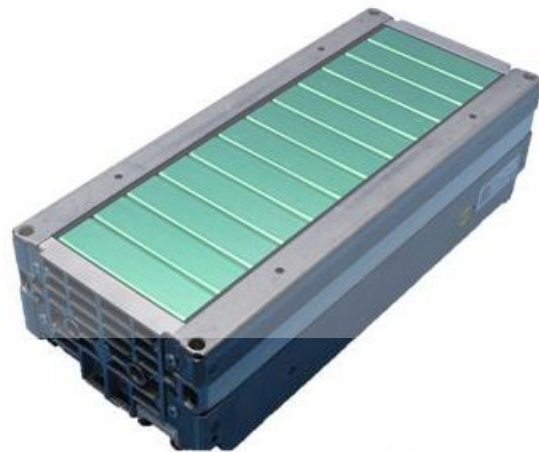


图 4-2 特斯拉 Model S 电动汽车电池组板

图 4-3 为大众 e-Golf 不同结构的 2 种电池模组。e-Golf 电池包总计有 264 支单体，27 块模组组成，串并联方式为 88 串 3 并。e-Golf 的模组由于箱体结构不同，使得模组分为 2 种。一种为小模组，10 块，每块有 6 支电池单体，如图(a)所示；另外一种为大模组，17 块，有 12 支电池单体，如图(b)所示。其箱体总能量为：24.2kw.h，总标称电压为 320V，标称容量为 75A.h，总重量为 313kg，体积为 229.4L。大众选用的为三元材料软包单体，其标称电压为 3.7V，续航里程可达到 200km。



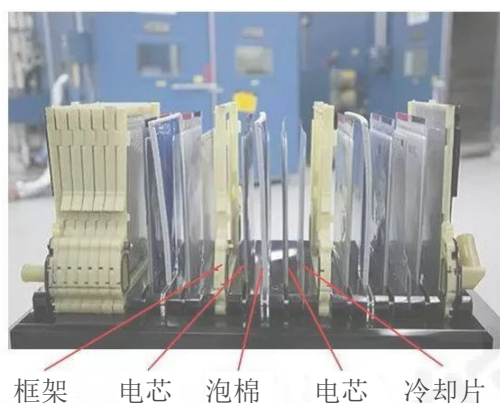
(a) 10 串 6 并电池模组



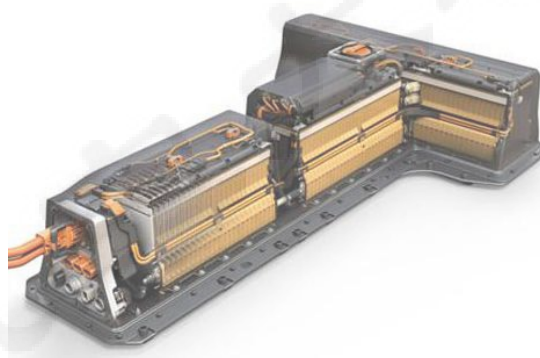
(b) 17 串 12 并电池模组

图 4-3 大众 e-Golf 两种电池模组

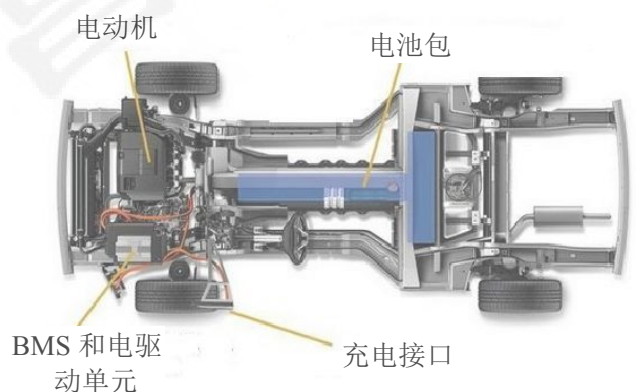
图 4-4 为雪佛兰“沃兰达”(Volt)的电池包及整车安装位置, (a)图为雪佛兰“沃兰达”(Volt)模组结构组成, (b)图为 Volt 的电池包, (c)图为 Volt 的电池包在整车上的安装位置。由于是一款混合动力类型的电动汽车, 所以内燃机和燃油箱仍然存在。其电池包是由 96 块软包单体串联成电池模组, 在由 3 块模组并联而成的 288 块 45Ah 的电池组, 纯电续航里程为 64km, 电池包总能量为 16kWh, 其热管理散热设计采用了液体冷却方式, 散热管道和散热片嵌入在一起, 分布在电池单体之间, 进行散热。



(a) 雪佛兰“沃兰达”(Volt) 模组结构组成



(b) 雪佛兰 Volt 电池包



(c) Volt 电池包安装位置

图 4-4 Volt 电池包及安装位置

随着纯电动汽车的蓬勃发展, 客户对电动汽车动力源的要求越来越高, 主要集中在电池包的循环寿命和续航里程这两方面, 而影响这两方面的主要原因就是电池模组内外部环境温度, 这就催生出了一门新技术: 电池包热管理设计。电池包的热管理设计要达成两个目标: 控制电池单体工作温度以及控制不同电池单体的温度差, 前者会严重影响到整个电池包的性能和循环寿命, 后者会严重影响模

组间的均匀性，导致充放电性能降低，致使续航里程缩短。电池热管理设计主要从模组在电池箱内的排布方式、正负极连接方式以及散热结构设计入手，对其进行高温散热、低温加热以及保温等措施，来实现热管理设计目标。

4.2.2 电池模组设计

按照电池单体结构的不同，由单体结构形成的电池模组排布方式也不尽相同。但总体来说软包电池单体成组组成的模组主要以平行排列为主，如图 4.5 所示，而圆柱电池主要以平行排列(如图 4.6 所示)、叉形排列(如图 4.7 所示)以及梯形排列为



图 4-5 软包电池模组平行排列方式

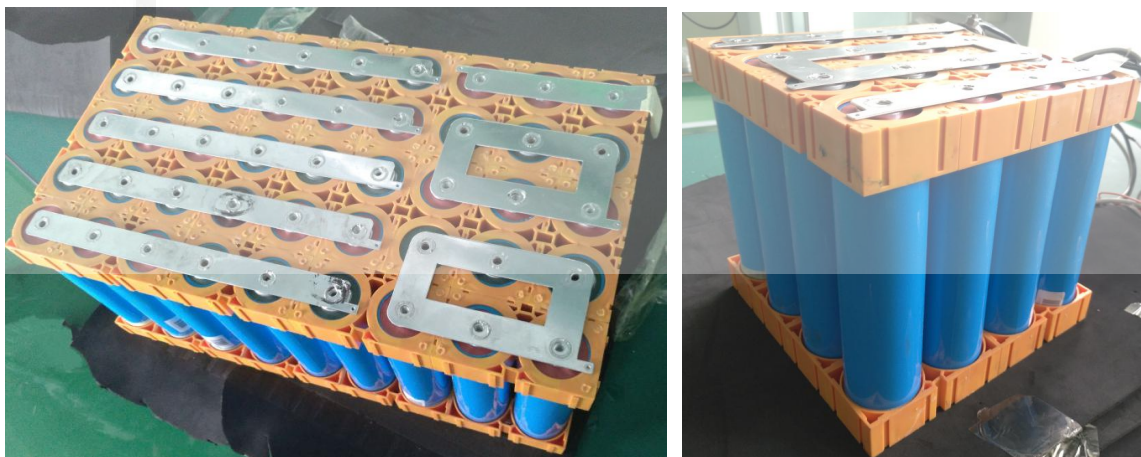


图 4-6 圆柱电池模组平行排列方式

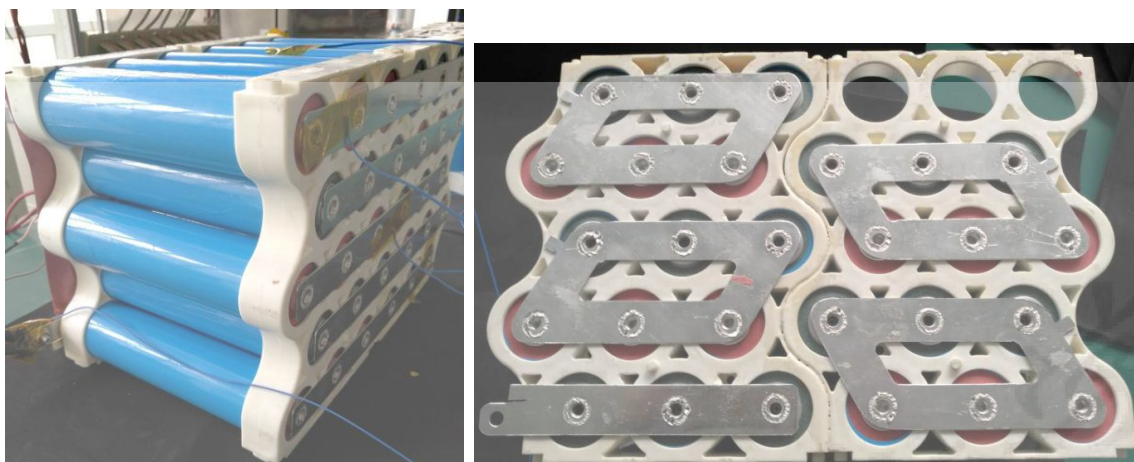


图 4-7 圆柱电池模组叉形排列方式

平行排列是将单体成组以后按照平行顺序排布在箱体内，外界进入的冷却介质将流过单体或模组间的间隙，对其进行散热。其优点主要是流动阻力较小；缺点是流体不怎么受到干扰而出现湍流涡旋，与单体的有用的换热面积小，所以对流传热系数偏小，因此冷却效率不高^[83]，需要增加主动散热元件，对其热量进行二次消耗。

叉形排列是将沿着冷却介质的流向，邻近的单体或模组相互交错地排布在箱体内，从外界流入的制冷介质流过单体或模组间的间隙后，就直接流到下一层单体的表面，然后流过该单体表面，流向单体两边的空间。其优点主要是使得气流流过单体的阻力增强，增大了单体或模组表面的换热能力，改善了其温度分布；缺点主要是流动阻力损耗较大。

梯形排列是通过减少沿着冷却介质流向上的单体或模组数量，逐步减小沿着流向上箱体的横截面积，逐渐增大冷却介质流速，使得对流换热能力增强。运用梯形排布方式，虽然沿着流向冷却介质流动过程温度逐渐升高，但是由于冷却介质流速逐渐增大，对流换热系数升高，均衡了上、下游的温度分布，致使箱内模组最大温差能保持在适宜的程度^[84]。

为了使电池箱内部的温度场一致性更好，本章通过风冷散热方法仿真了圆柱电池组在箱体不同进、出风口开设下以及模组不同排布方式下的箱内的二维温度场分布。图 4-8 为圆柱电池组二维排列模型；图(a)为二维平行排列模型；图(b)为二维叉形排列模型；图(c)为二维梯形排列模型。根据电池成组方式，单体选用了型号为 18650 的圆柱电池，单体之间的间隙根据国标设置了 2mm；平行排列模型通过 5 并 5 串的方式，组成了 25 支单体的电池模组；叉形排列组成了 27 支的电池

模组；梯形排列组成了 20 支的电池模组。在不同的排列方式下，通过改变进风口的位置来模拟箱内的温度云图分布，使其获得最优的进风口设计与模组排列。

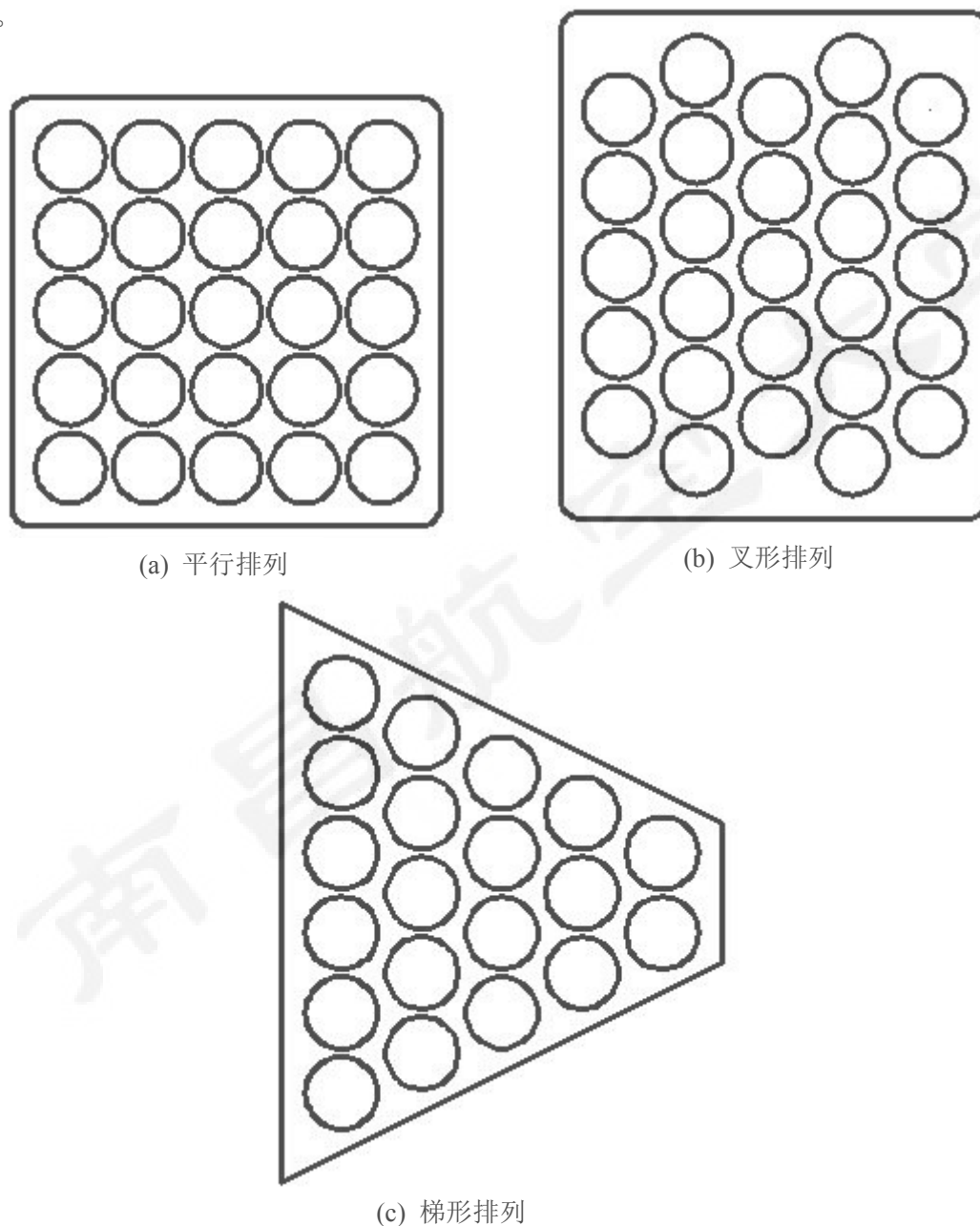


图 4-8 圆柱电池二维排列模型

4.3 锂离子电池组温度场仿真

4.3.1 电池组二维模型建立与网格划分

在对 18650 圆柱电池所组成的模组进行二维建模仿真时，需要对模型进行简化处理：只考虑排布方式下其结构的热效应模型，忽略正负极连接板及其焊接点对热效应模型的影响，忽略单体的成组方式，把每个单体都看作是一个均衡的发热源。图 4-9 为 18650 圆柱电池在平行排列下的进出风口排布的二维网格划分模型：

