



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM 代码: 10335

分类号: U461.2

密 级: 无

学 号: 21227062

浙江大学

硕士学位论文



中文论文题目: 车用锂离子电池冷却方案优化设计

英文论文题目: Optimization Design of Cooling Scheme on
Lithium Ion Batteries for Vehicles

申请人姓名: 彭影

指导教师: 俞小莉

合作导师: _____

专业名称: 动力机械及工程

研究方向: 电池热管理

所在学院: 能源与工程学院

论文提交日期 2015年1月

车用锂离子电池冷却方案优化设计



论文作者签名: 彭影

指导教师签名: 李东

论文评阅人 1: 陈为

评阅人 2: 陈为

评阅人 3: 陈为

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 牙北大

委员 1: 程昕

委员 2: 李东

委员 3: _____


委员 4: _____

委员 5: _____

答辩日期: 2015.3.5

浙江大学研究生学位论文独创性声明

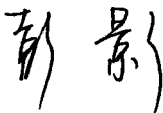

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：  签字日期： 2015 年 3 月 10 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：  导师签名： 
签字日期： 2015 年 3 月 10 日 签字日期： 2015 年 3 月 10 日

致 谢

美丽的西子湖畔，近三年的求学时光匆匆而过，这是一段难忘的人生经历。值此论文完成之际，向所有给予我指导和帮助的老师、朋友们和亲人们表达由衷的感谢。

首先感谢我的导师俞小莉教授。俞老师学术造诣深厚，治学态度严谨，为课题组创造了一个包容、严谨而又不乏自由的学术环境，此中求学，感到非常知足；同时，俞老师淡泊、善良、真诚的人生态度，也带给我很多生活上的启示与思考。在本论文的写作过程中，俞老师从思路、结构等方面都给了我关键的指导。

其次，还要感谢黄瑞老师。黄瑞老师利落、高效的行事风格给我的学习、工作树立了很好的榜样。同时，在课题的具体推进过程中，黄老师也非常负责地给了我很多认真细致及时的帮助指导。

此外，还要感谢 104 室的小伙伴们：刘孝龙、吴志军、邱斌斌、潘俊、杨振伟、魏强、奕冬、孙朝晖、刘晓晨、贾晓奇、马浩军、林鼎，感谢你们为我研究生生活增添的快乐，愿大家都有一个美好的前程。

感谢我的室友吕妍、马瑶、许方馨，研究生阶段能够遇到你们这样的室友感到非常幸运，和谐温馨的寝室氛围之外，不同的专业背景也让我增长了很多见识。

感谢我的父母，千里之外求学多年，不能常在家中陪伴你们，但你们一直是我努力的最大动力，更是我努力之后最想要回报的人。感谢男友张思录多年来的异地相伴，无数次及时出现的关心体贴都让我感到很安心。

彭影

2015. 1. 7 于浙大玉泉

摘 要

在能源紧缺与污染加剧的背景下,电动汽车已成为当前国家发展重点关注的领域。作为电动汽车里主要的甚至是唯一的动力源,动力电池的性能将制约着整个电动汽车行业的发展。动力电池的工作温度会直接影响其使用性能、使用寿命及可靠性、安全性,而由于动力电池在工作中会产生大量的热量,在紧凑摆放的车载环境下热量更容易聚集,因此需要研究设计合理的冷却方案,以保证电池组的工作温度能维持在一个合理范围内,同时尽可能的降低电池间的温度差异。

本文主要完成了以下内容:

(1) 分析了目前电动汽车的发展优势、动力电池的发展现状以及动力电池热管理的研究现状,给出了电池热模型的主要研究方法。

(2) 分析了磷酸铁锂离子电池的结构特点、工作原理以及生热原理、传热特性,总结出锂离子电池性能最优的温度区间,并建立了电动汽车锂离子电池组的基本传热模型,通过 Fluent 软件的计算,掌握了自然对流条件下的电池组温度分布特点。

(3) 进一步采用环境风强制对流冷却、空调风强制对流冷却以及导热油强制对流冷却三种冷却方式,分析了放电倍率、冷却温度以及对流速度等因素对电池组冷却效果的影响,对比了三种强制对流冷却方式的冷却能力。

(4) 根据实车运行采集的数据,掌握了车辆不同运行工况下对应的电池工作状态,提出相应的冷却方案优化策略。

本文的研究结果为电动汽车电池热管理系统设计提供了一定的参考依据。

关键词: 锂离子电池; 冷却方式; 温度场; 数值模拟

ABSTRACT

As the energy decreases and pollution increases, electric vehicle has become the country's current development focus. As the the main source of power, battery performance is crucial to the development of electric vehicle industry. Battery operating temperature will directly affect their performance, life and reliability. Power battery at work will generate a lot of heat, and is easier to gather more heat when packed in the compact vehicle space; therefore the research of cooling methods is important to ensure that the operating temperature of the battery pack can be maintained within a reasonable range, as well as the temperature consistency.

In this paper, the main contains are listed below:

(1)The development advantages of electric vehicles, power battery development status and battery thermal management system is analyzed, and the main research method of battery thermal model is proposed.

(2) The structure and working principle of lithium-ion battery is introduced , also the principle of heat and heat transfer characteristics. The best performance temperature range of lithium-ion battery is determined. Also, a basic heat transfer model of lithium-ion battery pack has been established. By Fluent software, a simulation is conducted to master the battery pack temperature distribution under natural convection conditions.

(3) Simulations are conducted to compare the cooling capacity of ambient wind cooling, air conditioning wind cooling and heat transfer oil cooling methods ,and the impact of the discharge rate, temperature and fluid velocity to the temperature field is mastered;

(4) According to the data collected from real car running, the battery status of different vehicle operating conditions has been mastered, and an appropriate solution to optimize cooling is proposed.

The results of this paper can be used as a reference of the further design of battery thermal management system..

Keywords: Lithium-ion battery; Cooling methods; Temperature field; Numerical simulation

目 次

致 谢	I
摘 要	II
目 次	V
1 绪论	1
1.1 电动汽车发展现状.....	2
1.2 动力电池发展现状.....	4
1.3 电池热管理研究现状.....	6
1.3.1 动力电池热力模型研究现状.....	7
1.3.2 动力电池冷却技术研究现状.....	9
1.4 课题来源及研究内容.....	12
2 锂离子电池的基本生热及传热特性分析	13
2.1 锂离子电池的基本结构与工作原理.....	13
2.1.1 锂离子电池的基本结构.....	13
2.1.2 锂离子电池工作原理.....	16
2.2 锂离子电池的生热机理分析.....	17
2.2.1 锂离子电池的生热机理.....	17
2.2.2 锂离子电池生热速率的确定.....	18
2.3 锂离子电池的传热特性分析.....	19
2.3.1 电池内部传热分析.....	19
2.3.2 电池外部传热分析.....	20
2.3.3 锂离子电池热物性参数的确定.....	21
2.4 锂离子电池组传热模型及其自然对流传热的数值仿真.....	23
2.4.1 电池组自然对流传热模型的建立.....	25
2.4.2 不同放电倍率下的电池组自然对流传热温度场分析.....	26
2.4.3 不同环境温度下的电池组自然对流传热温度场分析.....	28
2.5 本章小结.....	30
3 锂离子电池组空气强制对流冷却方案的数值仿真研究	31

3.1 电池组空气强制对流冷却模型的建立.....	32
3.1.1 电池组-冷却通道模型的建立.....	32
3.1.2 网格划分、材料属性与边界条件的设置.....	32
3.1.3 湍流模型的选择.....	33
3.2 环境风强制对流冷却模式.....	34
3.2.1 不同放电倍率的环境风冷却温度场分析.....	34
3.2.2 不同冷却强度的环境风冷却温度场分析.....	36
3.2.3 不同环境温度下环境风冷却温度场分析.....	44
3.3 空调风强制对流冷却模式.....	51
3.3.1 不同放电倍率的空调风冷却温度场分析.....	51
3.3.2 不同冷却强度的空调风冷却温度场分析.....	53
3.3.3 不同温度的空调风冷却温度场分析.....	56
3.4 本章小结.....	60
4 锂离子动力电池组导热油冷却方案的数值仿真研究	61
4.1 导热油强制对流冷却模式.....	61
4.1.1 不同放电倍率的导热油冷却温度场分析.....	61
4.1.2 不同冷却强度的导热油冷却温度场分析.....	63
4.1.3 不同温度的导热油冷却温度场分析.....	64
4.2 本章小结.....	65
5 锂离子动力电池组冷却方案优化策略	66
5.1 电池组冷却方案控制策略.....	66
5.2 本章小结.....	69
6 总结与展望	70
6.1 全文总结.....	70
6.2 不足与展望.....	71
参考文献	72
作者简介	76

1 绪论

近年来全世界汽车工业迅速发展,带动了相关机械、能源、橡胶、钢铁等产业的发展,同时也带来了能源短缺、环境污染的严重问题^{[1][2]}。一方面,我国国内石油资源不足,勘探难度大^[3]。据统计^[4],我国人均拥有石油最终可采资源量和产量仅达到全世界平均值的1/5左右,而且,可采资源中约有3/5还有待探明。另一方面,国内石油供需缺口增大,对外依存度逐年提升^[5]。根据国家统计局数据显示,2013年1-10月,我国原油表观消费量达40321.78万吨,同期我国累计生产原油17302.78万吨,供应缺口20000万余吨。2014年全年石油进口量将达到3.04亿吨,增长5.3%,原油进口量将达到2.98亿吨,增长7.1%。图1.1显示的是2005年以来,我国每年原油表观消费量及对外依存度的变化趋势,根据国家统计局网站公布的最新结果显示,这其中大部分消费量来源于汽车传统内燃机的燃料消耗。

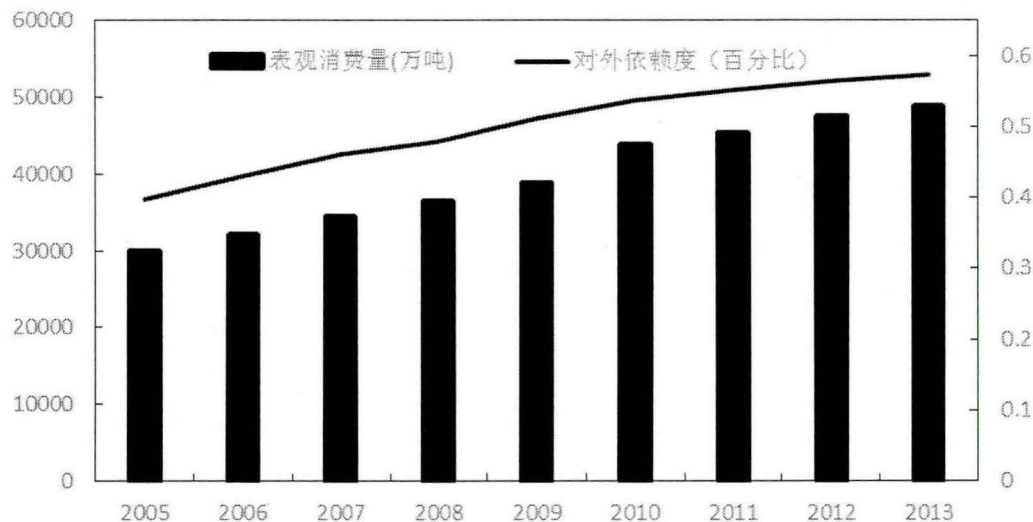


图 1.1 2005-2013 年我国原油消费与对外依存度情况

另一方面,来自汽车的排放污染也不容忽视。根据《中国城市发展报告》蓝皮书,截至2014年9月,我国汽车保有量为1.3亿辆,平均10人拥有1辆汽车,

而随着快速城镇化的进程,汽车需求量将进一步增长^[6],未来全国汽车保有量有望达到4亿辆。根据环保监测数据显示,汽车尾气的排放是城市空气污染的主要来源。以北京为例,汽车尾气对大气污染物中的一氧化碳分担率为63.4%,对碳氢化合物的分担率为73.5%,对氮氧化物的分担率为46%,而在上海,这些数字分别达到了86%、96%和56%。2014年11月APEC会议期间的机动车管控减排措施对削减PM2.5的贡献率最大,达到为39.5%。全国柴油车排放的氮氧化物约占汽车排放量总量七成以上,固体颗粒物比例达到九成;汽油车则贡献了排放总量七成之多的一氧化碳和碳氢化合物^[7]。汽车尾气污染已成为大气环境污染的首要来源之一,是造成城市雾霾天气的罪魁祸首。同时,值得注意的是,由于汽车主要运行在经济发达的人口稠密地区,尾气带来的污染更直接地对人群健康造成威胁^[8]。

在这样的大形势下,发展新能源电动汽车成为各个国家汽车工业近年来的重要方向。

1.1 电动汽车发展现状

电动汽车泛指以电源为动力源的汽车,主要有三种:混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)、纯电动汽车(Electric Vehicle, EV)和燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)^{[9][10]}。

纯电动汽车用储能动力电池彻底替代了传统的内燃机^[11]。动力电池通过外部电源充电来储存能量,使用时电池向电机输出电流,再由电机向驱动轴输出扭矩带动车轮转动^[12]。

混合动力汽车仍保留传统的内燃机,但额外配备储能动力电池。汽车既可以由电池驱动电动机发动,也可使用传统内燃机驱动^[13]。在制动或下坡行驶状态时,车辆部分动能将通过电机的发电运行回馈给动力电池充电,从而实现能量的回收利用。混合动力汽车又可分为普通混合动力汽车和插电式混合动力汽车 PHEV (Plug-in hybrid),后者可以只依靠动力电池组独立驱动车辆^[14],电池组容量大于前者,且电池能量耗尽后需要通过外接电源充电。

根据驱动系统的配置,混合动力汽车有串联式、并联式以及混联式三种结构形式^[15]。其各自特点如表1.1所示^[16]:

表 1.1 三种混合动力汽车特点

	控制系统	电池	能量传递效率	环境污染	适用范围
串联式	仅电机驱动	容量大 重量高 成本大	有转换损失 效率较低	排放小	城市公交车
并联式	发动机主动力 电机辅助动力	容量小 峰值功率低	中间环节少 效率较高	排放大 噪声大	乘用车
混联式	低速时仅电机驱动 高速时二者配合驱动	依赖小 无需外置充电系统	高	排放适中	乘用车

