



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

电动汽车用锂离子动力电池组热管理数值研究

A numerical study on the thermal management of lithium-ion battery pack for electric vehicles

学科专业： 化学工程

研 究 生： 陈宏珍

指导教师： 王宇新教授

天津大学化工学院

二零一四年六月

摘要

电动汽车由于具有环境污染小、能量利用率高、噪音低等优势，成为未来汽车发展的主流方向之一。作为动力系统的电池组是电动汽车的核心部件，其性能的进一步提高是目前电动汽车发展亟需解决的问题。温度对动力电池的性能有重大影响。因此有必要对电动汽车的电池组进行热管理，使电动汽车安全高效运行。

相变材料冷却法是电池组热管理采取的重要方法之一。本文针对相变材料本身不能散热这一缺点提出了相变材料-水协同冷却法，对比了分别采用相变材料冷却以及相变材料-水协同冷却时电池的温度分布情况。结果表明，5C 放电倍率下，放电完毕后采用相变材料冷却时电池的温度为 62℃，而采用相变材料-水协同冷却法时电池的温度为 54.4℃。相变材料-水协同冷却法的控温效果要明显优于相变材料冷却法。

考虑到相变材料-水冷却装置的复杂程度及维护成本较高，本文提出了翅片-空气协同冷却新方法，比较了空气冷却法和翅片-空气协同冷却法的控温效果。结果表明，7C 放电倍率下，与传统空冷方法相比，翅片-空气协同冷却法能有效抑制电池的温升，放电完毕时电池的温度为 47.4℃。对翅片强化传热机理的分析表明，翅片的导热能力是决定翅片-空气协同冷却效果的关键因素。

对不同面积的翅片的控温效果分析可知靠近空气入口处及出口处翅片的散热能力最好，因此设计出工字型翅片，旨在减轻电池组的重量。结果表明，7C 放电倍率下，工字型翅片的控温效果要明显优于矩形翅片。可根据控温要求来灵活选择翅片的尺寸，进而有效减轻电池组的重量。

关键词： 锂离子电池，温度控制，数值模拟

Abstract

Due to the advantages of less pollution emissions, high energy efficiency and low noise, electric vehicles are becoming one of the mainstreams for future vehicles. The improvement of performance for Lithium-ion battery packs which are the core components of electric vehicles is the key issue for developing of electric vehicles. Temperature has a significant impact on the performance of battery. As is shown above, we should take effective measures to control the temperature of battery packs to ensure the safe and effective operation of electric vehicles.

Phase change material(PCM) cooling is one of most important methods for thermal management of battery pack. The PCM-water cooling method is proposed because the PCM itself does not have heat dissipation potential. It is shown that the temperature of battery with PCM-water cooling method is 54.4 degree at 5C discharge rate, while the temperature of battery with PCM cooling is 62 degree. The temperature controlling effect of PCM-water cooling is much better than that of PCM cooling.

A novel cooling method coupling metal fins and air flow is proposed because of the complexity of PCM-water cooling system and high maintenance cost. The temperature effects are discussed at the same discharge rates. It is shown that the coupling of metal fins and air flow is much more superior to common air cooling in terms of controlling the maximum temperature of the battery. The temperature of battery at the end of discharge is 47.4 degree. The mechanism of cooling enhancement by fins is discussed. The thermal conductivity of the fins proves to be a critical factor which determines the cooling effect.

According to the temperature effects on different areas of fins, the heat dissipation of fins which close to the air inlet and outlet is the best. So a novel cooling method coupling I-shaped metal fins and air flow is proposed. The results show that the coupling of I-shaped fins and air flow is much more excellent than the coupling of rectangular fins and air flow. The coupling of I-shaped fins and air flow can control the temperature of battery to below 55 degree at different heat transfer area of fins with 7C discharge rate. The weight of the battery pack will be reduced effectively by selecting the size of fins flexibly.

Key Words: lithium-ion battery, temperature control , numerical simulation

目 录

第一章 文献综述	1
1.1 电动汽车简介	1
1.1.1 电动汽车特点及分类	1
1.1.2 电动汽车的发展	2
1.2 纯电动汽车的核心部件-锂离子动力电池	4
1.2.1 锂离子动力电池的发展	4
1.2.2 锂离子动力电池的工作原理及特点	4
1.2.3 锂离子电池的构成材料	6
1.3 电池组强化传热研究进展	7
1.3.1 锂离子电池热管理的必要性	7
1.3.2 电池组强化传热方法及研究进展	7
1.4 本论文的研究内容	11
第二章 相变材料冷却及其改进方案	12
2.1 模型建立	12
2.1.1 物理模型及模拟假设	12
2.1.2 相变材料传热数值模型建立	14
2.1.3 控制方程及边界条件	16
2.1.4 数值计算方法	20
2.2 模拟结果	23
2.2.1 相变材料冷却	23
2.2.2 相变材料-水协同冷却	26
2.3 本章小结	31
第三章 翅片-空气协同冷却	33
3.1 模型建立过程	33
3.1.1 模拟单元的选取与模型假设	33
3.1.2 控制方程和边界条件	34
3.2 模拟结果	38
3.2.1 翅片-空气协同冷却	38
3.2.2 翅片强化传热机理	40
3.3 本章小结	46
第四章 翅片形状对翅片-空气协同冷却控温效果的影响	47
4.1 模型建立	47
4.1.1 模拟单元的选取	47

4.1.2 控制方程与边界条件	48
4.2 模拟结果	49
4.2.1 矩形翅片-空气协同冷却	49
4.2.2 工字型翅片-空气协同冷却	50
4.3 本章小结	53
第五章 结论	54
参考文献	56
发表论文和参加科研情况说明	60
致 谢	61

第一章 文献综述

1.1 电动汽车简介

1.1.1 电动汽车特点及分类

汽车是现代文明的重要标志,它作为一种道路交通工具,在国防建设和人民生活、生活等方面均起着十分重要的作用。但是随着能源紧张和环境污染问题的日益突出,汽车行业的发展正面临着重大危机。

汽车在运行时产生的废气和噪声会造成严重的环境污染。汽车废气中的污染物有一百多种,其中对人体危害最大的有一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、碳氢化合物和碳微粒等,这些物质吸入人体后会对人体造成极大地伤害,严重时甚至会死亡。除此之外,汽车排放的大量二氧化碳虽然无毒,但会造成温室效应,使地球变暖,威胁人类的生存环境。汽车运行时发出的噪声也会产生噪声污染,影响人们的工作和生活。在交通领域的石油消耗量中,有 67%源于燃油汽车^[1]。然而世界范围内石油资源正日趋枯竭,这极大的阻碍了燃油汽车的发展。

能源危机及大气污染直接威胁着传统燃油汽车的可持续发展,而以电动汽车逐步代替传统的燃油汽车是人类解决这些问题的主要途径。电动汽车是从车载电源获得电力,用电动机驱动的汽车类型,与传统的内燃机汽车相比具有无可比拟的优势^[2],主要表现为以下几个方面:

1)电动汽车可以较好地解决燃油汽车对城市环境污染的问题。电动汽车的核心部件电池组在工作时不会排放有害气体,并且给蓄电池充电所用的电力可以来自水能、核能、风能、地热、潮汐等对环境没有污染的能源。除此之外,与燃油汽车所用内燃机相比,电动汽车所用电动机的工作噪声较低。

2)电动汽车可以解决汽车对石油资源的依赖。电动汽车用车载电源有蓄电池、燃料电池、太阳能电池等,可以不依赖与石油资源。

3)电动汽车可以节约大量能源。电动汽车用蓄电池可以利用晚间富余的电力进行充电,从而避免大量富余电力的浪费,提高电网电能的利用率。电动汽车还可在减速、制动和下坡时,实现能量回馈,提高能量的利用率,从而节约能源。

根据国标 GB/T 19596-2004 电动汽车术语,电动汽车可以分为纯电动汽车(Battery Electric Vehicle ,BEV)、混合动力电动汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)

和燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)。这些电动汽车都得到了各国政府不同程度的关注与研发。

纯电动汽车是指以蓄电池为车载电源, 仅以电动机为驱动力的电动汽车。纯电动汽车工作时不产生排气污染, 是真正意义上的零污染汽车。对纯电动汽车的研究表明, 其总的能源效率高于燃油汽车^[3]。与燃油汽车相比, 纯电动汽车的结构简单, 动力传动部件少, 维护保养工作量少, 且驾驶操纵也更为简单。但是作为纯电动汽车唯一动力电源的蓄电池的性能还不够优异, 这使得目前的纯电动汽车还不能与燃油汽车相抗衡。因此, 随着动力电池关键技术的突破与发展, 纯电动汽车将具有广泛的发展空间。

混合动力汽车是指同时由内燃机和电动机驱动的电动汽车。混合动力电动汽车综合了传统燃油汽车和纯电动汽车的优点, 并最大限度地克服了它们的缺点。与纯电动汽车相比, 混合动力电动汽车的续驶里程延长了 2~4 倍。与传统内燃机汽车相比, 混合动力电动汽车的工作效率更高, 在相同的行驶里程的条件下, 燃油消耗量和排放量均减少。混合动力电动汽车也可以在纯电动模式下工作, 实现零排放。总体上讲, 混合动力电动汽车的热效率可提高 10% 以上, 废气排放量可减少 30% 以上。因此, 混合动力电动汽车在技术、经济及环境等方面存在更大的优势。但是, 混合动力电动汽车的结构和控制过程比较复杂, 在有内燃机参与工作的情况下, 仍存在废气排放问题。

燃料电池电动汽车是动力源为燃料电池的电动汽车。相比于内燃机汽车, 燃料电池电动汽车具有很多优点, 如能量转换率高, 实际能量转换效率高达 50%~70%; 当燃料电池使用氢作为燃料时, 其排放的是水, 对环境无污染; 燃料电池电动汽车无运动部件, 运行时振动小、噪声低。由于燃料电池电动汽车的价格较高, 并且其高效、安全的储氢和运氢等问题还需解决, 所以燃料电池电动汽车的产业化仍需时日。

1.1.2 电动汽车的发展

1881 年法国工程师 Gustave Trove 组装了第一辆电动三轮汽车并成功运行, 自此开始人们广泛关注电动汽车。到了 20 世纪 30 年代末, 由于当时的蓄电池性能较差, 以蓄电池为电源的电动汽车逐渐消失。这一时期, 由于大量油田的开发, 廉价的石油降低了内燃机汽车的使用成本, 加上内燃机技术及汽车底盘技术的不断提高, 使内燃机汽车在市场上占据了绝对的优势, 电动汽车被淘汰。20 世纪 80 年代以来, 随着汽车保有量的不断增加, 内燃机汽车排放有害气体、依赖不可再生的石油资源等的劣势逐渐显现出来, 不会对环境造成污染且无需依赖石油

资源的电动汽车又成为世界性的研发热点。世界上各大汽车公司都投入巨资研发电动汽车，以促进本国电动汽车的发展。

美国是最发达的汽车工业国家，为增强汽车制造业的竞争力，美国政府提出了著名的“新一代汽车联合体计划”(Partnership for a New Generation of Vehicles)和“自由车计划”(Freedom Cooperative Automotive Research Partnership Plan)。新一代汽车联合体计划的执行情况为：1997年完成了新一代汽车的技术选择，其主要技术方向为轻质材料、混合动力、高性能发动机和燃料电池等；2004年生产出了电动汽车样车。自由车计划的主要目标是：开发出无污染、燃料能量转换效率高、成本具有竞争力、燃料添加方便的燃料电池电动汽车；开发出排放达到或低于排放标准、成本具有竞争力的内燃机/电动机混合动力电动汽车。计划所取得的成就对美国乃至全世界的电动汽车发展都具有深远的意义。

日本也是汽车生产大国，而且日本的石油资源匮乏，石油几乎全部依赖进口。因此，日本政府及日本的各大汽车公司对电动汽车的开发也十分重视。日本的混合动力电动汽车处于世界领先地位。日本的电动汽车研发计划主要有：低公害汽车开发普及行动计划、氢能及燃料电池示范项目(Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project)和针对电动汽车某项技术的研究计划。

我国也早已将电动汽车的研究与开发以及电动汽车的产业化列为重点项目，并制定了电动汽车发展的规划。我国863计划的BEV、HEV和FCEV研发纲领中设立了电动汽车重大专项。电动汽车重大专项提出“三纵、三横”的研究和开发布局，强调建立符合整车开发规律的开发程序，以BEV、HEV和FCEV的整车为主导(三纵)，带动多能源动力总成控制系统、电动机驱动系统、电池和电池管理系统(三横)。在我国973计划中，也设立了电动汽车专项，主要涉及氢能的规模制备、储备及相关的燃料电池基础研究。

电动汽车要向前快速发展，还面临许多需要解决的关键问题，主要表现为以下几个方面：

1)车载电源的性能和成本问题。目前，纯电动汽车产业化的主要问题是一次充电的续航里程、汽车的价格和使用成本，而蓄电池是这些问题的关键所在。要实现电动汽车的市场化，对蓄电池的比能量和能量密度、比功率和功率密度、快速和深放电的能力、自放电率、充电效率、使用寿命、安全性、成本、环保、可回收性等均有较高的要求。

2)电动机及控制器的性能问题。对电动汽车电动机及其控制器的基本要求是：启动转矩大且功率范围较宽；高功率密度；具有较大的转速范围；具有较快的转矩响应特性；再生制动时的能量回收效率高；在各种环境下的工作可靠性好，低噪音；体积小，重量轻，成本低。因此，研发更高效的电动机，匹配最优化的控

制技术,使电动汽车的电驱动系统达到最理想的工作状态,也是电动汽车发展过程中必须解决的关键技术。

3)电动汽车能量管理系统问题。电动汽车能量管理系统的作用是充分发挥电动汽车有限的车载能量,延长电动汽车的续驶里程和蓄电池的使用寿命。电动汽车能量管理系统必须能监测蓄电池的电压和电流、能控制蓄电池的终止充放电、能监测蓄电池组中单个蓄电池状态、能控制蓄电池均衡充电等。因此研究开发出一个最理想的电动汽车能量管理系统,也是今后电动汽车产业化进程中需要攻克的关键技术。

综上所述,电动汽车的发展还需攻克多项技术问题。随着这些问题的解决,电动汽车必将得到快速的发展。

1.2 电动汽车的核心部件-锂离子动力电池

电动汽车动力的来源之一为蓄电池。由蓄电池构成的电池组的性能直接影响了整车的性能。为增加电动汽车的续驶里程,电池组的容量要足够大。但是,增大蓄电池的容量,蓄电池组的体积增大,质量也会增大,会影响车辆的动力性和整车布局。因此,电动汽车需根据设计目标和道路工况的不同来选择电池组。在众多化学电源中,锂离子电池因其比能量密度高、质量轻、充放电循环寿命长等优点成为 BEV/HEV 电池的首选。

1.2.1 锂离子动力电池的发展

锂离子动力电池是 20 世纪开发成功的一种新能源电池^[4]。1980 年, Armand 首次提出了“摇椅式电池”(Rocking Chair Battery)这一突破性思想,并运用该想法制成了锂离子电池,使锂二次电池的实用化成为可能^[5]。Armand 开发出的该电池开路电压高、充放电效率好、寿命长,但是比容量低、锂离子在正负极的扩散慢,因而没能走向市场。1990 年,日本索尼公司和加拿大莫利公司首次制备出了两种锂离子电池,使锂离子电池开始走向商品化的道路。1993 年,美国贝尔电讯公司首次报导了聚合物锂离子电池的制备工艺^[6]。至今,锂离子二次电池的研究与开发已成为世界性的热点^[7]。

1.2.2 锂离子动力电池的工作原理及特点

电动汽车用锂离子电池主要分为方型和圆柱形。其中应用最为普遍的是圆柱型锂离子电池。圆柱型锂离子电池单体由正极集流体层、锂盐正极活性物质层、

多孔隔膜层、负极集流体层及负极活性物质层这五层结构叠加卷绕而成的，其基本的结构示意图如图 1-1 所示^[8]。其中，正负极活性物质是均匀涂敷在正负极集流体上的，且活性物质具有多孔结构。在正负极活性物质以及隔膜的空隙中浸满了传输锂离子的电解质溶液。

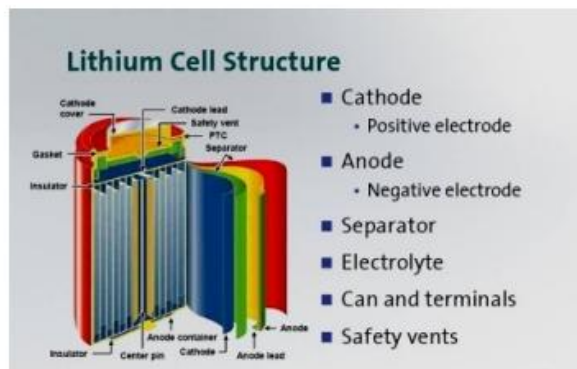


图 1-1 锂离子电池单体内部结构示意图^[8]

Fig.1-1 Structure of lithium-ion battery

锂离子二次电池是一种锂离子浓差电池。图 1-2 表示了锂离子电池的工作原理^[9]。

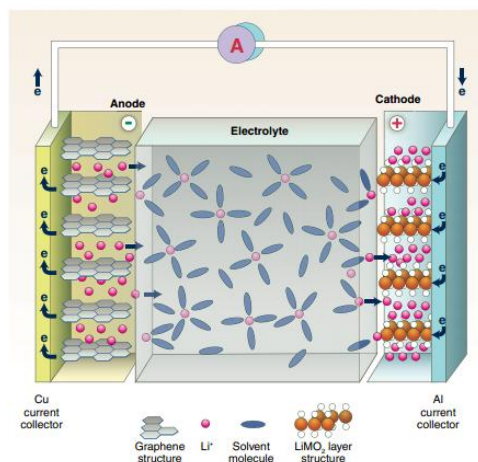


图 1-2 锂离子电池工作原理示意图^[9]

Fig.1-2 The schematic of the principle of lithium ion battery

在众多的化学电源中，锂离子电池因具有一系列优点而成为电动汽车电池的首选，具体表现为以下几方面：

1) 荷电保持能力强，允许工作温度范围宽。锂离子电池具有优良的高低温放电性能，高温放电性能优于其它各类电池。

2)循环使用寿命长。锂离子电池在连续充放电 1200 次后, 电池的容量减少量低于额定值的 40%, 该值远低于其它各类电池, 具有长期使用的经济性。

3)无环境污染。电池中不含有镉、铅、汞这类有害物质, 对环境没有任何的危害。

4) 无记忆效应。可随时反复充、放电使用。

5)体积小、质量轻、比能量高。通常锂离子电池的比能量是镍镉电池的 2 倍以上; 体积是同容量镍氢电池体积的 70%, 重量则同容量镍氢电池的一半。

1.2.3 锂离子电池的构成材料

锂离子电池单体内部的主要构成材料有正极集流体材料、正极活性物质材料、负极集流体材料、负极活性物质材料、电解质溶液和隔膜。下面对各组成材料作进一步阐述。

目前, 正极集流体材料主要采用金属铝, 负极集流体材料主要采用金属铜。集流体的主要作用是在充电的时候将电流导入到活性物质上, 放电的时候将活性物质上产生的电流收集导出传给负载而实现供电。