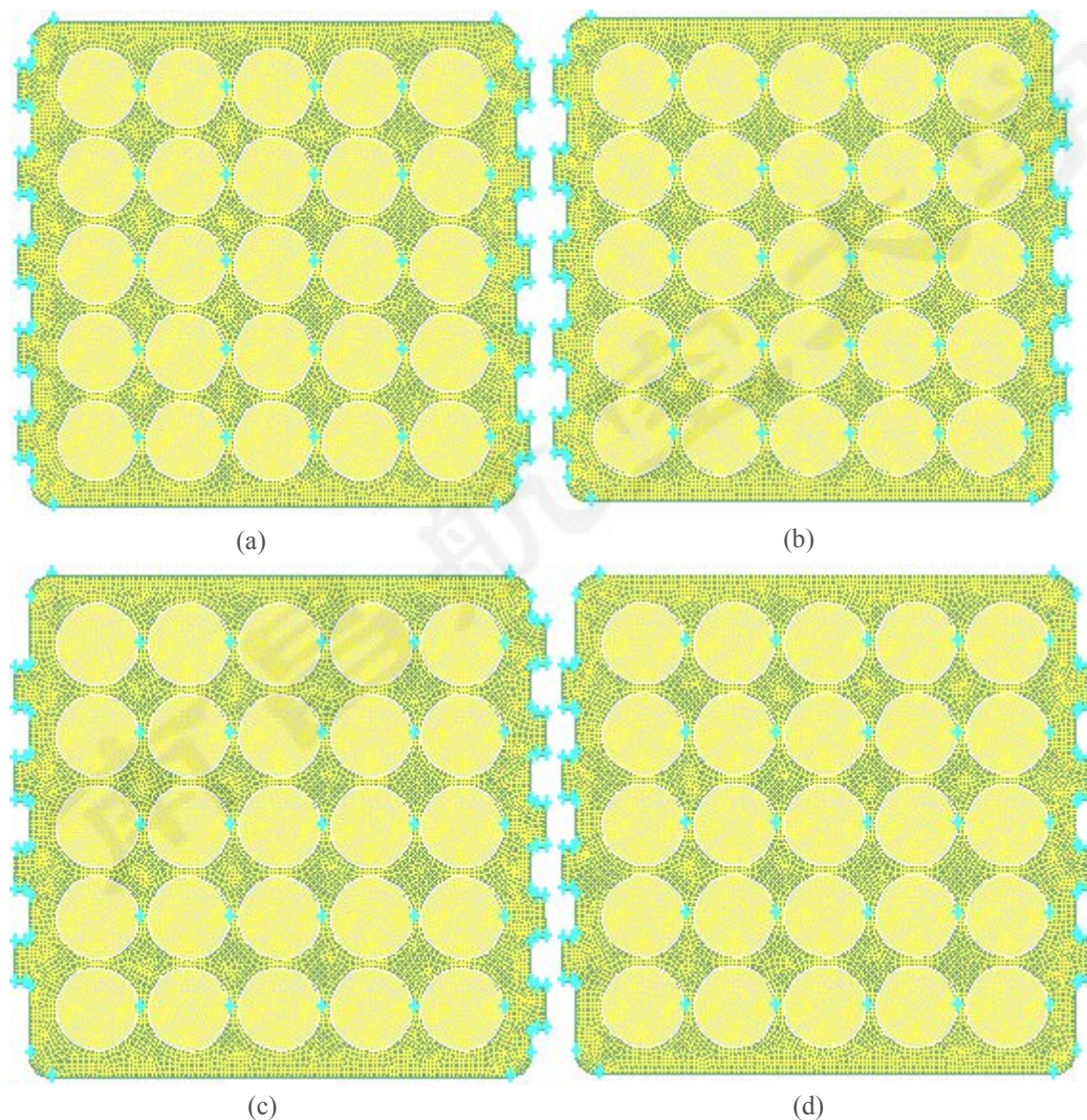


图 4-9 平行排列下的进出风口排布及网格划分

(a)方案、(b)方案、(c)方案、(d)方案中左边凸起的是进风口，右边凸起的是出风口，图中圆形结构为圆柱电池。其中，(a)图表示进风口正对电池中心，出风口正对电池中心；(b)图表示进风口正对电池中心，出风口正对电池间隙；(c)图表示进风口正对电池间隙，出风口正对电池中心；(d)图表示进风口正对电池间隙，出

风口正对电池间隙。

图 4-10 为 18650 圆柱电池在叉形排列下的进出风口位置的二维模型，同平行排列一样，四各方案中左边凸起的为进风口，右边凸起的为出风口，(a)图表示进风口正对电池中心，出风口正对电池中心；(b)图表示进风口正对电池中心，出风口正对电池间隙；(c)图表示进风口正对电池间隙，出风口正对电池中心；(d)图表示进风口正对电池间隙，出风口正对电池间隙。

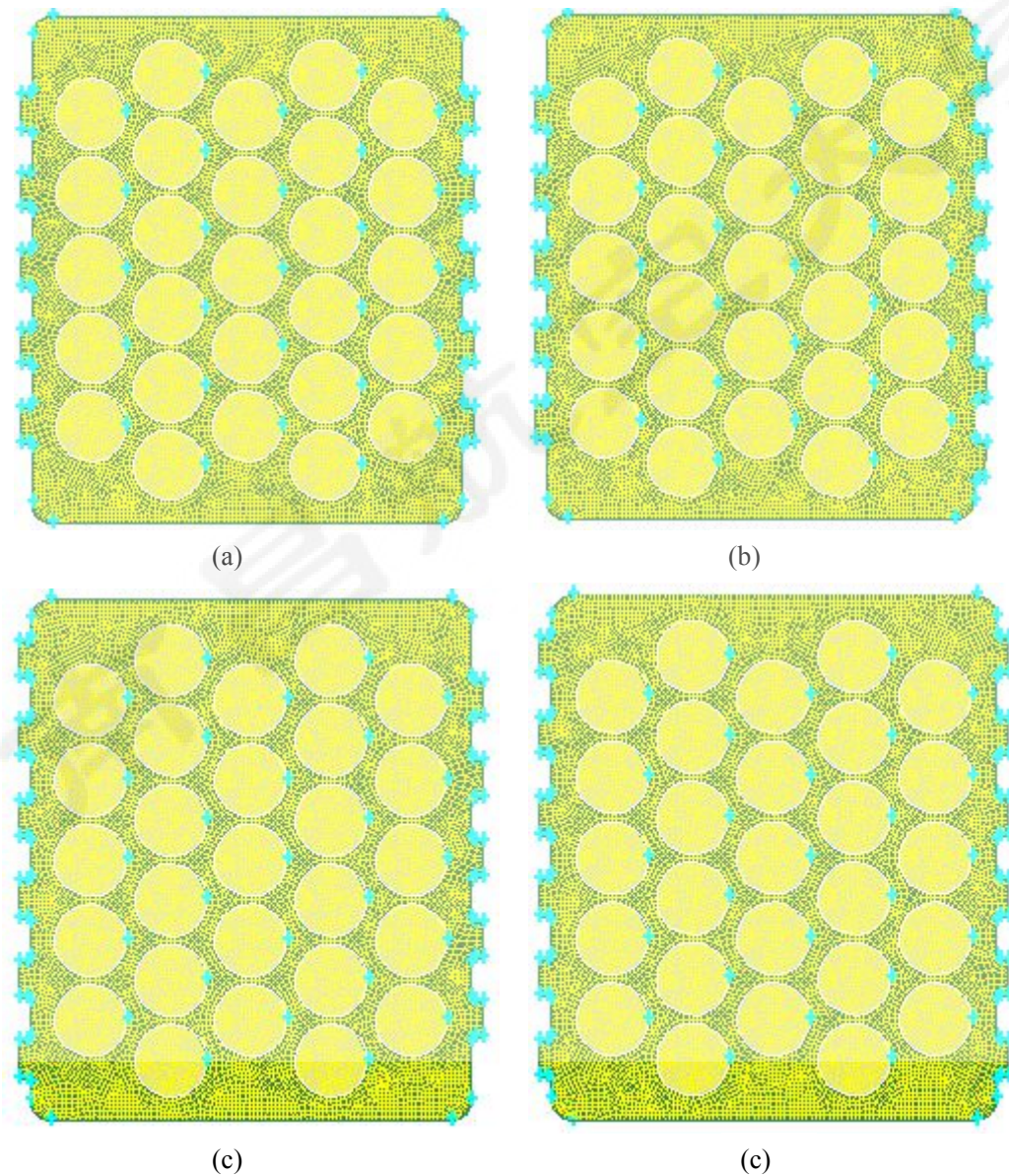


图 4-10 叉形排列下的进出风口排布及网格划分

图 4-11 为 18650 圆柱电池梯形排列下的进出风口位置排布的二维网格模型，

由于电池组在梯形排列下沿着空气流通方向上，电池组数目逐渐减小，所以图4-11(a)和(b)方案中，所开设出风口相同，其中(a)图为进风口正对电池单体中心，(b)图为进风口正对电池单体间隙。

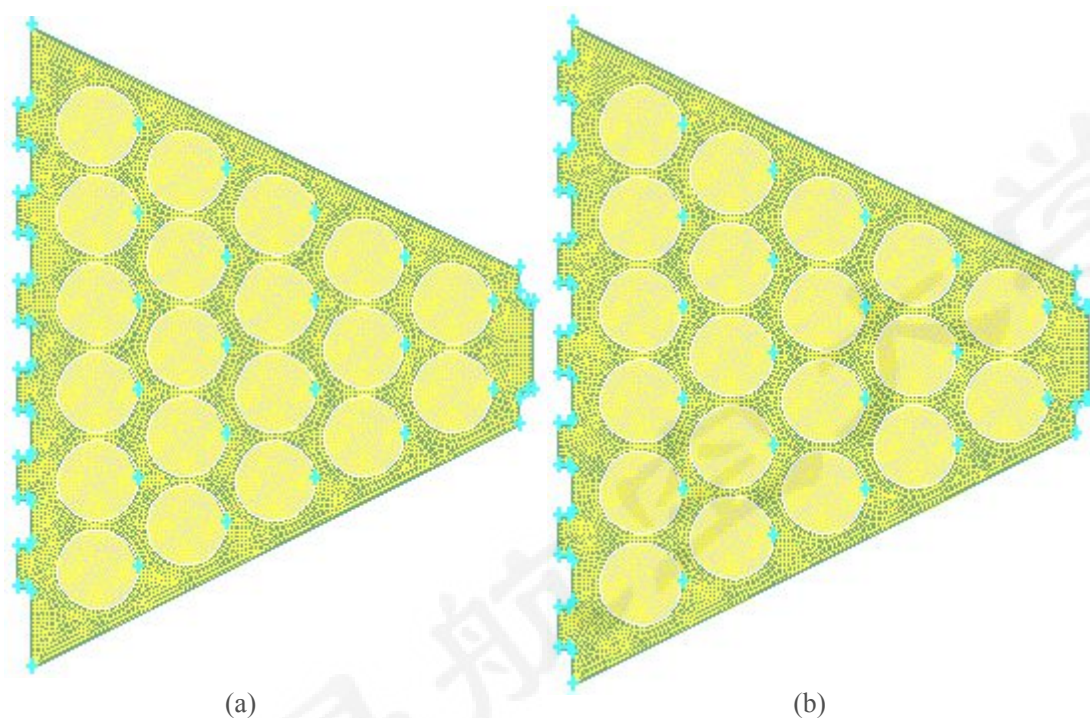


图 4-11 梯形排列下的进出风口排布及网格划分

4.3.2 电池组二维模型仿真数据分析

由于电动汽车在行驶过程中其行驶状态不同，导致动力电池箱放电电流大小是个瞬态值，包括小倍率下的恒流放电以及大倍率下的瞬时放电^[80]等等。由于大倍率瞬时放电时间较短、放电电流较大，对研究电池箱热管理设计不具有代表性，所以本章在研究电池模组二维模型温度场分布时，选择了0.5C(大多数情况下，单体的充放电要求为0.5C充电，0.5C或1C放电)恒流放电倍率下的仿真分析。

前面已说明：在仿真时，把电池箱内的单体看作是一个单独的发热源，其0.5C放电倍率下的热源生热率可由第二章及第三章相关公式得到。箱体内部初始仿真温度设为298K(25℃)，进口风速设为1.5m/s，0.5C放电时间设为7200s，电池模组自然对流换热系数取为5W/m².k。1、图4-12为18650型号圆柱电池0.5C倍率放电平行排布，不同进出风口下的温度云图分布：

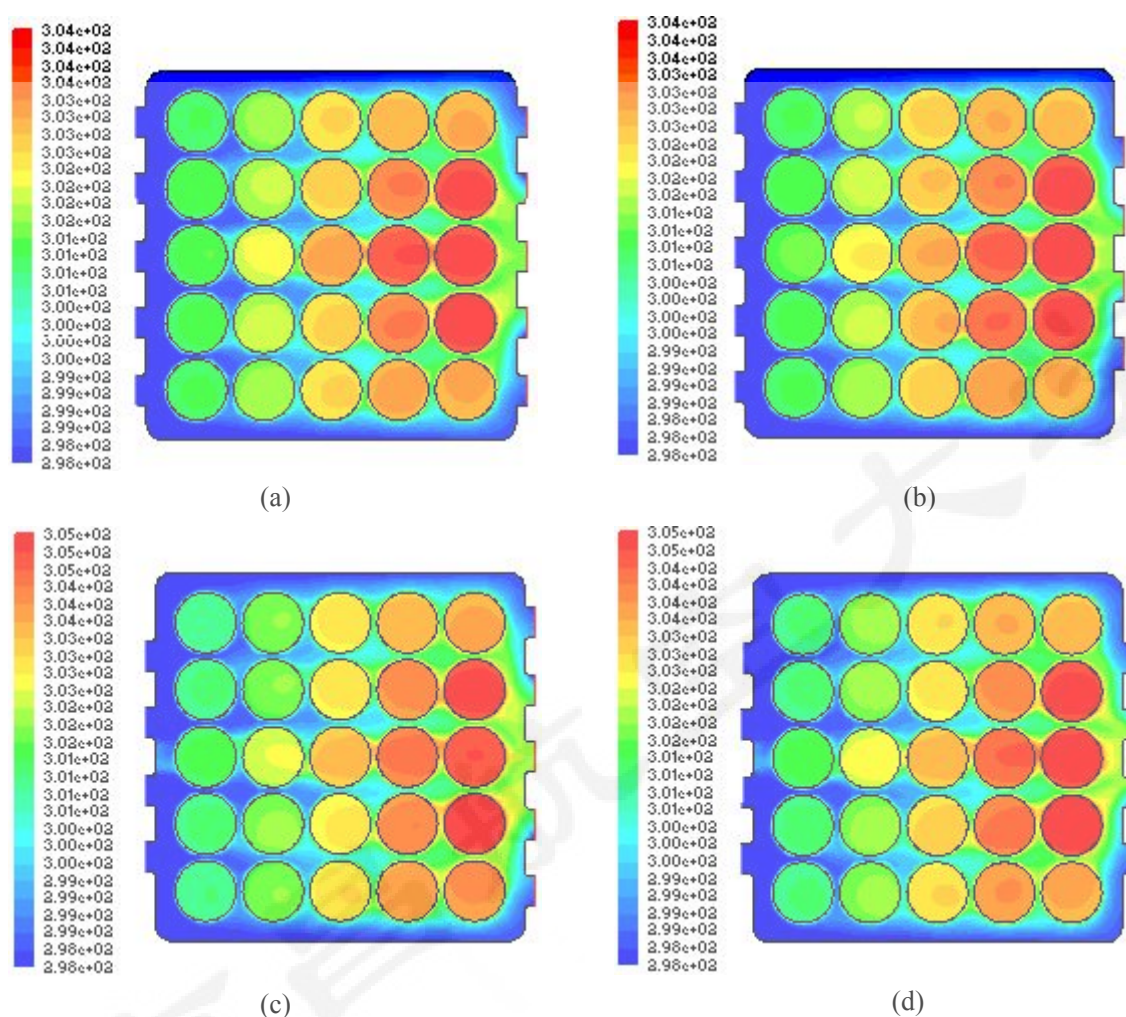


图 4-12 进出风口不同排布下的温度云图分布

从上面温度云图可看出，在不同进出风口排布下，(a)、(b)、(c)、(d)温度场整体上分布趋于相似。越接近进风口的单体温度越低；离进风口越远，其单体温度越高，模组边缘的单体温度普遍低于模组中部的温度。出现这种情况的原因主要有：(1)通过进风口流进的冷却风与电池模组表面不断地进行对流换热，致使冷却风温度逐渐被加热，使得风冷散热效果变差。(2)冷却风流过单体之间的间隔时，需要同时冷却两支单体，而当冷却风流过模组边缘时，只需要冷却一支电池单体，故电池模组中部的冷却能力显著低于电池模组边缘。