燃料电池汽车既摒弃了内燃机，也不需要从外界充电，而是通过自身携带的液态氢气和氧气发生化学反应产生电能，驱动电机运转，进而驱动车辆行驶。燃料电池汽车能源效率高，续航里程长，但成本较高，仍处于研发阶段，制氢技术有待突破^[17]。

与传统内燃机汽车相比，以上三种电动汽车具有以下优势：

(1) 电动汽车以二次能源电能作为动力源，有广泛的来源，具有风能、水能、太阳能、潮汐能、氢能等多种绿色发电方式，用电能代替传统内燃机汽车的燃油一次能源，非常有力地缓解了石油资源消耗的压力^[18]。

(2) 电动汽车尾气排放低，甚至可以实现车上零排放，非常显著地减少甚至消除了汽车尾气对环境的污染。即使考虑到电池充电统一转嫁到发电厂排放的污染，但按其行驶过程耗电量换算，发电厂排放的硫、固体颗粒物等也明显减少，而且发电厂地点相对固定，集中排放，相比汽车广泛且移动的污染源分布，更加易于集中处理，同时电站远离城市，环境容量远大于城市^[19]。

(3) 电动汽车所用的动力电池可以利用电网的夜间“谷电”进行充电，改善了电网的负荷特性，可以一定程度上平抑电网峰谷差值，有利于提高电网的整体

效率^[20]。

(4) 与传统内燃机汽车相比,电动汽车的新技术也有许多亮点。由电池驱动的电机调速特性良好,可通过控制电机转矩或转速来实现对整车车速的控制,提高了控制精确度,同时也降低了车辆对变速系统的要求,简化了车辆结构;此外,电动汽车减速制动时的能量可以回收再使用,提高了整体能量效率^[21]。

综上所述,电动汽车的发展对资源、环境以及汽车技术的发展都具有非常重要的意义。

长期来看,电动汽车的发展趋势是由纯电动汽车和混合动力汽车起步,最后发展至燃料电池汽车。但由于成本太高,燃料电池汽车目前还有许多技术瓶颈需要突破,离产业化还有很长的路要走。当前正是电动汽车和混合动力汽车技术及产业化高速发展的时期。

根据工信部网站最新数据统计,2014年1~11月,全国电动汽车共生产5.67万辆,较去年增长5倍。其中,纯电动乘用车、插电式混合动力乘用车分别生产了2.58万辆、1.36万辆、纯电动商用车、插电式混合动力商用车分别生产了7363辆、9949辆,分别同比增长近7倍、25倍、1.88倍和2.45倍;同时,在强刺激政策驱动下,电动汽车的产销量暴增,从2012年的销量1.28万辆,到2013年增至1.76万辆,2014年全年销售有望达6~7万辆,同比增长4倍,而到2015年,销量有望达25万辆。这些都表明,我国的电动汽车正在迎来高速发展的时代。

1.2 动力电池发展现状

动力电池作为电动汽车的核心,其性能对电动汽车的发展起着至关重要的作用。为满足电动车辆的实际运行需求,对动力电池各项使用性能有以下期望^[22]:

- (1) 比功率大,能够满足电动汽车加速、爬坡等行驶工况下的动力性要求;
- (2) 比能量高,在相同的电池组规模下,尽可能地提高电动汽车的续驶里程和工作效率;
- (3) 工作温度范围广,以保证不同环境温度下的稳定、高效充放电需要;
- (4) 循环寿命长,提高电动汽车续航能力,保证动力电池的经济性;
- (5) 自放电率低,即在车辆较长时间搁置后,电池容量损耗小;
- (6) 无记忆效应,以应对车辆制动能量回收时电池处于非完全放电状态下的

充电，或电动车辆随时充电的实际需要，仍然能保持一定的电池性能及寿命；

(7) 安全性和可靠性高，电池材料可循环利用，生产过程对环境污染小。

目前常见的蓄电池主要有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池和燃料电池，它们各自的特点如表 1.2 所示^[23]：

表 1.2 常见蓄电池特点

	铅酸电池	镍氢电池	锂离子电池		燃料电池
			液态锂离子电 池	聚合物锂离子 电池	
比能量 (Wh/kg)	35-40	75-80	110	155	500
比功率 (W/kg)	50	160-230	300	315	100
体积比能量 (Wh/L)	80	100-200	200-280	>320	1000
电压 (V)	2.0	1.2	3.7	3.7	0.6-0.8
工作温度 (°C)	-20~60	20~60	0~60	20~60	20~105
自放电率 (%)	4-5	30-35	<5	<0.5	极低
循环寿命 (次)	800	>1000	>1000	>1000	
优点	原材料来源丰富	寿命长	高能量密度	能量密度高 自放电率低	比能量、能量 转换率高
	价格较低	耐充放电	输出电压高、功率大	不需传统隔膜、 寿命长	环保
	技术成熟	安全性好	无记忆效应、寿命较长	安全、易于批量 生产	安全性好、性能稳定

		锂离子电池			
	铅酸电池	镍氢电池	液态锂离子电 池	聚合物锂离子 电池	燃料电池
缺点	比能量较 低		成本较高、安全 性能差		成本很高、寿 命较短
	耐过充能 力差	自放电率 高	需要保护以防 过充放	成本较高、低温 性能弱	电流较小、比 功率较小
	污染环境		热不稳定、易爆 炸		难以充电

目前技术最成熟、应用最广泛、商业化最成功的是镍氢动力电池，锂离子电池因为有更高的能量密度、更大的放电功率、自放电率小和寿命长，而成为电池发展的方向。

1.3 电池热管理研究现状

锂离子电池性能对工作温度很敏感^[24]。其寿命衰减主要和工作温度有关，受使用循环次数影响较小。当锂离子电池在过高的温度下工作时，虽然短时间内放电容量会提升，但同时伴随着电池的快速老化，严重极化，使用寿命衰减迅速，若温度达到电池材料燃点，还会造成电池组起火；当锂离子电池在低温环境下工作时，电池容量下降，且随着循环的进行，容量持续衰减。低温循环若干次之后，即使恢复到合适温度，电池容量也不可恢复。桂长清对磷酸铁锂离子电池和铅酸动力电池的容量、内阻、比能量、能量密度和比功率随温度的变化进行了实验研究^[25]，结果表明，长时间在 0℃ 以下工作，磷酸铁锂离子电池容量下降较铅酸电池明显，会导致电动汽车起困难，而磷酸铁锂离子电池在 60℃ 时仅有 160 次循环寿命，明显低于 20℃ 时的 420 次。

电动汽车中的动力电池组在充放电过程中，内部会发生各种电化学变化和物理变化，产生大量的热量，如果这些热量在车辆行驶过程中不能及时地散发出去，将使各单体电池之间出现很大的温度差异，导致各电池充放电的容量出现差异，使电池组的使用循环寿命减少^[26]；所以电池组热管理系统对于维持电池组工作在最佳的温度范围内，性能达到最优，效率达到最高起到极其关键的作用^[27]。

1.3.1 动力电池热力模型研究现状

从上世纪90年代起开始研究以来,从研究正常生热的电-热耦合模型,结合电池内部电流密度分布的电-热耦合模型^[28],到研究热失控特殊状况的热滥用模型,从单体电池的模型到成模块电池的模型,锂离子电池的热力模型不断地在发展完善。在最常用的电-热耦合模型的基础上,先后发展出了集总参数模型、二维模型和三维模型,这些模型各有其适用的研究范围,针对电池不同特性的研究精度与可靠度也各不相同^[29]。

1.3.1.1 集总参数模型

集总参数模型,是将电池视为一个质点,得到的仿真结果是电池整体的平均温度情况而不涉及温度分布状况。该模型计算过程相对简单,适用于对锂离子电池进行整体性能的研究。

Gerardine Botte 针对某 $\text{Li}_x/\text{Li}_y\text{NiO}_2$ 型锂离子电池,建立了一个包含阳极碳分解反应在内的模型来预测中高放电倍率下锂离子电池单体的温度,探讨了阳极的设计参数和其分解产生的活化能是如何影响电池的温度^[30]。

Hallaj 建立了索尼 US18650 圆柱形锂离子电池的集总参数模型和简化的一维模型,模拟其内部的温度分布。结果表明,在 C/2, C/3 和 C/6 的放电倍率下,集总参数模型的仿真数据与实验数据相吻合,但在 1C 倍率下仿真数据出现了偏差,同时,冷却速率对电池各个放电倍率下的温度均有显著影响,在较低的冷却速率下,电池模型表现为一个集总参数系统,具有均匀的温度,但在高冷却速率下,电池内部出现显著地温度梯度,此时集总参数模型不再适用,即集总参数模型在研究电池生热时存在一定的局限性^[31]。

Noboru Sato 详细探讨了锂离子电池的生热机理,提出了锂离子电池的生热模型,指出锂离子电池在充放电过程中的产热可以分为三部分,即反应热、极化热及焦耳热;并采用集总参数模型对某一 80Ah 锂离子电池单体进行了仿真,结果表明,用钴酸锂作正极时,其在充电中会表现吸热过程,当电流超过 70A 或 80A 时,吸热量将超过电池焦耳热,使该电池整体的整体放热量为负值。同时,通过用绝热材料包裹电池进行了温度测量试验,仿真值与实验值吻合较好,验证了该生热模型的正确性。Noboru Sato 生热模型除了没有考虑到副反应生热过程,其余与 Bernadi 生热模型已经非常类似,对锂离子电池热模型的研究具有重要意

义^[32]。

1.3.1.2 一维模型

一维模型是将电池向某一个方向投影,仅研究锂离子电池在该方向上的温度分布情况,通常选择厚度方向。

Hallaj 等人使用一维模型初步讨论了以相变材料(PCM)为冷却介质的锂离子电池组的温度分布情况,证明其对电池的温度分布具有较好的导热效果,对锂离子电池管理系统中采用相变材料表示看好^[33]。

Kazuo Onda 等人使用一维模型,研究了某种小型钴酸锂离子电池径向温度分布情况,通过对其在快速充电和放电周期中的温度测量,验证了该模型的有效性,同时讨论了锂离子内阻的各种测量方式,证明较为准确的方法包括 V-I 图法、间歇电流法、开路电压法等^[34]。

1.3.1.3 二维模型

二维模型的研究对象是电池的某个截面。

Wu Mao Sung 等人利用二维瞬态热传递模型,研究了某圆柱形锂离子电池在不同热管和铝制散热翅片的结构设计方式下的温度分布情况。文章计算了电池内部径向和轴向的温度分布,并和实验测量值进行了比较^[35]。

Shin Chih Chen 等构建了详细的卷绕型圆柱锂离子电池单体二维分层模型,计算结果表明柱形电池的温度最高点出现在充满液体的中心附近的圆形区域,而非正中央。采用平行于圆柱形电池轴线方向的气流冷却可以有效抑制电池表面温度,但电池内部温度依然很高,而当电池直径较大的时候,垂直于轴线方向的气流比平行的气流散热效果更好^[36]。

王晋鹏等人采用二维模型对 Sony US18560 型锂离子电池进行了温度场分析,文章模拟了电池内部径向和轴向的温度分布,并讨论了对流换热系数对温度场的影响^[37]。又采用三维模型对 ICR65/400 型锂离子电池进行了温度场分析,并对比分析了二维模型和三维模型的结果,表明三维模型的准确率更高^[38]。

1.3.1.4 三维模型

三维模型通常用于研究锂离子电池整体的温度分布情况,更加全面准确,对电池设计的改进、电池运行策略的设计具有实际指导意义。。

美国再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的

Ahmad Pesaran 和 Andreas Vlahinos 等人使用锂离子电池三维模型,研究了低温环境下锂离子电池的加热问题,文章讨论了四种方案,包括内部核心自发热加热、整个电池模块外部电加热、模块内每个电池单体周围电加热以及每个模块周围流体加热,并简要讨论了在电池两段时间高频交流电的加热方案,结果表明通过内阻自生热加热是最快捷、最节省能源的方案^[39]。

Chen 等人以最高温度偏差、最低温度偏差、平均温度偏差、放电结束温度分布标准差为四个评价指标,对一维、二维、三维模型下各不同简化策略的 10 种模型进行仿真对比,系统比较了它们各自的计算量和计算精度,证明了对电池内核的模拟最为耗时,但并不关键,故应简化仿真中的内核结构,并据此构建了某一锂离子电池的热模型,分析了对流换热系数、放电深度、放电电流等对单体电池温度场的影响。同时还计算了在自然对流情况下,辐射散热大约占到电池整个散热比例的 50%左右,且强制对流散热能够有效降低电池最高温度,但对提高各个电池温度的一致性作用不明显^[40]。

Yue Ma 等人使用自行开发的电热有限元模型,对市售的使用 A123-26650 圆柱形锂离子电池的 A123 Hymotion™L5 PCM 电池包进行了热行为分析,且仿真结果与测量值基本吻合。这表明,在该研究中开发的电热有限元模型可以合理表征电池组的热行为,也可以被应用到其它几何形状的锂离子电池单体^[41]。

Cheng L, Ke C, Fengchun S 等对 100AH LiMn_2O_4 锰酸锂电池建立了三维模型,提出了该电池导热系数以及生热速率等参数的计算方法,并对电池模型进行了传热分析,得到了该电池在不同对流传热系数和不同工况下的温度云图,结果表明当该电池平均放电倍率达到 1C 以上时,就必须采取强制对流冷却措施,当对流换热系数超过 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,动力电池的热性能就足够满足电动汽车的运行要求了,此外,还提出了锰酸锂离子电池在恒流充电阶段和放电结束状态时尤其需要进行热管理^[42]。

1.3.2 动力电池冷却技术研究现状

目前,对动力电池采取的冷却技术主要有空气冷却、液体冷却、相变材料冷却以及热管冷却等方式。

1.3.2.1 空气冷却

针对空气冷却, Kelly K J 等针对丰田普锐斯 (Prius) 和本田音赛特

(Insight) 两款混合动力汽车,利用空气强制冷却方法,通过控制风扇功率,测试了 0、25、40 °C 下以 FTP-75 和 US06 循环工况电池的温升状况,实验结果说明在频繁变速及高速的工况)下,电池温升更高[43]。