锂离子电池正极活性物质材料常用的有钴酸锂(LiCoO_2)、锰酸锂(LiMn_2O_4)、磷酸铁锂(LiFePO_4)等。自 20 世纪 90 年代初, 以钴酸锂为正极材料的二次电池已经实现了商业化, 但由于钴资源有限、价格高且有毒性而限制了钴酸锂正极材料的使用与发展^[10]。相反, 锰资源丰富、价格便宜、环境友好, 且锰酸锂无毒、成本低、电容量高, 这使得锰酸锂成为最有可能取代钴酸锂的正极材料^[11]。目前, 锰酸锂已经在许多国内外的公司进入了中式化阶段或已开发批量生产。磷酸铁锂作为活性物质具有一系列优点: 不含重金属元素, 原材料丰富廉价; 工作电压适中, 充放电平台稳定性好; 储电性能好, 理论电容量大等^[12]。负极活性物质一般采用石墨类材料, 因其具有优异的嵌锂、脱锂性能及良好的电化学稳定性^[13]。

锂离子电池内的电解质溶液由有机溶剂和电解质锂盐组成。有机溶剂主要有碳酸乙烯酯、碳酸丁烯酯和碳酸二乙酯。电解质锂盐主要采用六氟磷酸锂(LiPF_6)。LiPF₆具有良好的离子电导率和电化学稳定性, 但 LiPF₆的抗水解性和抗热性较差, 有待进一步研究改进^[13]。锂离子电池中的隔膜几乎全部采用聚丙烯/聚乙烯/聚丙烯三层聚合物隔膜, 因其具有较好的抗撕裂强度、较强的耐酸碱能力以及对非质子溶剂的保持性能。

1.3 电池组强化传热研究进展

1.3.1 锂离子电池热管理的必要性

温度是影响锂离子电池性能至关重要的因素。一般认为锂离子电池的正常工作温度范围为 20℃~60℃。锂离子电池温度每升高 1℃, 将会降低电池的使用寿命 2 个月^[14]。电池的放电倍率会随着车辆不同的行驶状况而改变。随着时间的积累以及空间的影响, 电池组内会有不均匀的热量的积累, 从而导致电池组的温度复杂多变^[15]。然而过高的温度会降低电池容量、寿命以及能量效率。如果电池组积累的热量无法及时散出, 将会导致热失控的产生, 严重时会发生爆炸^[16]。近年来由于锂离子电池的爆炸已经造成了多场火灾的发生, 其中也包括多起与锂离子电池有关的电动汽车火灾。

2010 年 1 月 7 日, 乌鲁木齐市公交公司车库内一辆锂离子电池混合动力客车因磷酸铁锂锂离子电池故障过热发生火灾。2011 年 7 月 18 日, 上海一辆纯电动公交车也因磷酸铁锂锂离子电池过热故障而发生自燃。2011 年 5 月以来, 美国一家公司生产的电动汽车使用的锂离子电池存在火灾隐患, 这引起国际汽车制造业的高度重视。2011 年 9 月, 美国国家公路交通安全管理局对该款车进行了碰撞试验, 两组电池在碰撞试验后一周内先后发生火灾, 第三组电池电弧放电并产生明火, 第四组电池在触点处出现过热现象, 第五组电池出现缓慢放电, 第六组电池烧毁。这一结果促使汽车公司立即提出调整横向刚性构件以保护电池舱的改进方案, 对已销售的超过 8000 台车召回改造。2012 年 3 月, 该汽车公司宣布该款车停产 5 周^[17]。

锂离子电池的安全隐患是电动汽车可持续发展道路上必须克服的障碍之一。因此, 为保证电动汽车安全运行, 一套完善的电池组热管理系统是非常必要的。性能良好的电池组温度控制系统的设计成为决定电动汽车商业化前景的关键技术之一。

1.3.2 电池组强化传热方法及研究进展

1.3.2.1 空气冷却

空气冷却就是直接让空气穿过电池组模块以达到冷却的目的。空气冷却系统因其结构简单、经济性而被许多电动汽车选为热管理系统^[18]。根据空气相对电池的流动方向不同, 空气冷却可分为串行和并行两种冷却方式; 根据是否使用风扇, 分为自然和强制冷却两种冷却方式^[19]。

Pesaran 等^[20]采用二维数值模型模拟了串行和并行冷却方式的控温效果,如图 1-3 所示。由图 1-3 可知,在相同的放电条件下,采用并行冷却时,电池组内各电池的温度相差较小,电池组中最大温度差为 8℃,整个电池组的温度均匀性较好;而采用串行冷却方式时,虽然电池组的最低温度有所降低,但电池组内各电池温度相差较大,尤其是靠近空气入口处的电池和靠近空气出口处的电池温度差高达 18℃。丰田 Prius 混合动力汽车的热管理系统中采用了并行方式来冷却或加热电池组^[21]。为有效提高电池组的温度均匀性,空气冷却一般采用并行方式。

采用空气自然冷却方式对电池组的冷却效果是非常差的,因此空气冷却一般采用强制冷却方式。强制冷却是指采用冷却风扇进行冷却。Chen 等^[22]分别提出了精确的和简化的电池三维热模型,仿真结果表明在空气自然冷却下辐射散热占散热总量的 43%~63%;强制对流是降低电池最高温度的有效措施,但扩大强化传热的强度会降低电池组的温度均匀性。Kelly 等^[23]采用空气强制冷却方法对电池组(此电池组分别为丰田 Prius 和本田 Insight 混合电动汽车使用的电池组)进行热管理,分别在 0℃、25℃、40℃ 下进行测试,通过调节风扇的功率来控温,两种电池组的温度都能被控制在合理的温度范围之内。Nelson 等^[24]用实验验证了当 15mm×100mm×110mm 方型电池温度超过 66℃ 时很难用空气冷却的方法将电池温度降低到 52℃ 以下。Wu 等^[25]验证了极端的工况下,尤其是高倍率、高的环境温度 (>40℃) 时,空气冷却将不再能使电池的温度降到正常范围内,并且此时电池表面的温度很不均匀。可见在电池组热管理系统中,单纯的采用空气冷却方式有时难以达到控温要求。

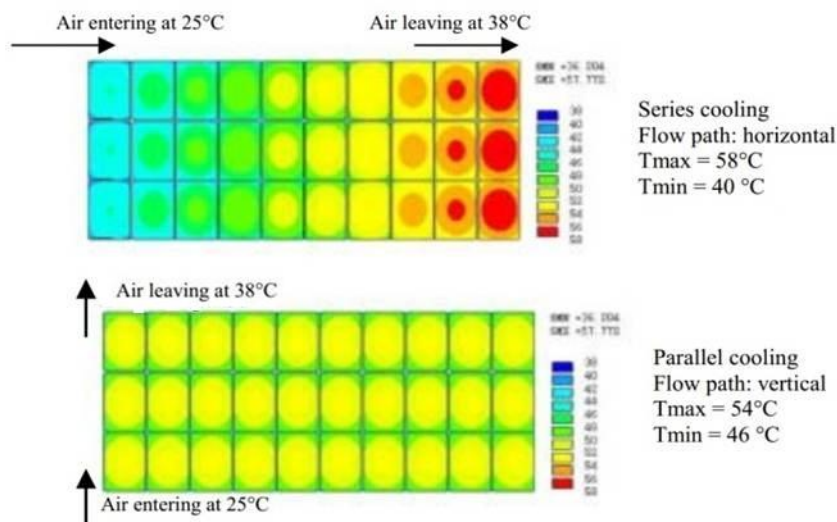


图 1-3 串行和并行冷却方式下电池组温度分布情况^[20]

Fig.1-3 Temperature distribution comparison of series and parallel air cooling for a battery pack

1.3.2.2 液体冷却

在一般工况下,采用空气冷却法即可满足控温要求,但在高倍率以及环境温度较高的工况下,液体冷却才可达到电池组的散热要求。液体的导热系数和比热容均大于空气,在相同流速下其对流换热能力要远高于空气。液体冷却系统就是利用流动的液体将电池组产生的热量带到外界从而降低电池组的温度。在液体冷却系统中,液体在模块间布置的管线中或夹套中流动。传热介质可以采用水、乙二醇、油甚至制冷剂;也可以直接将电池模块沉浸在电介质的液体中,此时必须采用绝缘措施防止短路^[26]。

David 等^[27]将松下(CGR18650E)电池组包裹在三角铝中,并将电池组放在水中,理论分析和实验数据都显示电池组放电结束时温度不会超过工作温度范围(-20℃~60℃),该冷却系统是最简单的水冷却系统。Nelson 等^[24]用聚硅酮电介质流体作为电池组热管理系统的冷却介质,结果表明聚硅酮流体不仅能显著降低电池组的最大温度,还能使电池组具有较好的温度均匀性。但液体冷却系统的制造和维护成本高,例如需要保证该系统具有足够好的密封及绝缘设计,这极大的制约了其在电池组热管理上的应用^[28]。

1.3.2.3 相变材料冷却

相变材料(PCM, Phase Change Material)是指物理性质随温度变化而改变并在变化的过程中能提供潜热的物质。相变材料有很多种类,分类方法也多种多样,从所储存能量的特点来分,可以分为储热材料和储冷材料^[29];从储能方式来分,可以分为显热储热材料、潜热储热材料和化学反应储热材料三类^[30]。潜热储热是利用相变材料在发生相变时的相变潜热来储存热量,蓄热密度大、装置简单,并且在储热过程中相变材料的温度基本保持不变,能灵活的实现温度的控制^[31]。因此这种储热材料应用最为广泛,也已经开始将其用于动力电池组热管理系统^[32]。

Hallaj 等^[33]采用数值模拟法验证了 EV 用 80240 型圆柱形电池组采用相变材料热管理系统的控温效果。模拟结果表明电池组的温度均匀性比没有采用相变材料冷却时的温度均匀性要高很多;在高温环境下,相变材料能够将电池组散发出的热量储存起来;在低温环境下,相变材料又将储存的热量释放出来用于给电池组加热。Kizilel 等^[34]模拟验证了 4S5P18650 型圆柱形电池组在正常放电以及电池组中有一个电池发生热失控的状况下采用相变材料-石墨模块冷却系统的控温情况。结果表明,在环境温度为 40℃时,采用相变材料-石墨模块冷却法能有效维

持电池组的温度均匀性；当电池组中某一个电池发生热失控后，采用相变材料-石墨模块冷却法能够阻止热量传递给其它的电池，从而保证了电池组中其它电池的安全性。Rami 等^[35]通过数值模拟和实验验证了相变材料冷却的控温效果。结果表明在 6.67C(10A/cell)倍率持续放电下，采用相变材料冷却法能维持电池的温度在 55℃ 以下。Siddique 等^[36]比较了四种不同散热模式的实验：1)自然冷却；2)发泡铝矩阵冷却；3)石蜡冷却；4)发泡铝和石蜡结合冷却，实验结果见图 1-4。由图可知将石蜡与发泡铝结合的冷却方法能有效改善石蜡低导热能力的问题，冷却效果最好。由于相变材料本身并不具备散热能力，这一缺点阻碍了其在电池组热管理上的应用。

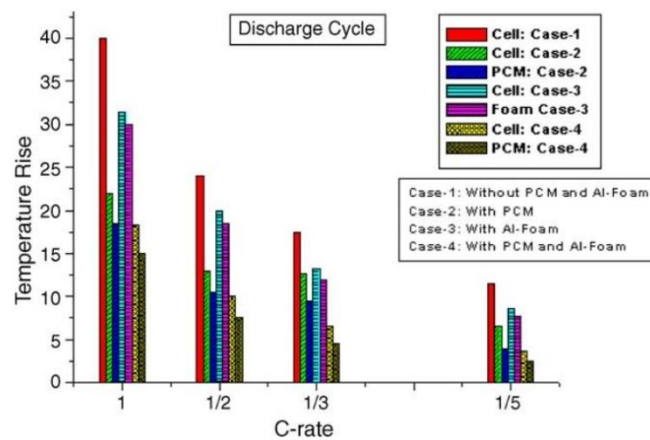


图 1-4 放电循环时不同热传递系统的锂离子电池模块实验结果^[36]

Fig.1-4 Temperature distribution comparison of different cooling methods for battery pack

1.3.2.4 热管冷却

热管是借助封闭管内的工作介质反复发生相变而进行传递热量的一种高效传热元件^[37]。热管由管壳、吸液芯和端盖组成，工作时可分为蒸发段、绝热段和冷凝段三个工段。热管的工作原理为：当热源对热管的蒸发段进行加热时，热管内的液体受热蒸发为蒸汽；蒸汽在压差的作用下流向冷凝段，冷凝段的液体通过管壁和散热器将热量传到管外；冷凝液在吸液芯的作用下又回到蒸发段。热管热效率高，可以维持电池组内电池的温度均匀性，非常适合电池组这样的空间有限又需要充分冷却的装置^[38]。Wu 等^[25]将带有金属翅片的热管贴在 40110 型圆柱形电池壁面上来冷却电池组。结果表明在金属翅片的协助下，热管能有效降低电池的温度。张国庆等^[39]采用热管式冷却的热管理系统对电池组进行温度控制。实验结果表明，在 3728mA 电流放电的情况下，与采用自然冷却法相比，采用热管冷却法能使电池的温升降低 10℃ 左右；电池在持续放电 8min 后温度依然低于

43℃。热管的材质一般为金属管，当电池的外壳也是金属时，不能让热管直接与电池接触，否则可能导致绝缘安全问题^[40]。

1.3.2.5 冷板冷却

冷板是指一个或多个带有冷却剂内流管道的薄壁金属构件，其工作原理是热量从电池单元传给冷板，再通过冷板中的冷却剂导出热量。可根据电池组的实际情况与形状来灵活设计冷却板的形状。冷板散热能显著提高电池模块内的温度均匀性。在整个电池热管理系统中采用冷板无疑会增大电池堆的质量与体积，因此可以在重点发热区使用冷板冷却。

1.4 本论文的研究内容

基于以前工作者的研究成果，本文对电动汽车用锂离子电池组的热管系统进行了研究与改进，主要内容包括以下几个方面：

考虑到相变材料本身并不具备散热能力这一缺点，本文提出了相变材料-水协同冷却新方法，将该系统作为电动汽车用锂离子电池组的热管理系统。相同的放电倍率下，比较了相变材料冷却以及相变材料-水冷却的控温效果；分析了不同冷却水流速以及不同冷却管半径下，该冷却法对电池组的温度控制情况。根据模拟数据，对相变材料冷却法以及相变材料-水协同冷却法的冷却效果进行了评价与分析。

鉴于相变材料-水协同冷却系统的复杂性以及维护成本较高，本文提出了翅片-空气协同冷却新方法。首先建立了翅片-空气协同冷却三维热模型，模拟了不同倍率放电下，翅片-空气冷却法对电池组的控温情况，并将结果同传统的空气冷却法的结果进行对比分析，分别计算了两种方法下输送空气所消耗的能量。对翅片-空气协同冷却强化传热的机理进行了分析，讨论了翅片材质以及翅片的厚度对控温效果的影响。

对不同面积的翅片的控温效果分析可知，靠近空气入口处及出口处翅片的冷却能力较强，因此设计出工字型翅片，旨在减轻电池组的重量。在相同的放电倍率下及相同的翅片面积下，比较了矩形翅片-空气协同冷却法和工字型翅片-空气协同冷却法的控温效果。对工字型翅片的尺寸进行了优化，以达到满足电池组的控温要求的前提下有效减轻电池组的重量的目的。

第二章 相变材料冷却及其改进方案

相变材料冷却系统由于其结构简单、蓄热能力较强而被应用于动力电池组热管理系统。本章主要描述了相变材料数值模拟方法的建立过程，分析了采用相变材料冷却法对电池组的控温效果。针对相变材料冷却方法的不足，提出了相变材料-水协同冷却方法，对比了水冷却、相变材料冷却、相变材料-水协同冷却这三种散热系统的控温情况。

2.1 模型建立

2.1.1 物理模型及模拟假设

锂离子电池组由多个单电池经串并联连接构成，所用单电池可为圆柱形、方型、薄片型等。本文的研究基于最常见的 18650 型 $\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{C}$ 圆柱形电池构成的电池组，模块结构如图 2-1 所示。

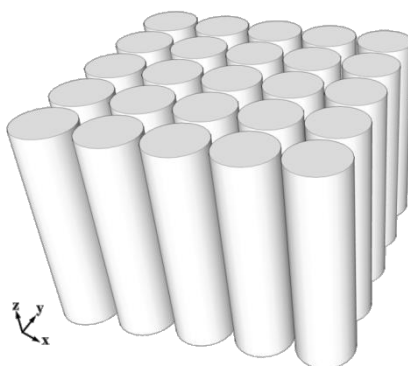


图 2-1 电池模块示意图

Fig.2-1 Schematic diagram of lithium ion battery module

忽略电池模块的边缘与中心处传热差别的前提下，电池模块实际上是由若干个重复单元组成的。通过对有代表性单元区域的详尽模拟，其结果即可准确反映整个电池模块内的温度分布情况。水冷却、相变材料冷却、相变材料-水协同冷却这三种情况下的求解区域有所不同，模拟单元如图 2-2(a)、(b)、(c)所示，其中电池之间的距离为 1mm。相变材料冷却模型是在电池模块之间填充相变材料，通过相变材料的蓄热对电池模块进行冷却。水冷却模型是在电池之间布置冷却水

管，冷却水管和电池之间的间隙中充满空气，电池散发出的热量先传递给空气，再由空气传给流动的冷却水进而将热量带到外界。相变材料-水协同冷却模型是在电池之间布置冷却水管，在水管和电池的空隙间填充相变材料，电池散发的热量先传递给相变材料，再经过相变材料传给冷却水。通过冷却水与外界交换热量而带走热量。

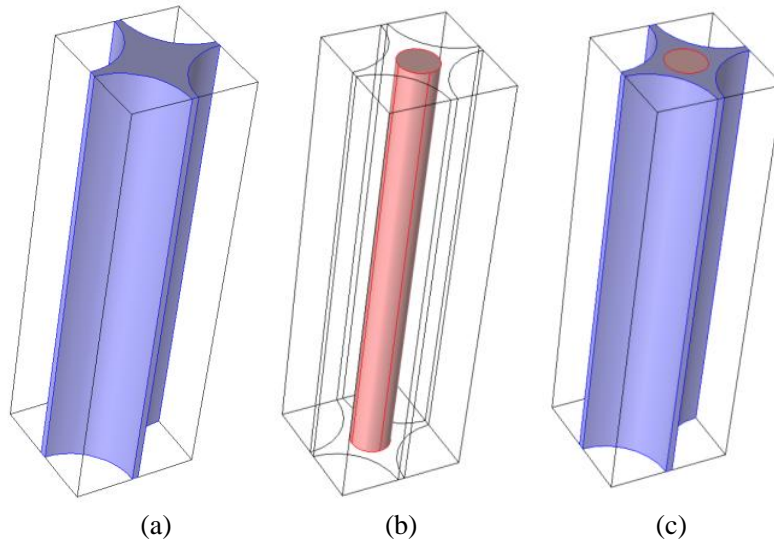


图 2-2 不同冷却工况下模拟单元示意图，蓝色区域表示相变材料区域，红色区域表示冷却水区域，其中(a)为相变材料冷却模型(b)为冷却水模型(c)为相变材料-水协同冷却模型