从图 4-12 四张图的温度场分布，可得出一些反映温度场分布的关键数据，(a)图中最高温度为 304.31K，(b)图中最高温度为 304.19K，(c)图中最高温度为 305.14K，(d)图中最高温度为 305.01K，其数据整理如下表 4-1 所示：

由下表 4-1 可看出进出风口排布异同，致使箱内的最高、最低温度以及最大温

差也不尽相同；进一步对比可看出(b)图进出风口的开设所得到的最高温度以及最大温差在四种排布方案中是最低的，也可以说明在四种进、出风口开设排布方案中(b)图温度场排布一致性是最佳的。

表 4-1 0.5C 放电，进出风口不同排布下的温升数据

	(a)	(b)	(c)	(d)
最高温度 (K)	304.31	304.19	305.14	305.01
最低温度 (K)	298	298	298	298
最大温差 (°C)	6.31	6.19	7.14	7.01

从下图 4-13 进出风口不同排布下的速度流线分布云图，也可看出 (b) 图进出风口的开设下的优点所在。

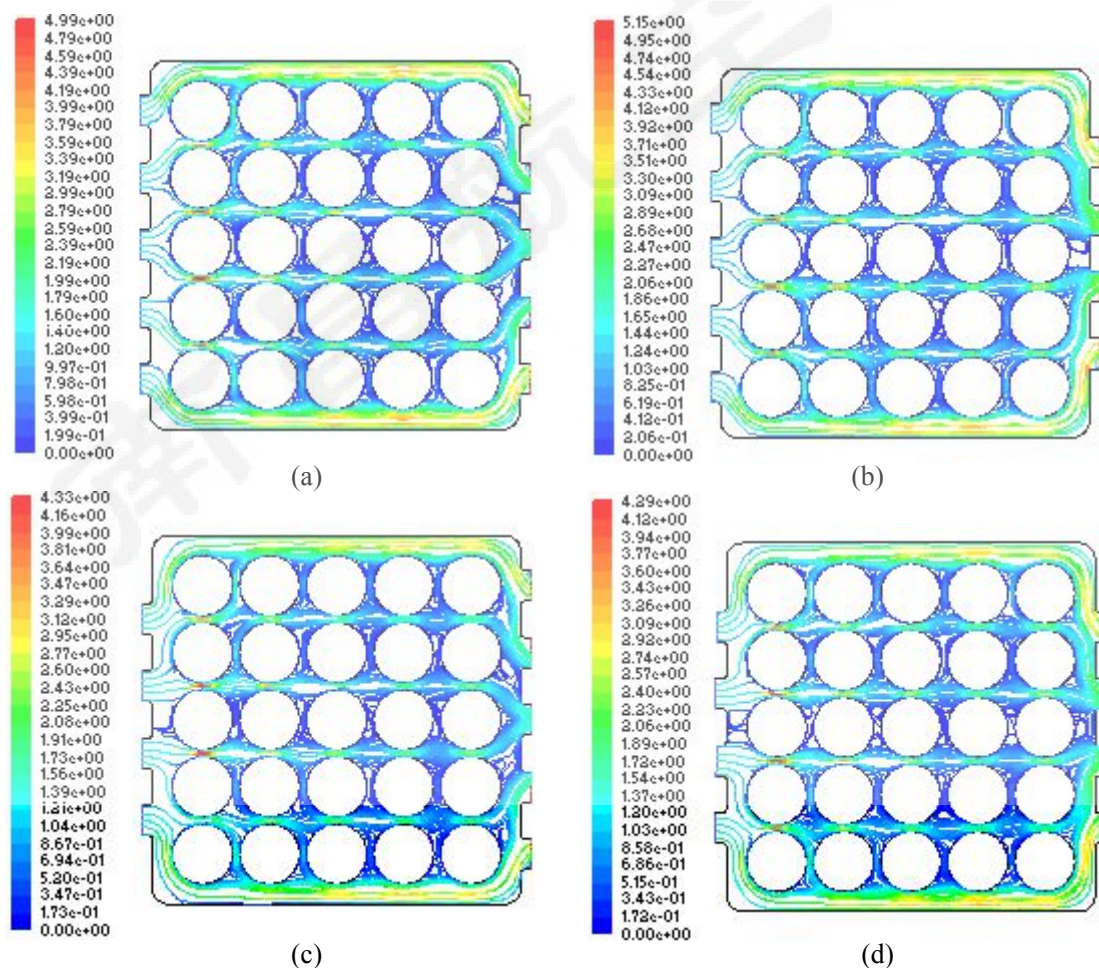


图 4-13 进出风口不同排布下的速度流线云图分布

从速度流线云图可看出，在进风口风速初始值 (1.5m/s) 设定的情况下，电池

箱进出风口开设结构的不同导致箱内最大空气流速各不相同，四种进出风口开设下的风速值如下表 4-2 所示：

表 4-2 0.5C 放电，进出风口不同排布下箱内的风速

	(a)	(b)	(c)	(d)
初始风速 (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5
最小风速 (m/s)	0	0	0	0
最大风速 (m/s)	4.99	5.15	4.33	4.29

对比分析可得出，(b)排布设计在初始风速相同的情况下，仿真所得到的箱内最大风速是四种排布方案中最高的，空气流通速度越快，其对流换热系数就越大，也间接的说明(b)进出风口开设散热能力更好。

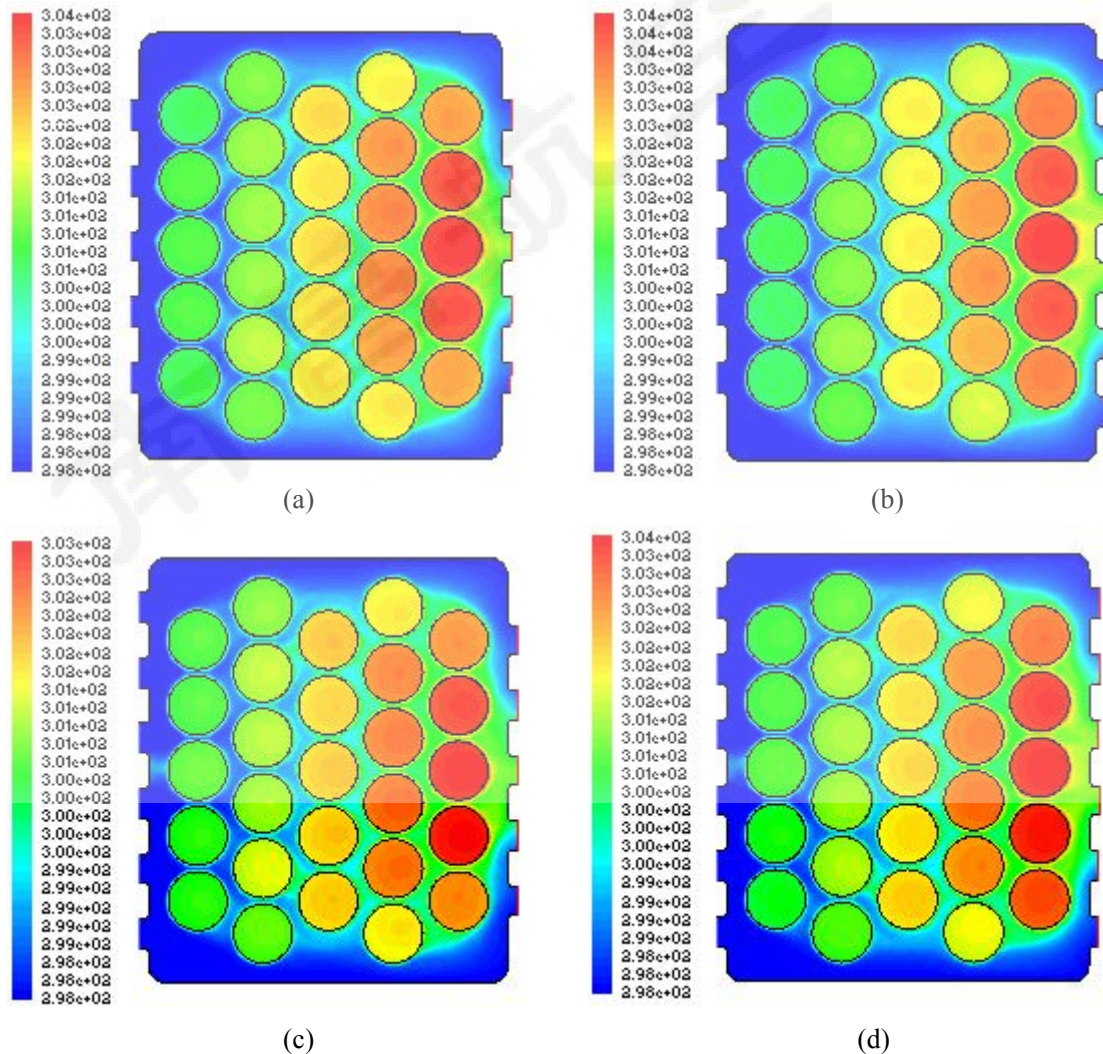


图 4-14 进出风口不同排布下的温度云图分布

同样的，与平行排列相似，叉形排列下，离进风口越近的单体温度越低，离进风口越远的单体温度越高，模组边缘的单体温度普遍低于模组中部的温度，其产生原因与平行排列相同，其温升数据整理如下表 4-3 所示：

表 4-3 0.5C 放电，进出风口不同排布下的温升数据

	(a)	(b)	(c)	(d)
最高温度(K)	303.7164	304.0224	303.0234	303.5163
最低温度(K)	298	298	298	298
最大温差(°C)	5.7164	6.0224	5.0234	5.5163

在叉形排列下，四种进出风口排布温升数据对比分析可知，(c)方案排布下，电池箱内温度场一致性更好一点。从图 4-15 进出风口不同排布下的速度流线分布云图，也可看出(c)图进出风口开设下的优势所在。

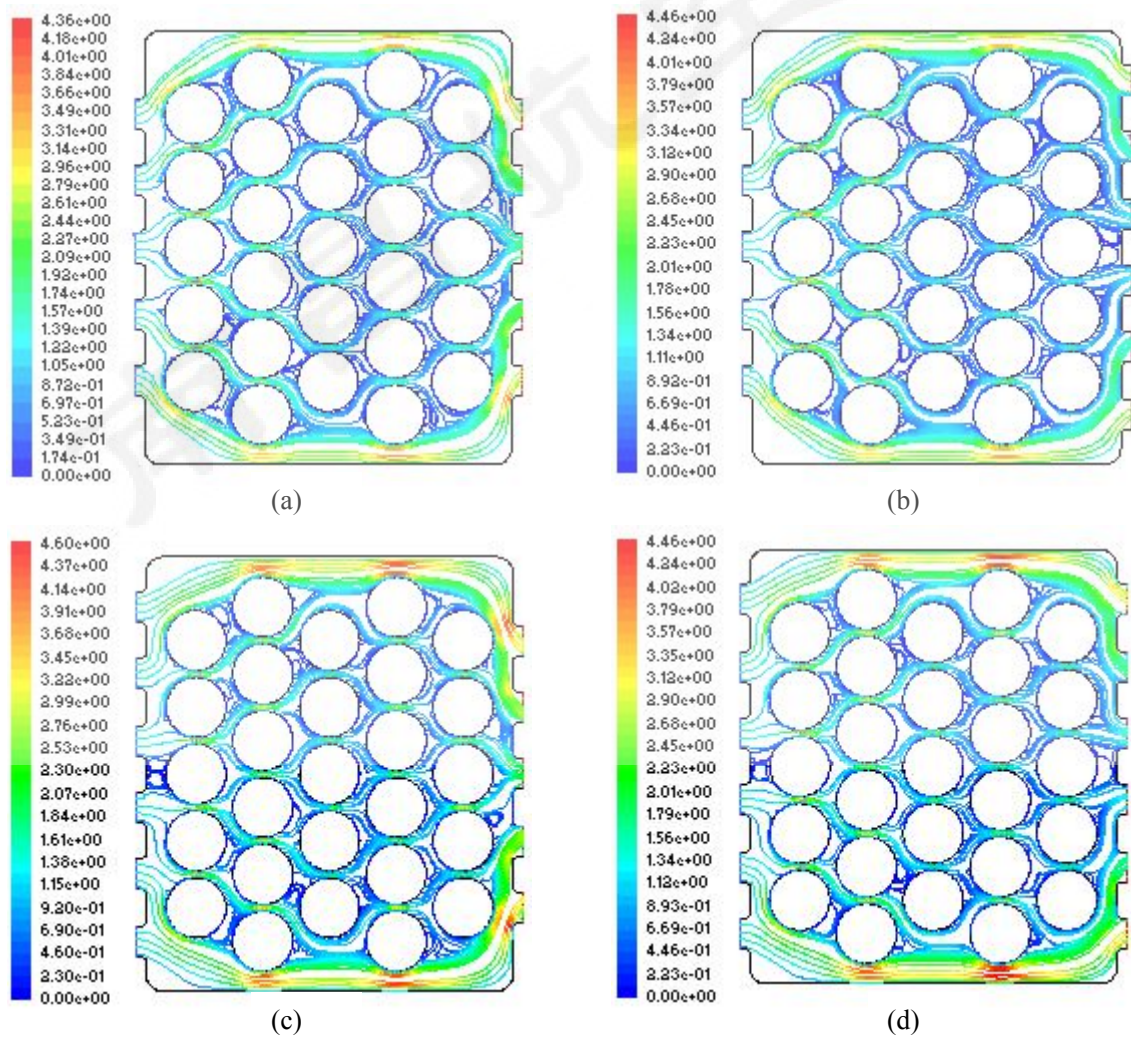


图 4-15 进出风口不同排布下的速度流线云图分布

从图 4-15 的流线云图分布可看出冷却风多数流向了电池箱两侧边缘，较少的流向电池模组中间间隔，造成了电池模组边缘温度低于电池模组中间温度，下表 4-4 为四种进出风口排列下的风速值：

表 4-4 0.5C 放电，进出风口不同排布下箱内的风速

	(a)	(b)	(c)	(d)
初始风速(m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5
最小风速(m/s)	0	0	0	0
最大风速(m/s)	4.36	4.46	4.60	4.46

与平行排列相比，在相同的初始环境温度、进口初始风速以及初始压差工况下，叉形排列箱内的最大风速为 4.60 m/s，而平行排列电池箱内的最大风速为 5.15 m/s，可说明叉形排列的空气阻力损耗比平行排列要大，空气阻力损耗加强了电池单体与空气的对流换热，使得叉形排列相比于平行排列散热效果更佳，散热能力更强。

也可从温升数据对比进一步说明叉形排列的优势所在，电池单体平行排布下，电池箱内单体的最高温度为 305.14K，而叉形排布下电池箱内的单体最高温度为 304.0224K，叉形排布增加了空气与电池单体的有效接触面积，间接增大了电池单体与冷却空气的对流换热系数，使得叉形排列电池箱内的温度一致性比平行排列更好。

从电池单体平行排布图 4-13 与叉形排布图 4-15 的流线云图可看出，冷却风更多的流向电池箱内间隙比较大的地方，使得电池箱两侧边缘的电池单体散热优于电池模组中部以及下游的电池单体，这样影响箱内温度场的一致性，所以在电池箱热管理设计时，需要考虑到模组与电池箱体内侧的间隙大小以及单体之间的间隔大小。

3、图 4-16 为 18650 圆柱电池 0.5C 倍率放电电池单体梯形排布，不同进出风口开设下的温度云图分布，图 4-17 为梯形排布不同进出风口下的速度云图分布。