陈磊涛、许思传等对混合动力汽车电池热管理系统,采取了两种结构变动方式,包括改变通道的宽度和改变气体进出口处集流板的倾斜角度。利用 Fluent 软件进行了多种组合结构方案的模拟仿真,分析了不同情况下空气流场的变化,比较了两种结构变动方式的影响原理。结果表明,增大通道宽度的递减值或增大倾集流板的倾斜角度,均可以减小首端流速并增大末端流速,但前者针对流动均匀性的改变作用更加显著,且有一定的规律性,后者规律性较弱,有效性有限,且一定程度上还要受到前者结构的限制,因此建议以调整通道宽度手段为主,调整集流板角度为辅^[44]。

戴海峰等人对世博会使用的插电式混合动力汽车上的磷酸铁锂离子电池进行了使用强制风冷的热管理手段,并结合整车布置方案,完成了热管理系统的结构设计并对设计结果进行了模拟及实验对比。该研究显示,合理的电池冷却系统流场配合风扇可以有效地控制电池系统的温升,减小电池单体间的温度差异,但随着电池老化及环境温度的升高,该热管理系统的负荷会增加,有效性降低,可能难以满足电池温度范围及温度均匀性的要求,需要进一步改善流场设计,或引入其他冷源来提高冷却效果^[45]。

康海鹏对某集中式大容量锂离子电池和并联的小容量锂离子电池的温度场进行了分析比较,表明选用并联的小容量锂离子电池更有利于电池温度场的分布,做出了关于电池选型的优化方案,同时,也分析对比了空气对流冷却方式下串行通风和并行通风的温度场,对电池包冷却结构进行了优化设计^[46]。

李策园仿真分析了锂离子动力电池组的系统方案,研究了不同设计参数对锂离子动力电池温度场的影响,并根据仿真结果优化了空气流场,确定了电池箱的系统方案,还设计了热管理系统的硬件系统及软件系统^[47]。

1.3.2.2 液体冷却

针对液体冷却,兰晓平对 18650 圆柱形锂离子电池进行了水冷却和空气冷却的模拟工作,以电池组内的最高温度和最大温差为评价标准,研究发现水冷却能比空气冷却更好地控制温度场,但仍远远达不到理想状况。同时提出了以泡沫金

属铝和煤油组成的复合材料作为温度缓冲介质,结果表明,该方式的冷却效果明显的优于传统的水冷却和空气冷却^[48]。

David Pendergast 等用铝模块包裹松下(CGR18650E)单元电池,然后将其浸入水中,将其视为一个简易的水冷系统。实验结果表明电池温度可以维持在 -20°C ~ 60°C 的基本工作温度范围内^[49]。

Paul Nelson 等以硅酮流体作为传热介质,证明了它无论在加热方面还是冷却方面,均优于空气介质。硅酮流体可以有效降低电池过热,同时也且能较好的控制电池模块之间的温差,并在此基础上进一步探讨了低温状况下使电池被快速加热的方案^[50]。

1.3.2.3 相变材料冷却

针对相变材料冷却,Selman 和 Hallaj 等进行了四种方案的冷却实验,包括:1) 自然对流冷却;2) 泡沫铝传热矩阵冷却;3) 相变材料冷却;4) 结合2)和3)的方式冷却,实验结果表明方案4)冷却效果最佳,且电池组一致性也较高,并用一个二维模型对其进行了仿真,吻合较好^[51]。

饶中浩,汪双凤等采用实验与数值模拟相结合的方法,分析了基于相变材料热管理的42110型圆柱磷酸铁锂电池组的散热性能,研究结果表明相变材料导热系数的增加能够增强相变过程的传热效果,但导热系数增加至某值后,电池最高温度受相变材料相变温度影响不大,如果相变材料不足量,在其全部融化后,电池组的局部温差还会继续增加,且温差与相变温度成正比^[52]。

1.3.2.4 热管冷却

热管是一种密封结构的空心管,两端分别为蒸发端和冷凝端,其冷却原理是:热管的蒸发端吸收热量时,管内毛细芯中的液体发生汽化,蒸汽在压力差的作用下流向冷凝端,在那里放出热量重新凝结成液体,液体再根据毛细作用原理,沿多孔材料回流至蒸发端,不断循环。用热管作为冷却方式,锂离子电池产生的热量可以沿热管迅速传递^[53]。

张国庆搭建了一种采用热管冷却的镍氢电池热管理系统。对比研究了空气自然对流、强制对流和热管冷却三种模式下镍氢电池的温度变化情况,实验表明,热管冷却方式对镍氢动力电池有良好的冷却效果,可保证电池的理想工作温度范围,并且能够维持电池间的温度均匀性。针对这一种电池,与空气冷却相比,在

3.728A 的电流下,热管冷却可以控制使电池温升降低约 10°C , 电池温度不高于 43°C ^[54]。

Mao Sung Wu 等进行了将带有金属铝翅片的热管贴到电池壁面的实验,并与其他冷却方式进行了对比。结果表明,自然对流冷却不能满足电池的散热需求,而强制对流冷却可以降低电池温升,却无法避免电池表面的温度不均匀性,增加了热管理的困难,而热管可以起到冷却电池的作用,同时,插入铝制翅片内的热管也可以提高电池温度的均匀性^[55]。

1.4 课题来源及研究内容

本课题来源于浙江省重点科技创新团队项目“电动汽车动力电池热管理系统设计开发”(项目编号:2011R50008-01),为解决当前某汽车厂商的纯电动汽车尚未采取冷却措施,在车辆运行过程中会出现动力电池组过热现象的问题,本文将主要进行以下内容的研究:

(1) 通过分析目前电动汽车的发展优势、动力电池的发展现状以及动力电池热管理的研究现状,掌握锂离子电池热管理的研究方法。

(2) 通过对锂离子电池基本结构及工作原理的了解,分析了锂离子电池的基本传热特性,包括其生热机理与传热机理。

(3) 利用 Ansys Fluent 软件,对建立的电池组模型进行四种冷却方案的数值仿真研究,包括空气自然对流冷却、环境风强制对流冷却、空调风强制对流冷却以及导热油强制对流冷却,并进一步分析对比各自在不同放电倍率、冷却温度以及冷却强度下的冷却效果。

(4) 根据实车运行采集的数据,掌握了车辆不同运行工况下的电池电流输出状态,提出相应的冷却方案优化策略。

2 锂离子电池的基本生热及传热特性分析

2.1 锂离子电池的基本结构与工作原理

2.1.1 锂离子电池的基本结构

锂离子电池是指在充放电过程中有锂离子嵌入或脱出电池正负极材料的电池^[56]。锂离子电池的主要结构包括：正极材料、隔膜、电解液、负极材料、正负极集流体^[57]。

正极材料直接决定了电池的特点，成本占到整个电池的三成左右。锂离子电池的正极材料应能够嵌入大量的锂离子，以得到较高的比能量，此外，锂离子嵌入/脱嵌过程要有较高的可逆性^[58]。一般选用锂元素的过渡金属氧化物等嵌入化合物。根据正极材料选取的不同，目前常用的锂离子电池主要包括钴酸锂离子电池，即以氧化钴锂 (LiCoO_2) 为正极材料；锰酸锂离子电池，即以锰酸锂为正极材料；磷酸铁锂电池，即以磷酸亚铁锂 (LiFePO_4) 为正极材料；三元复合材料材料^[59]。各种锂离子电池的特性见表 2.1^{[60][61]}：

表 2.1 不同正极材料的锂离子电池特性

正极材料	钴酸锂 (LiCoO_2)	锰酸锂 (LiMn_2O_4)	三元复合材料		磷酸铁锂 (LiFePO_4)
			$\text{Li}(\text{Ni}_{0.85}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.05})\text{O}_2$	$\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$	
正常电压 (V)	4.0	4.05	3.8	3.85	3.34
存储电容 (mAh/g)	145	100	160	120	150
比能量 (Wh/kg)	602	480	742	588	549
体积比能量 (Wh/L)	3073	2065	3784	2912	1976
循环寿命 (次)	>500	>500	>1000	>1000	>1000
质量成本 (\$/kg)	30-40	8-10	28-30	22-25	16-20
能量成本 (\$/kWh)	57-75	20-25	50-55	30-55	25-35
安全性	较差	良好	良好	优秀	优秀

正极材料	钴酸锂	锰酸锂	三元复合材料	磷酸铁锂
优点		安全性好	无过充限制	成本低、容量高
	工艺成熟	耐过充	无过放电限制	振实密度高、稳定性好
		高温稳定	高温稳定	循环性、安全性好
缺点	成本高、安全隐患高	充放电容量衰减	充放电结构不稳定	传导率低、合成困难
	只适合小容量单体电池	循环寿命低	工艺条件苛刻	高倍率充放电性能差

钴酸锂离子电池在 150℃ 高温时易爆炸，安全性差，原料成本超过 40 万元/吨，且循环寿命短^[62]；锰酸锂离子电池安全性有所提高，但高温下的循环寿命只有 500 次左右。而磷酸铁锂正极的锂离子脱出/嵌入后，磷酸铁锂的晶体结构几乎不发生重排，因此，磷酸铁锂离子电池的循环性能更好，可反复充放电达 1000 次以上，通过材料改性，寿命甚至可达到 1 万次以上，在高温高热环境下的稳定性也较高^[63]，是目前正极材料的最佳选择。

电解液填充电池内部，分布在隔膜两侧。电解液对离子有高导电性，在电池内部的正、负极之间承担着传输电荷的作用；由于锂离子电池的工作电压一般为 3.2V，而水在 1.2V 左右的电压下即会发生电解，故一般采用非水有机溶剂和分解电压更高的电解质盐溶剂等作为锂离子的载体^[64]。

隔膜的主要作用是将锂离子电池的正负极材料隔开，其具有选择通过性：电子不能通过电池的内电路，但锂离子可自由通过。隔膜在电池中会表现为一定的电阻性质。

负极材料主要有石墨及其相关材料。

集流体是正负极的导电骨架。

此外，锂离子电池在前几次充电过程中，有机电解液会在负极表面上发生氧

化还原反应，在电极表面形成一层固体电解质钝化膜，这层膜对电子绝缘，却是锂离子的导体，这层膜就是 SEI (Surface Electrolyte Interface) 膜。SEI 膜会增加电池内阻，但由于它不溶于有机溶剂性状致密，阻挡了有机溶剂的分子又不影响锂离子的传递，一定程度上也避免了有机溶剂分子嵌入对电极材料带来的破坏。若 SEI 膜被破坏，修复它则需要消耗锂离子，故电池使用一段时间以后，SEI 膜会变厚，电池内阻增加。

磷酸铁锂离子电池基本构造如图 2.1 所示：

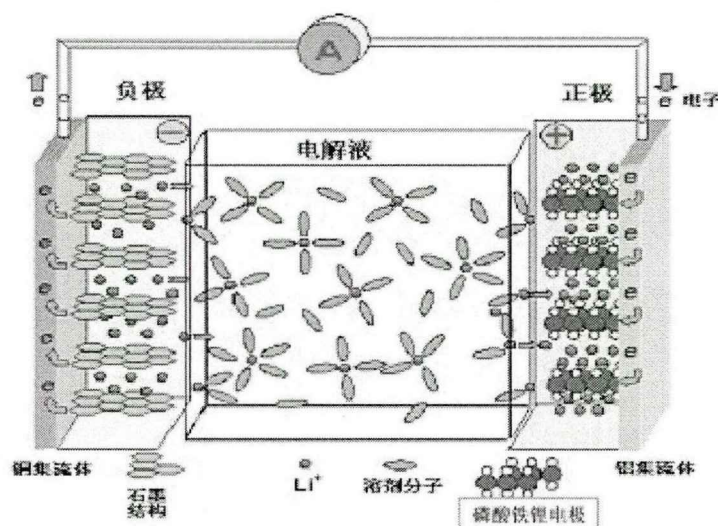


图 2.1 磷酸铁锂离子电池基本构造

锂离子电池内部的各种材料一般通过层叠或卷绕的方式排列。卷绕式是将正极片、隔膜、负极片依次排好，采取一定的工艺步骤，卷成圆柱形。层叠式则是将正极片、隔膜、负极片等材料按顺序堆叠成块状电池，然后将各层正极片引出焊接为正极柱，负极片引出焊接为负极柱。图 2.2 所示为两种方式的示意图。

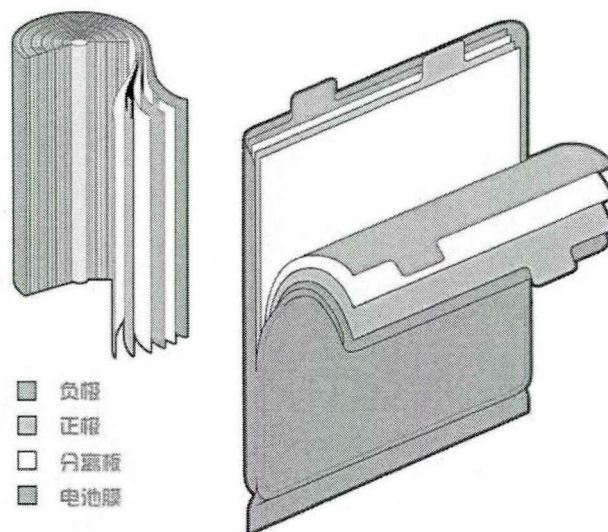
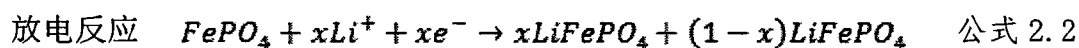
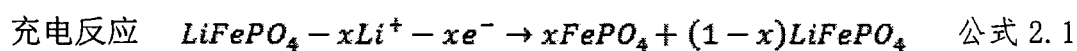


图 2.2 卷绕式与层叠式锂离子电池示意图

2.1.2 锂离子电池工作原理

磷酸铁锂离子电池内部发生的化学反应如下：



这是一种理想的可逆反应。从电化学角度，它本质就是一个锂离子浓度差电池。充电时，锂离子从正极化合物中脱出，经过电解质嵌入负极晶格，此时，负极处于富锂态，正极处于贫锂态，补偿电荷通过电子在外电路传到负极，维持负极的电荷平衡；放电时则相反，锂离子从负极脱出，经过电解质嵌入正极材料，此时，正极处于富锂态，负极处于贫锂态^[65]。由于电池的正负极都是层间化合物，在正常充放电时，锂离子负极碳材料的层状机构和正极氧化物的层状结构间嵌入和脱出，只带来层间距的变化，不破坏晶体结构，因此锂离子电池反应的可逆性较好，被称为“摇椅式”的电池体系^[66]。图 2.3 展现了锂离子电池的工作原理。