Fig.2-2 Schematic diagram of simulation unit with different cooling methods, where blue area is the PCM region, red area is the water region;(a) the PCM cooling model;(b)the water cooling model;(c)the PCM-water cooling model

圆柱型锂离子电池是由正极集流体、正极活性材料、隔膜、负极集流体、负极活性材料这五层结构叠加卷绕而成的。各层所用材料分别为 Al、 LiMn_2O_4 、聚丙烯/聚乙烯/聚丙烯三层隔膜、Cu、石墨。由于电解液填充在正负极活性材料及隔膜的孔隙内，正负极活性材料层及隔膜层的导热系数需考虑电解液的影响，其计算方程为^[41]：

$$\lambda_i = \lambda_m(1 - \varepsilon) + \lambda_f \quad (2-1)$$

其中 ε 表示孔隙率， λ_m 表示未填充电解液的正负极活性材料及隔膜的导热系数， λ_f 表示电解液的导热系数， λ_i 表示填充电解液之后正负极活性材料及隔膜的导热系数，各材料的物性参数见表 2-1。

表 2-1 锂离子电池物性参数^[42]

	孔隙率	密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容 ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	厚度 (μm)
Al	—	2710	902	237	20
LiMn ₂ O ₄	0.25	2370	1321	1.48	180
PP/PE/PP	0.47	1400	1551	0.35	40
石墨	0.30	1347	1437	1.04	120
Cu	—	8930	386	398	10
不锈钢	—	7850	475	44.5	200

为简化计算，我们假设：

- 1) 电池的物性参数不随温度变化；
- 2) 电池内部各处的产热速率相同；
- 3) 电池表面的热辐射量相比于电池热传导量和对流换热量来说很小，可忽略不计；
- 4) 相变材料液化之后的微弱流动可以忽略；
- 5) 在水冷却以及相变材料-水协同冷却模型中，采用导热系数较大、厚度较薄的冷却水管，其对传热的影响可以忽略。

2.1.2 相变材料传热数值模型建立

相变传热问题求解困难的主要原因是相变材料在发生相变的过程中存在移动的相变界面。相变传热问题在数学上是一个强非线性问题，因此相变传热问题一般很难获得解析解，通常只能采用近似方法或数值方法求解^[43]。数值求解方法可分为两类^[44]：前沿跟踪法与固定区域法。前沿跟踪法是对相变界面位置进行连续不断的追踪，具有较高的精度。为了追踪移动界面，需要对网格进行连续不断的重构、更换坐标或采用时空有限元技术^[45]。因此，前沿跟踪法计算量非常大，对计算机性能有很高的要求。另外，对具有温度区间的非等温相变问题，此方法不适用。固定区域法^[46]是将求解分区域的传热问题转化成求解整个区域上的传热问题，常用的方法有焓法、显热容法、等效热容法等。在固定区域法中，等效热容法是被研究得最早和应该用最为广泛的一种数值方法^[47]。等效热容法是将潜热的变化隐含到材料的热容中^[48]，其中等效热容 $C_{p,\text{eff}}$ 定义为焓 H 的函数。

石蜡作为相变材料具有相变潜热大、不过冷、不层析、性能稳定、无腐蚀性等优点。本文选取石蜡作为锂离子电池组热管理系统的冷却介质。石蜡的化学组成为多种烷烃的混合物，因此石蜡没有固定熔点，熔化温度为一个区间。

石蜡在发生相变时存在两相区域。在相变区域有 $\Omega = \Omega_l + \Omega_s$ ，其中 Ω_l 表示液

相区域, Ω_s 表示固相区域。各单相区域中控制方程如下^[49]:

$$C_{p,l} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_l \nabla T) \quad \text{在 } \Omega_l \text{ 相内} \quad (2-2)$$

$$C_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) \quad \text{在 } \Omega_s \text{ 相内} \quad (2-3)$$

其中 $C_{p,l}$ 、 $C_{p,s}$ 分别表示液相和固相的比热容; λ_l 、 λ_s 分别表示液相和固相的导热系数。

在相变材料的整个两相区域内, 能量方程如下:

$$C_{p,\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad \text{在 } \Omega \text{ 内} \quad (2-4)$$

其中 $C_{p,\text{eff}}$ 表示等效热容, 定义如下:

$$C_{p,\text{eff}} = \frac{dH}{dT} \quad (2-5)$$

其中 H 为焓。

在许多相变材料传热问题中, 非等温相变发生在一个较小的相变温度区间内。对于非等温相变, 可以通过下式求得等效比热容:

$$C_{p,\text{eff}} = \begin{cases} C_{p,s} & , (T < T_s) \\ C_{p,f} + \frac{L}{T_l - T_s} & , (T_s < T < T_l) \\ C_{p,l} & , (T > T_l) \end{cases} \quad (2-6)$$

其中 L 表示相变潜热, $C_{p,f}$ 表示相变区间的热容, T_s 表示相变材料固化温度, T_l 表示相变材料液化温度。

由式(2-6)知在 $T=T_s$ 和 $T=T_l$ 时, $C_{p,\text{eff}}$ 存在阶跃变化, 这种跳跃变化会为热容矩阵的数值积分带来困难, 有可能引起计算误差^[50]。Purlis 等^[51]建议采用 Heaviside 函数对等效热容进行光滑处理, 具体过程如下所述。

首先定义函数 B 为相变材料两相区域中液相分数, 其为相变材料温度的函数, 方程如下^[52]:

$$B(T) = \begin{cases} 0 & , T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{T - T_m + \Delta T}{2\Delta T} & , (T_m - \Delta T) < T < (T_m + \Delta T) \\ 1 & , T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (2-7)$$

其中 T_m 表示相变材料的平均熔点, ΔT 表示相变材料融化的半温度区间。

由(2-7)可知 $B(T)$ 也存在阶跃变化, 这会给计算带来误差。因此采用 Heaviside 函数对 $B(T)$ 进行光滑处理, 方程如下:

$$B(T) = \text{flc2hs}((T - T_m), \Delta T) \quad (2-8)$$

其中 $\text{flc2hs}(T)$ 表示连续过冲的平滑 Heaviside 函数, 此函数为 Comsol Multiphysics 软件中内置的函数。

相变材料的等效比热容可以用下式表示^[53]:

$$C_{p,\text{eff}} = C_{p,s} + (C_{p,l} - C_{p,s}) \cdot B(T) + L \cdot \delta(T) \quad (2-9)$$

其中 $\delta(T)$ 表示达西 δ 函数, 该函数值在 $[T_m - \Delta T, T_m + \Delta T]$ 区间以外的点都等于零, 且在整个定义域上的积分等于 1。使用该函数的目的是使潜热在整个相变温度区间都有分布。 $\delta(T)$ 的表达式如下:

$$\delta(T) = \begin{cases} 0, & T < (T_m - \Delta T) \\ \frac{T - T_m + \Delta T}{2\Delta T} \frac{e^{-T(T - T_m)^2}}{\sqrt{\pi} \Delta T^2}, & (T_m - \Delta T) < T < (T_m + \Delta T) \\ 0, & T > (T_m + \Delta T) \end{cases} \quad (2-10)$$

相变材料发生相变之后其密度和导热系数都会发生变化, 对相变材料的密度和导热系数进行校正, 公式如下:

$$\rho(T) = \rho_s + (\rho_l - \rho_s) \cdot B(T) \quad (2-11)$$

$$\lambda(T) = \lambda_s + (\lambda_l - \lambda_s) \cdot B(T) \quad (2-12)$$

其中 ρ_s 、 ρ_l 分别表示相变材料固相和液相的密度; λ_s 、 λ_l 分别表示相变材料固相和液相的导热系数。

2.1.3 控制方程及边界条件

2.1.3.1 电池单体的能量方程

电池在放电过程中产生的热量包括以下两部分: 1) 电池内阻产生的焦耳热; 2) 电化学反应的熵变。若以 Q_b 表示电池单位体积的产热速率, 则计算公式为^[54]:

$$Q_b = \frac{1}{V_b} \left[I(E - E_{ocv}) - IT \frac{dE_{ocv}}{dT} \right] \quad (2-13)$$

其中 I 表示电流 (放电时 $I < 0$, 充电时 $I > 0$); E 表示电池电压; E_{ocv} 表示电池开路电压; V_b 代表电池的体积。方程(2-13)还可以用内阻的形式来表达, 如下:

$$Q_b = \frac{1}{V_b} \left[I^2 R_i - IT \frac{dE_{ocv}}{dT} \right] \quad (2-14)$$

其中 R_i 表示电池的内阻。电池在高倍率放电过程中焦耳热占主导地位, 电化学反应熵变可以忽略^[54], 故本文中电池的单位体积产热速率可以简化为:

$$Q_b = \frac{I^2 R_i}{V_b} \quad (2-15)$$

本文模拟的 18650 型锂离子电池的容量为 1500mAh, 电池单体的内阻为 66m Ω , 则电池单体的放电倍率、放电时间及单位体积的发热功率的关系见表 2-2。

表 2-2 18650 型锂离子电池放电倍率、放电时间及产热速率关系表

Table2-2 The relationship of discharge rate, discharge time and heat power for 18650 form battery

电池单体放电倍率	理论可持续放电时间	单位体积产热速率
7C	540s	$4.0 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$
6C	600s	$3.2 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$
5C	675s	$2.6 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$

电池区域的能量守恒方程为：

$$\rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{x,b} \frac{\partial T_b}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{y,b} \frac{\partial T_b}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{z,b} \frac{\partial T_b}{\partial z}) + Q_b \quad (2-16)$$

其中 ρ 表示电池的平均密度， C_p 表示平均比热容， Q_b 的计算公式见式(2-15)。由于电池内部是由物理性质各不相同的材料叠加卷绕而形成，是混合物。在模拟过程中，我们取了各组成层密度以及比热容的加权平均值，计算公式如下：

$$\rho C_p = \frac{\sum \rho_i C_{p,i} V_i}{\sum V_i} \quad (2-17)$$

其中 ρ_i 、 V_i 、 $C_{p,i}$ 分别代表电池内各组成层的密度、体积和比热容。

式(2-16)中 $\lambda_{x,b}$ 、 $\lambda_{y,b}$ 、 $\lambda_{z,b}$ 分别表示电池在 x 、 y 、 z 方向上的导热系数， t 表示时间， T_b 表示电池的温度。值得注意的是，各材料的热阻沿电池径向表现为串联关系，沿轴向表现为并联关系，因此电池的导热系数存在各向异性，在径向与轴向应给予分别计算^[55]，计算方法如下：

$$\lambda_{x,b} = \lambda_{y,b} = \frac{\sum L_i}{\sum (L_i / \lambda_i)} \quad (2-18)$$

$$\lambda_{z,b} = \frac{\sum L_i \lambda_i}{\sum L_i} \quad (2-19)$$

2.1.3.2 相变材料及冷却水的控制方程

相变材料内部仅存在热传导，其能量守恒方程如下：

$$\rho_{PCM} C_{p,PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = \lambda_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial x} + \lambda_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial y} + \lambda_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial z} \quad (2-20)$$

其中 $\rho_{PCM} = \rho(T)$ ，计算方法见式(2-11)； $C_{p,PCM} = C_{p,eff}$ ，计算方法见式(2-9)； $\lambda_{PCM} = \lambda(T)$ ，计算方法见式(2-12)。所需相变材料的物性参数见表 2-3^[56]。

表 2-3 石蜡、空气及冷却水的物性参数表^[56]

Table 2-3 Parameters of paraffin wax and air and water

物理量	数值
$C_{p,s}(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1770
$L(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	195000
$\rho_s(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	822
石蜡 $\rho_l(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	910
$\lambda_s(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.21
$\lambda_l(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.29
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	2
$T_m(^{\circ}\text{C})$	42
空气 $\rho_a(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.185
$\lambda_a(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.026
$C_{p,a}(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1005
水 $\rho_w(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	996.95
$\lambda_w(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.61
$C_{p,w}(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	4178.5

冷却水内部的能量积累由热传导和热对流两部分引起, 其能量控制方程如下:

$$\rho_w C_{p,w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T_w) + \rho_w C_{p,w} u_w \nabla T_w \quad (2-21)$$

其中 ρ_w 、 $C_{p,w}$ 、 λ_w 分别表示冷却水的密度、比热容、导热系数, T_w 表示冷却水的温度。

冷却水流动过程中遵循的质量守恒方程即连续性方程如下:

$$\nabla u_w = 0 \quad (2-22)$$

冷却水的速度控制方程采用不可压缩 Navier-Stokes 层流流动方程, 如下:

$$\rho_w \frac{\partial u_w}{\partial t} = \rho_w g_w - \nabla p_a + u_w \nabla^2 u_w \quad (2-23)$$

其中 g_w 、 P_a 表示重力加速度和压强。

水冷却模型中, 冷却水与电池的间隙间充满滞留的空气, 此部分空气不流动, 空气内部仅存在热传导, 能量控制方程如下:

$$\rho_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} = \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial y} + \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} \quad (2-24)$$

其中 ρ_a 、 $C_{p,a}$ 、 λ_a 分别表示空气的密度、比热容、导热系数, T_a 表示空气的温度。

2.1.3.3 初始条件及边界条件

1) 初始条件

电池组放电开始前，假设各电池、相变材料、水以及空气均和环境的温度一致，为 25°C。

$$T_b = T_{\text{pcm}} = T_w = T_a = 25^\circ\text{C} \quad (2-25)$$

冷却水的初始速度为定值，方程如下：

$$u_w = \text{constant} \quad (2-26)$$

2) 温度边界条件

电池与相变材料的接触面上，流入该界面的能量等于流出该界面的能量：

$$\lambda_b \nabla T_b = \lambda_{\text{PCM}} \nabla T_{\text{PCM}} \quad (2-27)$$

电池与空气的接触面上，流入该界面的能量等于流出该界面的能量：

$$\lambda_b \nabla T_b = \lambda_a \nabla T_a \quad (2-28)$$

冷却水与相变材料的接触面上，流入该界面的能量等于流出该界面的能量：

$$\lambda_w \nabla T_w = \lambda_{\text{PCM}} \nabla T_{\text{PCM}} \quad (2-29)$$

在整个电池组系统中，电池组上下表面会安置电路板，所以电池上下表面近似绝热，即表面上没有能量通过，所以有：

$$\lambda_b \nabla T_b = 0 \quad (2-30)$$

电池与相变材料以及电池与空气的接触面两侧温度相等，冷却水与相变材料接触面两侧温度相等：

$$T_{b,\text{surface}} = T_{\text{PCM},\text{surface}} \quad (2-31)$$

$$T_{b,\text{surface}} = T_{a,\text{surface}} \quad (2-32)$$

$$T_{\text{PCM},\text{surface}} = T_{w,\text{surface}} \quad (2-33)$$

相邻单元与单元之间的接触面为对称性边界，在此边界上能量的净传输量为零，方程如下：

$$\lambda_b \nabla T_b = 0 \quad (2-34)$$

冷却水入口处，冷却水的温度为固定值：

$$T_{w,\text{inlet}} = \text{constant} \quad (2-35)$$

3) 速度边界条件

冷却水进口处为恒定速度边界，方程如下：

$$u_{w,\text{inlet}} = \text{constant} \quad (2-36)$$

冷却水出口为开放边界，设压强恒定为标准大气压：

$$p_w = p_0 = 101.325\text{KPa} \quad (2-37)$$

2.1.4 数值计算方法

本数值模拟研究采用的是中方科技有限公司开发的 COMSOL MULTIPHYSICS 仿真软件,应用该软件中的传热模块(heat transfer module)和流体流动模块(fluid flow module)。数值模拟的过程中,结合初始条件以及温度边界条件、速度边界条件对各区域的能量方程进行精确求解。

首先,需要在软件中对初始条件、温度边界方程和能量方程中的相关物理量的数值进行设定,所需数值见表 2-1、表 2-2、表 2-3。

在求解相变材料冷却的数值问题时,还需设置一些辅助函数,这些函数见式(2-8)、(2-9)、(2-10)、(2-11)、(2-12)。在求解过程中需调用这些辅助函数,相变传热问题才能顺利解决且准确性较高。

其次,采用有限元方法对电池组内的温度分布进行求解计算。有限元法(FEM, Finite Element Method)也称有限单元法是随着计算机的发展而迅速发展起来的一种数值求解方法。自 20 世纪 50 年代开始逐渐得到大规模应用,现在已经应用于各种物理、数学、工程等领域^[57]。有限元方法的基础是变分原理和加权余量法。该方法的基本思路是把求解域离散成有限个互不重叠的单元,在每个单元内选择一些合适的节点作为插值点,然后把待求的偏微分方程中的因变量改写成依据节点上的值的插值函数组成的线性方程组,从而可以通过适当的数值方法得到所需的解。采用有限元法解决问题可分为预处理、求解、后处理这三个环节。每个环节包含的具体步骤如下:

预处理环节:

- 1)将求解对象离散成系列的节点与单元;
- 2)针对每一个离散的单元建立各自的温度控制方程和边界条件,针对有流动的流体存才的区域还要建立速度控制方程以及边界条件;
- 3)将所有的离散单元组合成模拟总体,从而构造总体矩阵;
- 4)根据所设定的初值条件、边界条件对能量控制方程及速度控制方程进行微元的迭代数值求解;
- 5)求解线性(或非线性)的微分方程组,得到节点及微元上的数值。

后处理环节:

计算工作完成后,大量数据主要通过图像显示出来,从图像中可获取大量的有用信息。比如,可获取电池区域的整体温度分布图像、电池区域某个截面的温度分布图像、流场的速度分布图示及流场的压力分布图示等。

对电池区域进行求解时采用的瞬态求解器,对相变材料和冷却水以及停滞空气区域求解时采用的稳态求解器。采用瞬态求解器时,需确定好积分时间以及积分步长。相变材料冷却求解流程见图2-3,水冷却、相变材料-水复合冷却的求解流程见图2-4。