图 4-16 从整体上来看，在冷却空气流通方向上电池模组从左到右温度逐渐升高，其温度场变化趋势与前面两种排布方式相同，但与之平行排列和叉形排列温度升高幅度相比，其升高幅度却有显著降低。从图 4-17 可看出，在冷却风流通方向上，冷却风速度呈现逐渐升高的趋势，这是平行排列和叉形排列所不具备的特征，冷却风流速的增大，也间接地增大了单体与冷却空气的对流换热系数。图 4-16(a)方案中所开进风口正对于单体，仿真获得的温度云图分布最高温度为 302.6315K，温差最大为 4.6315℃；图 4.16(b)方案中所开进风口正对于电池间隙，其仿真所获得温度云图分布最高温度为 302.4154K，最大温差为 4.4154K。而且两

种进风口设计在相同的进口风速下仿真得到的风速分别为：进风口正对于电池单体最大风速为 7.93m/s；进风口正对于电池单体间隙最大风速为 9.25m/s，比较而言，进风口开设于电池单体间隙，更有利于模组散热以及均衡箱内的温度场的分布。

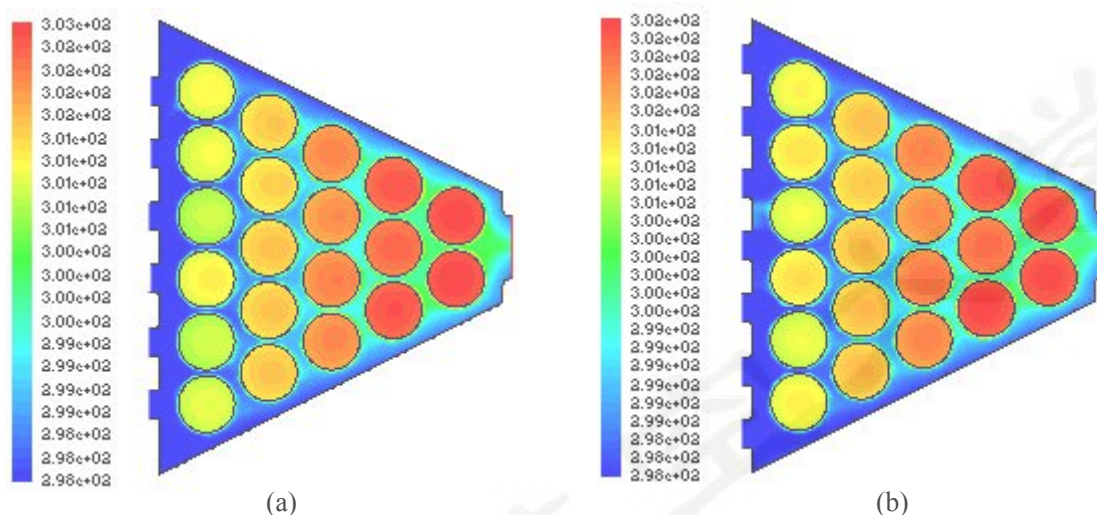


图 4-16 进出风口不同排布下的温度云图分布

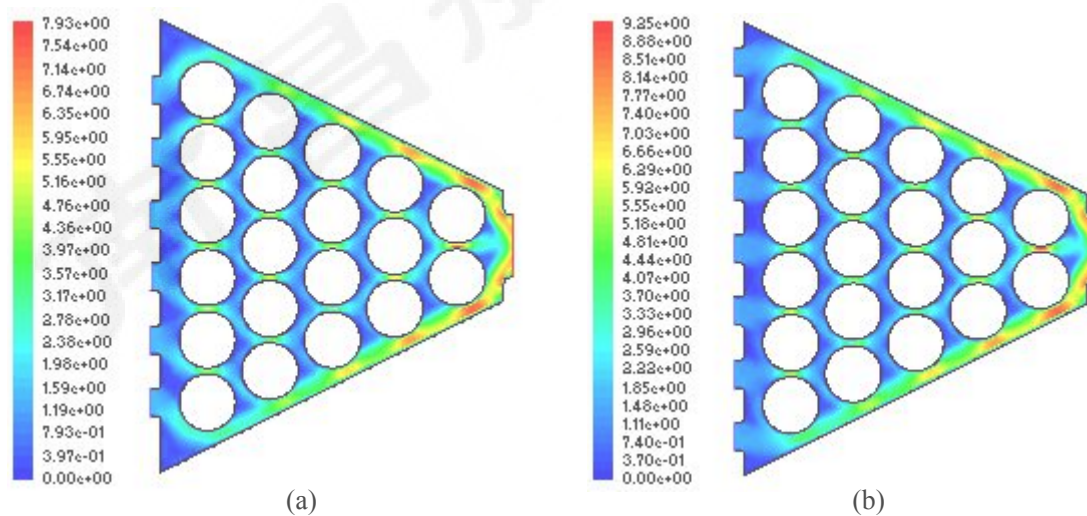


图 4-17 进出风口不同排布下的速度云图分布

通过以上电池单体在不同排列下的仿真对比分析，初步得到了电池单体不同排列下的最优的进风口排列设计，分别是：平行排列(b)方案进出风口开设方式、叉形排列(c)方案进出风口开设方式以及梯形排列(b)方案进风口开设方式，三种不同排列下的进出风口最优排布设计仿真数据，如下表 4-5 所示：

表 4-5 0.5C 放电，三种排列下最优进出风口仿真数据

	平行排列(b)	叉形排列(c)	梯形排列(b)
最高温度(K)	298	298	298
最低温度(K)	304.19	303.02	302.42
最大温差(°C)	6.19	5.02	4.42
初始风速(m/s)	1.5	1.5	1.5
最小风速(m/s)	0	0	0
最大风速(m/s)	5.15	4.60	9.25

对比分析可知在圆柱电池三种排列方式下，初始环境温度一定的情况下，梯形排列电池单体之间的温差是最小的。在进口风速一定的条件下，梯形排列电池箱内的空气流速是最大的，其流速越大，单体与空气的对流换热系数就越大，散热能力越强，这可以充分说明 18650 圆柱电池梯形排列方式能够很好的均衡箱体内部模组的温度场。

然而，梯形排列电池模组由于结构设计复杂、在相同的电池包能量要求下，占用空间较大，所以在实际应用方面很少见到，现在圆柱电池排列设计主要以平行排列和叉形排列为主，而且随着客户对电池包电量要求的增大，伴随而来的是需要数量更多的电池单体成组而成，这样不仅致使电池模组尺寸增大，而且导致电池箱内温度急剧升高，在短时间内，采用常规的风冷散热方法将无法达到热管理设计要求，故需要通过进风口的结构改造来提高风冷式散热效率或使用其它散热方法配合风冷散热来实现电池箱内温度场的一致性，以达到快速散热。

4.4 本章小结

本章首先了解了国内外电动汽车电池模组的使用现状，分析了国内外典型的几款软包电池、圆柱电池模组在电池箱内的排布方式，总结了圆柱电池主要的三种排列方式，通过查阅相关文献了解了平行排列方式、叉形排列方式以及梯形排列方式下电池模组的结构特点以及使用时的优缺点，结合第三章节所建立的圆柱电池热效应模型，对电池单体三种不同排列下的圆柱电池模组按照进出风口的不同，对其做了 CFD 仿真计算，获得不同单体排列及不同进出风口开设下的温度云图分布、速度云图分布以及速度流线云图分布，通过相同单体排列下、不同进出风口开设下的仿真计算横向对比、不同单体排列下其进出风口开设位置的仿真计算纵向对比，可得出：

(1) 在电池单体平行排列方式下, 初始环境温度与进口风速一定的情况下, (b) 方案进出风口开设相比于其它三种开设布置, 散热能力更好, 散热效果更佳; 同样的, 在单体叉形排列方式下, (c) 方案进出风口开设与其它三种相比, 电池箱内的最大温差最小, 且冷却空气流速最高, 对流换热能力更好; 单体梯形排列下, (b) 方案进风口开设相比较(a)而言, 温度场一致性更好, 对流换热能力更强。

(2) 在 18650 型号圆柱电池三种排列方式下, 梯形排布方式不论是箱内温度场的均匀性、冷却风流速以及单体与空气的对流换热能力, 都优于平行排列和叉形排列方式, 梯形排列下温度场温差更小、箱内冷却风流速更大、风压更强, 使得梯形排列下箱内散热能力更好。

第 5 章 锂离子电池箱三维风冷散热仿真与实验研究

5.1 引言

随着电动汽车的快速发展,客户对电动汽车的核心部件动力电池箱的要求也越来越高,在车载安装空间尺寸一定的情况下,为了满足高能量、大功率的使用要求,单体之间的间隙变得越来越小,电池箱内单体的数量变得越来越多,空间更加紧凑,在电动汽车大倍率充放电时,热量大量积累,电池箱内环境温度急剧升高,使得对单纯的风冷散热方法是否能够满足散热要求提出了质疑。

Chen S C^[95]等通过仿真研究发现,强制风冷散热的对流强度增加到一定程度后,其锂离子电池温度场的一致性并没有得到根本改善。

Harmel J^[96]等对镍氢电池进行热均衡分析发现,当风冷散热风速增大到一定值后,如果继续增加风速,温度场变化不是太明显。

Nelson P^[97]等对锂离子 PNGV 电池研究发现,当电池所处环境温度比较高时,采用风冷散热方式很难让 66℃ 的电池温度下降到 52℃ 以下。

本章节通过电池组三维不同排列下的风冷散热仿真以及实验,主要验证风冷散热的有效性。

5.2 常用的散热方法

论文第二章已提到常用的散热方法主要有自然风冷散热、强制风冷散热、液冷散热以及制冷剂直接冷却散热等等。其中,前面三种散热方法都是采用冷却介质流过发热的电池单体表面时,通过对流换热将温度降低,在对流换热进程当中冷却介质没有产生相变。制冷剂散热是介质在冷板中产生了相变反应,并通过相变材料性能散热。表 5-1 为上面提到的四种散热方法的散热效率对比:

表 5-1 四种散热方式的散热效率对比

散热方式	散热原理	对流换热系数	表面热流密度
自然风冷	空气自然对流	5~25	0.005~0.25
强制风冷	空气强制对流	25~100	0.025~0.15
液冷	液体强制对流	500~15000	0.5~15
制冷剂冷却	相变吸热	2500~25000	2.5~25

自然风冷是指箱体内部模组或单体，在无任何散热措施下，与空气进行对流换热来降低模组及单体温度；自然风冷散热的优点是成本低、占用空间小，其缺点是散热效率较低。

强制风冷是通过吹风风扇将空气导入 pack 内部，空气在风扇的作用下，以一定的流通速度扫过单体或模组表面，将模组或单体产生的热量通过吸风风扇传递到箱体外面。

液冷散热，主要是在模组或单体之间放置管路，或环绕模组设置夹套，或者直接把模组浸没在绝缘流体中，来实现散热要求。

相变材料散热是指当材料自身的温度达到相变温度上、下限时，其通过向周围吸收或放出热量来达到保温；相变材料存在相变温度范围，超过上限、低于下限温度时，都会产生相变反应。

制冷剂直接冷却散热主要是利用冷却介质的相变制冷原理，它主要包括冷凝器、压缩机、节流装置以及蒸发器。制冷装置安装在模组侧面或底部，而且与模组尽量紧密贴合，冷却介质流过制冷装置时，发生相变吸收模组或单体产生的热量，通过节流装置把热量带出箱体。

在电池箱散热系统设计中，需要根据实际的电池箱工作情况选择合理的散热方式，其一般的选择步骤有如下可总结为：

(1) 根据电池箱的使用工况，获取电池单体的生热速率关于时间的关系曲线；(2) 获取电池单体以及模组温差的控制要求；(3) 根据串并联成组特点，建立单体以及模组的热效应模型，并进行 CFD(计算流体力学)仿真，获得多组对流换热系数下的单体温升曲线；(4) 根据温差控制要求以及仿真计算数据，得到可供选择的散热方式；(5) 再结合电池箱体的 IP 防护等级、空间安装尺寸、能量和电池单体成本需求等，得到合理的散热方法。

5.3 电池箱风冷散热三维仿真研究

5.3.1 电池组平行排列下的风冷散热仿真研究

第四章通过建立二维电池箱体模型，对其不同排列下的 18650 型号的圆柱电池做了仿真分析，虽然进出风口开设不同，但进出风口同处于一个平面，忽略了热胀冷缩效应，由于热胀冷缩的原因，受热气体膨胀，密度减小，致使热空气上升，冷空气下降，这也使得进出风口同处于一个平面，不能很好地反映散热效果，也可说明，进出风口开设在同一平面不是最优的散热结构设计。正常情况下，在箱

体没有做任何散热措施下且在平行排列下的圆柱电池 5×5 模组 1C 倍率放电下的温度云图分布，如图 5-1 所示：

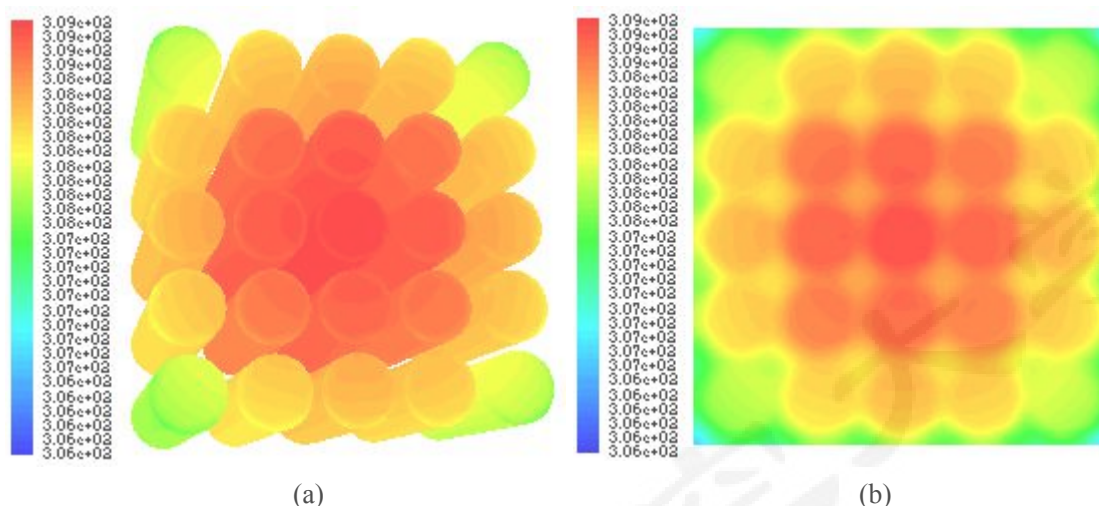


图 5-1 无散热措施下电池箱内的温度云图分布

图 5-1(a)为圆柱电池 5×5 模组整体的温度场分布，(b)为电池箱体顶面平面的温度云图分布，电池模组中间区域温度最高，离电池模组几何中心越远，温度越低，其中最高温度为 309K，最低温度为 306K，最大温差为 3°C 。

对其进出风口结构进行了改善，使其进出风口位于不同平面，存在高度差。下图 5-2 为 18650 圆柱电池平行排列下的箱体三维模型：图 5-2(a)为 5×5 的圆柱电池模组；(b)装配完成的电池箱体以及箱体装配关系。改善后的箱体进出风口设计，进风口的高度高于出风口，动力电池箱在工作时，电池单体产生的热量，由于热胀冷缩效应，聚集于电池模组中上部，所以进风口也开设在冷却风流向的中上部，出风口的开设与进风口互为中心对称。

图 5-3 为 CFD 前处理软件 Gambit 中所建的模型以及电池模组网格划分，其体网格划分数量为 53133 个，(a)为进出风口电池箱模型，(b)为 5×5 电池模组网格划分。

图 5.4 为进风口风速在 0.3m/s 下的温度场分布，(a)图为电池模组整体的温度云图，(b)图为电池箱体顶面的温度云图分布。可看出，在强制风冷的情况下，温度最高区域出现在冷却风流向下游方向，其最高温度为 305K，最低温度为 298K，最大温差为 7°C 。与无散热措施下的自然对流散热相比，最高温度降低了 4°C ，而最大温差有所增大，温差的增大导致的负面因素前面几章已提到，会影响单体间的循环寿命、容量和内阻出现差异，所以在结构相同的情况下，必须通过加强强