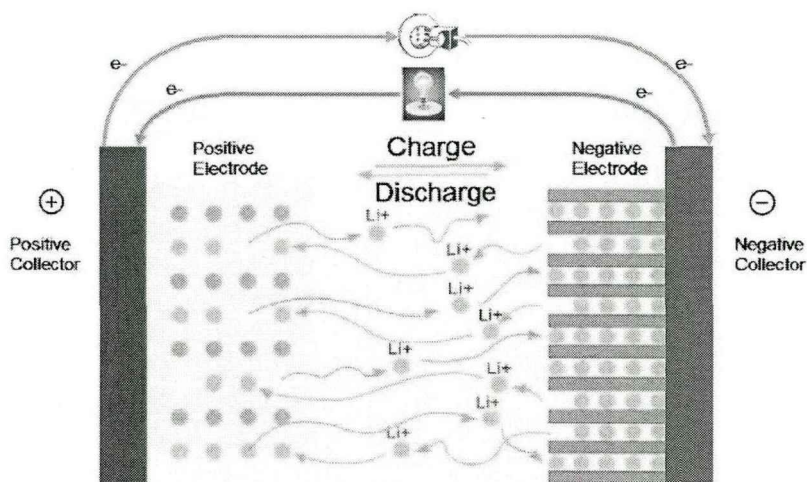


图 2.3 锂离子电池工作原理

2.2 锂离子电池的生热机理分析

2.2.1 锂离子电池的生热机理

由于内部化学反应变得非常复杂，在正常使用状态下，锂离子电池总的生热量一般由以下四部分构成：反应热、焦耳热、极化热以及副反应热^[67]。记总生热量为 Q_t ，则其可表示为：

$$Q_t = Q_r + Q_p + Q_s + Q_j \tag{公式 2.3}$$

其中：

Q_r 是反应热：是指在电池充放电过程中，锂离子在正负极板间嵌入和脱嵌这一电化学反应过程里产生的热量，与反应过程中的熵变有关，充电状态时，该值为负值（即吸收热量），放电状态时，该值为正值（即释放热量）。反应热 Q_r 的计算表达式为：

$$Q_r = \frac{nmQI}{MF} \tag{公式 2.4}$$

其中 n 表示电池单体个数； m 表示正负电极质量； Q 表示电池正极电化学反应

应产生热量和负极电化学反应产生的热量的代数和； I 表示充放电电流大小，单位为 A； M 代表摩尔质量，单位为 g/mol； F 表示法拉第常数，其值为 96484.5C/mol。

Q_j 是焦耳热，由于组成电池的材料存在一定电阻，电流流经时便会产生热量，这部分热量是不可逆的，在充放电过程当中均为正值，计算表达式为：

$$Q_j = I^2 R_e \quad \text{公式 2.5}$$

其中 I 为电流强度，单位为 A； R_e 为电池的内阻，单位为 Ω 。

Q_p 是极化热：当有电流通过时，在锂离子电池的电极表面发生实际电位偏离平衡电位的现象，称为极化现象。由于电池的平均端电压与开路电压的差异，这部分压降而产生的热量即极化热。它与电池种类、电流大小、环境温度等有关。在充放电的状态下其值均为正值。一般情况下，会虚拟一个电池极化内阻 R_p ，用其产生的焦耳热来等效代替。

Q_s 是副反应热，是伴随电池内主电化学反应的一些副反应，如电极一部分的分解反应，高温下电解液分解反应等。该部分热量产热量很小，一般不予考虑。因此，电池生热量可以表示为：

$$Q_t = Q_r + Q_p + Q_j = \frac{nmQI}{MF} + I^2 R_p + I^2 R_e \quad \text{公式 2.6}$$

2.2.2 锂离子电池生热速率的确定

美国加州大学伯克利分校的 Bernadi 从锂动力电池内阻和熵增反应原理两个方面出发，基于电池内部热源稳定且均匀生热的条件，将极化热与反应热均处理成不可逆的反应热，提出计算锂离子动力电池生热速率的 Bernadi 生热速率模型^[68]，其估算公式为：

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(U - U_0) + T \frac{dU_0}{dT} \right] \quad \text{公式 2.7}$$

式中 q 为电池生热速率, V_b 为电池单体体积, I 为充放电电流, U 为电池单体电压, U_0 为电池开路电压, $T \frac{dU_0}{dT}$ 为电池的温度影响系数, 是与电化学反应相关的物理量。

2.3 锂离子电池的传热特性分析

2.3.1 电池内部传热分析

由传热学基本原理知, 热量的传递有三种基本方式, 即: 热传导、热对流以及热辐射。在锂离子电池内部, 由于电解液的流动微弱, 内部发生的流动换热可以忽略不计, 同时内部辐射换热的影响微弱, 故热量传递的主要方式是热传导。根据导热基本定律-傅里叶定律知, 在导热过程中, 单位时间内通过单位面积的导热量, 正比于垂直该截面方向上的温度变化率, 即:

$$q_n = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{公式 2.8}$$

其中, q_n 是沿 n 方向传递的热流密度, λ 为导热系数, 它的大小反映了该物质的导热能力, $\frac{\partial T}{\partial n}$ 是电极等温面法线方向温度梯度, 负号表示热量传递方向与温度升高的方向相反。

当物体温度是三维函数时, 空间热流密度矢量, 记为 q , 进而热量传导的速度公式可表示为:

$$q = -\lambda \nabla T \quad \text{公式 2.9}$$

其中, ∇T 代表温度的梯度。它是在实验观察的基础上于 1822 年提出的, 它将温度场与热量流动联系起来, 并适用于各种不同的温度场, 也适用于稳态、非稳态、一维或者多维的情况^[69]。

2.3.2 电池外部传热分析

由电池内部经热传导到达电池壳体的热量，与外界进行热量交换时，方式主要是对流换热。对流换热发生在有宏观运动的流体中，常见的情况是冷却流体流过一个发热固体表面时，有温度差的流体和固体之间发生的热量传递过程。对于空气或液体冷却的锂离子电池，即是流动的冷却空气或冷却液体通过与电池表面的直接接触，将电池产生的热量带走的过程。当流体与固体之间存在温度差异时，对流换热就会发生。描述对流换热的基本公式为：

$$q = h(T_w - T_f) \quad \text{公式 2.10}$$

当换热面积为 S 时，有：

$$Q = h \cdot S(T_w - T_f) \quad \text{公式 2.11}$$

该式被称作牛顿冷却公式，是对流换热的定义式。其中 q (W/m^2) 或者 Q (W) 为对流换热量， h 为表面传热系数，又称为换热系数，单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

流体运动有自然对流和强迫对流两种形式。自然对流是指当流体温度升高时，即使没有外部作用，流体也会在自身力（如密度差）作用下产生相对运动。强迫对流是指通过外部作用提高流体的压差来强迫流体流动。当流体流经固体表面时，在固体表面附近，越接近固体表面流体的流动速度越低，当与固体接触的距离非常小时，流体处于停滞状态，可以看成流体与固体之间只有热传导存在。因此，不考虑辐射时，把锂离子电池表面由热传导传递的能量作为对流换热传递的能量，由牛顿冷却公式和傅里叶定律：

$$h = \frac{-\lambda \partial T}{\nabla T \partial y} \quad \text{公式 2.12}$$

其中, h 为换热系数, $\frac{\partial T}{\partial y}$ 为流固接触面垂直接触面方向的流体温度变化率。

影响对流换热的因素包括流动影响因素和热量传递影响因素, 主要包含以下五个方面:

(1) 流体流动的起因。自然对流换热通常是由流体内部的密度差引发的, 强制换热通常是风机、水泵、油泵等外部动力源引发的。由于二者流动成因的区别, 导致流体速度场的分布差别, 因此有不同的换热规律。

(2) 流体有无相变。流体没有相变时的, 流体的对流换热由流体的显热变化而实现, 当流体在换热过程中存在相变(如沸腾或凝结)时, 流体相变热的吸收或释放将会给传热过程带来很大影响。

(3) 流体的流动状态。流体力学的研究表明, 粘性流体存在两种不同的流动状态——层流与湍流。层流状态时, 流体微团沿流体主要流动方向作规则的分层流动; 湍流状态时, 流体内部各部分之间发生剧烈的混合, 因此, 同等条件下, 湍流状态伴随着更强的换热强度。

(4) 换热表面的几何因素。包括换热表面的形状、大小、表面粗糙度。在自然对流状态下, 还包含几何布置状态。

(5) 流体的物理性质。如流体的密度、动力粘度、导热系数和比热容等等。

2.3.3 锂离子电池热物性参数的确定

锂离子电池的中心区域就是它的发热区域, 各种电化学反应等都在这里进行, 同时这里的材料分布也最复杂, 包含了正极材料、负极材料、隔膜材料、电解液等, 各部分各材料的导热系数不同且厚度很小, 由上百层叠加而成, 直接建模非常困难, 故考虑将电池中心区域视为一个整体, 为达到等效的模拟, 需要计算此部分的一系列等效参数, 包括等效比热容、等效导热系数、等效密度等^[70]。

锂电池的等效物性参数分别采取以下方式确定:

(1) 比热容的确定

锂离子电池的等效比热容可由个部分材料比热容的加权平均值计算得到:

$$C_p = \frac{\sum m_i C_{p,i}}{\sum m_i} \quad \text{公式 2.13}$$

式中： C_p 为电池的比热容， m_i 为电池单体各种材料的质量； $C_{p,i}$ 为组成电池的各种材料的比热容。

(2) 密度的确定：

$$\rho C_p = \frac{\sum \rho_i C_{p,i} V_i}{\sum V_i} \quad \text{公式 2.14}$$

式中： ρ 为电池单体的密度； m_i 为组成电池单体各种材料的质量； C_p 为电池的比热容； $C_{p,i}$ 为组成电池的各种材料的比热容。

(3) 导热系数的确定

文献证明了可以将锂离子电池简化为沿三个正交方向具有不同导热系数的各向异性匀质材料^[71]。台湾清华大学 S. C. Chen 等人提出了一种类似于计算电路等效电阻的方法，根据传热学中热阻串并联原理，计算各方向上的等效导热系数。故电池中心区域的等效导热系数与各材料的厚度以及连接方式有关^[72]。在电池三维几何模型中，记电池正负极垂直于 Y 轴，电池生热量沿着 Y 轴方向以串联形式传递，同时沿 X 轴和 Z 轴方向，视作按并联形式在正负极板间传递热量。

$$\lambda_x = \lambda_z = \frac{\lambda_p L_{y_p} + \lambda_n L_{y_n} + \lambda_s L_{y_s}}{L_y} \quad \text{公式 2.15}$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{\frac{L_{y_p}}{\lambda_p} + \frac{L_{y_n}}{\lambda_n} + \frac{L_{y_s}}{\lambda_s}} \quad \text{公式 2.16}$$

其中， λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为单体电池中心区域材料沿 x, y, z 方向上的导热系数； λ_p 、 λ_n 、 λ_s 为电池单体内的正极极片、负极极片、隔膜的导热系数； L_z 电池单体的厚度； L_{y_p} 、 L_{y_n} 、 L_{y_s} 是电池单体内正极极片、负极极片、隔膜的厚度。

2.4 锂离子电池组传热模型及其自然对流传热的数值仿真

由于锂离子电池本身性能受温度条件影响很大,并且在电动汽车中,受限于有限的车辆动力舱空间,锂离子电池都是成组密集排布在汽车电池箱内,车辆运行过程中,电池组内部所产生的焦耳热、极化热、反应热和副反应热等热量更容易积聚,造成电池组工作环境温度过高,同时引发各电池单体温度分布不均,降低了电池的一致性,从而降低电池充放电循环效率,甚至导致电池组热失控,影响系统的安全性与可靠性。根据文献总结,最适宜磷酸铁锂离子电池的工作区间是 293K 至 318K,温差不超过 5K 为最佳,5K-10K 可以接受。

当多个电池组成一个电池组模块后,虽然单体电池内核生热速率没有变化,但电池表面的边界条件有所改变,只有边缘区域的电池具有与外界进行良好热量交换的条件,中间区域的电池由于密集排列,热量聚集,温度较边缘处高。同时,各电池间的空气热传导作用不可忽略。因此,电池组温度场并不是单体电池温度场的简单叠加。

接下来,本文将采用 Ansys Fluent 软件,对电池组在自然对流状态下的传热温度场进行数值仿真,为接下来电池组冷却方案的设计提供依据。

受到现有模拟计算水平的限制,现阶段若想实现完全还原的真实几何模型的模拟存在较大的难度,主要原因在于:首先,实际中的电池单体往往存在大量的几何细节,如电池表面的浅凹槽,以及极柱纹孔等,这些细节处往往需要较高精度的网格去还原,会导致模型总体网格数量过多,延长了迭代计算时间;其次,复杂几何模型的网格划分质量难以保证。当网格划分过于粗糙产生扭曲时,会导致计算失真。因此,建模过程对几何模型进行一定的简化处理是非常必要的。原则是既能准确反映模型主要特征,也能适当降低模型复杂度,保持网格模型计算的高效性和准确性。

本文中的计算对象标称容量 100Ah,标称电压为 3.2V,三维尺寸为:445mm · 192mm · 72mm,极柱高 20mm,直径 36mm,其余参数如表 2.2 所示:

表 2.2 计算对象初始参数表

项目	单位	数值
正极材料名称	/	磷酸铁锂
正极材料厚度	mm	0.169
正极材料导热系数	W/m·K	0.85 (20℃)
正极材料比热容	J/kg·K	1017 (20℃)
正极材料密度	kg/m ³	2287.6
正极材料质量	g	1017.6
负极材料名称	/	石墨粉
负极材料厚度	mm	0.123
负极材料导热系数	W/m·K	2.449 (20℃)
负极材料比热容	J/kg·K	734 (20℃)
负极材料密度	kg/m ³	2125.5
负极材料质量	g	711.1
隔膜材料名称	/	PP 多孔膜
隔膜材料厚度	mm	0.040
隔膜材料导热系数	W/m·K	0.1413 (20℃)
隔膜材料比热容	J/kg·K	1080 (20℃)
隔膜材料密度	kg/m ³	512.5
隔膜材料质量	g	123.82
电解液材料名称	/	六氟磷酸锂的有机溶液
电解液材料厚度	mm	/
电解液材料导热系数	W/m·K	0.13 (20℃)
电解液材料比热容	J/kg·K	1950 (20℃)
电解液材料密度	kg/m ³	1270
电解液材料质量	g	620
电池外壳材料名称	/	铝
电池外壳厚度	mm	1