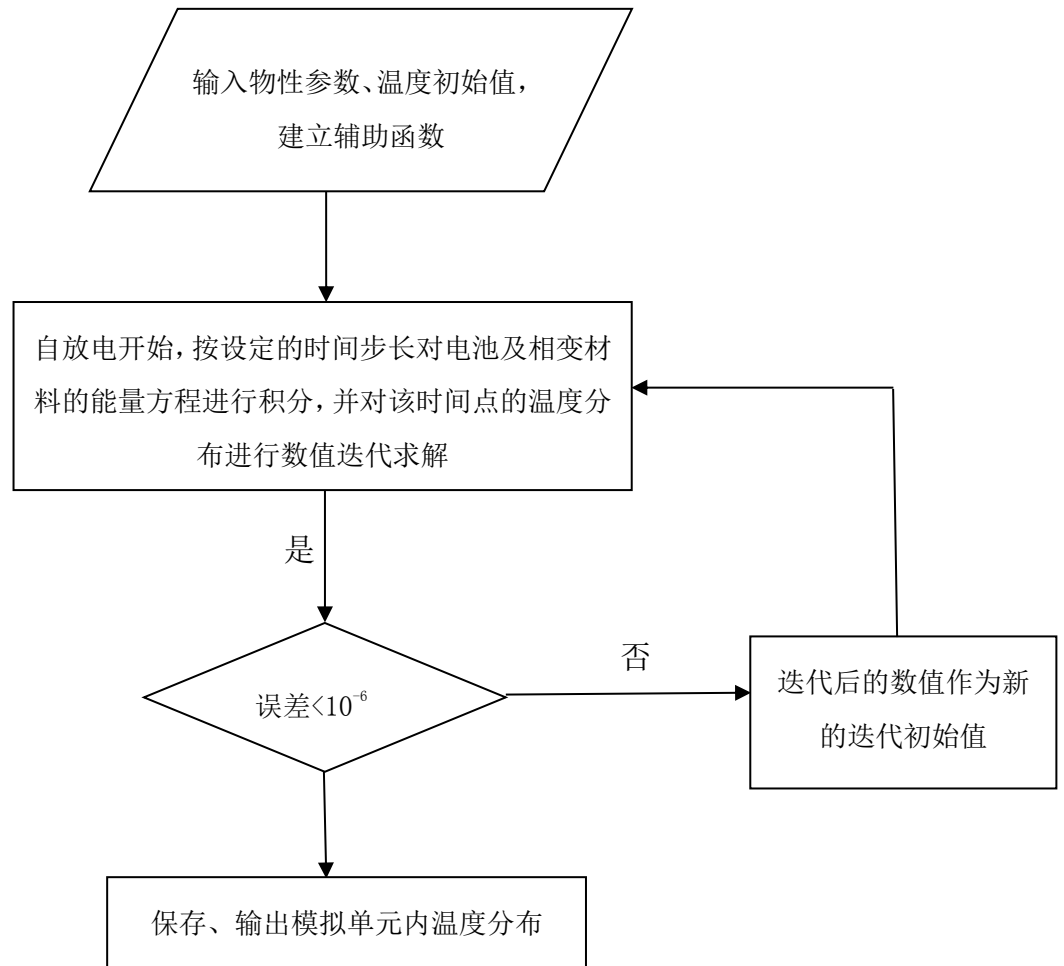


图 2-3 相变材料冷却电池求解流程图

Fig.2-3 Schematic block diagram of the simulation of battery cooling with PCM

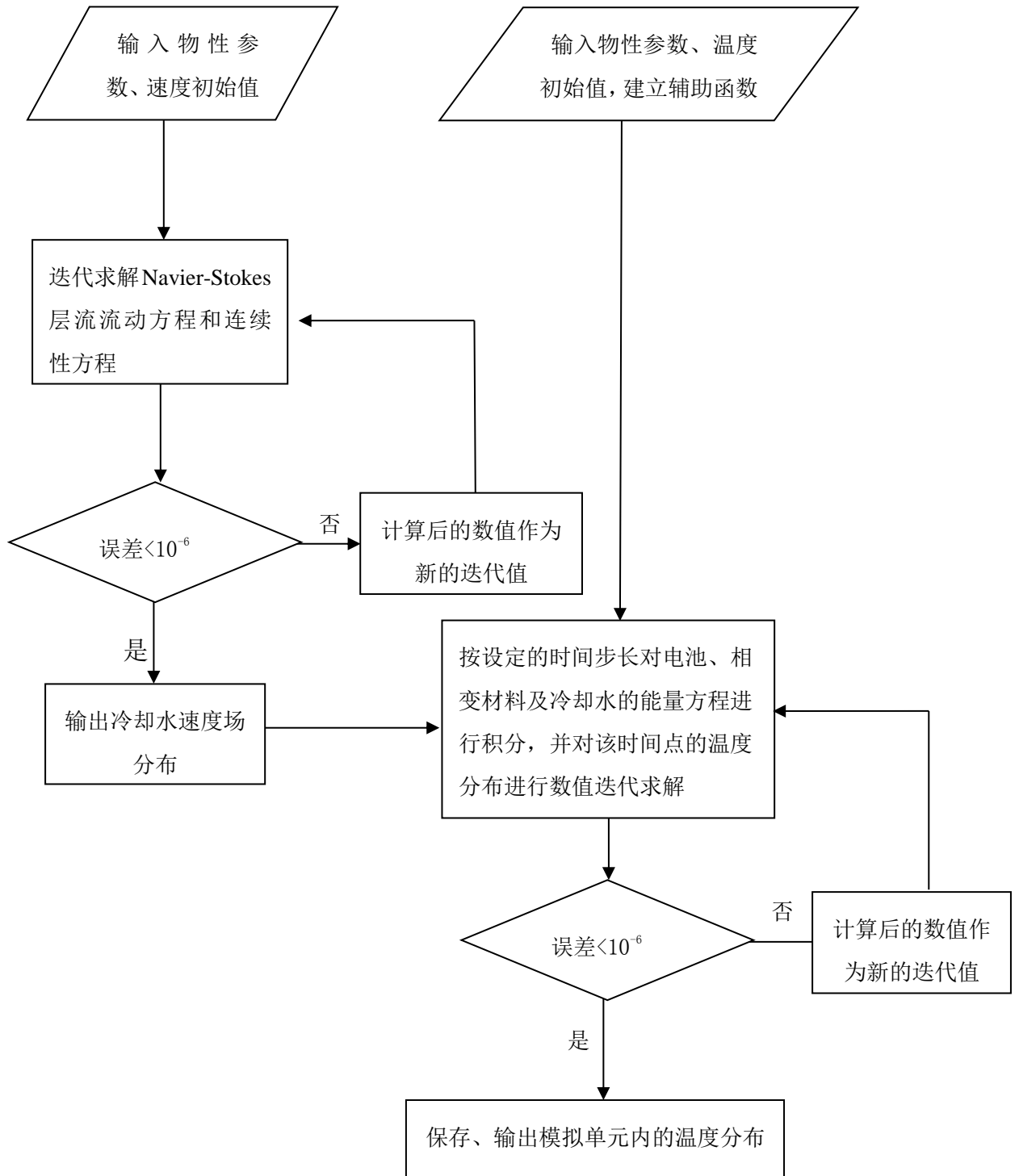


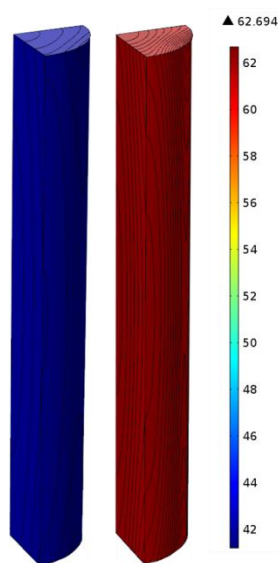
图2-4 水冷却以及相变材料-水协同冷却求解流程图

Fig.2-4 Schematic block diagram of the simulation of water cooling or PCM-water cooling

2.2 模拟结果

2.2.1 相变材料冷却

首先模拟了环境温度为 25°C ，不同放电倍率下采用相变材料作为冷却介质时电池的温升情况，取 2C 和 5C 两个放电倍率，结果见图 2-5。由图可知放电倍率为 2C 时，电池的最大温度为 42°C ，而放电倍率为 5C 时，电池的最大温度达到了 62.7°C 。因放电倍率越大，电池放出的热量越多，且放电时间短，相变材料与电池接触的时间短，因此电池的温度就越高。



(a)放电倍率 2C (b)放电倍率 5C

图 2-5 不同放电倍率下电池的温度分布图

Fig.2-5 Temperature distribution of battery at different discharge rates

为了更清楚的看出采用相变材料冷却法过程中电池的温度的变化趋势，取出了电池的体积平均温度随放电时间的变化图，结果见图 2-6。由图可知 2C 放电倍率时，电池的体积平均平均温度基本随放电时间而线性增加，放电完毕时电池的体积平均温度为 37.5°C 。此温度还未到达相变材料的熔点，因此它的潜热没有发挥作用。而放电倍率为 5C 时，电池的体积平均温度刚开始基本随放电时间线性变化，紧接着温度升高很平缓，近似一个等温平台，最后又接近线性升高，放电完毕时电池的温度为 62°C 。电池在温度区间 $40\sim 44^{\circ}\text{C}$ 内温度升高缓慢，这是因为相变材料在此温度区间发生了相变化，而相变材料在发生相变的过程中温度基本保持不变。

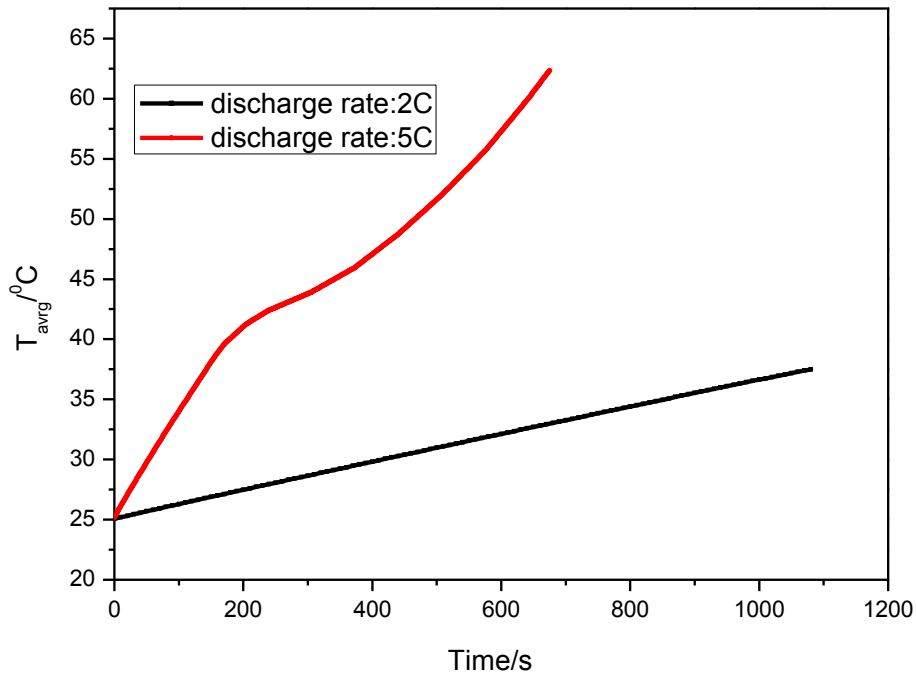


图 2-6 不同的放电倍率下 PCM 冷却时电池的体积平均温度随放电时间的变化图

Fig.2-5 The average temperature of battery with PCM cooling at different discharge time with different discharge rates

图 2-7 为放电倍率为 2C 和 5C 时相变材料的体积平均温度随放电时间的变化图。放电倍率为 2C 时，相变材料的温度也是随着放电时间的增加而线性增加的，到放电完毕相变材料还未发生相变。放电倍率为 5C 时，相变材料的温度先是线性变化；到了相变区间后温度缓慢上升，出现明显的温度平台；相变材料完全相变后温度又线性升高。相变材料的相变温度区间为 40~44℃，当温度低于此区间温度时，相变材料的潜热没有发挥作用，因此温度线性升高；而当温度高于此温度区间时，相变材料完全融化，因此温度又线性升高。

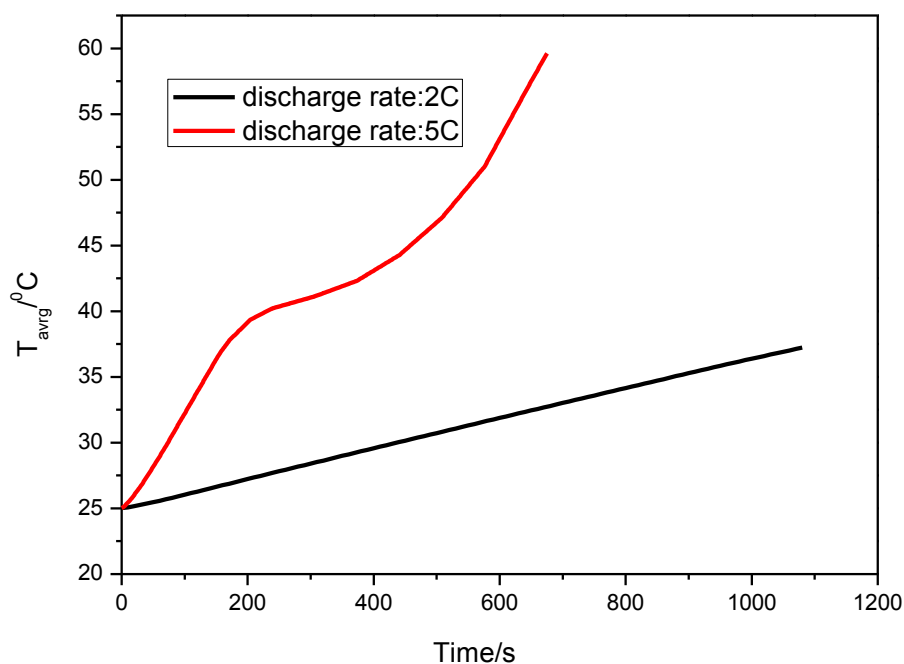


图 2-7 不同放电倍率下相变材料的平均温度随放电时间的变化图

Fig.2-7 The average temperature of PCM at different discharge time with different discharge rates

当环境温度改变时，对电池组的控温要求会有所提高。图 2-8 表示了环境温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ 时 2C 放电倍率下电池的平均温度随放电时间的变化图。由图可知，电池的平均温度在放电刚开始时快速升高，随后升高较缓慢，放电完毕后电池的温度仅为 41.7 $^{\circ}\text{C}$ ，仅比初始温度高了约 7 $^{\circ}\text{C}$ 。这说明相变材料的相变潜热发挥了较好的作用，对电池的温度进行了有效的控制。

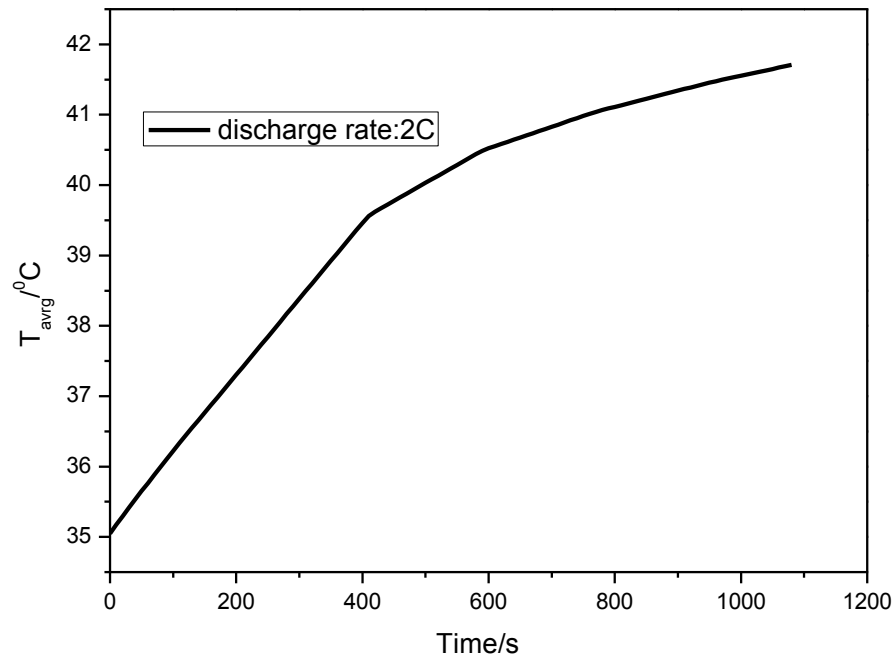


图 2-8 环境温度为 35℃、2C 放电倍率下电池的平均温度随放电时间的变化图

Fig.2-8 The average temperature of battery at different discharge time with 5C discharge rate and 35℃

2.2.2 相变材料-水协同冷却

2.2.2.1 单纯水冷却

由 2.2.1 节可知,在低倍率放电情况下,采用相变材料冷却法能较好的控制电池组的温度。即使在高温环境下,采用相变材料冷却法也能将电池的温度控制在合理的温度范围内。而在高倍率放电的情况下,采用相变材料冷却法将不能很好地控制电池的温度。这是由于相变材料的储热能力有限,当相变材料完全融化后其冷却作用完全靠自身吸热来发挥,而它本身并不具备散热能力。随着时间的积累,热量也会集聚从而导致整个电池组系统的温度急剧升高。由图 2-6 可知,在 5C 放电倍率下,采用相变材料冷却法时,电池放电完毕后温度高达 62.7℃,超过了锂离子电池正常工作温度范围,这将对电池造成不可逆转的损害。因此有必要对相变材料冷却法进行改进。

水是一种常用的冷却剂,其比热容较大、无污染、价格低廉,也常用作锂离子电池液体热管理系统的冷却介质。水冷却电池组系统是在电池之间布置冷却水管,冷却水管和电池之间的间隙中充满空气,电池散发出的热量先传递给空气,

再由空气传给流动的冷却水进而将热量带到外界。5C 放电倍率下，采用水冷却法时电池的体积平均温度随放电时间的变化见图 2-9。冷却水区域的半径为 3mm，水的流速为 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图可知随着放电时间的增加，电池的温度线性升高，放电结束时电池的平均温度达到了 83.7°C ，远远超过了锂离子电池的正常工作温度范围。这是由于在电池和冷却水之间充满了停滞的空气，而空气的导热系数非常小，传热热阻很大，很难快速的将电池散发出的热量传给冷却水进而将热量带到外界，冷却水的冷却能力并没有得到充分的利用。这说明在高倍率放电下，采用水冷却管理系统不能对电池组进行有效的温度控制，应对此冷却法继续改进。