制风冷措施，增大进风口风速，来控制箱内温差。

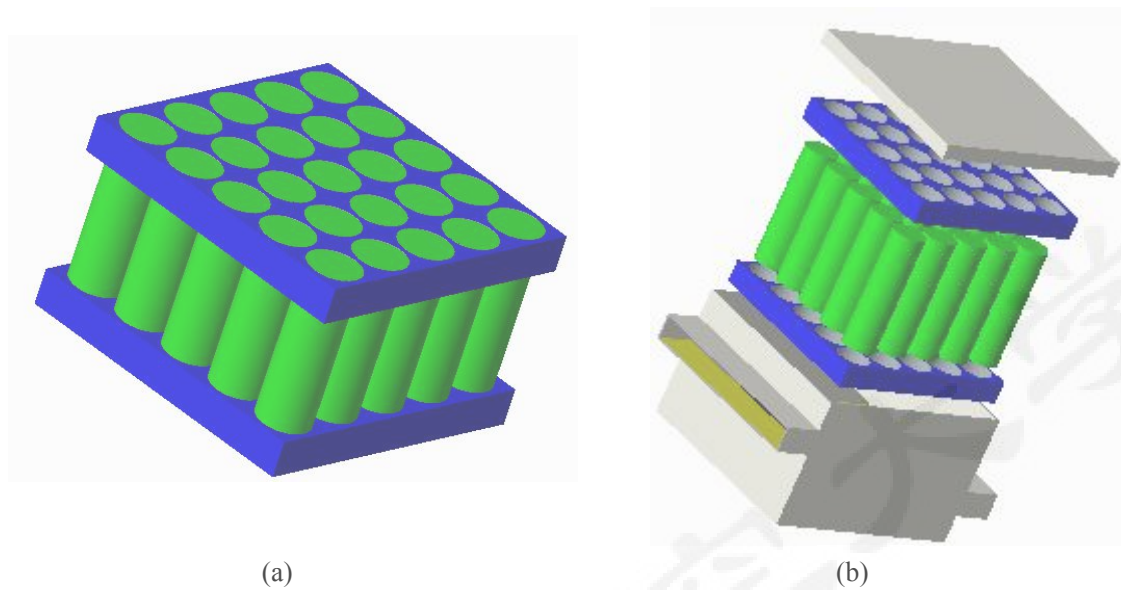


图 5-2 圆柱电池平行排列下的三维模型

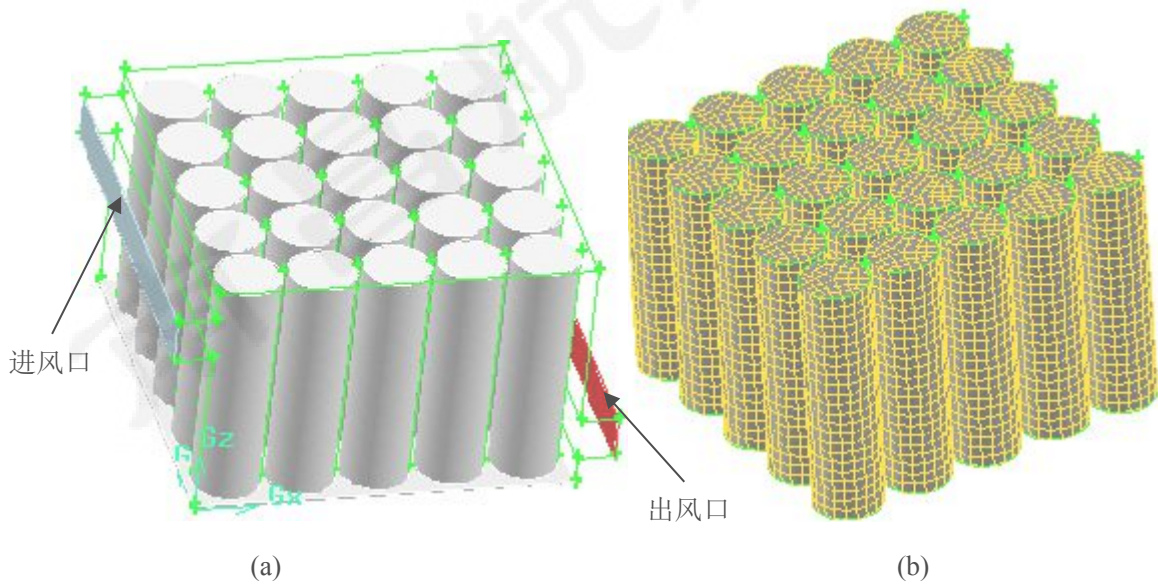


图 5-3 Gambit 软件所建模型及模组网格划分

图5-5为进风口风速在0.7m/s下的电池箱体温度场分布，在原有的进出风口结构上，增大进风口风速，进一步来均衡模组温度场，(a)和(b)图分别为电池模组整体温度场分布以及箱体顶面温度云图分布。

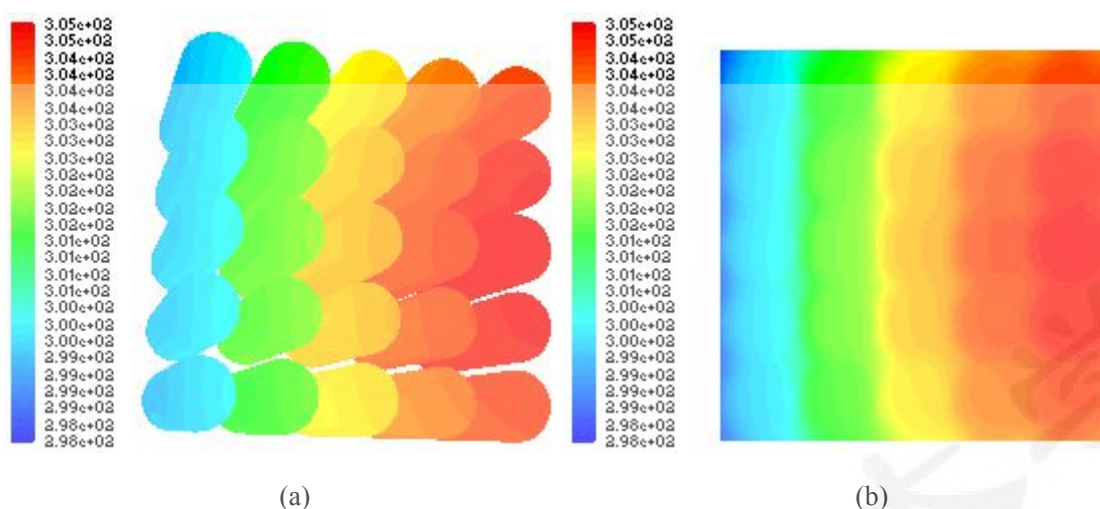


图 5-4 进风口风速 0.3m/s 下的电池箱体温度场分布

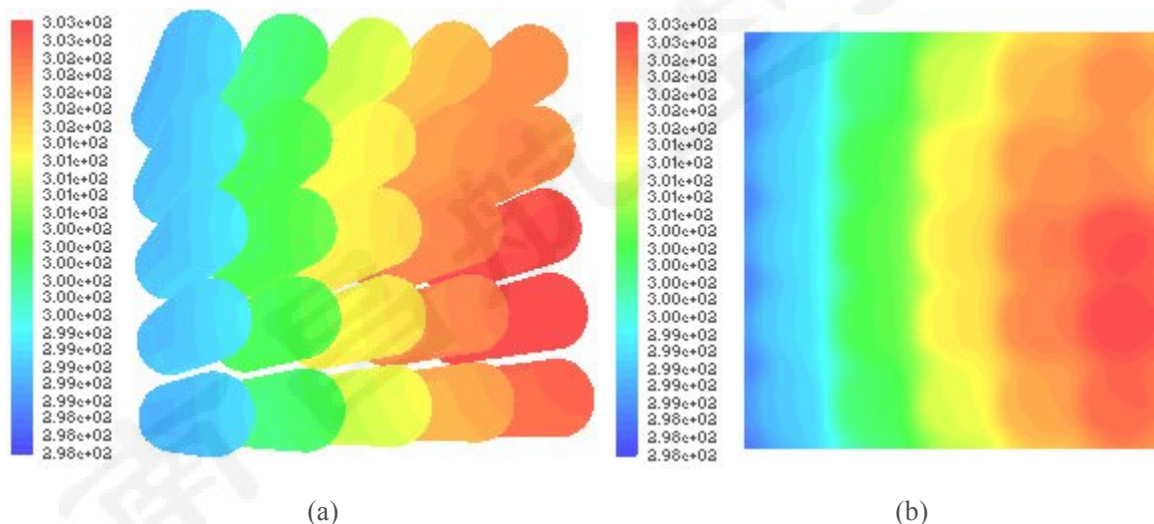


图 5-5 进风口风速 0.7m/s 下的电池箱体温度场分布

图 5-5 可看出流速在 0.7m/s 下的温度场分布，最高温度为 303K，最低温度为 298K，温差最大为 5℃，在进口风速提升一倍多的情况下，最大温差在无散热措施基础上下降了 2℃，散热效果明显。

下图 5-6 进风口风速在 1.5m/s 下的温度场分布，图(a)为模组温度场分布，图(b)为电池箱体顶面温度云图分布。与上一步相比，可看出在风速增加 0.8m/s 的基础上，最高温度仅仅下降了 1℃，最大温差也仅仅降低了 1℃。

对以上不同进风口风速下的温度场温升数据经过总结整理，如下表 5-2 所示，由表 5-2 可看出：与无散热措施下的自然对流散热对比，后三种风速下温度场的整体分布，随着进风口风速的增加，最高温度逐渐降低，最大温差逐渐减小。深入分析发现，随着进口风速的成倍增加，最高温度以及最大温差下降速度变缓，如

果继续增加进口风速，最高温度和最大温差下降幅度变得越来越小，最后致使风速的增加影响不了温度场分布。

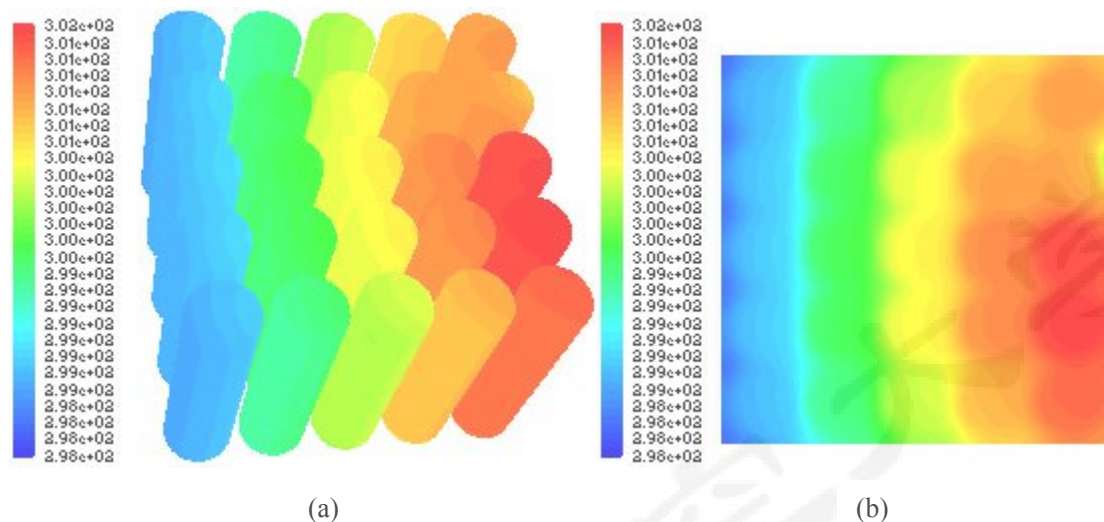


图 5-6 进风口风速 1.5m/s 下的电池箱体温度场分布

表 5-2 不同进口风速下，温度场仿真数据

进口风速(m/s)	最低温度(K)	最高温度(K)	最大温差(°C)
0 (自然对流散热)	306	309	3°C
0.3	298	305	7°C
0.7	298	303	5°C
1.5	298	302	4°C

箱体单体数量少的情况下风冷散热可以达到热管理设计的要求，但如果电池单体数量多，安装空间小以及客户对电池箱充放电功率要求高，这样就使得热量积累过多，箱内环境温度过高，致使常规的风冷散热不能满足散热要求。

5.3.2 电池组叉形排列下的风冷散热仿真研究

同样的，对叉形排列下的圆柱电池模组做无任何散热措施下的仿真计算，其仿真温度场分布如下图 5-7 所示，可看出平行排列和叉形排列下的整体温度场分布相似，模组中间区域温度分布高、边缘区域温度普遍低，离模组几何中心越远的单体温度越低。温度云图分布最高温度为 308K，最低温度为 303K，温差最大为 5°C，与平行排列自然对流散热相比，叉形排列最高、最低温度有所降低，而最大温差有所增大：

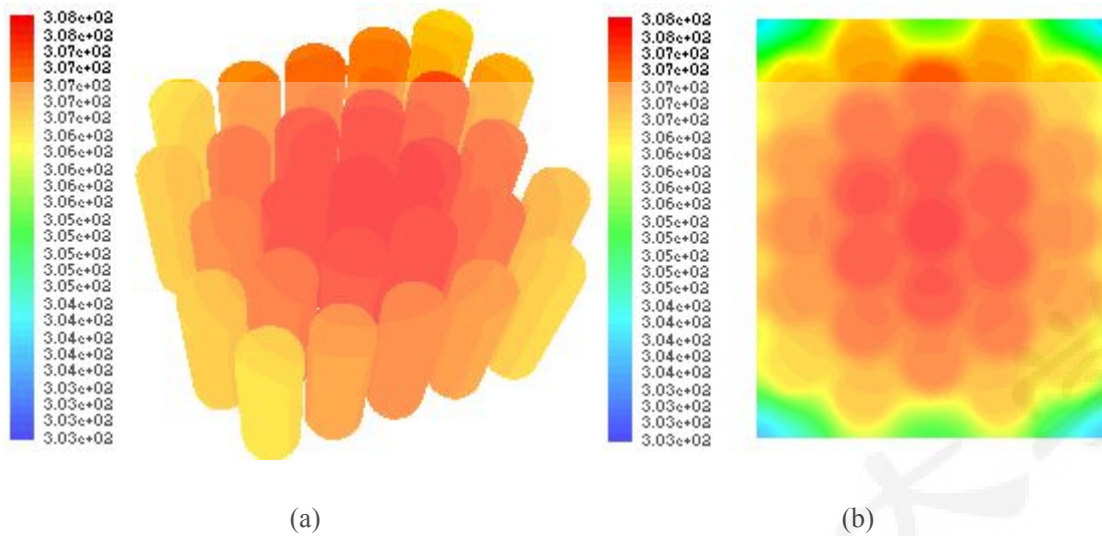


图 5-7 无散热措施下电池箱内的温度云图分布

根据上面自然对流散热温度场分布，相应的建立进出风口开设优化下的三维散热仿真，分析风速大小对电池模组温度场的影响效果，下图 5-8 为圆柱电池叉形排列下的三维模型，图(a)为电池单体、模组以及箱体的装配模型，图(b)为电池箱体装配关系图。