假设组成电池的同种材料的比热容相同,且同一方向上各处的导热系数相

同, 电池内部各种材料的导热系数及比热容不随温度及荷电状态变化, 为恒定值, 且组成电池的各种材料均为均匀介质, 同种材料的密度相同。根据公式 2.13、2.14、2.15、2.16, 得到该锂离子动力电池的等效热物性参数如表 2.3 所示:

表 2.3 锂离子动力电池的等效热物性参数

序号	项目	单位	参数
1	单体折算平均密度	kg/m ³	2018
2	单体折算平均比热容	J/kg · K	1282
3	单体折算平均导热系数	X 方向	2.732
		Y 方向	0.913
		Z 方向	2.732

2.4.1 电池组自然对流传热模型的建立

电池组由 12 块该电池单体排列组成, 单体间隙 5mm。由于电池组整体模型几何结构比较整齐, 故主要采用结构化网格来建立电池组的网格模型, 网格总数 126388, 如图 2.4 所示:

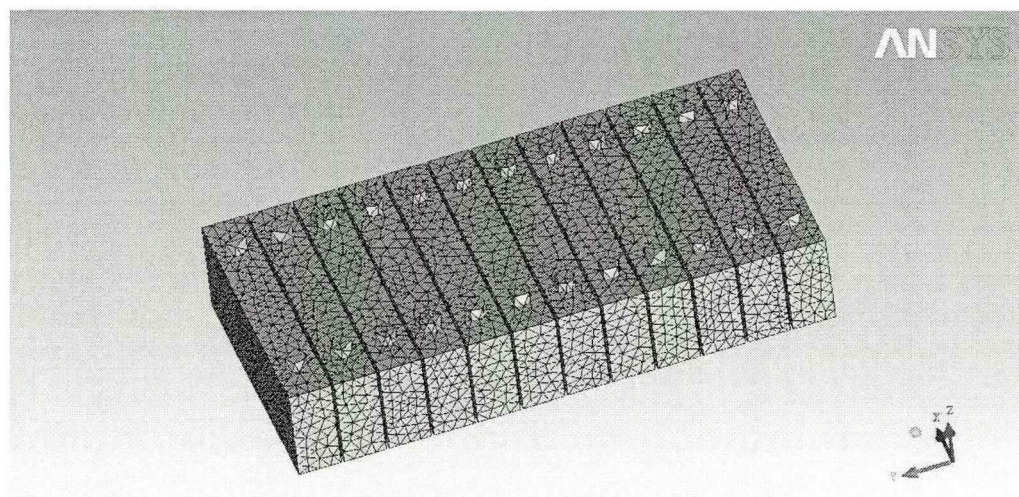


图 2.4 电池组单体排列示意图

电池组传热模型可以描述为: 在自然对流条件下, 各电池中心区域生热, 热

量一部分通过热传导经由电池外壳传到周围空气中，一部分带来自身升温。

对电池组设定以下边界条件：

(1) 壁面初始温度为环境温度，设定为 $T=303\text{K}$

(2) 壁面无滑移条件： $u=v=w=0$

(3) 壁面法向压力梯度为0： $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

(4) 电池外壳与周围空气的自然对流换热系数取 $5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

考虑车辆实际运行中状态的复杂性，为了方便接下来的仿真，根据公式 2.3-2.7 计算得到该锂离子动力电池典型放电倍率下的生热率，如表 2.4 所示：

表 2.4 电池单体生热速率

序号	放电倍率	电池单体电流	电池单体生热率
1	1/3C	33.3A	155.3W
2	2/3C	66.7A	1347.9W
3	1C	100A	5688.0W

2.4.2 不同放电倍率下的电池组自然对流传热温度场分析

首先，本文将对自然对流条件下，电池组以不同放电倍率（1/3C、2/3C、1C）恒流放电达到热平衡状态时的温度场进行初步分析，了解电池组的温度分布特点，为接下来的电池组冷却方案设计提供思路。

当环境温度为 303K 时，电池组恒流放电达到热平衡状态时的温度场及温度状况如图 2.5 (a)、(b)、(c) 以及表 2.5 所示：

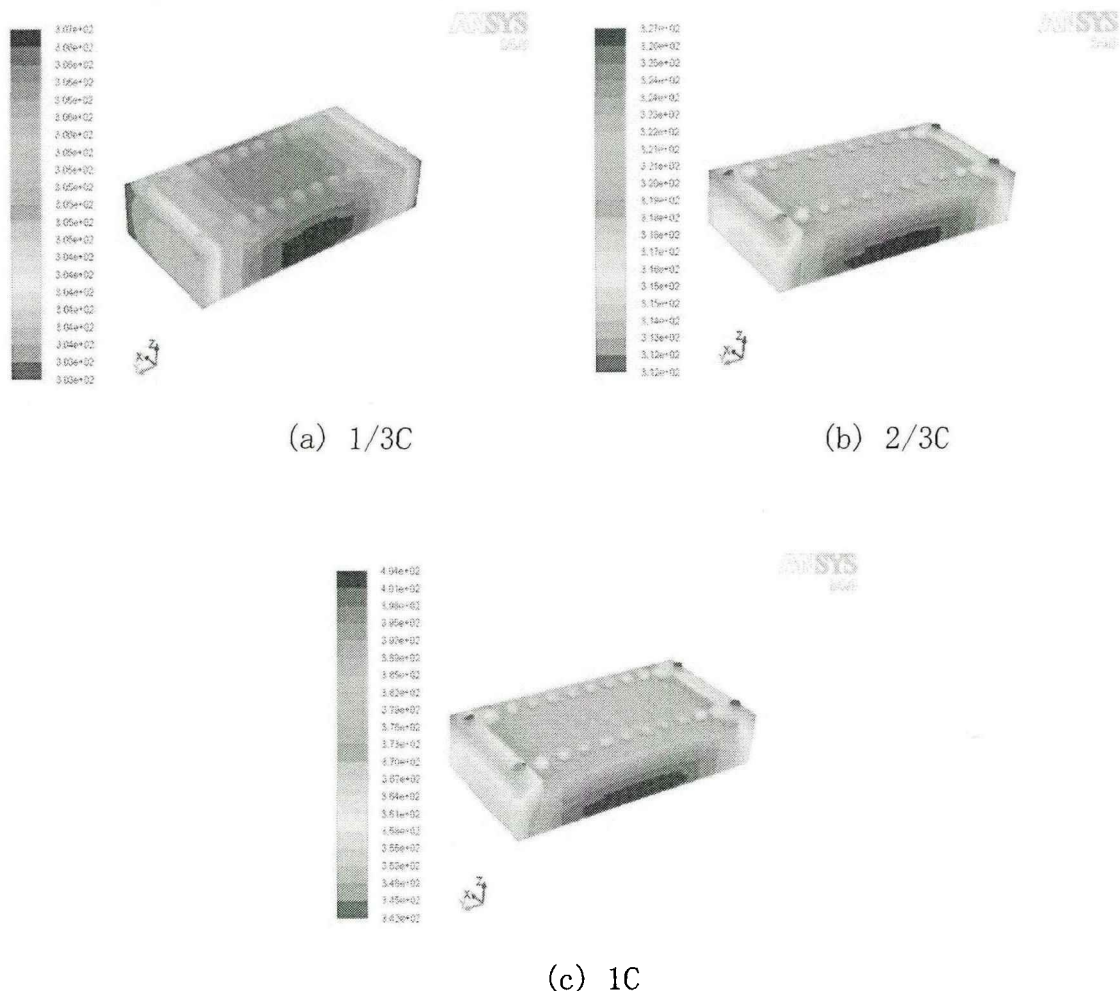


图 2.5 环境温度 303K 时，电池组恒流放电达到热平衡状态时的温度场

表 2.5 自然对流方式下电池组表面温度状况 (T=303K 单位: K)

放电倍率	最低温度	最高温度	最大温差
1/3C	303.2	306.6	3.4
2/3C	311.7	326.6	14.9
1C	342.2	404.0	61.8

以上可以看出，在同样的初始环境温度 303K 下，电池组以不同倍率恒流放电至热平衡状态时，温度分布各不相同。倍率越大，温升越大。1/3C 倍率放电状态下，电池组最高温度 306.6K，最低温度 303.2K，温差 3.4K；2/3C 倍率放电状态下，电池组升温最低温度至 311.7K，最高温度 326.6K，温差达到 14.9K，中间部位与边缘处电池的温度不均匀性已经很大；1C 倍率放电结束时，中间部

位电池大量热量聚集，最高温度已经高达 404K，最低温度也达到了 342.2K，这已经是十分危险的情况，极有可能发生电池热失控而发生爆炸。成组电池在中高放电倍率下，不但电池个体温度飙升，而且由于位置不同带来的温度不均匀性也非常显著。

图 2.6(a)是 12 个电池单体内部中心处的温度散点图，从左至右依次编号为 1-12 号。可以看出，由于排列方式对自然散热条件的影响，各个电池内部温度趋势与表层趋势相似，也呈现中间温度高，两侧温度低的趋势。在中低倍率放电条件下，中心点温差在 10K 以内，但当放电倍率达到 1C 时，各个电池单体中心点温度骤升，且中间位置高于最外侧位置电池温差也达到约 30K，电池组整体均匀性非常不理想。

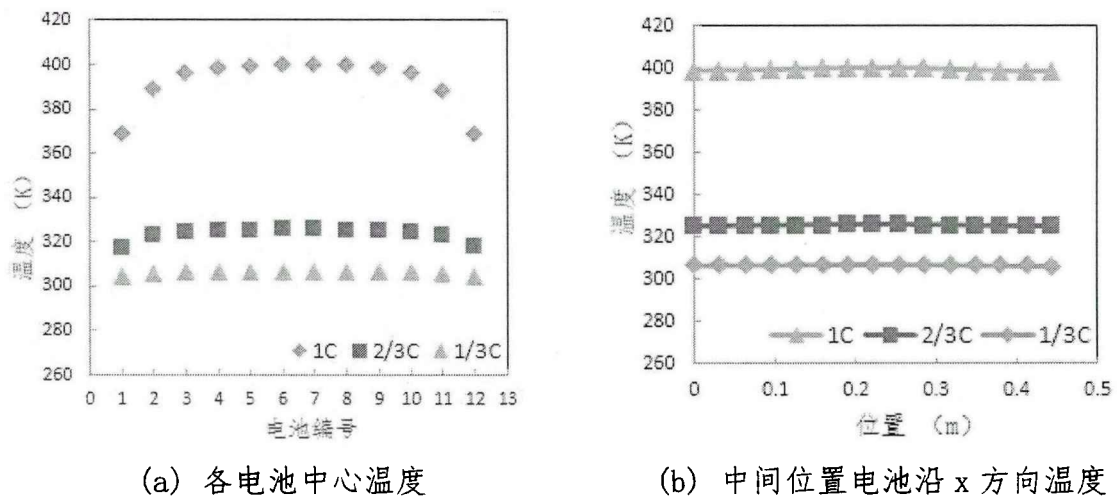


图 2.6 自然对流条件下不同放电倍率电池组内部温度分布

图 2.6(b)是电池组中间位置处 6 号电池的内部沿电池长度方向上若干监测点的温度曲线，在各倍率放电状态下各点温度基本保持一致，表明此时各电池内部的均匀性较好。

2.4.3 不同环境温度下的电池组自然对流传热温度场分析

不同的环境温度也会影响自然对流冷却的效果，从而对电池组整体温度造成影响。下面将以 2/3C 的放电倍率为例，对当环境温度为 293K, 303K 和 313K 时的电池组温度场进行计算和对比分析。

图 2.7(a)和图 2.7(b)是环境温度分别为 293K 和 313K 时的电池组温度云图：

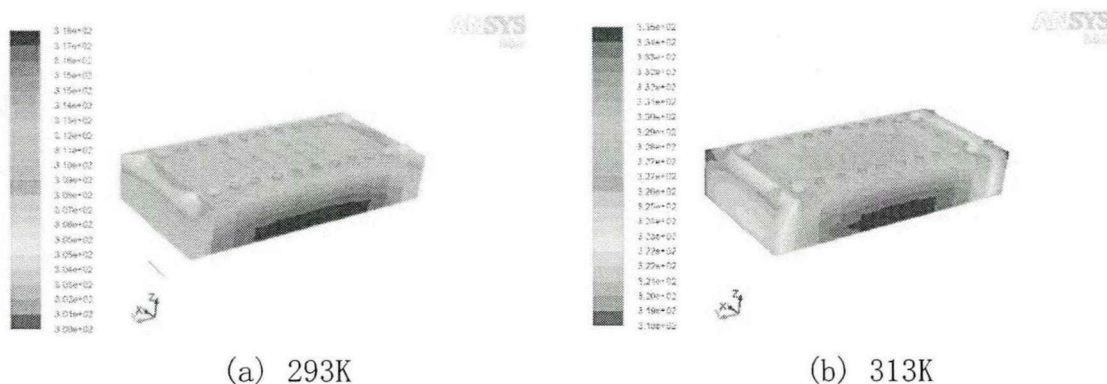


图 2.7 自然对流条件下不同环境温度的电池组温度场云图

结合图 2.7 与表 2.6 综合分析可得，电池组内最大温差随环境温度的升高而增大。

表 2.6 自然对流条件下的电池组表面温度状况 (2/3C 单位: K)

环境温度	最低温度	最高温度	最大温差
293K	304.3	318.2	13.9
303K	311.7	326.6	14.9
313K	318.2	335.0	16.8