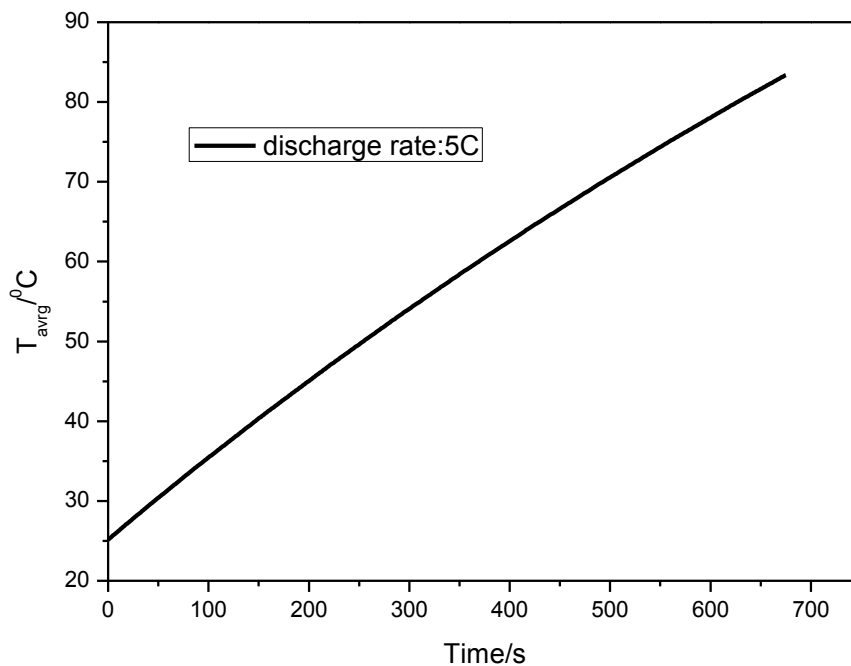


图 2-9 5C 放电倍率下采用水冷却法时电池的平均温度随放电时间的变化(冷却管半径为 3mm，水的流速为 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2-9 The average temperature of battery with water cooling at different discharge time with 5C discharge rate(the radius of water pipe is 3 mm; the velocity of water is $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.2.2.2 相变材料-水协同冷却

为了利用相变材料和冷却水各自的优点，可将相变材料冷却法和水冷却法结合起来，组成相变材料-水协同冷却法，即利用了相变材料较大的储热能力的优点，又利用了冷却水和外界进行热交换从而将热量散发出去的优点。5C 放电倍率下，采用相变材料-水协同冷却法时电池的平均温度随放电时间的变化见图

2-10。冷却水区域的半径为 3mm，水的流速为 0.1m/s。由图 2-10 可知，放电结束时电池的温度为 54.4℃。电池的温度在相变温度区间出现了缓冲段，上升较缓慢。结果表明，在 5C 放电倍率下相变材料-水协同冷却法能对电池组的温度进行有效控制。

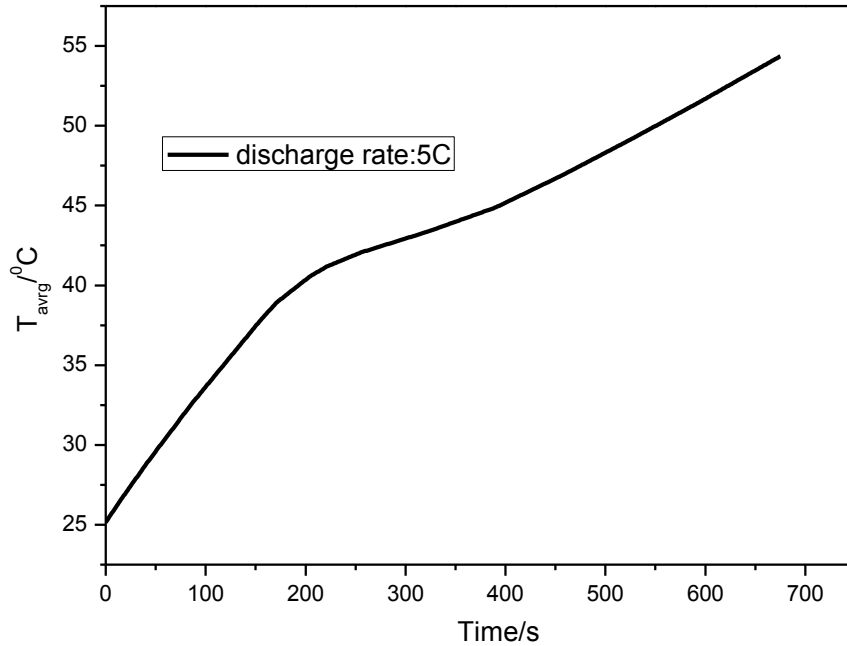


图 2-10 5C 放电倍率下采用相变材料-水协同冷却法时电池的平均温度随放电时间的变化
(冷却管半径 3mm，水流速 0.1 m·s⁻¹)

Fig.2-10 The average temperature of battery with PCM-water cooling at different discharge time with 5C discharge rate(the radius of water pipe is 3 mm; the velocity of water is 0.1 m·s⁻¹)

图 2-11 比较了 5C 放电倍率下，分别采用相变材料冷却法、水冷却法和相变材料-水协同冷却法时电池的平均温度随放电时间的变化。采用相变材料-水协同冷却法时，电池的平均温度比单纯采用相变材料冷却法时低约 8℃，比单纯采用水冷却法时低 29℃。相比采用相变材料冷却法时电池的温度曲线，采用相变材料-水协同冷却法时电池的温度曲线出现拐点的时间要晚一些，且温度平台持续的时间更长。这是由于相变材料不断的把电池散发出的热量传给冷却水，从而延缓了自身发生相变的时间。正是由于相变材料能持续的将热量传给冷却水进而将热量带到外界，电池的温度才会缓慢的升高。结果表明，在高倍率放电下，采用相变材料-水协同冷却法能有效的控制电池组的温度。

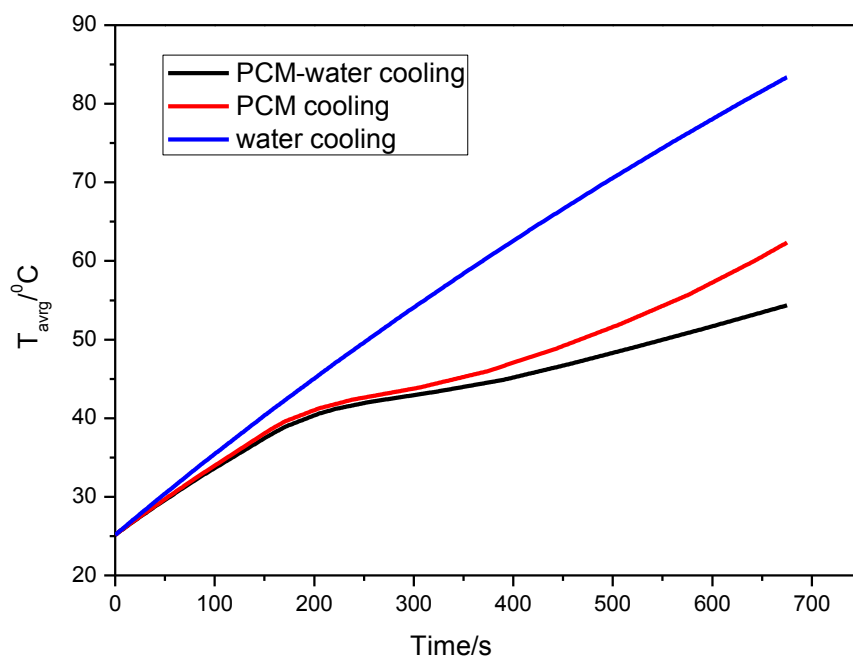


图 2-11 5C 放电倍率下采用不同冷却法时电池的平均温度随放电时间的变化(冷却管半径 3mm, 水流速 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2-11 The average temperature of battery with different cooling methods at different discharge time with 5C discharge rate(the radius of water pipe is 3 mm; the velocity of water is $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

改变冷却水的流速和冷却水管的管径都会对相变材料-水冷却法的控温效果有影响, 结果见图 2-12 和图 2-13。图 2-12 表示 5C 放电倍率下放电结束时电池的平均温度随冷却水流速的变化图, 其中冷却管的半径为 1mm。由图可知, 随着冷却水流速的增加, 电池平均温度下降, 下降幅度呈现先快速后缓慢的趋势。当水的流速大于 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 电池的温度下降很缓慢, 几乎保持不变。当冷却水的流速增加到一定程度时, 局部对流换热系数基本保持不变, 并不能有效地吸收电池传递给相变材料的热量, 从而不能快速的降低电池的温度。因此, 相变材料-水协同冷却法的控温效果并不是随着冷却水的流速增大而提高的。

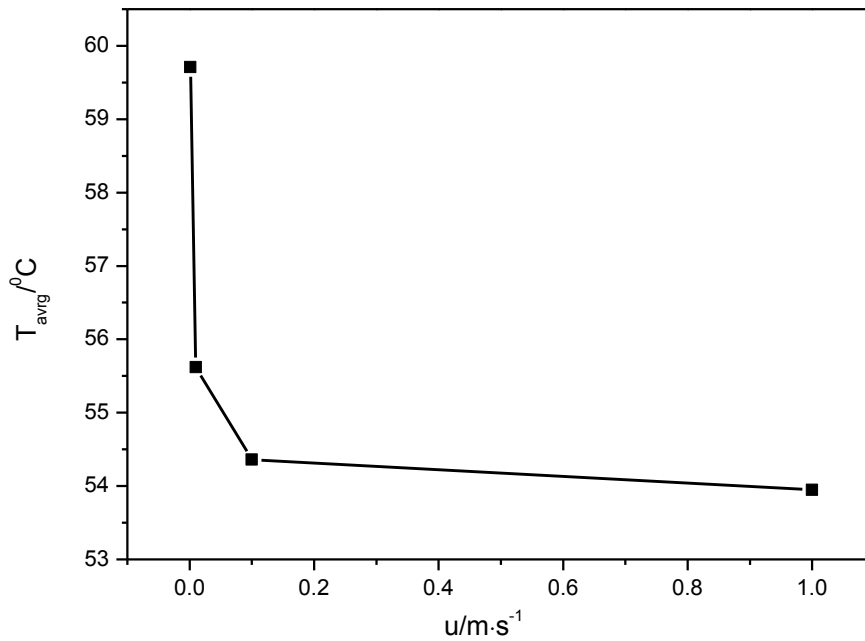


图 2-12 5C 放电倍率下放电结束相变材料-水协同冷却时电池的平均温度随冷却水流速的变化图(冷却管半径 1mm)

Fig.2-12 The average temperature of battery with PCM-water cooling at different velocity of water with 5C discharge rate(the radius of water pipe is 1 mm)

图 2-13 表示 5C 放电倍率下放电结束时电池的中心温度与电池表面的温度随冷却管管径的变化图。电池的表面紧挨着相变材料，能将电池表面散发出的热量传递给相变材料，所以整个电池区域电池表面的温度是最低的。而电池中心由于远离相变材料，散热较困难，在整个电池区域中温度是最高的。电池中心温度与电池表面的温度差即可反应整个单电池的温度均匀性。由图 2-13 可知，随着冷却管管径的增大，电池的中心温度与表面温度都降低，中心温度与表面温度的差值增大，也即电池的温度均匀性变差。因此冷却管的管径大小应根据控温目标来选择，并不是管径越大控温效果越好。

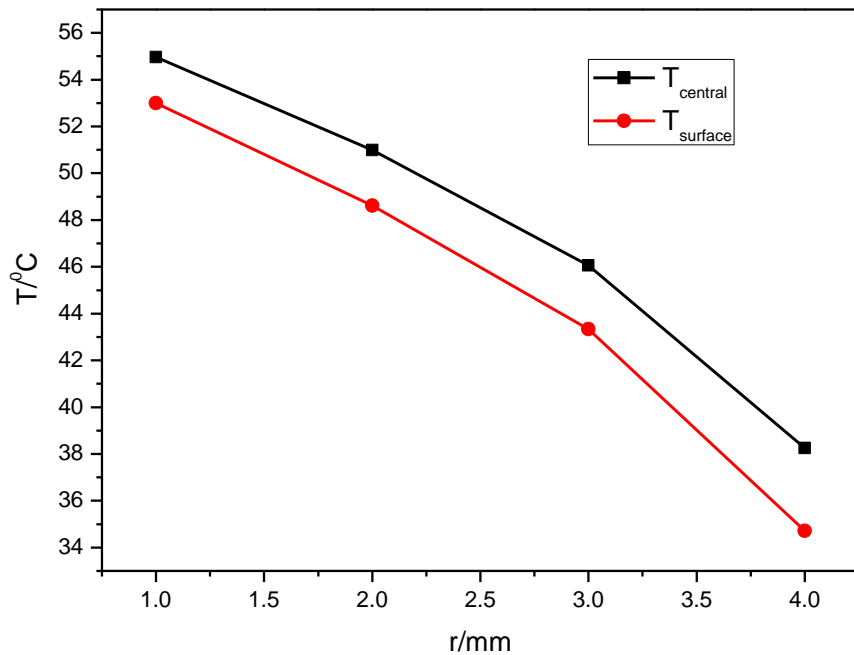


图 2-13 5C 放电倍率下放电结束电池中心温度和电池表面温度随冷却水管半径的变化图
(冷却水流速 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2-13 The temperature of battery with PCM/water cooling at different radius of water pipe with 5C discharge rate(the velocity of water is $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.3 本章小结

本章中模拟了采用相变材料冷却法、水冷却法以及相变材料-水协同冷却法对电池的控温效果。首先模拟了不同电池放电倍率下采用相变材料冷却法对电池组的控温效果。结果表明，2C 放电倍率下，采用相变材料冷却法能有效控制电池组的温度，即使在高温环境下，该方法也是有效的。5C 放电倍率下，单纯采用相变材料并不能有效控制电池的温度。因相变材料本身并不具备散热能力，当相变材料完全融化后，相变材料储存的热量不能及时散发到外界，导致整个电池组系统的温度急剧升高。鉴于此，本文提出了相变材料-水协同冷却法。结果表明，5C 放电倍率下，相变材料-水协同冷却法能将电池组的温度控制在 55°C 以内。随着冷却水流速的增加，该法的控温效果增强，但控温效果并不是随着流速的增加而线性增强的。因水的流速增加一定值以后，对流换热系数趋于定值，冷却能

力基本保持不变。随着冷却管管径的增大，电池中心温度和表面温度都降低，但是二者的温差值逐渐增大，也即电池的温度均匀性变差。因此，相变材料-水冷却系统中冷却水管的管径应根据控温要求来选择，并不能一味的增大冷却水管的管径。

第三章 翅片-空气协同冷却

空气冷却系统的优势在于结构简单、运行和维护成本低,但在环境温度较高、持续大电流放电等条件下,该系统不仅因所需空气的流速高以致能耗大大增加,还可能无法实现预期的控温目标^[58]。因此对传统的空气冷却法进行改进以扬长避短是电池组冷却系统设计的一种可能思路。由于铝材具有质量轻、导热性好、易于加工的特点,制作翅片式换热设备广为实用^[59]。本章我们提出了一种翅片-空气协同冷却的新方法。该方法利用翅片强化电池与空气之间的热交换从而实现高效散热并降低冷却系统的能耗。对翅片强化传热的机理也在本章进行了讨论。

3.1 模型建立过程

3.1.1 模拟单元的选取与模型假设

与相变材料冷却的模拟相似,对于翅片-空气协同冷却,模拟时依然采用选取模拟单元的处理方法以减小模型的计算量。图 3-1(a)为采用翅片-空气协同冷却的电池组示意图。在该电池组中,铝制翅片置于电池间隙中,翅片厚度与电池间距相等,翅片高度与电池高度相等;空气在电池与翅片围成的空隙中流动,与电池及翅片进行热交换从而带走热量。为简化计算,取电池组中的重复单元(即图 1(a)中红线框所示区域)为模拟区域,如图 3-1(b)所示。图 3-1(b)中箭头表示空气流动方向。对采用传统空气冷却方法的电池组进行模拟分析时,模拟单元的选取与图 3-1(b)所示类似,但模拟单元中不考虑翅片的存在,即图 3-1(b)中翅片所占区域由空气域代替。

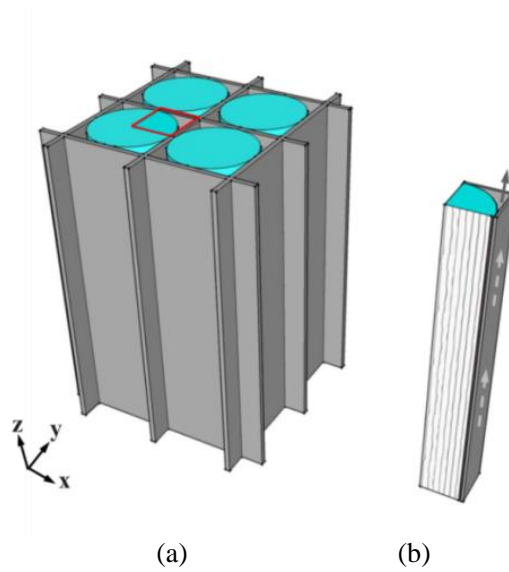


图 3-1 翅片-空气协同冷却电池组及模拟单元示意图

Fig.3-1 Schematic of (a) the fin-air cooled battery pack and (b) the selected simulation domain

为简化计算，我们设定：

- 1)电池的物性参数不随温度变化；
- 2)电池内部各处的产热速率相同；
- 3)电池表面的热辐射量相比于电池热传导量和对流换热量来说很小，可忽略；
- 4)空气的流动视为不可压缩流动。当空气的流速小于三分之一声速($113\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)时，可认为是不可压缩气体^[60]。本文中空气的流速远小于这个值，故空气的流动视为不可压缩流动。

3.1.2 控制方程和边界条件

3.1.2.1 控制方程

电池区域的能量方程具体表述为：

$$\rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{x,b} \frac{\partial T_b}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{y,b} \frac{\partial T_b}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{z,b} \frac{\partial T_b}{\partial z}) + Q_b \quad (3-1)$$

其中 ρ 表示电池的平均密度， C_p 表示平均比热容， $\lambda_{x,b}$ 、 $\lambda_{y,b}$ 、 $\lambda_{z,b}$ 分别表示电池不同方向上的导热系数， t 表示时间， T_b 表示电池的温度， Q_b 表示电池单位体积的产热速率。 ρC_p 、 $\lambda_{x,b}$ 、 $\lambda_{y,b}$ 、 $\lambda_{z,b}$ 、 Q_b 的计算公式见式(2-17)、(2-18)、(2-19)、(2-15)。

翅片内部的能量积累完全由热传导引起，其能量控制方程如下：

$$\rho_f C_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} + \lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z} \quad (3-2)$$

其中 ρ_f 、 $C_{p,f}$ 、 λ_f 分别表示翅片的密度、比热容、导热系数， T_f 表示翅片的温度。

空气内部的能量积累由热传导和热对流两部分引起，其能量控制方程如下：

$$\rho_a C_{p,a} \frac{\partial T_a}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_a \nabla T_a) + \rho_a C_{p,a} u_a \nabla T_a \quad (3-3)$$