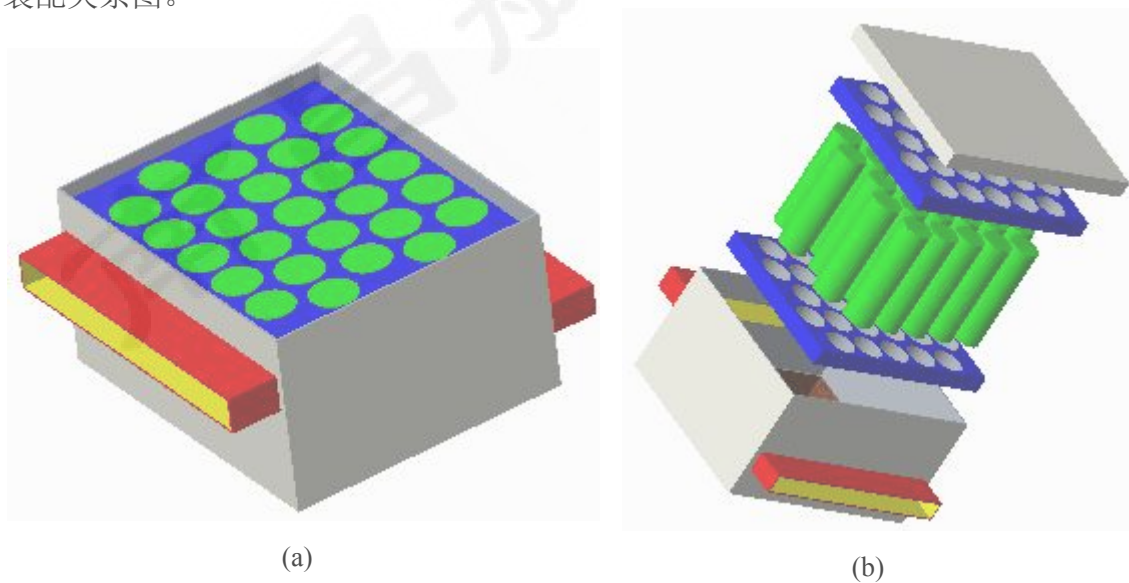


图 5-8 圆柱电池叉形排列下的三维模型

下图 5-9、图 5-10、图 5-11 分别为进风口风速在 0.3m/s、0.7m/s、1.5m/s 下的温度云图分布，其中每张图(a)表示为电池模组在该风速下的整体温度场分布，图(b)为电池箱体顶面的温度云图。

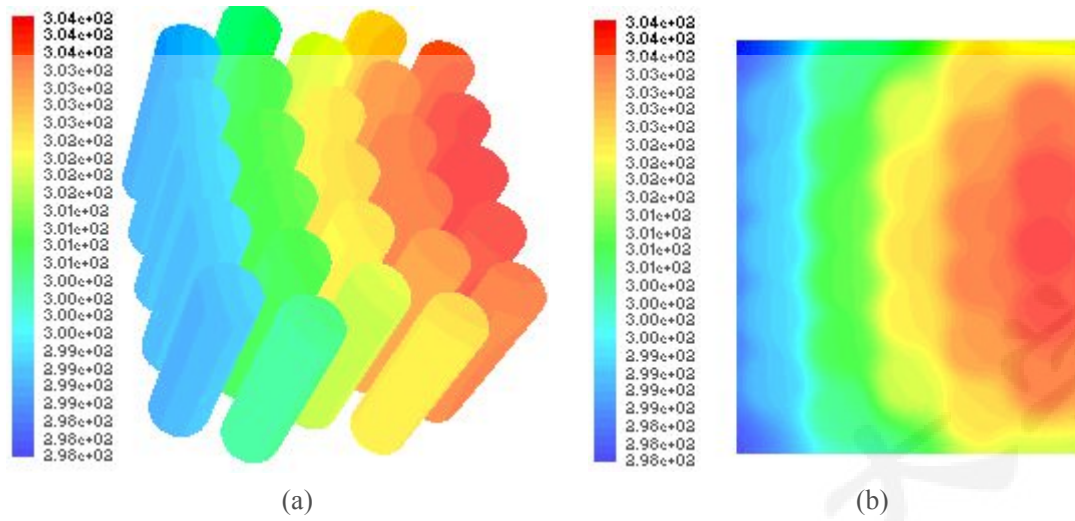


图 5-9 进风口风速 0.3m/s 下的电池箱体温度场分布

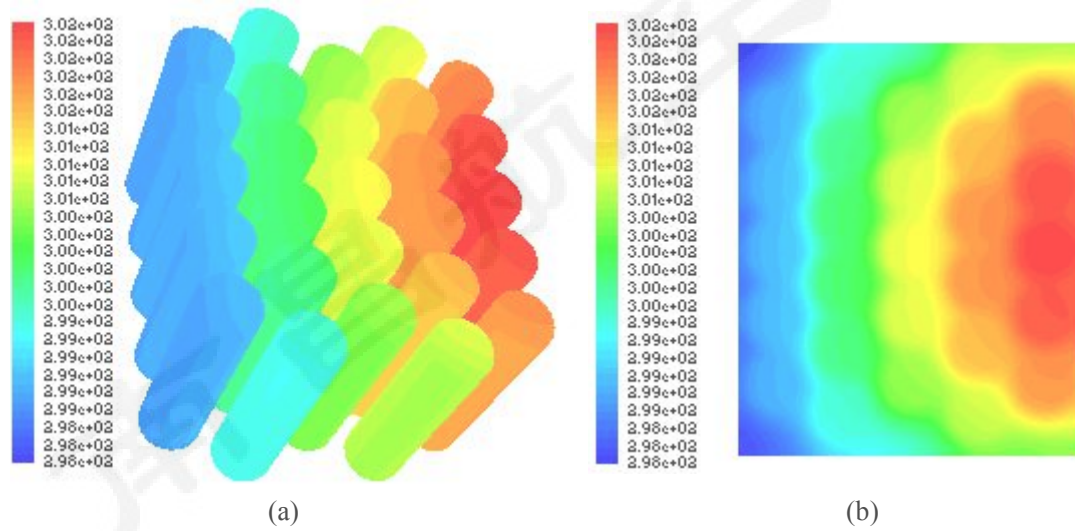


图 5-10 进风口风速 0.7m/s 下的电池箱体温度场分布

对以上不同进口风速下的温度场温升数据总结整理，如下表 5-3 所示：

表 5-3 不同进口风速下，温度场仿真数据

进口风速(m/s)	最低温度(K)	最高温度(K)	最大温差(°C)
0 (自然对流散热)	303	308	5°C
0.3	298	304	6°C
0.7	298	302	4°C
1.5	298	300	2°C

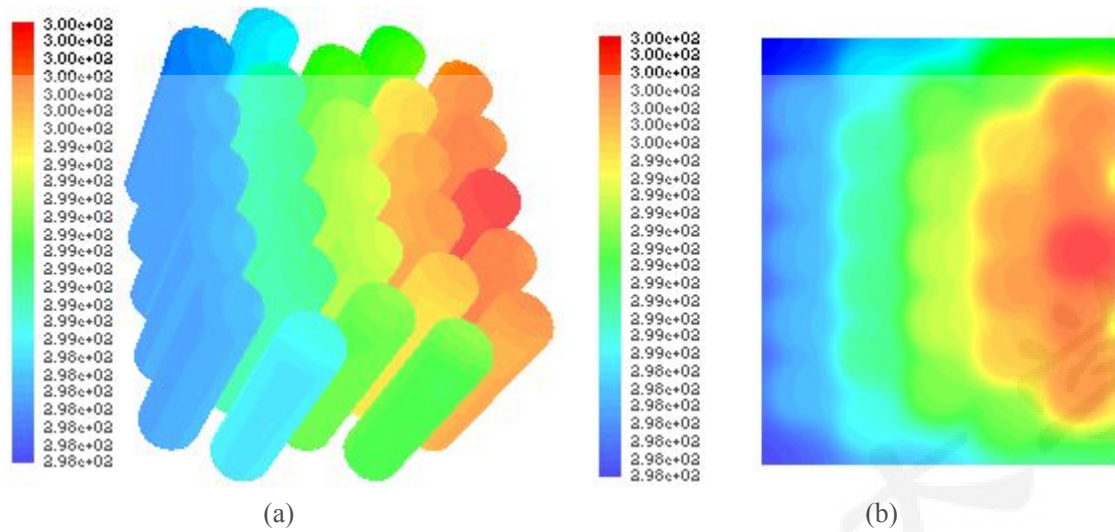


图 5-11 进风口风速 1.5m/s 下的电池箱体温度场分布

从表 5-3 可看出，随着进风口风速的增大，最高温度以及最大温差总体上呈减小趋势，和平行排列一样，出现了一种现象：从 0.3m/s 到 0.7m/s，最大温差降低了 2℃，从 0.7m/s 到 1.5m/s，最大温差也降低了 2℃，虽然最大温差都呈减小趋势，前一种是在速度差为 0.4m/s 下降低的，后一种是在速度差 0.8m/s 下降低的，也就是说随着进风口风速的逐渐增大，其风冷散热的散热能力是逐渐降低的。

5.4 电池组叉形排列实验研究

5.4.1 电池组叉形排列实验平台搭建

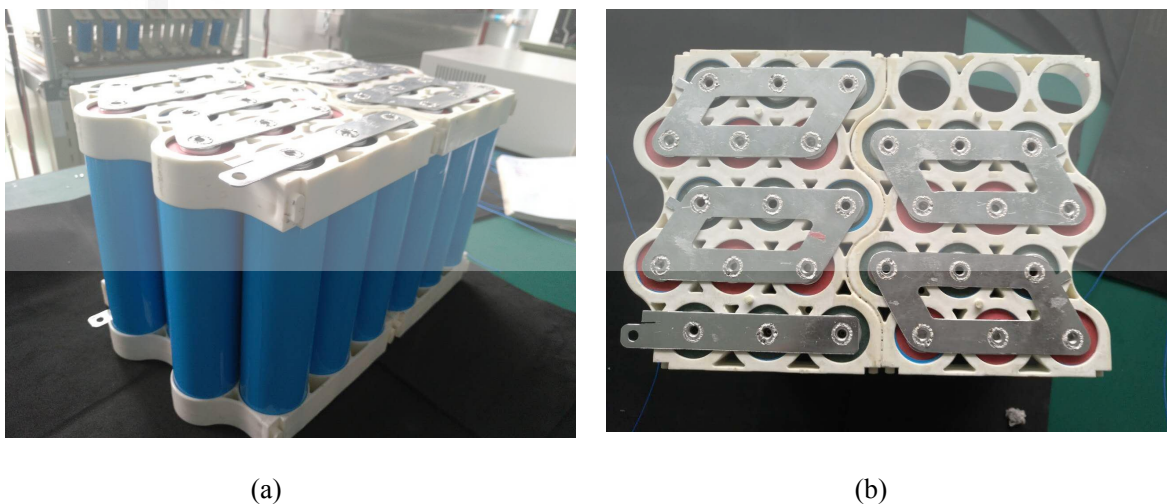


图 5-12 叉形排列 3 并 9 串圆柱电池组

为创建风冷散热实验平台,设计了上图 5-12 圆柱电池单体在叉形排列下 3 并 9 串电池模组,其单体间隙为 12mm,单体额定电压为 3.2V,额定容量为 21A.h。

下图 5-13 为构建的叉形排列电池模组散热平台,冷却装置选用直流电压为 5V 电流为 0.33A 的轴流风扇,由于其结构紧凑,节省空间,安装方便,故选之。

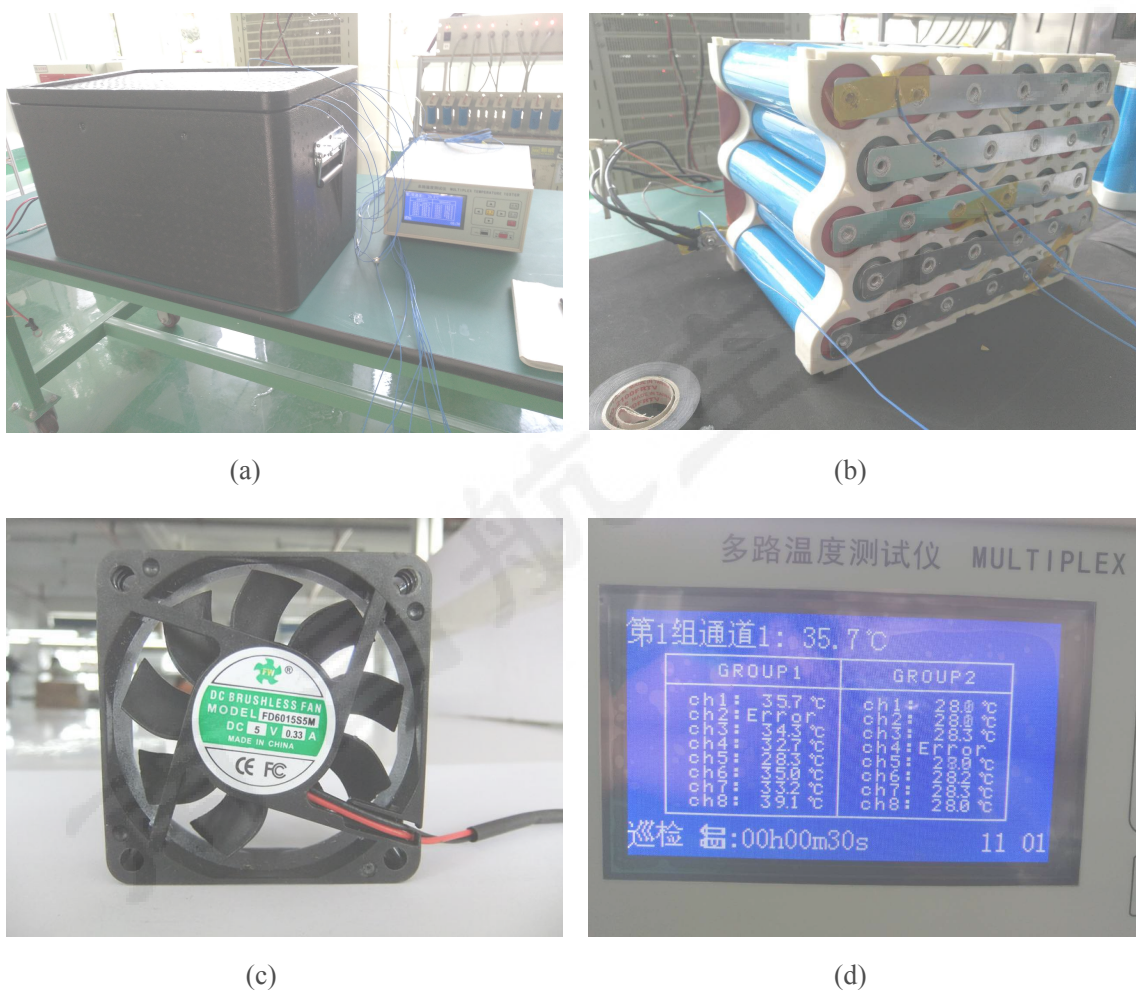


图 5-13 3 并 9 串电池组风冷散热研究平台搭建

图 5-13(a)为风冷散热平台,3 并 9 串电池模组置于黑色箱体中,电池模组正负极接电池测试设备。图(b)多路温度测试仪热电偶端子粘贴在电池箱体模组表面以及中心位置,实时监测温度数据。图(c)为所选用的轴流风扇来提供冷却风。图(d)为多路温度测试仪显示屏,使用 GROUP1 来采集温度。

由于控制风扇输出风速的挡位只有两个,所以散热实验在这两个不同挡位的风速下进行,下面简称高档和低挡。下图 5-14 为多路温度测试仪热电偶监测点粘贴分布,其中 1#和 6#分别粘贴在模组总正以及总负连接测试部位,3#和 8#粘贴在电

池单体表面中部，4#和 7#粘贴在电池单体表面偏正极端，5#粘贴在偏负极端。

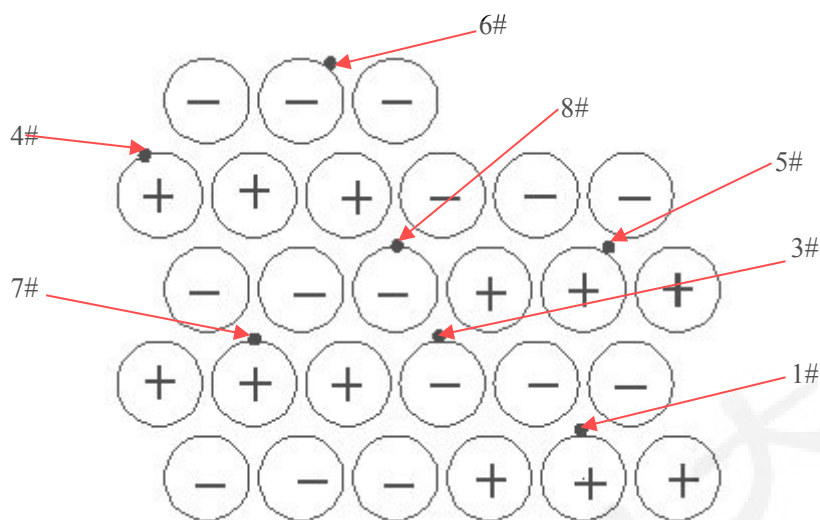


图 5-14 热电偶采集点的位置分布

5.4.2 电池组叉形排列实验数据分析

为了看出风速大小对电池温差的影响效果，电池模组放电倍率大小选择了 2C 放电，用时 32 分钟 28 秒，每隔 3 分钟采集一次数据。以下各图中“数字+#”表示为图 5-14 中的热电偶采集点，第一组测试在没有散热下的温度数据，最高温度达到了 53.9℃，如下图 5-15 所示：