图 2.8(a)、(b) 分别代表了这三种环境温度条件下，各电池单体中心位置的温度状况及中间位置电池温度曲线：

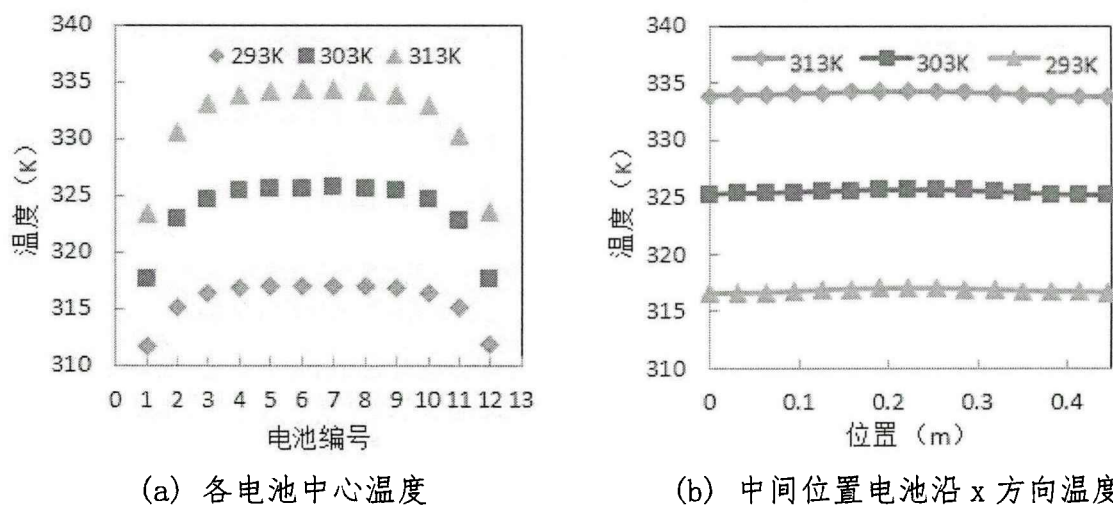


图 2.8 自然对流条件下不同环境温度电池组内部温度分布

以上结果分析对比表明,在自然对流条件下,随着放电倍率的提高,电池组整体温度水平升高,且受排列形式的影响,电池组整体呈现中间温度高,两侧温度递减的趋势,各个电池间的温度均匀性较差,但各电池内部的均匀性较好。此外,电池组表面最高温度、最低温度、最大温差均随环境温度的升高而增大。总之,中高倍率下自然对流已经无法满足电池组理想工作条件,需要采取强制冷却措施。

2.5 本章小结

本章首先介绍了锂离子电池的基本结构,对比了不同类型锂离子电池的性能特点,并介绍了磷酸铁锂离子电池的工作原理,分析了其生热机理。接着从传热学原理角度出发,对锂离子电池进行了传热分析,包括其内部的传热方式和它与外部换热方式。接下来针对锂离子电池这种分层的复杂多材料体,采取等效替代的方式,计算了其热物性参数的等效值,包括等效比热容、等效密度、等效导热系数等,最后建立了电池组自然对流条件下的传热模型,并导入 Fluent 软件进行传热效果的仿真计算,对比了对自然对流条件下,电池组在不同环境温度以及不同倍率放电至热平衡状态时电池组温度分布特点。结果表明:1. 电池组放电倍率越大,温升越大。中高倍率下自然对流已经无法满足电池组理想工作条件,需要采取强制冷却措施。2. 成组电池在中高放电倍率状态下,不但电池个体温度飙升,而且由于位置不同带来的温度不均匀性也非常显著,电池组整体温度均匀性很差。3. 自然对流条件下,各电池内部的均匀性较好。

3 锂离子动力电池组空气强制对流冷却方案的数值仿真研究

由前一章电池组在自然对流条件下的温度场的计算结果可以看出,如果不采取一定的强制对流冷却措施,锂离子电池组在工作状态下非常容易出现过热或温差过大的现象,这会极大地损坏动力系统的安全性、耐久性。因此,为保证锂离子动力电池组的正常运行,需要对电池组采取强制对流冷却措施,以控制电池组工作在最适宜的温度范围内,并保证一定的温度均匀性。

根据冷却介质的不同,电池组一般有空气强制对流冷却、液体强制对流冷却及相变材料冷却三种方式。其中,空气强制对流冷却是指通过风扇、风机等设备,向电池组内引入空气气流,与电池表面进行流动换热,带走电池组产生的热量,降低电池组内的热量的累积。

液体强制对流冷却方式是用导热系数较高的一些液体代替空气,对电池组进行流动换热冷却。由于电池组浸泡在冷却液体中,因此对电池本身以及电池组对外的密封性有很高的要求,且对冷却液体的电绝缘性要求也较高。

相变材料冷却是指利用材料的相变过程中吸收的潜热实现冷却的效果,这种方式冷却效率较高,冷却温度的稳定性较高,但广泛应用的瓶颈在于成本过高且后期需要较高的维护水平。

空气强制冷却的流道设计方式主要有串行和并行两种结构,如图3.1、图3.2所示:串行结构里,冷却空气依次流经电池组内各个电池表面,在较靠后的位置处,冷却空气已被加热,且由于前列电池的阻挡作用,流场发展不充分,冷却空气不易到达电池间的缝隙,整体换热能力也逐渐减小;并行结构里,冷却空气从进风口进入后,按照单体电池数量分成不同路径,自动分配各自的流量,能够充分流经各个电池单体之间的缝隙,且靠后位置处的电池受前列电池的气流阻挡影响小,各单体电池换热条件接近。故本文采取并行通风结构对电池组进行强制对流冷却方式的分析。

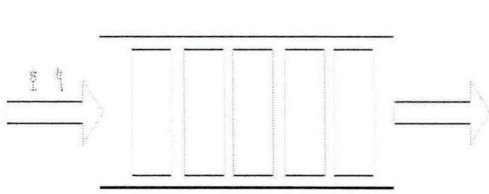


图 3.1 串行通风冷却方式

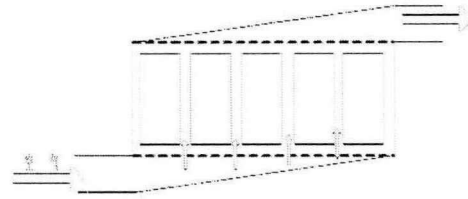


图 3.2 并行通风冷却方式

3.1 电池组空气强制对流冷却模型的建立

3.1.1 电池组-冷却通道模型的建立

在电池组的强制对流冷却过程中,涉及到电池的内部导热以及与强制对流的空气进行热量交换两种过程。在上一章建立的电池组传热模型基础上,运用 Ansys 附带的网格划分软件 ICEM 建立强制对流的流场通道模型,流场包含进风部分的流场、电池组各单体电池间缝隙处的冷却通道流场和出风部分的流场。计算冷却温度场时,将电池组与冷却通道模型进行装配,形成电池组-冷却通道耦合传热模型,如图 3.3 所示,空气由左下方进入电池组,并在电池单体间流动换热,最后由右上端出口流出。

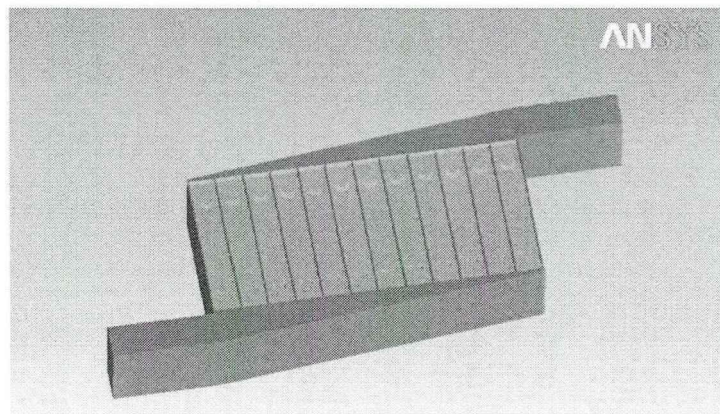


图 3.3 电池组-冷却通道几何模型

3.1.2 网格划分、材料属性与边界条件的设置

对冷却通道采用四面体网格划分,适当调小网格单元尺寸以提高计算精度;由于电池间的缝隙对流动换热有着重要的影响,故对各缝隙处的流场也进行精细化网格划分。全场网格总数为 1596180。网格模型如图 3.4、图 3.5 所示所示:

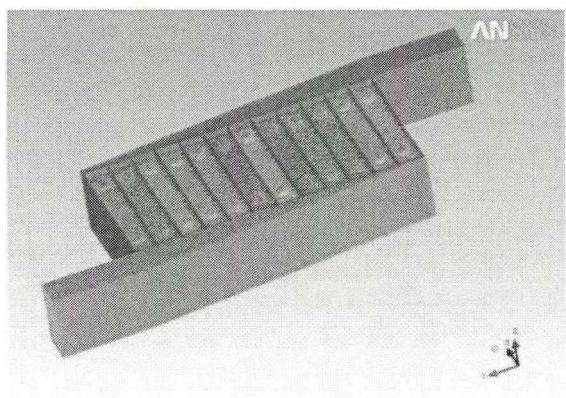


圖 3.4 電池組-冷卻通道網格模型

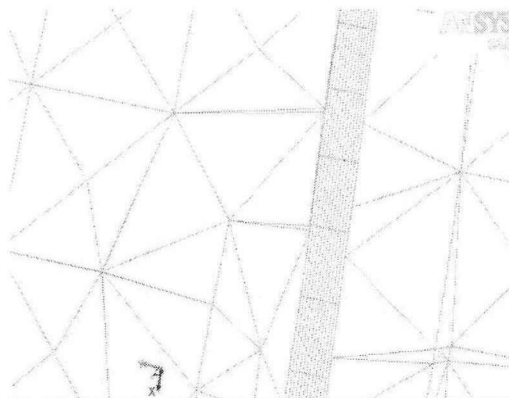


圖 3.5 電池縫隙處網格細節

對於耦合傳熱模型，在冷卻溫度場的模擬過程中，要同時計算電池生熱傳熱以及流体流動兩個過程。故除了設置鋰離子電池的材料屬性，還需要設置冷卻介質的材料屬性。視空氣為常溫下的不可壓縮定常流体，空氣密度 1.225kg/m^3 ，比熱容 $1006.43\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ，導熱係數 $0.0242\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，粘度係數 $1.789 \cdot 10^{-5}\text{kg/m}\cdot\text{s}$ 。

該耦合傳熱模型的邊界條件包括流体部分的入口邊界、出口邊界、流体壁面邊界，以及固体部分的電池內熱源邊界，及流固耦合傳熱邊界。本文流体的入口邊界採用速度邊界條件，並在仿真過程中，通過改變流体入口速度條件及溫度條件來改變空氣強制對流冷卻強度。出口邊界與大氣相通，採用壓力出口邊界。流体壁面在計算過程中設定為絕熱邊界條件，即冷卻通道中的流体不與通道壁面產生熱交換，流体通道壁面熱流密度為0，法向壓力梯度為零，無滑移。電池外殼與冷卻流場的邊界為熱耦合邊界條件，通過設置interface，Ansys Fluent將在計算時自動耦合電池組的導熱和空氣流體的換熱。內熱源設置參照前章。

3.1.3 湍流模型的选择

由於空氣強制對流冷卻為強迫對流換熱，換熱效果與流体流動狀態相關。根據流體力學的相关知识，流体流動狀態可根據雷諾數（Reynolds number）判斷。當雷諾數小於某一臨界值時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流体穩定，即為層流；反之為湍流。雷諾數的大小與流体的速度有關。經過大致估算，本模型雷諾數約等於60000，遠大於臨界雷諾數，故冷卻空氣的流動狀態為完全湍流運動。

Fluent 软件具有很多湍流计算模型，但工程实践表明， $k-\varepsilon$ 湍流模型应用最广泛^[73]，也最为有效，因此本文采用标准两方程 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

接下来将对电池组的空气强制对流冷却进行仿真计算。

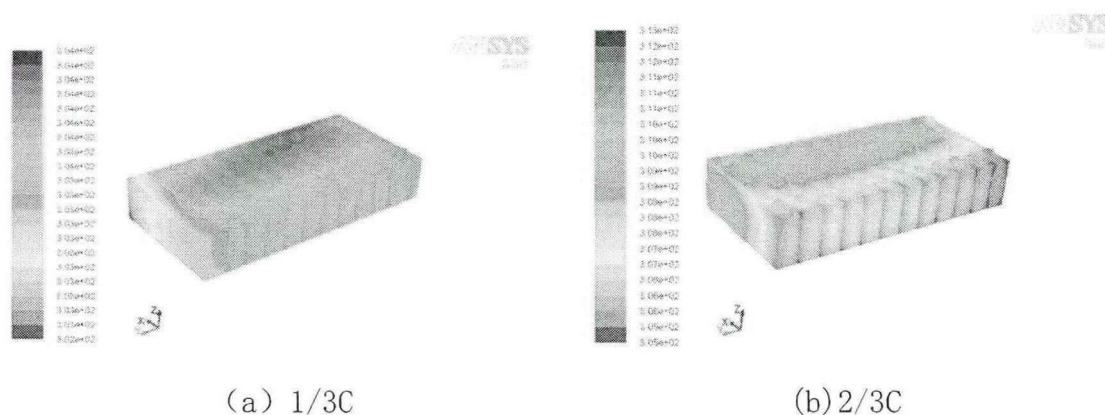
3.2 环境风强制对流冷却模式

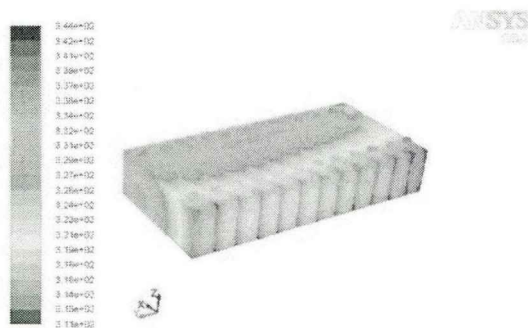
环境风冷却模式是指引入车辆行驶环境中的自然风对电池组进行强制冷却，流过电池组表面的气体温度与外界环境一致。环境风的引入可以依靠两种方式。一种是直接利用车辆行驶中产生的迎风气流，通过导流管进入电池组冷却通道直接冷却电池组；另一种方式是采用轴流式风机，采取抽吸车外环境空气的方式为电池组提供冷却气流^[74]。两种方法相比，直接利用迎风气流可以简化机械结构，并免去了风机运转所需的功耗，整体机械效率更高，但不足之处在于冷却流速受车速影响大，气流不稳定。风机抽吸的方式能够提供更加稳定的冷却气流。

下面将从不同放电倍率、冷却风不同速度及温度的角度，分析比较电池组环境风强制对流冷却的冷却效果。

3.2.1 不同放电倍率的环境风冷却温度场分析

首先设定车辆运行环境温度为303K，环境冷却风入口流速为1m/s。该条件下，电池组以1/3C、2/3C、1C倍率恒流放电至热平衡状态下时，温度场分布云如图3.6所示：