其中 ρ_a 、 $C_{p,a}$ 、 λ_a 分别表示翅片的密度、比热容、导热系数， T_a 表示翅片的温度， u_a 表示空气的流速。

空气在翅片和电池之间的区域流动，质量守恒方程即连续性方程如下：

$$\nabla u_a = 0 \quad (3-4)$$

空气的速度控制方程采用不可压缩 Navier-Stokes 层流流动方程，如下：

$$\rho_a \frac{\partial u_a}{\partial t} = \rho_a g_a - \nabla p_a + u_a \nabla^2 u_a \quad (3-5)$$

其中 g_a 、 p_a 表示重力加速度和压强。

3.1.2.2 初始条件和边界条件

1) 初始条件

电池、翅片以及空气的初始温度与环境温度相同，为 25℃，方程如下：

$$T_b = T_f = T_a = 25^\circ\text{C} \quad (3-6)$$

空气的初始速度为定值，方程如下：

$$u_a = \text{constant} \quad (3-7)$$

2) 温度边界条件

电池与翅片的接触面上，流入该界面的能量等于流出该界面的能量：

$$\lambda_b \nabla T_b = \lambda_f \nabla T_f \quad (3-8)$$

电池与空气的接触面上，流入该界面的能量等于流出该界面的能量：

$$\lambda_b \nabla T_b = \lambda_a \nabla T_a \quad (3-9)$$

电池与空气以及电池与翅片的接触面两侧温度相等：

$$T_{b,\text{surface}} = T_{f,\text{surface}} \quad (3-10)$$

$$T_{b,\text{surface}} = T_{a,\text{surface}} \quad (3-11)$$

在整个电池组系统中，电池组上下表面会安置电路板，所以电池以及翅片上下表面近似绝热，即表面上没有能量通过，所以有：

$$\lambda_b \nabla T_b = 0 \quad (3-12)$$

$$\lambda_f \nabla T_f = 0 \quad (3-13)$$

相邻单元与单元之间的接触面为对称性边界，在此边界上能量的净传输量为零：

$$\lambda_b \nabla T_b = 0 \quad (3-14)$$

$$\lambda_f \nabla T_f = 0 \quad (3-15)$$

入口处，空气温度为固定值：

$$T_{a,\text{inlet}} = \text{constant} \quad (3-16)$$

3)速度边界条件

空气进口处为恒定速度边界，方程如下：

$$u_{a,inlet} = constant \quad (3-17)$$

空气出口为开放边界，设压强恒定为标准大气压：

$$p_a = p_0 = 101.325KPa \quad (3-18)$$

空气为牛顿型流体，它在电池及翅片表面流动时遵循牛顿粘性定律，其表面流动速度为零，方程如下。

$$u_{a,surface} = 0 \quad (3-19)$$

本研究中，模拟单元内的流场和温度场采用有限元方法进行求解，求解流程如图 3-2 所示。

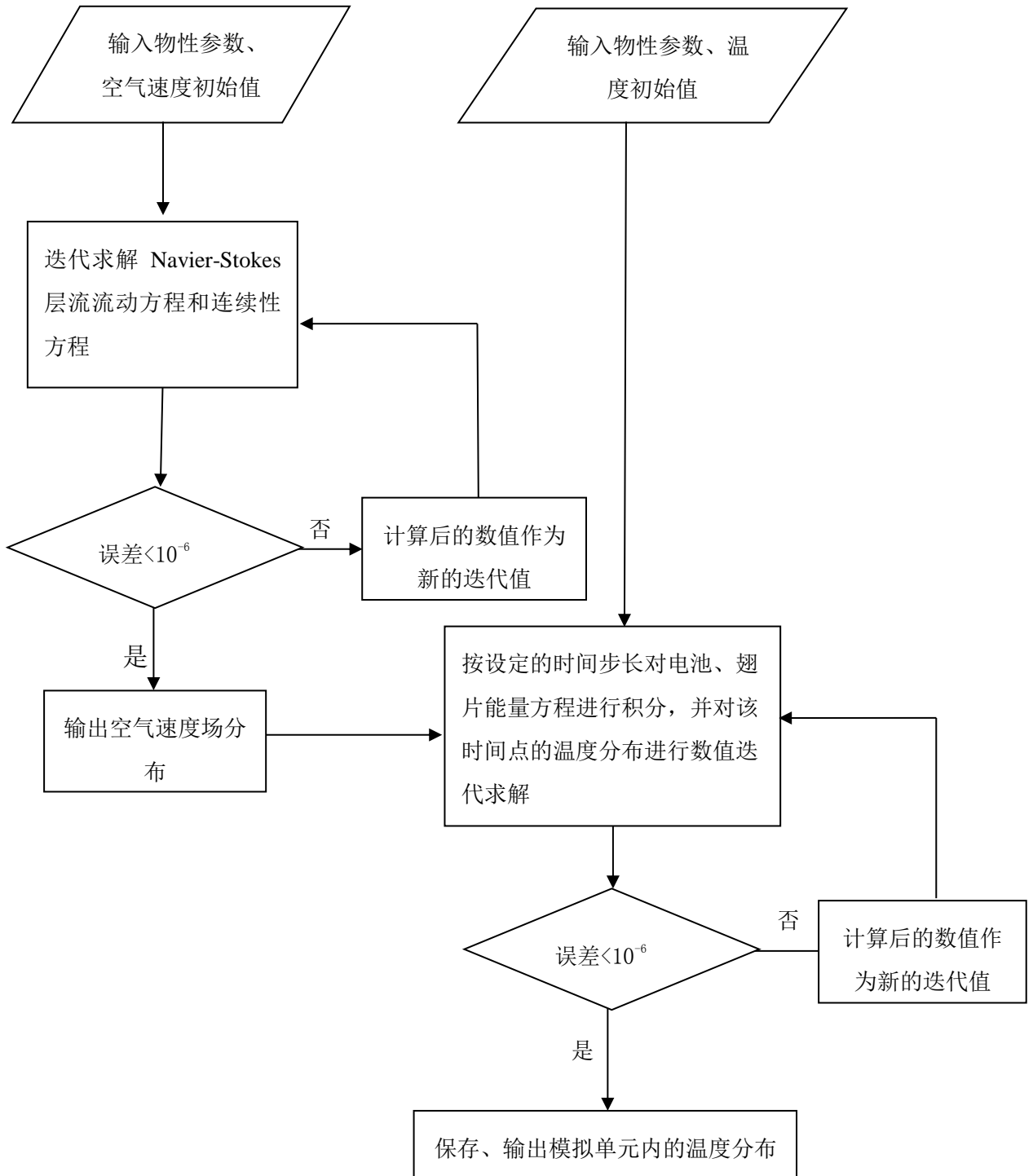


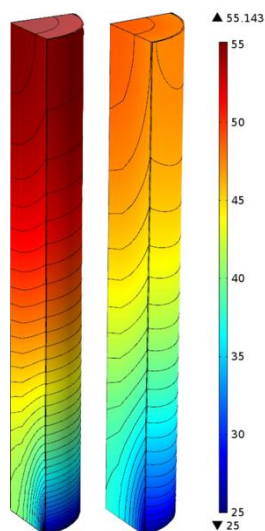
图3-2 模型计算流程图

Fig.3-2 Block diagram of the calculation process of the model

3.2 模拟结果与讨论

3.2.1 翅片-空气协同冷却

环境温度为 25°C 、 7C 放电倍率条件下，对分别采用空气冷却、翅片-空气协同冷却时电池的温度分布情况进行比较，如图 3-3 所示。两种方法中所用空气流速均为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 7C 放电倍率下，采用传统空气冷却法时，放电结束时电池的最大温度可达 55.1°C 。如果电池的放电倍率再增大，采用空气冷却法就有可能引发电池热失控。而采用翅片-空气协同冷却法时，电池的最大温度为 47.4°C ，相比于传统空气冷却，电池的最大温度降低了 8°C 。此外，由图 3-3(b)可知电池内部温度分布的均匀性也有明显提高。这说明翅片-空气协同冷却方法的散热能力远强于传统空气冷却方法。



(a)空气冷却 (b) 翅片-空气协同冷却

图 3-3 放电终止时空气冷却及翅片-空气协同冷却时电池的温度分布图(放电倍率 7C ，翅片厚度 0.2mm)

Fig.3-3 Temperature distribution of air cooled battery and the fin-air cooled at the end of discharge (discharge rate is 7C ;the thickness of fin is 0.2mm)

为进一步说明翅片-空气协同冷却法的优势，我们调整了传统空气冷却方法时所用的空气流速，以确保放电结束时电池最高温降低到与采用翅片-空气协同冷却方法时相同，并在此基础上对比了两种方法的送风能耗。送风能耗包括两部

分 1)空气在流道中流动的能量损失; 2)空气在入口处的初始动能, 这一部分能量也需要送风设备来提供。计算方程如下:

$$P = \Delta p(h \cdot u \cdot A) + 0.5\rho_a \cdot h \cdot u \cdot A \cdot u^2 \quad (3-20)$$

其中 P 表示功率; h 表示空气流道的长度, 此值等于电池的高度, 即 65mm; u 表示空气的流速; ρ_a 表示空气的密度; A 表示空气入口处的截面积; Δp 表示空气入口处与出口处的压力差。

由模拟可知, 若翅片-空气协同冷却法所用的空气流速保持 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不变, 为达到相同的冷却效果(此处是指两种冷却方法下使电池的最大温度相当), 我们需要调整空气的气速。为更明显的看出空气速度变化过程电池的温度变化, 分别取空气流速为 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 放电完毕时电池的温度分布图, 见图 3-4。由图可知当空气流速达到 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时电池的最大温度为 47.13°C , 此温度与翅片-空气协同冷却时电池的最大温度(47.4°C)相当。前一过程的总送风功率为 $5.8 \times 10^{-5}\text{W}$; 后一过程的总送风功率为 $2.5 \times 10^{-3}\text{W}$, 是前者的 43.1 倍。若以 Tesla model s 纯电动汽车所用电池组(由 6000 个 18650 型锂离子电池构成)为例, 采用翅片-空气协同冷却系统作为该车的冷却系统, 则所需送风功率为 1.39 W; 若采用空气冷却系统, 则所需送风功率为 60 W。该结果表明翅片-空气协同冷却方法在减少电池组热管理的能耗上具有巨大优势。

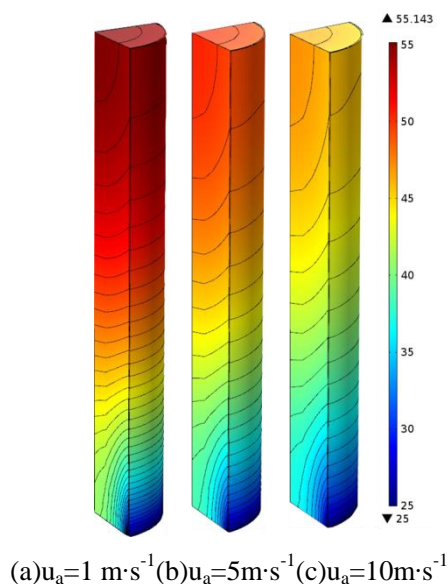


图 3-4 不同空气流速下空气冷却时电池的温度分布图(放电倍率 7C, 翅片厚度 0.2mm)

Fig.3-4 Temperature distribution of air cooled battery at different velocities of air(discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2mm)

此外, 翅片-空气协同冷却法在电池高倍率放电时更为适用。表 3-1 给出了电池以不同倍率放电完毕后电池的最大温度数据。由表中可知, 随着放电倍率的提高, 电池的最大温度也随之升高, 但采用翅片-空气协同冷却方法时该温度的升高幅度远小于采用传统空气冷却方法时的幅度。因此, 在需要电池进行高倍率放电的场合, 如电池应用于混合动力汽车时, 采用翅片-空气协同冷却方法将更有效地保障电池组的运行安全。

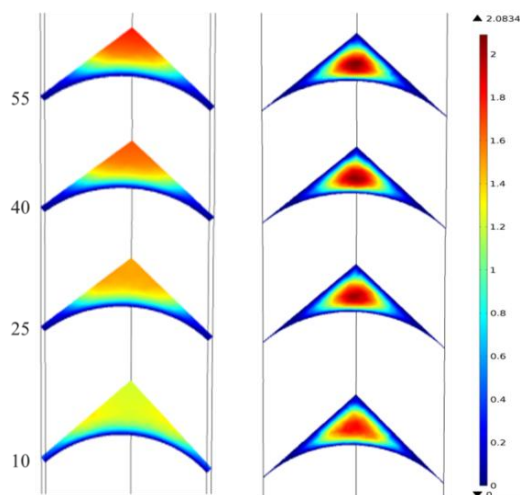
表 3-1 不同放电倍率下放电终止时电池的最大温度(翅片厚度 0.2mm)

Table 3-1 The maximum temperature after discharge of battery with different discharge rates

放电倍率/(C)	T_{\max} (空气冷却) ($^{\circ}\text{C}$)	T_{\max} (翅片-空气协同却) ($^{\circ}\text{C}$)
4	36.3	33.1
5	44.9	39.4
6	50.0	43.1
7	55.1	47.4

3.2.2 翅片强化传热机理

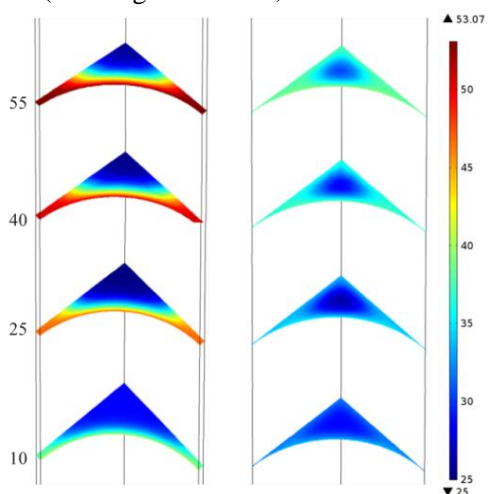
3.2.1 节的结果表明, 与传统空气冷却方法相比, 翅片-空气协同冷却方法能更有效地抑制电池的温升。为探究翅片强化传热的机理, 在传统空气冷却系统与翅片-空气协同冷却系统的空气流道高度方向上, 取电池放电完毕后空气流速截面图和温度截面图并进行对比, 结果如图 3-5 及图 3-6 所示。由图可见, 翅片加入前后, 流道中空气的流场发生了改变, 进而影响了空气的温度场。在传统空气冷却系统中, 热交换仅发生在电池与空气的交界面上, 流道中远离该交界面的空气的散热能力并未得到充分利用。而在翅片-空气协同冷却系统中, 电池产生的热量传递给翅片后, 空气与翅片的交界面上也会发生热交换, 即翅片是电池热量传递给空气的媒介。因此与传统空气冷却方法相比, 翅片-空气协同冷却方法能够增大传热面积, 从而能更有效地抑制电池的温升。



(a)空气冷却 (b) 翅片-空气协同冷却

图 3-5 空气冷却及翅片-空气协同冷却时空气速度截面图 (放电倍率 7C, 翅片厚度 0.2mm)

Fig.3-5 The sectional views of the air flow fields in(a) the air cooling system (b) the fin-air cooling system (discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2 mm)



(a) 空气冷却 (b) 翅片-空气协同冷却

图 3-6 空气冷却及翅片-空气协同冷却时空气温度截面图 (放电倍率 7C, 翅片厚度 0.2mm)

Fig.3-6 The sectional views of the air temperature fields in(a) the air cooling system (b) the fin-air cooling system (discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2 mm)

另一方面，电池传导给翅片的热量将从电池-翅片接触面沿翅片厚度、长度及高度方向传导。而翅片在其长度及高度方向上所接触的空气具有不同的温度。根据对流换热原理，翅片与空气的温差越大，在这两者间传热的推动力也就越大。因此在翅片与低温空气的交界面上，翅片向空气传热较快，带走的热量经由翅片内部的热传导得到迅速补充，从而强化了翅片与空气的整体传热。根据上述分析可推论，翅片内部在长度及高度方向上的热传导在翅片强化传热过程中将起重要

作用。为验证该推论，我们分别对翅片在厚度、长度及高度方向上的导热系数取较小值($1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)，模拟计算电池及翅片的温度分布，结果如图 3-7 及图 3-8 所示。由图 3-7 可知，分别限制了热量在翅片厚度、长度及高度方向的热传导后，电池的温度均有所提高，但提高幅度差别巨大。相比之下，限制翅片厚度方向的热传导对电池散热影响较小，这是由于翅片较薄，厚度方向导热系数变小也无法明显影响该方向的热量传递。限制翅片长度与高度方向的热传导对电池散热影响较大，这一结果与上述推论一致。远离电池表面的空气温度较低，与相应位置翅片间的传热较快，所以限制了翅片长度方向的热传导后，该处翅片上被带走的热量无法得到快速补充，导致翅片表面沿长度方向出现明显的温度梯度(见图 3-8(c))；翅片沿高度方向亦然(见图 3-8(d))。因此，翅片的作用除增大传热面积外，还在于能够迅速地将热量补充至传热较快的位置，使流道中温度较低的空气获得充分利用。这一机理也可用于解释翅片-空气协同冷却方法能够提高电池内部温度均匀性的现象。

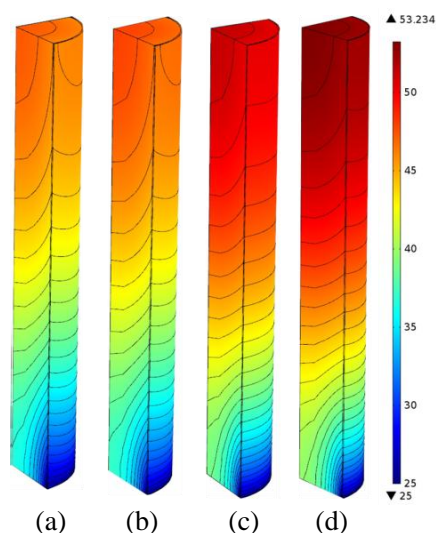


图 3-7 翅片各方向上的导热系数对翅片-空气协同冷却方法散热效果的影响(放电倍率 7C,翅片厚度 0.2mm),其中(a)为 $\lambda_{\text{thickness}}=\lambda_{\text{length}}=\lambda_{\text{height}}$, (b)为 $\lambda_{\text{thickness}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, (c)为 $\lambda_{\text{length}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, (d)为 $\lambda_{\text{height}}=1(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

Fig.3-7 The impact of the fin's thermal conductivity of each direction on the heat dissipation using the fin-air cooling method (the discharge rate is 7C; the thickness of fin is 0.2 mm)

(a) $\lambda_{\text{thickness}}=\lambda_{\text{length}}=\lambda_{\text{height}}$ (b) $\lambda_{\text{thickness}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (c) $\lambda_{\text{length}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
(d) $\lambda_{\text{height}}=1(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