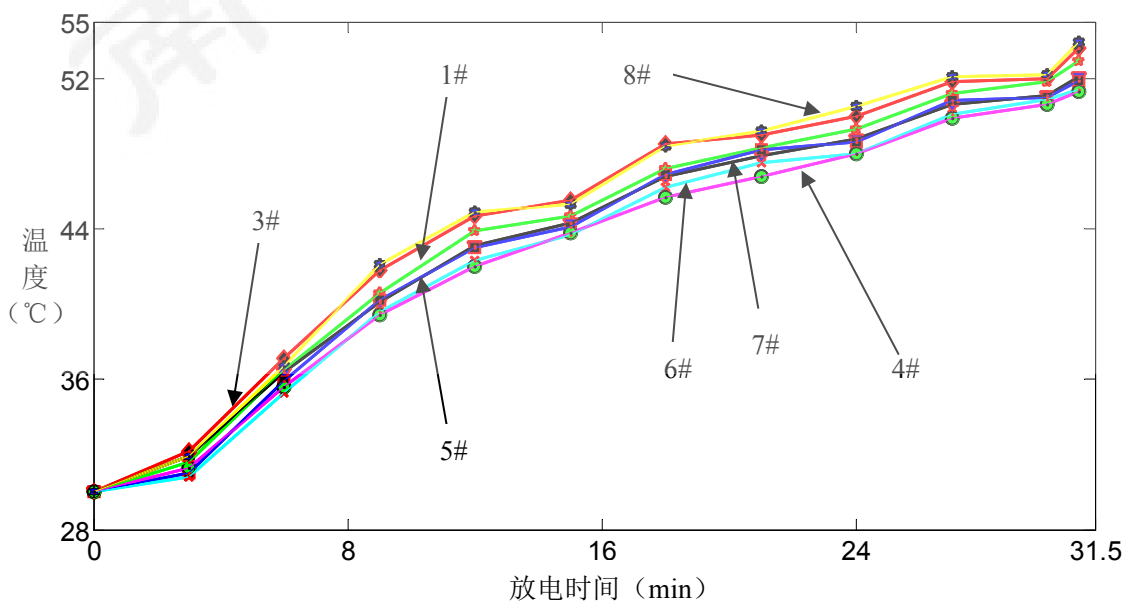


图 5-15 无散热措施下，各测试点温升变化趋势

箱内自然对流散热下，在箱内初始环境温度为 30°C 时，所有测试点中，8# 达到温度最高为 53.9°C ，放电完全后，所有测试点温度都达到了 50°C 以上，监测点中最高、最低温度之差为 2.5°C 。下一步加入轴流风扇，挡位在低挡时，对模组进行散热，其温升变化趋势如下图 5-16 所示：

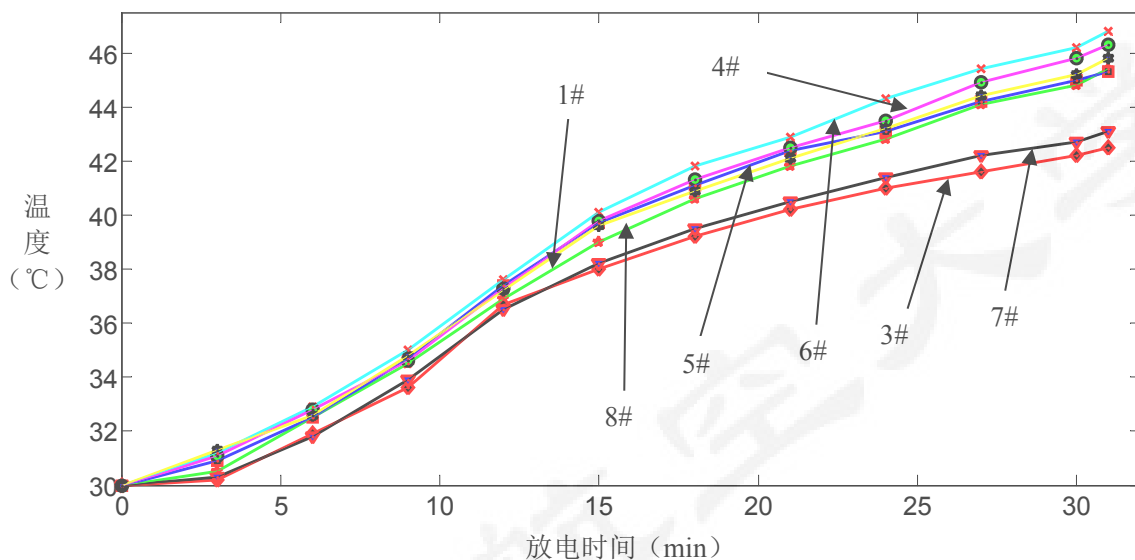


图 5-16 低挡风速下，各测试点的温升变化趋势

可看出，在图 5-16 低挡风速下，各测试点的整体温度变化趋势都有所下降，各测试点在初始阶段温升幅度变化相比于自然对流条件下有所变缓，2C 放电完成后，测得测试点中 6# 高温度 46.9°C ，3# 最低温度为 42.6°C ，温差最大为 4.3°C 。

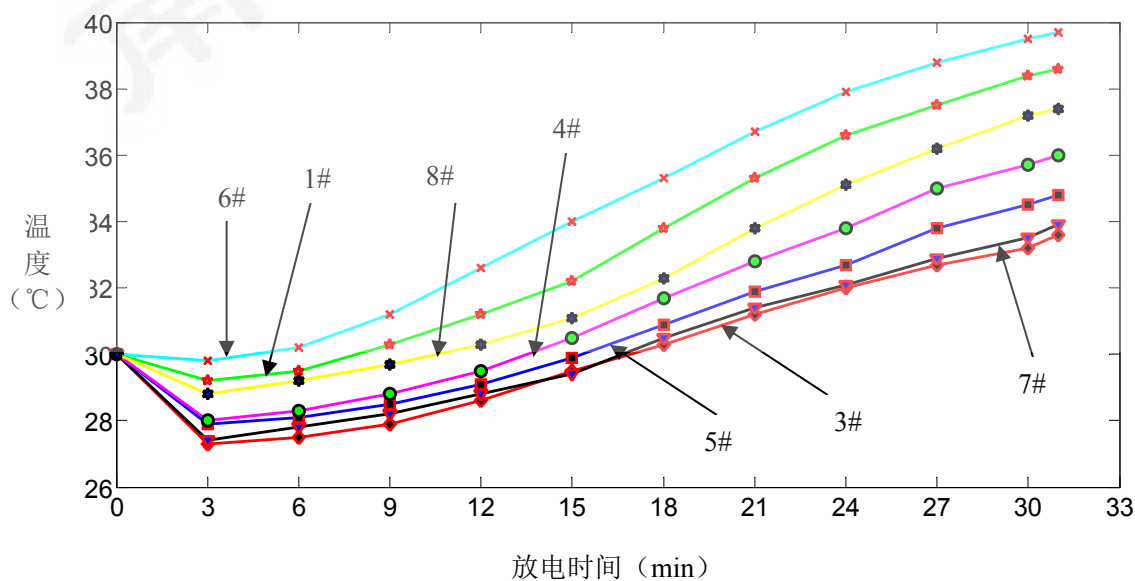


图 5-17 高挡风速下，各测试点的温升变化趋势

图 5.17 为高档风速下，各测试点的温升变化，可看出，随着风速的进一步增大，各测试点的温升变化梯度越来越大，除过 1#以外，越接近风源的测试点，温度变化梯度越小，如 3#和 7#；越远离风源的，温度梯度变化越大，如 6#和 8#。

图中出现各测试点温度先降后升（拐点）的原因是：电池模组放电初期，热量积累不多，在高挡风速下，使得电池各测试点表面的散热速率大于电池的生热速率以及热量积累速率，致使出现测试点温度变化趋势出现上述现象。

通过对三种不同条件下的散热温升变化对比分析，整理出不同散热风速下，2C 放电完全以后的，各测试点的温升数据，如下表 5-3 所示：

表 5-2 三种散热风速下，最高温度数据

散热方式	1#	3#	7#	5#	6#	4#	8#
自然对流	52.9℃	53.6℃	52.1℃	51.9℃	51.4℃	51.3℃	53.9℃
低挡风速	45.4℃	42.7℃	43.2℃	45.3℃	46.9℃	45.7℃	45.8℃
高挡风速	38.4℃	33.2℃	33.9℃	34.8℃	39.7℃	36.0℃	37.4℃

由表 5-2 可看出，随着风速的逐渐增大，风冷散热效果凸显，这也导致箱内的温度梯度增大，最大温差升高。在自然对流散热下，2C 放电完全，各测试点的最大温差为 2.6℃；在低挡风速下，放电完全，各测试点的最大温差为 4.2℃；高挡风速下，放电完全，各测试点的最大温差为 6.5℃。出现这种情况的原因主要是：随着冷却空气流速的增大，冷却空气与单体的对流换热系数增加，空气温度逐渐被加热，使得模组上下游的对流换热系数不一致，温度梯度增大，致使单体散热效果改善。

以上实验是在模组单体数量少的条件下，风冷散热效果看起来比较明显，若电池数量增加，且单体之间空间很小，像特斯拉电动汽车电池，使用 18650 型号的圆柱电池单体数量达到 7104 支，单纯的使用风冷散热方式，电池模组的温度场分布以及最高温度变化不太明显，就需要寻求使用更好、散热效率更高的散热方法，特斯拉授权专利所使用的是液冷散热方法，其液体由 50%的乙二醇和 50%的水组成，散热效率显著，能将箱内的最大温差控制在 5℃以内，满足客户以及设计者的要求，但是液冷散热系统设计复杂、设计成本高，对技术的要求也非常高，还伴有漏液的风险。所以需要寻求在大功率放电、电池单体数量多、风冷散热效果不太明显的情况下，选择一种或几种散热方法耦合使用，来实现不同工况下的散热。

5.5 本章小结

本章首先建立了圆柱电池两种不同排列下的三维模型，利用 CFD 仿真软件，模拟了在不同风速下的温度场分布，搭建了模组叉形排列下的实验平台，对其温升数据做了对比分析，验证了风冷散热效果的有效性以及所存在的不足。其仿真结果和实验结果总结如下：

(1) 电池单体平行排列时，在初始环境温度与进口风压一定的情况下，随着进口风速的逐渐增大，电池箱内的最高温度与最大温差都在逐渐降低，而最高温度和最大温差降低的幅度在逐渐减小。

(2) 电池单体叉形排列时，同样的初始环境温度与进口风压，在风速不断变化下，其最高温度与最大温差变化规律趋于相同；不同之处在于，不论是自然对流散热还是施加相同风速下，叉形排列的整体温度场分布更均衡，其最高温度以及最大温差相较于平行排列更低，散热效果更好。

(3) 实验中，通过布置7个不同的测温点，发现从自然对流散热到高挡风冷散热过程中风速的增加，使得电池组的最高温度下降显著，风冷散热作用明显，同样带来的电池组温度梯度增大，最大温差升高，这种工况下，久而久之，电池单体的各项性能差异化加剧，不利于电池的循环寿命要求设计，所以风冷设计一定要在温差可控的范围内进行。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文针对目前电动汽车电池组在工作过程中热量积累过多, 温度过高, 对环境适应能力差, 致使动力锂电池组在热滥用条件下工作时, 电池性能下降, 循环寿命缩短等一系列问题。采用实验+CFD(计算流体力学)仿真的方法, 研究了电池不同结构的热特性、进出风口的不同开设对箱内温度场的影响以及风冷散热的有效性。论文主要成果如下:

1、考虑到锂离子电池的结构特点及工作原理, 对不同结构、材料的电池做了生热机理分析, 同时, 在直角坐标系和柱坐标系下按照质量、动量以及能量守恒定律建立了不同的导热微分方程, 为后续关于锂离子电池单体、模组以及系统的温度场研究奠定了基础。

2、首先对锂离子单体进行了不同温度下的充放电容量测试以及不同放电倍率下的温升实验。实验数据表明:(1) 在锂离子电池所允许的工作温度区间内, 环境温度越高, 其电池充放电容量越多; 环境温度越低, 其电池充放电容量越少。(2) 在放电倍率允许的范围内, 放电倍率越大, 电池温升越高; 放电倍率越小, 电池温升越低。随着放电倍率的线性变化, 单体各个部位的温升变化幅度也在不同程度的增大。

其次对锂离子电池单体建立了热效应模型, 仿真计算了不同放电倍率(0.5C/1C/1.5C/2C)下的温升变化, 而且对仿真与实验结果做了对比分析, 仿真值与实验所测值温度相对误差在 3%以内, 验证了所建三维电池热效应模型的可行性, 也同时证明了电池热管理的必要性。

3、建立了圆柱电池二维热效应模型, 对其进行结构网格划分以及 CFD 仿真计算, 通过横向对比以及纵向对比分析, 可得出:

(1) 在电池单体平行排列下, 初始环境温度与进口风速为定值时, (b)方案进出风口开设相比于其它三种开设布置, 散热能力更好, 散热效果更佳; 同样的, 在电池单体叉形排列下, (c)方案进出风口开设与其它三种相比, 电池箱内的最大温差最小, 且冷却空气流速最高, 对流换热能力更好; 电池单体梯形排列下, (b)方案进风口开设相比较(a)而言, 温度场一致性更好, 对流换热能力更强。

(2) 在 18650 圆柱电池三种排列下, 梯形排列不论是温度场的均匀性、箱体内部

的冷却风流速以及电池单体与空气的对流换热能力，都优于其它两种排列，梯形排列下温度场最高温度更小、冷却风流速更大、箱内风压更强，致使梯形排列电池箱散热能力更好。

4、建立了两种不同排列下的电池模组三维模型，利用 CFD 仿真软件，模拟了在不同风速下的温度场分布，搭建了圆柱电池组叉形排列实验平台，其仿真结果和实验结果总结如下：

(1) 电池单体平行排列时，在初始环境温度与进口风压一定的情况下，随着进口风速的逐渐增大，电池箱内的最高温度与最大温差都在逐渐降低，而二者降低的幅度在逐渐减小。

(2) 电池单体叉形排列时，同样的初始环境温度与进口风压，在风速不断变化下，其最高温度与最大温差变化规律与平行排列趋于相同；不同之处在于，不论是自然对流散热还是施加相同风速下，叉形排列下温度场整体分布相比于平行排列更均衡，其最高温度以及最大温差相较于平行排列更低，散热效果突出。

(3) 实验中，通过布置 7 个不同的测温点，发现从自然对流散热到高速挡风冷散热过程中，随着风速的增加，可看出电池组的最高温度下降显著，风冷散热作用明显，同样带来的电池组温度梯度增大，最大温差升高，只要最大温差低于设计温差上限，风冷散热是可以投入到实践应用方面。

6.2 展望

本文通过实验和 CFD 仿真相结合，对单体电池的热特性以及电池组风冷散热下的温度场进行了研究。但是由于研究时间及软、硬件方面的限制，所以在研究过程中仍有许多不足之处，需要亟待解决，主要有以下几个方面：

(1) 论文研究发现：不论是平行排列，还是叉形排列，电池箱内的速度流线云图分布，在箱体四个拐角处分布很少，在后续的热管理箱体结构设计中，在四个拐角处放置导流板^[22]，研究导流板在不同角度下的设置是否可以改善电池模组的温度场分布，使其一致性更好。