(c) 1C

图3.6 T=303K, v=1m/s时, 电池组各倍率放电的冷却温度场

由上三图可见, 总体说来, 与自然对流条件下相似, 随着放电倍率的增大, 电池组表面整体温度水平有所上升。同时, 引入环境风强制对流之后, 电池组各倍率放电下的整体温度水平大幅下降, 放电倍率越高, 强制对流冷却起到的作用越明显。在 1C 放电倍率下, 最高温度降幅达到 60K 之多, 同时电池组内温度不均匀性也明显下降, 如表 3.1 所示:

表 3.1 环境风强制对流冷却电池组表面温度变化表 (单位: K, T=303K, v=1m/s)

	1/3C	2/3C	1C
最低温度	302.4	304.9	311.0
最低温度 (自然冷却)	303.2	311.7	342.2
温度变化	-0.8	-6.8	-31.2
最高温度	304.3	312.6	344.0
最高温度 (自然冷却)	306.6	326.6	404.0
温度变化	-2.3	-14.0	-60
最大温差	1.8	7.7	33
最大温差 (自然冷却)	3.4	14.9	61.8
温度变化	-1.6	-7.2	-28.8

从图3.7中也可以看出, 环境风冷却使电池内部温度水平也较自然对流条件下有所下降, 且随放电倍率的增大而升高:

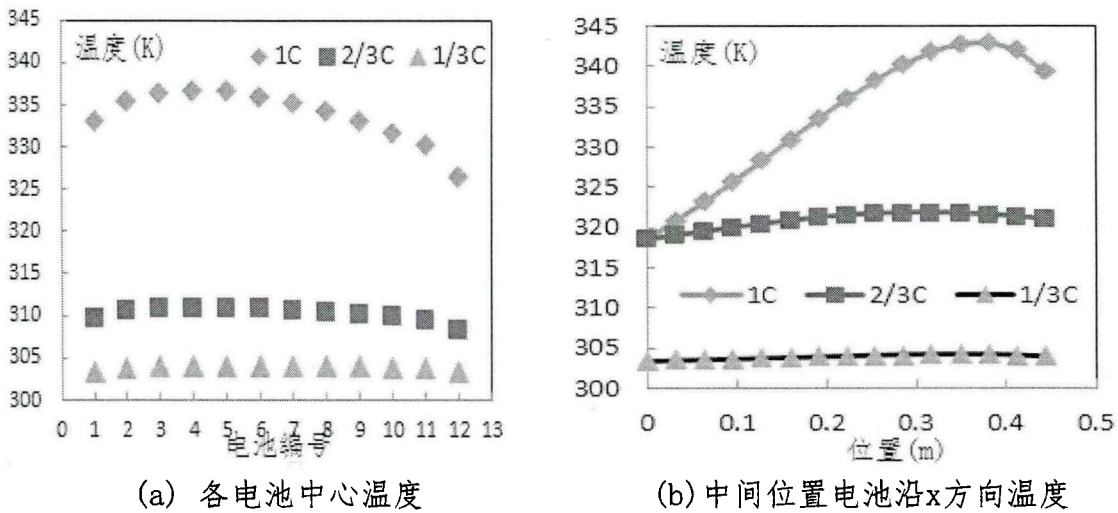


图3.7 $T=303K$ $v=1m/s$ 时，电池组不同放电倍率内部温度分布

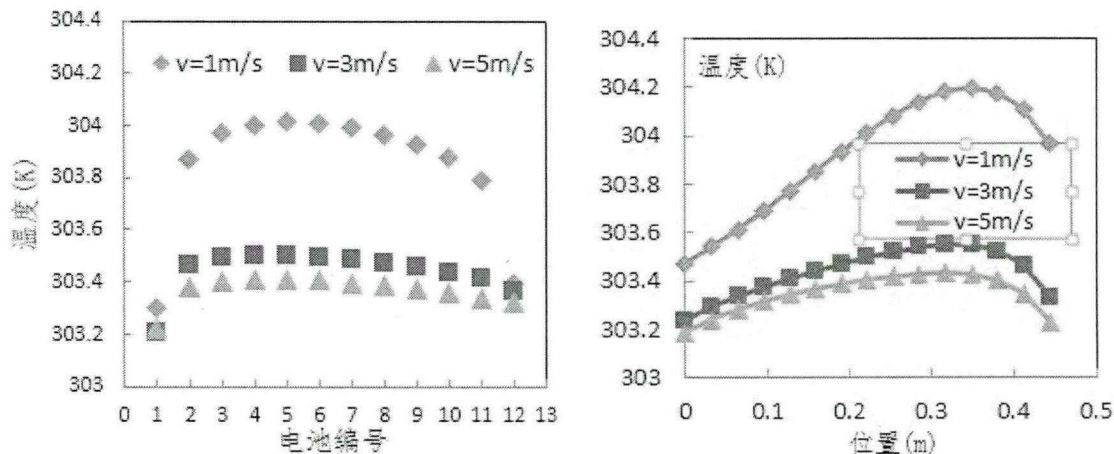
但与自然对流条件下不同，电池组整体温度分布不再是单纯的边缘位置电池组温度低，中间位置电池温度高，中心点最高温度没有出现在中央的6,7号单体上，而是向进风口一侧4号电池附近偏移。

同时，受到强制对流气体流场的影响，整体趋势表现为各个电池靠近进风流道一边的部分温度水平略低于出风流道一侧，在1C放电倍率时这种趋势更加明显，电池单体温度的最高点出现在接近出风口流道的一侧，温度最低点出现在最靠近进风口流道的一侧。

3.2.2 不同冷却强度的环境风冷却温度场分析

在上一小节中，可以看到中高倍率（2/3C、1C）放电时，1m/s的入口风速条件并不能满足电池组的冷却需求，接下来改变入口风速条件，研究环境风强制冷却的不同散热强度对电池组温度场的影响。以环境温度303K为例，设定环境风进口流速分别为3 m/s, 5 m/s, 10m/s。

(1) 放电倍率1/3C，冷却空气温度 $T=303K$, $v=1$ m/s, 3m/s, 5m/s, 10m/s时，电池组放电至热平衡状态时的仿真结果如图3.8所示：



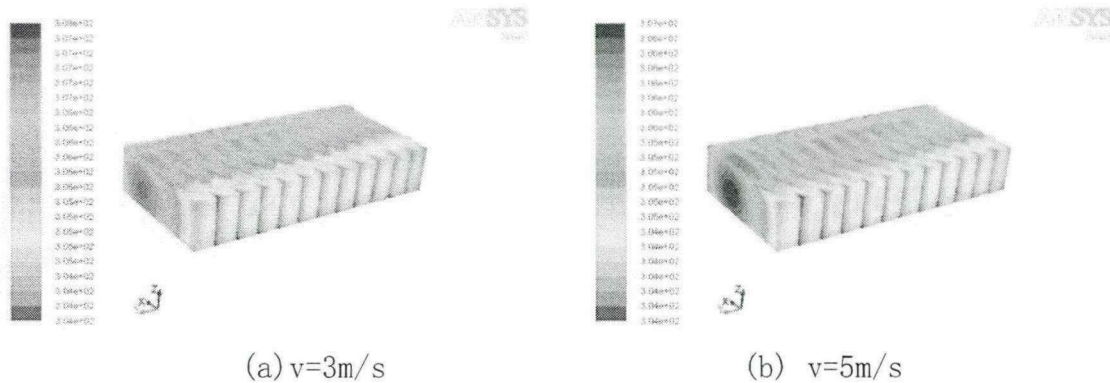
(a) 各电池中心温度

(b) 中间位置电池沿x方向温度

图3.9 T=303K 1/3C倍率放电 各冷却风速度下电池组内部温度分布

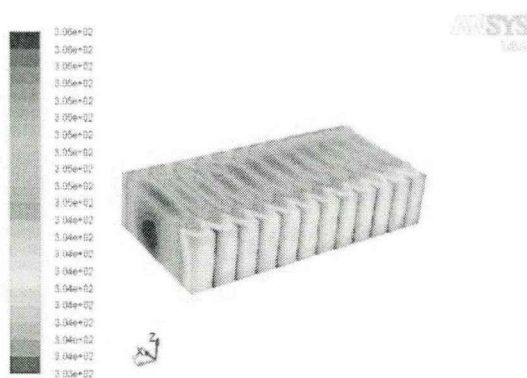
综上所述，小倍率放电时，1m/s 的环境风风速已经可以满足电池表面及内部的冷却需求，此时风速的提高对电池组表面及内部冷却效果的提升作用微弱。

(2) 放电倍率 2/3C，冷却空气温度 T=303K，v 分别为 1 m/s，3 m/s，5 m/s，10m/s 时，电池组放电至热平衡状态的温度场仿真结果如下：



(a) v=3m/s

(b) v=5m/s



(c) $v=10\text{m/s}$

图3.10 $T=303\text{K}$ 电池组2/3C倍率恒流放电时不同冷却风速的冷却温度场

表3.3 空气强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 ($T=303\text{K}$, 2/3C, 单位: K)

空气入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
1m/s	304.9	312.6	7.7
3m/s	303.8	307.6	3.8
5m/s	303.6	306.6	3.0
10m/s	303.4	305.7	2.3

由图3.10以及表3.3可知，在电池组中倍率放电状态下，随着风速的提高，电池组整体表面温度有所下降，在环境风进口速度达到3m/s时，其电池组内表面最高温度、最低温度以及最大温差便可以满足电池组的理想工作温度范围要求，电池组整体均匀性较好。

同时，电池内部温度也有明显下降，3m/s的风速时2/3C放电倍率下一个比较明显的冷却效果分界点。从中间位置电池轴线温度分布图也可以看出，随着风速的增大，电池单体内部的温度均匀性也有所提高：当风速达到3m/s及以上时，单体内部温差由1m/s时的6K降到了3K及以下。