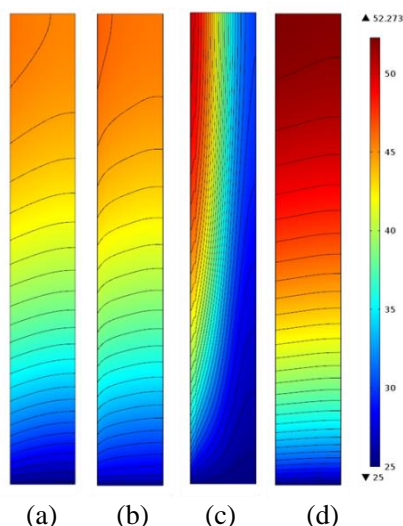


图 3-8 翅片各方向上的导热系数对翅片-空气协同冷却方法翅片温度的影响(放电倍率 7C,翅片厚度 0.2mm),其中(a)为 $\lambda_{\text{thickness}}=\lambda_{\text{length}}=\lambda_{\text{height}}$, (b)为 $\lambda_{\text{thickness}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, (c)为 $\lambda_{\text{length}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, (d)为 $\lambda_{\text{height}}=1(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$

Fig.3-8 The impact of the fin's thermal conductivity of each direction on the temperature of fins using the fin-air cooling method (the discharge rate is 7C; the thickness of fin is 0.2 millimeter) (a) $\lambda_{\text{thickness}}=\lambda_{\text{length}}=\lambda_{\text{height}}$ (b) $\lambda_{\text{thickness}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (c) $\lambda_{\text{length}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, (d) $\lambda_{\text{height}}=1(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$; (the discharge rate is 7C; the thickness of fin is 0.2 mm)

一般常用两个指标来表征电池组热管理系统的控温效果，一个是电池的最大温度，另一个是电池组各电池的温度差或者单体电池内部的温差。两种冷却方法下电池的最大温度比较已在 3.2.1 中讨论过。现为了进一步分析翅片强化传热的机理，取翅片-空气协同冷却法、限制翅片各个方向的导热系数(对翅片在厚度、长度及高度方向上的导热系数取较小值($1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$))后的冷却法及传统的空气冷却法下电池的温差并进行对比，见表 3-2。其中温差指电池上下表面的温度差值。由表 3-2 可知，相比采用传统的空气冷却法，采用翅片-空气协同冷却法时电池的温差下降了 5°C ，有很大程度上的降低。分别限制了热量在翅片厚度、长度及高度方向的热传导后，电池的温差均有所提高，但提高幅度差别较大。此结果和分别限制了热量在翅片厚度、长度及高度方向的热传导后电池的最高温度的提高趋势相同。加入翅片后，翅片的高导热性能减小电池的轴向温差，能够迅速地将热量补充至传热较快的位置，从而使电池的温度均匀性大幅度提高。

表 3-2 不同工况下放电结束时电池的最大温度和温差(放电倍率为 7C, 翅片厚度为 0.2mm)

Table 3-2 The maximum temperature and temperature difference of battery at different cooling methods(the discharge rate is 7C; the thickness of fin is 0.2 mm)

不同工况	$T_{\max}(\text{°C})$	$\Delta T(\text{°C})$
空气冷却	55.1	19.1
翅片-空气协同冷却($\lambda_{\text{thickness}}=\lambda_{\text{length}}=\lambda_{\text{height}}$)	47.4	14.2
翅片-空气协同冷却($\lambda_{\text{thickness}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	48.0	15.0
翅片-空气协同冷却($\lambda_{\text{length}}=1\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	51.4	16.7
翅片-空气协同冷却($\lambda_{\text{height}}=1(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$)	53.2	17.9

根据上述分析, 若需进一步强化翅片传热的能力, 则除了增大翅片的表面积外, 还可通过其它方法增强翅片的热传导能力。其中后者可通过两种方法实现: 1)增大翅片厚度; 2)增大翅片的导热系数。图 3-9 给出了翅片厚度对放电终止时电池温升的影响, 可知翅片厚度越大, 翅片-空气协同冷却方法的控温效果越好。这是由于增大翅片厚度能够增大翅片内部沿长度及高度方向热传导的截面积, 从而强化传热。但是翅片厚度增大意味着电池间距变大、翅片重量增加, 会导致电池组体积与重量增加, 因此在电池组热管理系统设计时应予以权衡。表 3-3 给出了翅片采用不同材料时电池的温升情况, 可知翅片材料的导热系数对翅片-空气协同冷却方法的控温效果有重要影响。这是由于导热系数越大, 翅片沿长度、高度方向及厚度方向的热阻就越小, 控温效果就越好。由前面的一系列分析可知, 翅片强化传热的原因包括两个方面, 一方面是增大传热面积, 另一方面是由于翅片的高导热性能够迅速地将热量补充至传热较快的位置, 使流道中温度较低的空气获得充分利用。

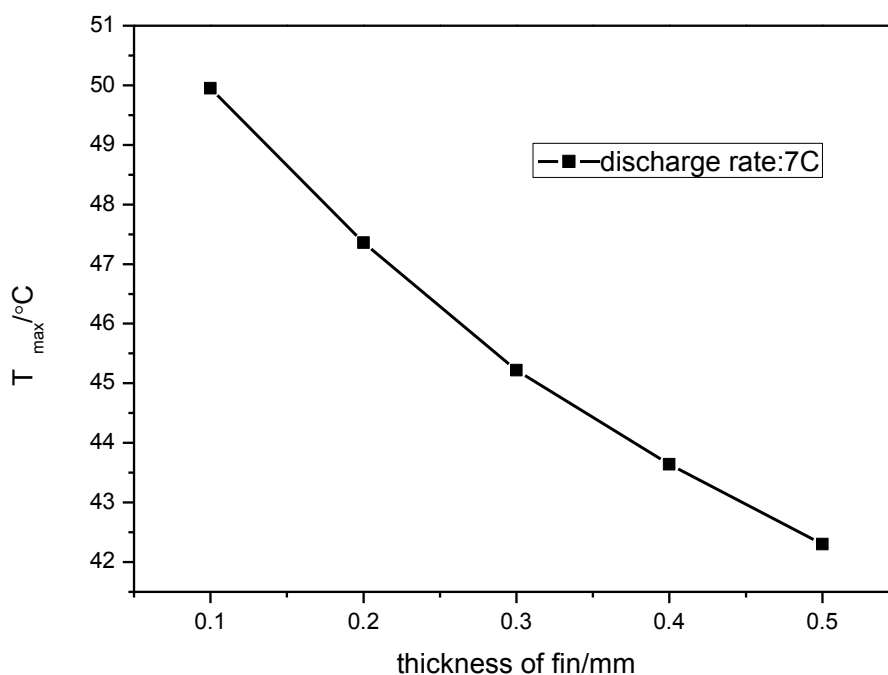


图 3-9 不同翅片厚度下电池放电终止时电池的最大温度图(放电倍率 7C)

Fig.3-9 The maximum temperature of battery at discharge end with different thickness of fins(the discharge rate is 7C)

表 3-3 翅片选用不同材料电池放电终止时电池的最大温度 (放电倍率为 7C, 翅片厚度为 0.2mm)

Table 3-3 The maximum temperature of battery at discharge end with different material of fins(the discharge rate is 7C; the thickness of fin is 0.2 mm)

	导热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$
铜	400	42.3
铝	160	47.4
铁	76.2	50.1
铅	35.3	51.8
塑料	0.18	55.4
无翅片	—	55.1

3.3 本章小结

本章通过数值模拟检验了翅片-空气协同冷却方法的控温效果，并将结果同采用传统的空气冷却法的结果进行对比。结果表明，与传统空气冷却方法相比，翅片-空气协同冷却法不仅能有效降低电池的最大温度，提高单电池内部温度分布的均匀性，还在很大程度上降低了空冷散热的能耗。电池的放电倍率越大，翅片-空气协同冷却的控温效果就越明显。对翅片强化传热机理的分析表明，相比与传统的空气冷却，翅片增大了传热面积，而且还能够通过内部热传导强化与流道中温度较低空气的传热，从而有效抑制了电池的温升。对比在相同放电倍率下采用空气冷却法和翅片-空气协同冷却法时电池的上下表面的温差值，可知翅片的高导热性能减小电池的轴向温差，从而提高电池的温度均匀性。根据翅片强化传热机理可知，增大翅片厚度及选择导热系数大的材料均能提高翅片-空气协同冷却法的控温效果。

第四章 翅片形状对翅片-空气协同冷却控温效果的影响

由第三章给出的结果可知,采用全翅片(即翅片高度与电池高度相等,翅片宽度与电池半径相等)增强空气冷却法的控温效果时,电池的最大温度在 47.5°C 以下,低于锂离子电池工作时的最大允许温度(55°C)。因此,可适当减小翅片面积,在尽可能保持翅片-空气协同冷却法控温能力的同时,减少翅片的用量以减轻电池组重量。我们用尺寸不同的矩形和工字型翅片构成一系列翅片-空气协同冷却系统,并通过数值模拟分析这些冷却系统的控温效果,其结果将在本章中给出。

4.1 模型建立

4.1.1 模拟单元的选取

对于翅片-空气协同冷却电池组系统,当采用不同尺寸的矩形和工字型翅片时,仍选取电池组中的重复单元进行模拟,模拟单元如图4-1所示。图4-1中蓝色区域为电池域,红色区域为翅片域,空气在电池和翅片的空隙间流动进而带走电池散发出的热量。图4-1(a)中所示翅片为矩形,该翅片上端与电池上表面齐平,下端所处位置由该翅片的高度决定;图4-1(b)中所示翅片为工字型,该翅片上下端分别与电池的上下表面齐平,翅片中部靠近电池侧被裁去以减小翅片面积。两种翅片的二维示意图如图4-2所示。图中 H 指翅片的高度, Δx 与 Δy 分别代表工字型翅片被裁去部分的宽度以及高度,被裁去部分的面积为 Δx 乘以 Δy 。

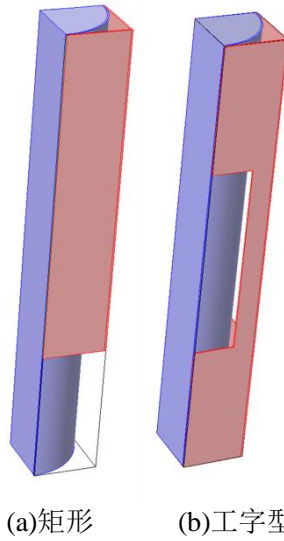


图 4-1 采用不同形状翅片时电池模拟单元示意图

Fig.4-1 Schematic of the selected simulation domains with different forms of fins

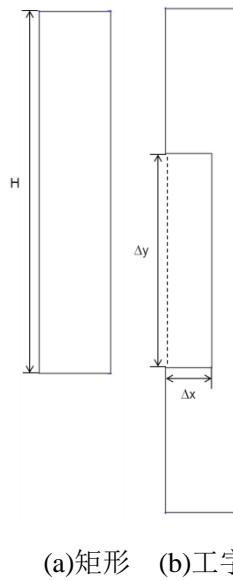


图 4-2 相同换热面积下两种形状的翅片的二维平面示意图

Fig.4-2 Schematic of fins with different shapes

4.1.2 控制方程与边界条件

与第三章中的模型相比，本章中只是对翅片的尺寸进行了改变，电池以及翅片的控制方程以及温度边界条件、速度边界条件都没有发生变化。

求解过程中所需的物性参数见表 2-1，求解流程如图 3-2 所示。

4.2 模拟结果

4.2.1 矩形翅片-空气协同冷却

为考察矩形翅片的面积对翅片-空气协同冷却法控温效果的影响,模拟计算了矩形翅片高度从0变化到65mm(即翅片面积从 0mm^2 变化到 585mm^2)时电池放电完毕后的温度情况,见图4-3。模拟时通过增加翅片的高度来增加翅片的面积,翅片的长度保持不变,与电池的半径大小相同。

由图4-3可知,在7C放电倍率下,随着翅片高度的增加,电池的最大温度逐渐降低,该温度的降低并不随着高度的增加而线性变化,而是呈现先快后慢再变快的趋势。这是由于采用翅片-空气冷却法冷却电池时,空气与翅片的接触面上会重新形成速度边界层。此速度边界层会沿着空气流动方向不断增厚,直至充分发展。当翅片高度很小时,速度边界层较薄,因而热阻较小,翅片与空气之间的对流换热系数大,有利于传热。而随着翅片高度的逐渐增大,边界层逐渐变厚,对流换热系数沿翅片高度方向增加的趋势逐渐变小,因此电池最大温度的降低逐渐变缓。当翅片高度增加增大到一定程度时,速度边界层充分发展,局部对流换热系数保持不变,此时电池最大温度的降低主要由翅片面积增大所致,所以图4-3所示曲线的中段呈现线性变化规律。翅片面积进一步增大时,翅片不断接近空气入口处。由于入口处空气温度较低,在无翅片时并不能与电池发生充分的热交换,所以具备高导热系数的翅片延伸至空气入口处后,可将电池上部积累的热量通过翅片内热传导传递给入口空气,从而强化传热,使得电池最大温度的下降再次变快。

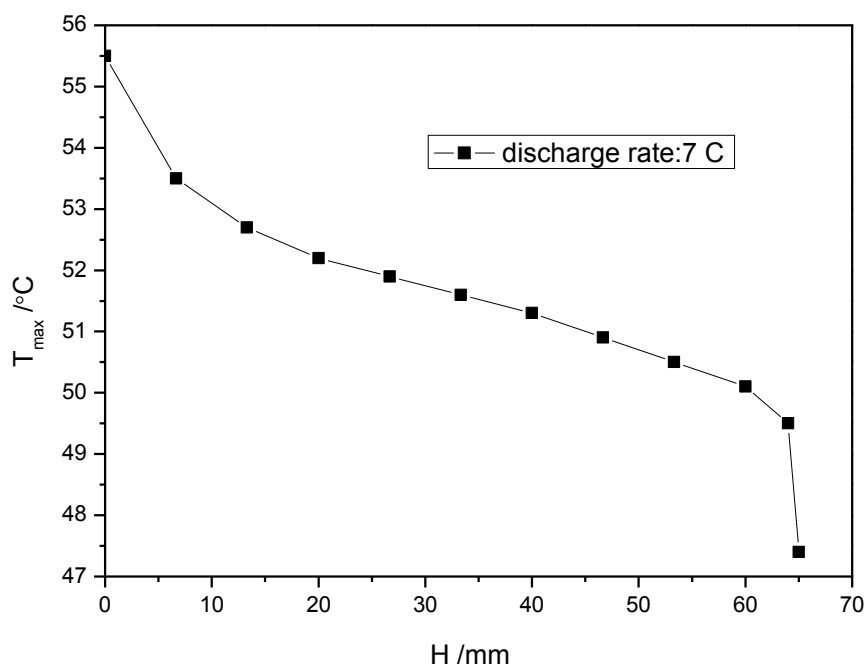


图 4-3 不同的翅片高度下电池的最大温度图(放电倍率为 7C, 翅片厚度为 0.2mm)

Fig.4-3 The maximum temperature of battery with fins of different heights(the discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2 mm)

4.2.2 工字型翅片-空气协同冷却

从图 4-4 可以看出,随着翅片高度的增大,电池最大温度下降的幅度遵循由快变慢而后又变快的趋势。这说明对电池冷却贡献较大的部分为靠近空气入口处与靠近空气出口处的翅片。基于此种分析,我们设计了一种工字型翅片,即适当挖去位于中部的翅片,使翅片上下对称成工字形,如图 4-2(b)所示。设计工字型翅片的目的在于尽可能保持翅片散热能力的同时减小翅片的用量,进而减轻整个电池组的重量。

为了对比工字型翅片和矩形翅片的冷却能力,模拟计算了相同的放电倍率以及相同换热面积下电池的最大温度,模拟结果见图 4-4。工字型翅片的中间部分全部被截掉,即所截宽度等于翅片宽度。从图 4-4 可知,随着翅片高度的增加,电池的最大温度是逐渐降低的。当翅片高度非常小时,由于工字型翅片的中间完全被截断,电池顶部的热量无法通过靠近空气出口处的翅片传给靠近空气入口处的翅片,所以靠近空气入口段的翅片的冷却能力基本没有发挥作用,这就导致了采用工字型翅片的控温效果比采用矩形翅片的稍微差一些。随着翅片高度的增加,

速度边界层逐渐建立。在工字型翅片-空气协同冷却过程中，空气在翅片和电池的间隙中流动时，速度边界层经历了两次重建。速度边界层的每一次重新建立，都要经历从入口段发展为充分发展段的过程。由于在速度的入口段，边界层很薄，流动阻力小，对流换热系数大，因此可以强化传热。采用矩型翅片-空气协同冷却时，空气在翅片和电池的间隙中流动时，速度边界层只经历了一次重建。由图 4-4 可知，工字型翅片能够充分利用空气入口和出口附近翅片的高散热能力。总体来说，相比与矩形翅片-空气协同冷却，采用工字型翅片-空气协同冷却对电池的控温效果更优异。

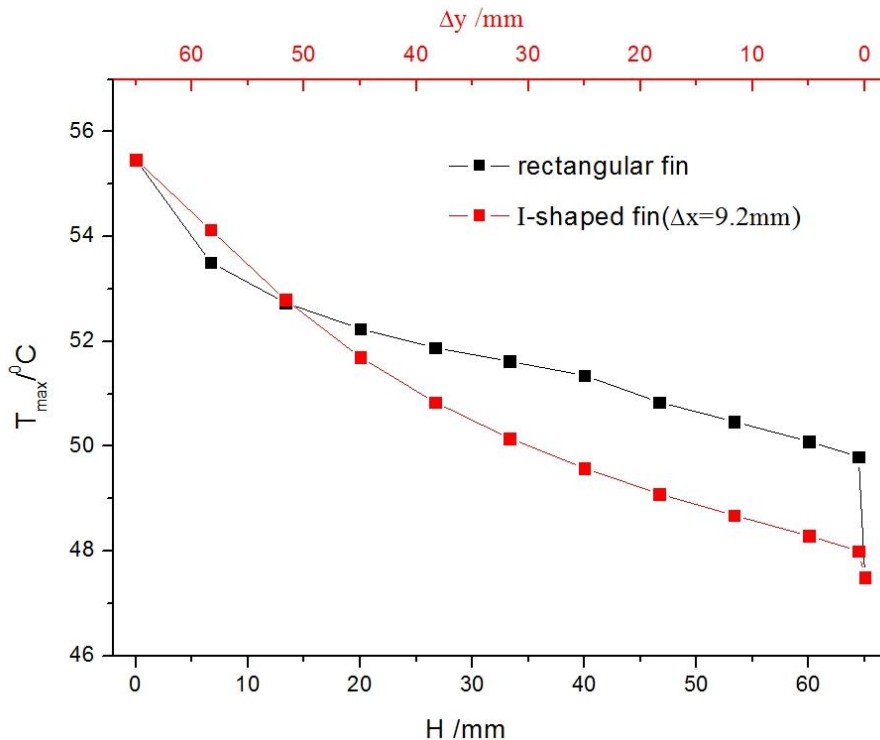


图 4-4 不同形状的翅片不同对流换热面积下放电结束时电池的最大温度图(放电倍率为 7C, 翅片厚度为 0.2mm)