(2) 在研究二维模组风冷散热时，只研究了进口风速温度为常温时的电池模组的温度场分布，并未对电池模组在其它进口风速温度下的温度场进行研究，因此需要进一步对不同进口风速温度下电池模组温度场分布继续研究。

(3) 论文只在相同放电倍率下，对其平行排列和叉形排列的电池三维模组做了仿真研究，使得在不同散热风速下，温升数据变化幅度不是太大，没有直观反映出风冷散热对于大倍率放电下的局限所在，后续需要在相同的风速、不同的放电

倍率下，研究风冷散热能力的效果。

(4) 在模组风冷实验研究环节，由于电池单体数量有限，在模组 2C 放电下，风冷速度大于模组热量积累速度，使得风冷散热效果明显，却没有真正体现出在模组单体数量多、间隙小、瞬间大倍率充放电的场合下，风冷散热的不足所在，因为随着动力电池技术的要求越来越高，电量设计要求越来越多，在有限的空间下，组成模组的单体数量只能是有增无减，所以后续的研究在增加模组单体数量的基础上来模拟电池组大倍率放电时的温度场分布。

参考文献

- [1] 陈翌,孔德洋.德国新能源汽车产业政策及其启示[J].德国研究,2014,29(01):71-81+127.
- [2] 张天舒.日本新能源汽车发展及对我国的启示[J].可再生能源,2014,32(02):246-252.
- [3] Yuan C, Liu S, Fang Z, et al. Research on the energy-saving effect of energy policies in China: 1982–2006[J]. Energy Policy, 2009, 37(7): 2475-2480.
- [4] Wang Z, Jin Y, Wang M, et al. New fuel consumption standards for Chinese passenger vehicles and their effects on reductions of oil use and CO₂ emissions of the Chinese passenger vehicle fleet[J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 5242-5250.
- [5] 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.
- [6] 姚雷. 混合动力汽车用 Ni-MH 电池的寿命预测[D].重庆大学,2011.
- [7] 马新文. 智能电池巡检仪的研究[D].武汉工程大学,2015.
- [8] 林国发. 纯电动汽车锂电池组温度场研究及散热结构优化[D].重庆大学,2011.
- [9] 李林. 电动汽车电池剩余电量估计的方法研究[D].沈阳工业大学,2014.
- [10] Zhan F, Jiang L J, Wu B R, et al. Characteristics of Ni/MH power batteries and its application to electric vehicles[J]. Journal of alloys and compounds, 1999, 293: 804-808.
- [11] 饶中浩. 基于固液相变传热介质的动力电池热管理研究[D].华南理工大学,2013.
- [12] 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.
- [13] 刘兴泉,于作龙,李淑华. 一种锂离子蓄电池正极材料及其制备方法[P]. 四川: CN1373528,2002-10-09.
- [14] 寿建华.汽车用燃料电池概况[J].上海汽车,1997(08):12-13.
- [15] 马兆强. 混合动力车用镍氢电池组散热系统 CFD 仿真与结构设计[D].重庆大学,2011.
- [16] Somogyi R H. An aging model of NI-MH batteries for use in hybrid-electric vehicles[D]. The Ohio State University, 2004.
- [17] Pesaran A A. Battery thermal management in EV and HEVs: issues and solutions[J]. Battery Man, 2001, 43(5): 34-49.
- [18] 黎火林,苏金然.锂离子电池循环寿命预计模型的研究[J].电源技术,2008(04):242-246
- [19] Leising R A,Palazzo M J,Takeuchi E S,et al.A study of the overcharge reaction of lithium-ion batteries.Journal of Power Source, 2001,97-8:681-683.
- [20] 林国发. 纯电动汽车锂电池组温度场研究及散热结构优化[D].重庆大学,2011.

- [21] 戴海峰,党丰玲,朱维,魏学哲.插电式燃料电池车锂电池热管理系统设计[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(04):589-595+609.
- [22] 许超. 混合动力客车电池包散热系统研究[D].上海交通大学,2010.
- [23] 唐志军,朱群志.热管理技术应用于动力电池的研究[J].电源技术,2013,37(01):103-106.
- [24] 齐晓霞,王文,邵力清.混合动力电动车用电源热管理的技术现状[J].电源技术,2005(03):178-181.
- [25] 李平,安富强,张剑波,王浩然.电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J].汽车安全与节能学报,2014,5(03):224-237.
- [26] 楼英莺. 混合动力车用镍氢电池散热系统研究[D].上海交通大学,2007.
- [27] 许超. 混合动力客车电池包散热系统研究[D].上海交通大学,2010.
- [28] 梁昌杰. 混合动力车用镍氢电池组散热性能 CFD 仿真与试验研究[D].重庆大学,2010.
- [29] 饶中浩. 基于固液相变传热介质的动力电池热管理研究[D].华南理工大学,2013.
- [30] 张国庆,吴忠杰,饶中浩,傅李鹏.动力电池热管冷却效果实验[J].化工进展,2009,28(07):1165-1168+1174.
- [31] 杨淑霞. 电动汽车异步电机直接转矩控制的研究[D].西南交通大学,2003.
- [32] Gould I. Thermal management of battery systems. *Journals of Power Sources*, 1984, 11(3/4): 265-266.
- [33] Eck G. Design of the thermal management systems for sodium-sulphur traction batteries using battery models. *Journals of Power Sources*, 1986, 17(1-3): 226-227.
- [34] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of the electrochemical society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [35] Kim G H, Smith K, Lee K J, et al. Multi-domain modeling of lithium-ion batteries encompassing multi-physics in varied length scales[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(8): A955-A969.
- [36] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿真研究[D].吉林大学,2012.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Park H. A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of power sources*, 2013, 239: 30-36.
- [40] 付正阳,林成涛,陈全世.电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J].公路交通科技,2005(03):119-123.

- [41] 睦艳辉,王文,夏保佳,娄豫皖,阎永恒.混合动力汽车动力电池组散热特性实验研究[J].制冷技术,2009,29(02):16-21.
- [42] 饶中浩,汪双凤,洪思慧,巫茂春.电动汽车动力电池热管理实验与数值分析[J].工程热物理学报,2013,34(06):1157-1160.
- [43] 吴忠杰,张国庆.混合动力车用镍氢电池的液体冷却系统[J].广东工业大学学报,2008,25(04):28-31.
- [44] 张国庆,吴忠杰,张海燕.带液体冷却系统的夹套式混合电动车电池装置[P].广东:CN101222077,2008-07-16.
- [45] 徐晓明,赵又群.基于双进双出液冷系统散热的电池模块热特性分析[J].中国机械工程,2013,24(03):313-316+321.
- [46] 徐晓明,赵又群.电动汽车冷却系统热流场的协同分析与散热性能研究[J].机械工程师,2013,49(02):102-108.
- [47] Liu R, Chen J, Xun J, et al. Numerical investigation of thermal behaviors in lithium-ion battery stack discharge[J]. Applied Energy, 2014, 132: 288-297.
- [48] 付正阳,林成涛,陈全世.电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J].公路交通科技,2005(03):119-123.
- [49] 罗军.充放电条件下LiCoO₂电池整体变形实时测试及铜箔拉伸性能分析[D].湘潭大学,2016.
- [50] 谢一龙.石油焦炭素作为锂离子电池负极材料的改性研究[D].济南大学,2014.
- [51] Araki T, Nakayama M, Fukuda K, etc., Thermal behavior of small nickel/metal hydride battery during rapid charge and discharge cycles[J], J. Electrochemical Soc., 2005, 152(6) ppA1128-A1135.
- [52] 李景.基于电池组温度状态的纯电动汽车能量管理策略研究[D].重庆大学,2014.
- [53] 张志杰,李茂德.锂离子电池内阻变化对电池温升影响分析[J].电源技术,2010,34(02):128-130.
- [54] 李景.基于电池组温度状态的纯电动汽车能量管理策略研究[D].重庆大学,2014.
- [55] 车杜兰.电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计[D].武汉理工大学,2009.
- [56] Wu M S, Wang Y Y, Wan C C. Thermal behaviour of nickel/metal hydride batteries during charge and discharge[J]. Journal of power sources, 1998, 74(2): 202-210.
- [57] Pesaran A A, Vlahinos A, Burch S D. Thermal performance of EV and HEV battery modules and packs[M]. National Renewable Energy Laboratory, 1997.
- [58] Verbrugge M W, Conell R S. Electrochemical and thermal characterization of battery modules commensurate with electric vehicle integration[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2002, 149(1): A45-A53.
- [59] 杨世铭,陶文铨.传热学.第四版.北京:高等教育出版社,2006.

- [60] 李升东. 电动汽车锂离子电池组散热特性仿真研究[D].重庆交通大学,2016.
- [61] 李斌. 基于流固耦合的发动机冷却水套—缸体传热研究[D].湖南大学,2012.
- [62] 李腾,林成涛,陈全世.锂离子电池热模型研究进展[J].电源技术,2009,33(10):927-932.
- [63] Forgez C, Do D V, Friedrich G, et al. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2961-2968.
- [64] 程昀,李劫,贾明,汤依伟,宋文锋,张治安,张凯.动力锂离子电池模块散热结构仿真研究[J].中国有色金属学报,2015,25(06):1607-1616.
- [65] 欧阳陈志. 锂离子动力电池热分析及优化[D].长沙理工大学,2013.
- [66] 何强. 基于 COMSOL 的混合动力汽车动力耦合机构瞬态温度场研究[D].重庆大学,2013.
- [67] 蔡灿. 管板结构分析与换热器性能数值仿真研究[D].武汉理工大学,2010.
- [68] 韩占忠,王敬,兰小平.FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用.北京理工大学出版社, 2010.
- [69] 王维东. 锂离子电池用 LiFePO₄/C 的复合碳源法制备、表征与性能研究[D].合肥工业大学,2009.
- [70] 董冰. 基于锂离子动力电池的纯电动汽车能量管理系统控制策略与优化[D].吉林大学,2014.
- [71] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿真研究[D].吉林大学,2012.
- [72] Inui Y, Kobayashi Y, Watanabe Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2103-2109.
- [73] 姬芬竹,刘丽君,杨世春,徐斌.电动汽车动力电池生热模型和散热特性[J].北京航空航天大学学报,2014,40(01):18-24.
- [74] Al Hallaj S, 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.
- [75] 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.
- [76] Kim G H, Pesaran A, Spotnitz R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170(2): 476-489.
- [77] 周庆辉,陈展,刘少楠.基于 Fluent 的锂离子动力电池的热分析[J].北京建筑大学学报,2017,33(03):33-37+65.
- [78] 赵卫兵. 电动车锂电池热管理系统研究[D].吉林大学,2014.
- [79] 郑潇洁. 动力用锂离子电池的热效应分析[D].北京交通大学,2012.
- [80] 姜海. 锂离子电池组温度场模拟与试验研究[D].大连海事大学,2017.
- [81] 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: 1786-1794.

- [82] 夏顺礼,秦李伟,赵久志,王亚斌,张宝鑫.某纯电动车型电池热管理系统设计分析与验证[J]. 汽车工程学报,2011,1(03):140-146.
- [83] 张扬军,谢今明,欧阳明高,陈全世. 电池组冷却机构中电池的布置方式[P]. 北京: CN1401511,2003-03-12.
- [84] 陆艳辉. 混合动力车用镍氢电池组散热结构研究[D].上海交通大学,2009.
- [85] 曾凡帅, 魏学哲. 混合动力汽车镍氢动力电池包热管理研究[J]. 机电一体化, 2014, 20(05):31-35+41.
- [86] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of power sources, 2002, 110(2): 377-382.
- [87] 郭巧嫣. 车用动力电池多内热源生热模型和电热不一致性研究[D].华南理工大学,2015.
- [88] 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(1-2): 345-353.
- [89] Kitoh K, Nemoto H. 100 Wh Large size Li-ion batteries and safety tests[J]. Journal of Power Sources, 1999, 81: 887-890.
- [90] Johnson V H. Battery performance models in ADVISOR[J]. Journal of power sources, 2002, 110(2): 321-329.
- [91] 杜双龙,赖延清,贾明,程昀,张红亮,张凯,刘业翔.圆柱锂离子动力电池电热特性仿真[J].中国有色金属学报,2014,24(07):1823-1830.
- [92] Smith K, Wang C Y. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles[J]. Journal of power sources, 2006, 160(1): 662-673.
- [93] Kim U S, Shin C B, Kim C S. Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery[J]. Journal of Power Sources, 2008, 180(2): 909-916.
- [94] 郑岳久. 车用锂离子动力电池组的一致性研究[D].清华大学,2014.
- [95] 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.
- [96] Harmel J, Ohms D, Guth U, et al. Investigation of the heat balance of bipolar NiMH-batteries[J]. Journal of power sources, 2006, 155(1): 88-93.
- [97] 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.

攻读硕士学位期间发表的论文和参加科研情况

一、攻读硕士学位期间发表的论文

1. 李志农, 杨澜, 覃章锋, 罗宗鸿, 卢祥军. 一种电动汽车电池箱体. 实用新型专利: ZL 2017 2 0639602.0, 2017.12.29.

2. 李志农, 罗宗鸿, 曹万友, 宁广秀, 刘玉强, 孙玉婷. 一种动力锂电池组的热管理耦合系统. 实用新型专利, 专利号: 201711292022.X.

二、攻读硕士学位期间参加科研情况

1. 国家自然科学基金(No. 51675258): 基于平行因子分析的机械故障诊断新方法研究

2. 江西省科技计划项目(No. 20141BBE50021): 增程式电动汽车用微型涡轮增压发电动力总成及能量回收系统

致谢

光阴似箭，更如白驹过隙，硕士三年的学习时光即将结束，本论文从选题到开题，一直到论文初稿完成，是在我的导师李志农教授、肖尧先教授的认真指导和细心关怀下顺利完成的，他们精益求精的工作态度、废寝忘食的工作作风、孜孜不倦的师德师风时时刻刻影响着我、激励着我，让我三年中每一天都感觉在不断进步。从拿到课题的茫然失措，到初稿完成一刹那间那一点点的成就感，这当中每一次课题遇到的瓶颈，包括仿真软件的使用、实验数据与仿真结果拟合度不明显，所造成的困惑等，都是导师从始至终的在耐心指导，帮我一次次走出难关，在论文完成之时，在此衷心谢谢两位老师三年来的尽心尽力、尽职尽责的培养，祝两位老师身体健康，科研蒸蒸日上。

其次，在生活中感谢我的家人，感谢他们给我提供了良好受教育的平台；感谢他们给我解决了生活上的后顾之忧，让我一门心思在科研当中埋头苦干；感谢他们在我心情最低落的时候，一直支持着我、鼓励着我，使我走出困境，昂起头来继续向前。

感谢实验室中一起奋战的同门师兄姐妹：马曼曼、刘杰、何邦源、吴伟校、陈晓龙、杨诚、陈周亮、陈巍、吴明涛、淦文建、覃章锋、方明亮、李振，感谢你们营造了一个轻松和愉悦的学习氛围，使我科研遇到的压力有所释放；感谢王瑞源、吴小垒、肖波、吴东等同学感谢你们在生活中的关心支持鼓励，让我一直向前；感谢鸥瑞智诺能源科技（天津）有限公司提供的实习平台，使我的论文能够顺利完成，感谢公司技术部一起工作过的同事们：曹万友、刘玉强、宁广秀、孙玉婷、刘阳、刘利伟、王玉帅，没有你们的帮助，我是无法很快融入到公司那个大环境下的，特别感谢曹万友部长在论文实验环节所提的指导意见及建议。

最后，真诚感谢各位评审专家在百忙之中审阅指导本论文，感谢各位答辩委员会老师所提的宝贵意见，为我后续的研究拓宽方向。

南昌航空大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文，是我个人在导师指导下，在南昌航空大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确地说明并表示了谢意。本声明的法律结果将完全由本人承担。

签名：_____日期：_____

南昌航空大学硕士学位论文使用授权书

本论文的研究成果归南昌航空大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解南昌航空大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌航空大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

签名：

导师签名：

日期：

中国热管理网 www.reguanli.com