Fig.4-4 The maximum temperature of battery at discharge end with different heat transfer area of fins(the discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2 mm)

对工字型翅片-空气协同冷却法的控温效果进行分析可知工字型翅片被裁去部分的宽度 Δx 以及高度 Δy 对控温结果有显著影响，结果见图 4-5。由图 4-5 可知，当翅片面积一定时，在翅片宽度 Δx 的变化过程中，电池的最大温度存在最小值。当工字型翅片中间部分全部截掉(即 Δx 等于 9.2mm)时，电池顶部的热量很难通过靠近空气出口处的翅片传到靠近空气入口处的翅片。因此工字型翅片截断之后，采用翅片-空气协同冷却法时对电池的控温效果就会变差。当 Δx 较大时，

远离电池端温度较低的翅片区域过少，控温效果变差。当 Δx 太小时，相应的 Δy 较大，此时靠近空气入口与空气出口处传热效果较好的翅片区域过少，控温效果变差。因此翅片被截掉的宽度存在最优值，即图 4-6 中曲线的最低点处对应的 Δx 的值。在此最优值时，靠近空气入口处与出口处的翅片区域以及远离电池端翅片与空气温差较大的区域都被保留下来，而在这些区域翅片的传热效果最好，因此温控温效果最优。由图可知在不同的翅片面积下，采用翅片-空气协同冷却法时电池的温度均低于 55°C ，都能使锂离子电池正常工作。

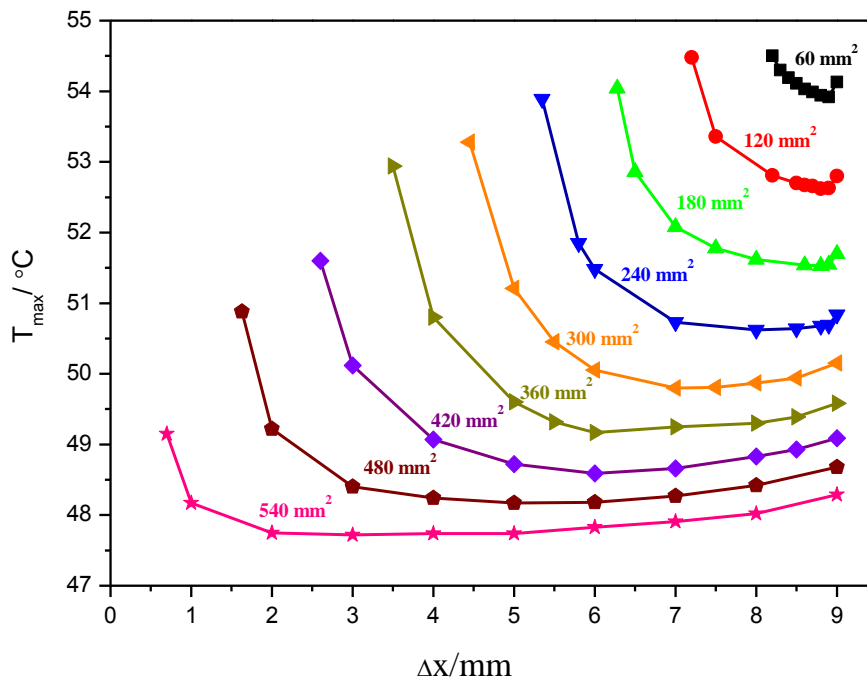


图 4-5 不同宽度的工字型翅片下采用翅片-空气协同冷却法放电完毕时电池的最大温度图
(放电倍率为 7C，翅片厚度为 0.2mm)

Fig.4-5 The maximum temperature of battery at discharge end with different height of I-shaped fins cooling((the discharge rate is 7C;the thickness of fin is 0.2 millimeter)

以 Tesla model s 纯电动汽车所用电池组(由 6000 个 18650 型锂离子电池构成)为例，若采用工字型翅片-空气协同冷却法，选取换热面积为 420mm^2 的工字型翅片，当 $\Delta x=6\text{mm}$ ，电池的最大温度为 48.6°C ；若采用矩形全翅片-空气协同冷却法，电池的最大温度为 47.4°C 。相比于矩形全翅片-空气协同冷却，采用工字型翅片-空气协同冷却法，电池的最大温度只升高了 1.2°C ，但电池组系统的重量减轻了 24kg。该数据表明采用工字型翅片-空气协同冷却法，能在满足控温要求的前提下有效减轻电池组的重量。因此可根据实际工况下对电池组的控温要求来灵

活选择翅片的尺寸,在满足控温要求的情况下适当减少翅片的用量以减轻电池组的重量。

4.3 本章小结

本章主要采用数值模拟的方法分析了翅片形状对翅片-空气协同冷却法控温效果的影响。结果表明随着矩形翅片高度的增加,采用翅片-空气协同冷却法时电池的最大温度下降,且呈现先快后慢再变快的趋势。随着矩形翅片高度的增加,空气与翅片接触时速度边界层经历了入口段到充分发展段的过程。在入口段边界层较薄,传热阻力小,在充分发展段边界层的厚度基本固定,对流传热系数基本保持不变,因此平均对流换热系数变小,控温效果变差。根据电池温度下降的趋势可知靠近空气入口处以及出口处的翅片区域传热下过最好,因此设计出工字型翅片,旨在满足控温要求的前提下减轻电池组的质量。在相同的放电倍率下,比较了相同的翅片面积下采用矩型翅片和工字型翅片(此时 $\Delta x=9\text{mm}$)时电池的最大温度,结果表明采用工字型翅片-空气协同冷却的控温效果更好。对工字型翅片的尺寸进行优化可知,在确定的翅片面积下,改变翅片尺寸的过程中电池的温度存在最小值。采用翅片-空气协同冷却法时电池的温度均低于 55°C ,都能使锂离子电池正常工作。因此可根据实际工况下对电池组的温度要求来灵活选择翅片的宽度,在保证满足控温要求的前提下可有效减轻电池组的重量。

第五章 结论

本文对电动汽车用锂离子电池组在不同的散热结构下的温度情况进行了数值模拟,考察了电池组在不同放电环境下电池的温度分布情况。通过建立三维模型,详细的分析了相变材料冷却以及相变材料-水协同冷却的控温效果。还提出了翅片-空气协同冷却新方法,并研究了翅片的高度以及宽度对电池控温效果的影响。对模拟结果的分析得出以下结论:

(1)高倍率放电时,单纯采用相变材料并不能有效控制电池的温度。因相变材料本身并不具备散热能力,当相变材料完全融化后,相变材料储存的热量不能及时散发到外界,导致整个系统的温度都升高。鉴于此,本文提出了相变材料-水协同冷却法。结果表明,高倍率放电下,相变材料-水协同冷却法能将电池组的温度控制在 55°C 以内。随着冷却水流速的增加,该法的控温效果增强,但控温效果并不是随着流速的增加而线性增强的。随着冷却管管径的增大,电池中心温度和表面温度有降低,但是二者的温差值逐渐增大,也即电池的温度均匀性变差。

(2)本文还提出了翅片-空气协同冷却法。对翅片强化传热机理的分析表明,相比与传统的空气冷却,翅片增大了传热面积,而且还能够通过内部热传导强化与流道中温度较低空气的传热,从而有效抑制了电池的温升。对比在相同放电倍率下,采用空气冷却法和翅片-空气协同冷却法时电池的上下表面的温差值,可知翅片的高导热性能减小电池的轴向温差,从而提高电池的温度均匀性。根据翅片强化传热机理可知,增大翅片厚度及选择导热系数大的材料均能提高翅片-空气协同冷却法的控温效果。

(3)翅片的性质决定了翅片-空气协同冷却法的控温效果,因此对不同形状的翅片的控温效果进行模拟研究。结果表明,随着矩形翅片高度的增加,采用翅片-空气协同冷却法时电池的最大温度下降,且呈现先快后慢再变快的趋势。从电池的最大温度随着翅片面积变化的趋势可知,靠近空气入口处和出口处翅片的冷却能力较强,因此提出了工字型翅片-空气协同冷却法,旨在减轻电池组的重量。在相同的放电倍率下,比较了相同的翅片面积下采用矩型翅片和工字型翅片时电池的最大温度,结果表明采用工字型翅片-空气协同冷却的控温效果更好。对工字型翅片的尺寸进行优化可知,在确定的翅片面积下,改变翅片尺寸的过程中电池的最大温度存在最小值。采用翅片-空气协同冷却法时电池的温度均低于 55°C ,都能使锂离子电池正常工作。因此可根据实际工况下对电池组的温度要求来灵活选择翅片的宽度,在保证满足控温要求的前提下可有效减轻电池组的重量。

符号说明

参数

C_p	比热容	$(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
λ	导热系数	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Q	电池单位体积产热速率	$(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$
T	温度	(K)
ρ	密度	$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
t	时间	(s)
I	电流	(A)
V	体积	(m^3)
m	质量	(Kg)
d	厚度	(m)
E	电压	(V)
R	电阻	(Ω)
u	速度	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$

下标

b	电池
a	空气
w	水
f	翅片
PCM	相变材料
0	初始
avg	平均值
max	最大值

参考文献

- [1]麻友良, 严云兵, 电动汽车概论, 北京: 机械工业出版社, 2012
- [2]李涛, 纯电动汽车锂离子电池热效应及电池组散热结构优化: [硕士学位论文], 重庆: 重庆大学, 2013
- [3]黄华, 邱森, 李献菁, 车用替代能源动力性、排放性研究, 装备制造技术, 2006, 4: 29-31
- [4]饶中浩, 锂离子动力电池强化传热关键技术研究: [硕士学位论文], 广州: 广东工业大学, 2010
- [5]Scrosati B, Lithium rocking chair batteries: an old concept. *Journal of The Electrochemical Society*, 1992, 139(10): 2776-81
- [6]Gozdz AS, Schmutz CN, Tarascon J-M, Rechargeable lithium intercalation battery with hybrid polymeric electrolyte. *Google Patents*, 1994
- [7]张娜, 动力锂离子电池正极材料锰酸锂的开发及应用研究: [博士学位论文], 天津: 天津大学, 2005
- [8]Mousavi M, Hoque S, Rahnamayan S, et al., Optimal design of an air-cooling system for a Li-Ion battery pack in Electric Vehicles with a genetic algorithm. *Evolutionary Computation (CEC)*, 2011, 1848-55
- [9]Dunn B, Kamath H, Tarascon JM, Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 2011, 334(6058): 928-35
- [10]李国防, 李琪, 近三年来锰酸锂二次锂电池的研究进展, 石油化工高等学校学报, 2003, 16(1): 72-7
- [11]康彩荣, 沈丽娜, 丁毅等, 锂离子电池正极材料锰酸锂的制备与改性研究, 无机盐工业, 2009, 41(2): 10-3
- [12]张学广, 张旭东, 何文等, 锂离子电池正极材料磷酸铁锂的研究进展, 山东陶瓷, 2011, 34(1): 17-21
- [13]徐仲榆, 郑洪河, 锂离子蓄电池碳负极/电解液相容性研究进展, 电源技术, 2000, 24(3): 171-7
- [14]Chacko S, Chung YM, Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles. *Journal of Power Sources*, 2012, 213: 296-303
- [15]车杜兰, 周荣, 乔维高, 电动汽车电池包散热加热设计, 北京汽车, 2010, 1(5): 1-4
- [16]唐志军, 朱群志, 热管理技术应用于动力电池的研究, 电源技术, 2013, 37(1): 103-6

- [17] 司戈, 王青松, 锂离子电池火灾危险性及相关研究进展, 消防科学与技术, 2012, 31(9): 994-6
- [18] Jung DY, Lee BH, Kim SW, Development of battery management system for nickel-metal hydride batteries in electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 2002, 109(1): 1-10
- [19] 雷志国, 张承宁, 电动汽车电池组热管理系统的研究进展, 电源技术, 2011, 35(12): 1609-1612
- [20] Pesaran AA, Burch S, Keyser M, An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs. *Proceedings of the 4th Vehicle Thermal Management Systems*, 1999: 24-7
- [21] Zolot M, Pesaran A, Mihalic M, Thermal evaluation of Toyota Prius battery pack. *FutureCar Conference*, 2002, 01-1962
- [22] Chen SC, Wan CC, Wang YY, Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2005, 140(1): 111-24
- [23] Kelly KJ, Mihalic M, Zolot M, Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing. *Battery Conference on Applications and Advances*, 2002, 247-52
- [24] Nelson P, Dees D, Amine K, et al., Modeling thermal management of lithium-ion PNGV batteries. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 349-56
- [25] Wu M-S, Liu K, Wang Y-Y, et al., Heat dissipation design for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2002, 109(1): 160-6
- [26] Pesaran AA. Battery Thermal management in EVs and HEVs: issues and solutions. *Advanced Automotive Battery Conference*, 2001
- [27] Pendergast DR, DeMauro EP, Fletcher M, et al., A rechargeable lithium-ion battery module for underwater use. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(2): 793-800
- [28] Rao Z, Wang S, A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(9): 4554-71
- [29] 宋德清, 方利国, 王聃, 相变储能材料的研究进展及在建筑中的应用, 节能, 2008, 27(6): 4-7
- [30] 崔巍, 相变蓄能材料在建筑节能中的应用, 节能与环保, 2007, (5): 21-3
- [31] 王海超, 焦文玲, 相变蓄热材料及其在低能耗建筑中的应用, 建筑热能通风空调, 2008, 27(3): 18-21
- [32] 张国庆, 饶忠浩, 吴忠杰等, 采用相变材料冷却的动力电池组的散热性能, 化工进展, 2009, 28(1): 23-6
- [33] Hallaj AS, Selman JR, A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material. *Journal of the Electrochemical Society*, 2000, 147(9): 3231-3236

- [34]Kizilel R, Sabbah R, Selman JR, et al.,An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105-12
- [35]Sabbah R, Kizilel R, Selman JR, 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. *Journal of Power Sources*, 2008, 182(2): 630-8
- [36]Khateeb SA, Amiruddin S, Farid M, et al.,Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation. *Journal of Power Sources*, 2005, 142(1-2): 345-53
- [37]纪绍斌, 李生生, 热管技术的应用与发展, *山西建筑*, 2005, 31(13): 140-1
- [38]钱舜田, 电动汽车动力锂电池散热结构与冷却系统仿真: [硕士学位论文], 杭州; 浙江工业大学, 2013
- [39]张国庆, 吴忠杰, 饶中浩等, 动力电池热管冷却效果实验, *化工进展*, 2009, 28(7): 1165-8
- [40]莫才颂, 李权, 热管传热及散热分析, *茂名学院学报*, 2006, 16(3): 31-4
- [41]Cheng L, Ke C, Fengchun S, et al. Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of EV Li-ion battery. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2009
- [42]Teng H, Ma Y, Yeow K, et al.,Thermal characterization of a Li-ion battery module cooled through aluminum heat-Sink plates. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 2011, 4(3): 1331-42
- [43]周业涛, 关振群, 顾元宪, 求解相变传热问题的等效热容法, *化工学报*, 2004, 55(9): 1428-33
- [44]Crank J,Free and moving boundary problems: Clarendon press Oxford, 1984
- [45]Lewis R, Ravindran K. Finite element simulation of metal casting. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 47(1-3): 29-59
- [46]Samarskii A,Vabishchevich P,Iliev O, et al.,Numerical simulation of convection/diffusion phase change problems—a review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, 36(17): 4095-106
- [47]Wilson EL, BATHE K-J,Numerical methods in finite element analysis, Prentice-Hall, 1976
- [48]Comini G, Del Giudice S, Lewis R, et al.,Finite element solution of non-linear heat conduction problems with special reference to phase change. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1974, 8(3): 613-24
- [49]赵朝义, 丁玉兰, 袁修干, 固态相变材料的运动对熔化传热的影响, *应用基础与工程科学学报*, 2008, (3): 235-9

- [50]Purlis E, Salvadori VO, Bread baking as a moving boundary problem part 1: mathematical modelling. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91(3): 428-33
- [51]Lewis RW, Morgan K, Thomas H, et al., *The finite element method in heat transfer analysis*. John Wiley & Sons, 1996
- [52]Groulx D, Samara F, Biwole PH, Natural convection driven melting of phase change material: comparison of two methods. *Proceedings of the 2012 COMSOL Conference, Boston*, 2012
- [53]Biwole P, Eclache P, Kuznik F, Improving the performance of solar panels by the use of phase-change materials. *World Renewable Energy Congress*, 2011
- [54]Zhu C, Li X, Song L, et al., Development of a theoretically based thermal model for lithium ion battery pack. *Journal of Power Sources*, 2013, 223: 155-64
- [55]Chen Y, Evans JW, Thermal analysis of lithium polymer electrolyte batteries by a two dimensional model-thermal behaviour and design optimization. *Electrochimica Acta*, 1994, 39(4): 517-26
- [56]Rao ZH, Wang SF, Zhang YL, Simulation of heat dissipation with phase change material for cylindrical power battery. *Journal of the Energy Institute*, 2011, 85(1): 38-43
- [57]王勳成, 有限单元法, 北京: 清华大学出版社, 2003
- [58]邓元望, 钟俊夫, 张上安等, 混合动力车用锂电池相变材料-空气耦合散热, *电源技术*, 2013, 37(10): 1751-4
- [59]余存焯, 铝翅片冷换设备化学清洗剂分析, *化学清洗*, 1999, 15(2): 12-6
- [60]朱晓彤, RAV-4 电动汽车电池组风冷系统的研究: [硕士学位论文], 南京: 南京航空航天大学, 2007

发表论文和参加科研情况说明

发表的论文:

[1] 陈宏珍,“锂离子电池组翅片-空气协同冷却法的数值模拟研究”,《化学工业与工程》,2014年6月

参与的科研项目:

无

致 谢

本论文的工作是在我的导师王宇新教授的悉心指导下完成的。本课题在选题及研究过程中得到王老师的悉心指导。王老师一丝不苟的作风,严谨求实的态度,踏踏实实的精神,不仅授我以文,而且教我做人,虽历时三载,却给以终生受益无穷之道。每与王老师交流,我总会感到受益匪浅,在这个过程中,我分析、解决问题的能力及表达能力都得到很大的锻炼与提高。再次衷心地感谢王老师,您辛苦了!

在实验室工作及撰写论文期间,感谢刘仲明师兄对我论文中的模型建立、问题分析等给予了许多热情无私的帮助,每次都会耐心地给我讲解,向他表达我的感激之情。

感谢实验室的吴斌、安德、张根磊、刘云龙、冷晓辉、吉小庆、王娜、秦瑞杰、邵泽超、袁超伟等,你们陪伴着我渡过了研究生阶段的学习和生活,谢谢你们给予我的帮助与支持。

另外也感谢家人,你们的理解和支持使我能够在学校专心完成学业。

陈宏珍

二零一四年五月于天津大学