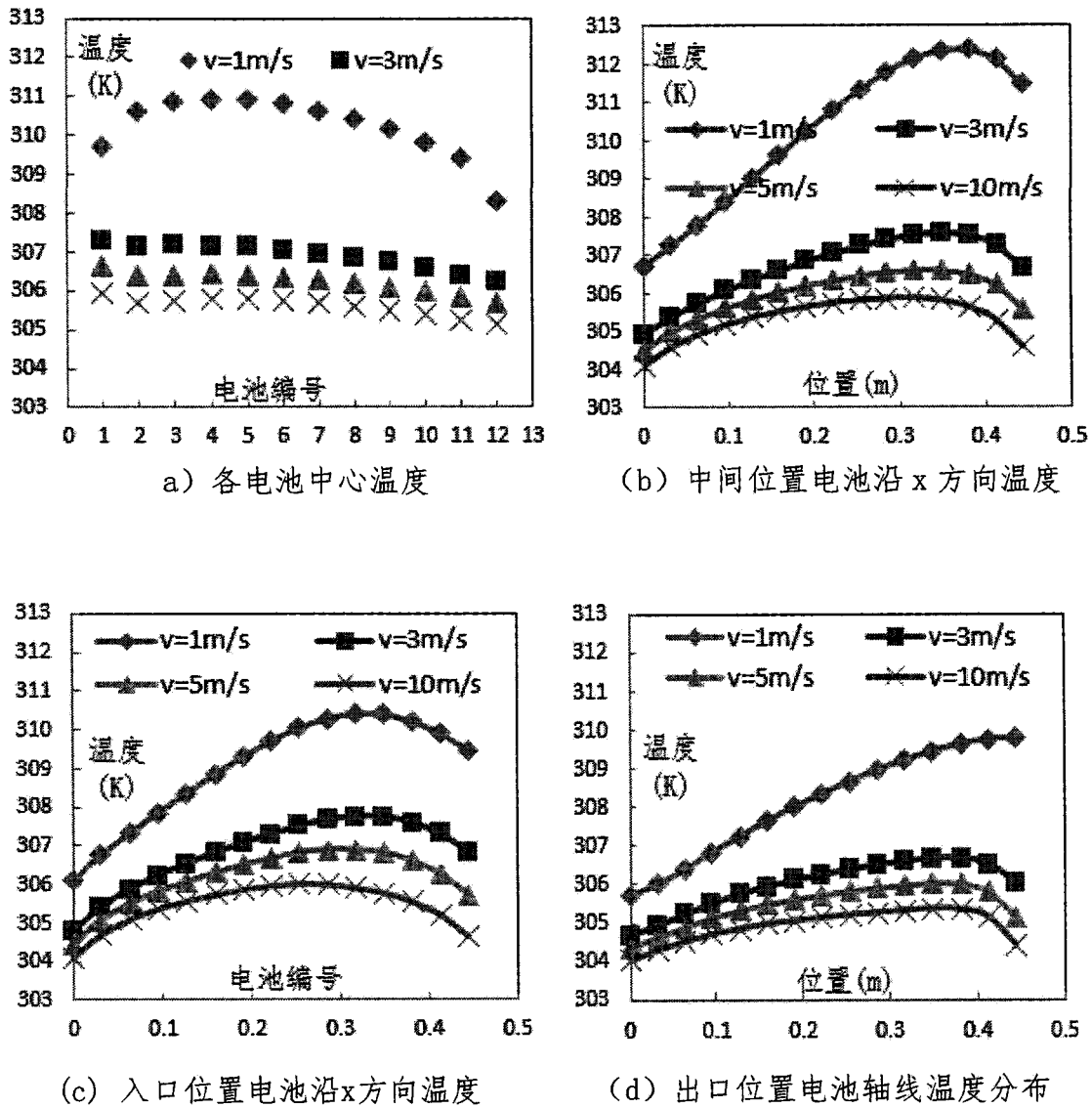


图3.11 T=303K 2/3C倍率放电 各冷却风速度下电池组内部温度分布

综上所述，在 2/3C 放电倍率下，环境风速度的提高有助于提高对电池组表面及内部的冷却效果。3m/s 及以上的环境风可以满足电池组中倍率放电时的冷却需求。

(3) 放电倍率 1C，冷却空气温度 T=303K，v=1, 3, 5, 10m/s，电池组放电至热平衡状态时的仿真结果如图 3.12 所示：

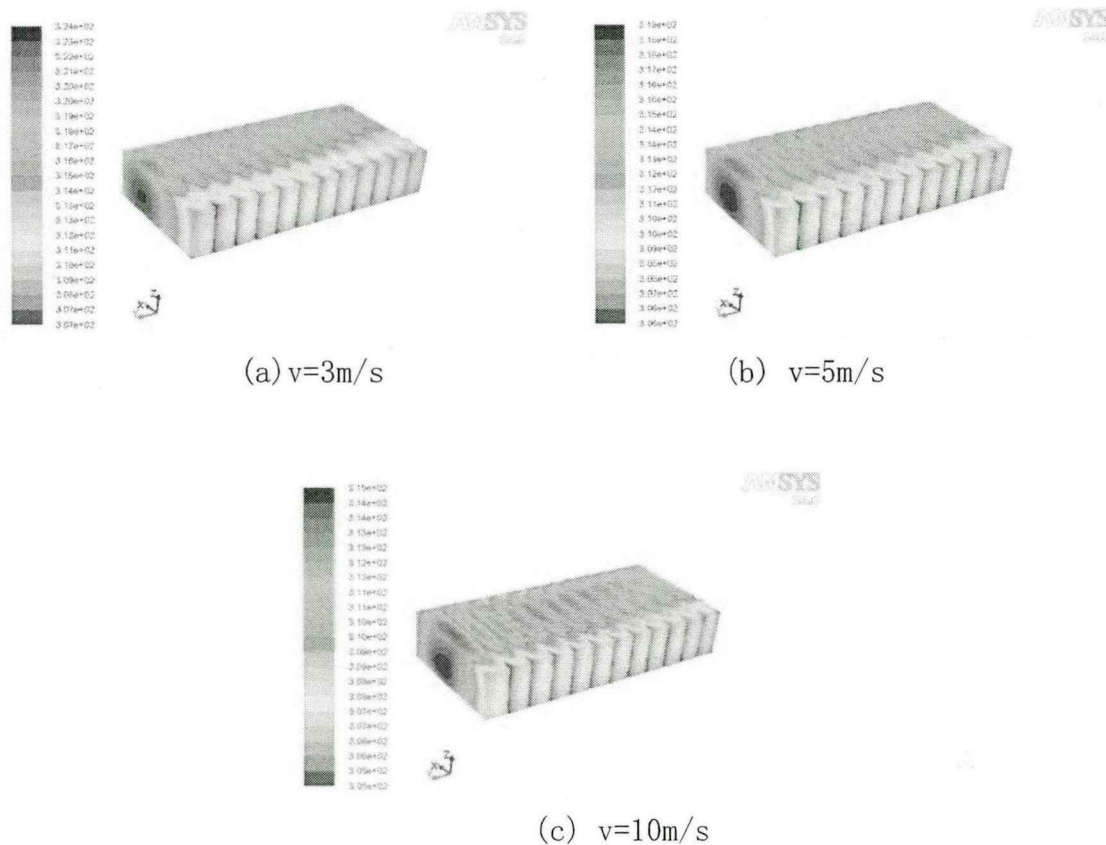


图3.12 T=303K 电池组1C倍率恒流放电时不同冷却风速的冷却温度场

表3.4 空气强制对流冷却方式下的电池组表面温度状况 (T=303K, 1C)

空气入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
1m/s	311.0	344.0	33.0
3m/s	306.5	324.0	17.5
5m/s	305.6	319.2	13.6
10m/s	304.8	314.9	10.1

1C 倍率放电时，虽然环境风速的提高对电池组表面最高温度的冷却提升显著，但只有风速达到 5m/s 及以上时，才能勉强将其降至电池组温度上限，且对温度均匀性的调节效果很差，即使增大到 10m/s 的风速，电池组内温差最大值仍然有 10.1K，即高倍率放电条件下，仅提高风速对电池组表面温度的冷却强度提升明显，但最高速时仅仅勉强满足要求。

由各电池单体中心点温度曲线图可以看出，1C 大倍率放电条件下，冷却风风

速的提高可以降低电池内部的温度，3m/s 及以上的风速可以控制各个电池中心点最大温差在 6K 左右，大部分温差都在 3K 左右。如图 3.13 所示，由进口位置、中间位置以及出口位置三个电池单体的长度方向沿轴向的温度分布可知，1C 高倍率放电条件下，仅提高环境风进口速度勉强满足电池内部的温度需求。

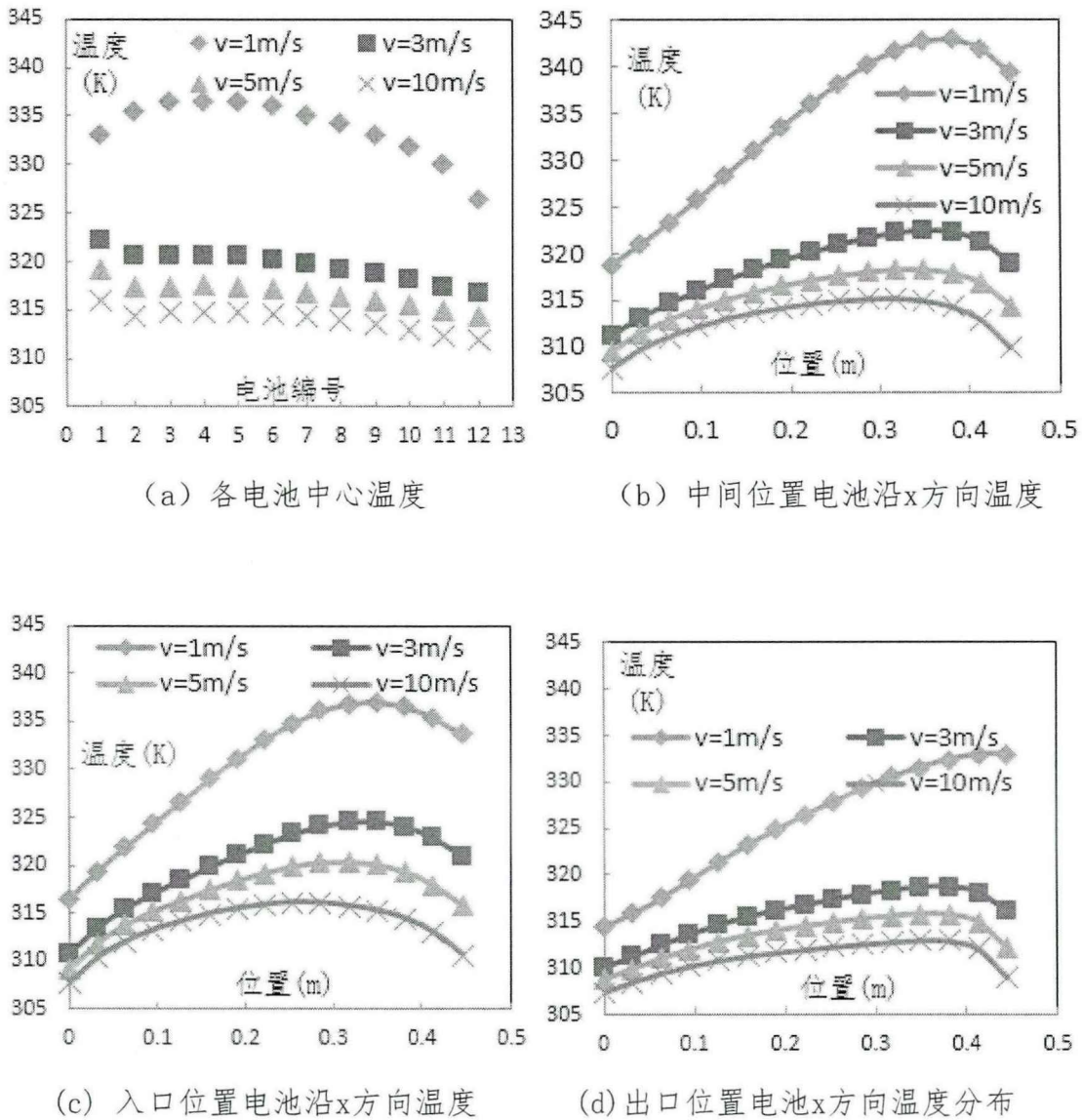


图3.13 T=303K 1C倍率放电 各冷却风速度下电池组内部温度分布

综上所述，在 1C 高倍率放电条件下，环境风速度的提高有助于提高对电池组表面及内部的冷却强度，但效果有限，10m/s 及以上 303K 环境风勉强满足电池组中倍率放电时的冷却需求。

由以下流场在模型z轴中央截面处的速度云图（图3.14）可知，当入口流速为1m/s时，电池缝隙之间的空气流速大约为0.3m/s-0.5m/s，当入口流速为3m/s时，电池缝隙之间的空气流速大约为1m/s-1.5m/s，当入口流速为5m/s时，电池缝隙之间的空气流速大约为1.5m/s-2.5m/s，当入口流速为10m/s时，电池缝隙之间的空气流速大约为4m/s-8m/s。

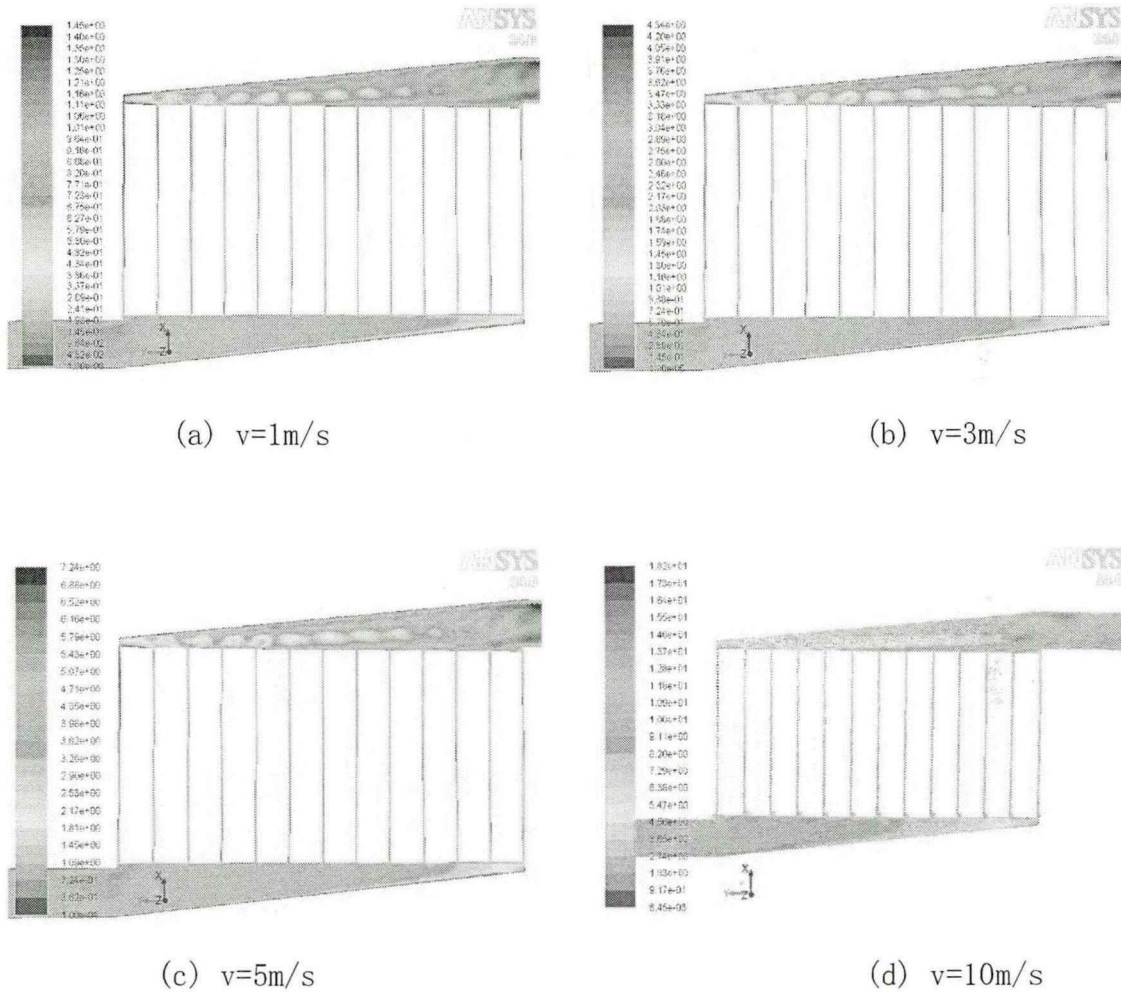


图3.14 冷却通道在z轴中央截面处速度云图

由上图还可以看出，电池间隙靠近进气楔形风道的一侧速度分布大于靠近出气楔形风道一侧的速度，因此会出现各个电池靠近进气楔形风道一边的部分温度水平略低于出气楔形风道一边的整体趋势。

此外，在各个电池中心点温度分布图中，注意到最高温度没有像自然冷却时出现在中央位置的电池上，而是向靠近进风段一侧的电池上偏移，这是由于

靠近进风段的电池间隙有气体回流现象出现，导致该部位流速缓慢，换热能力受到阻碍。如图 3.16 所示。

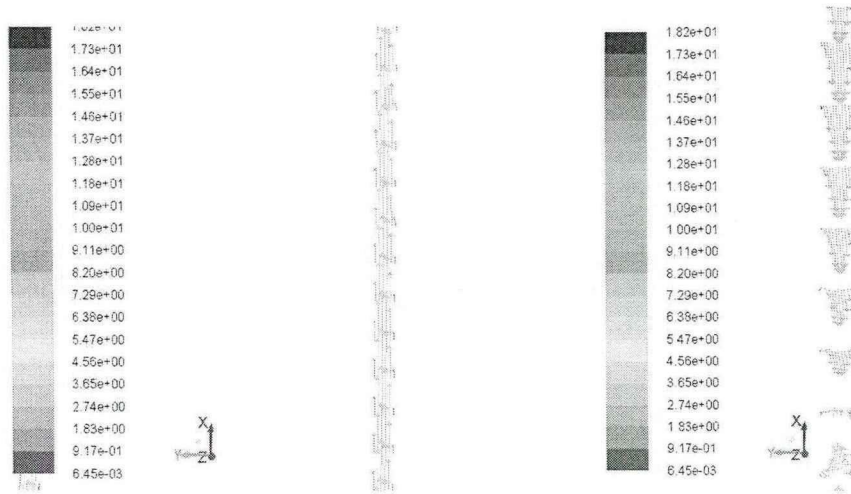


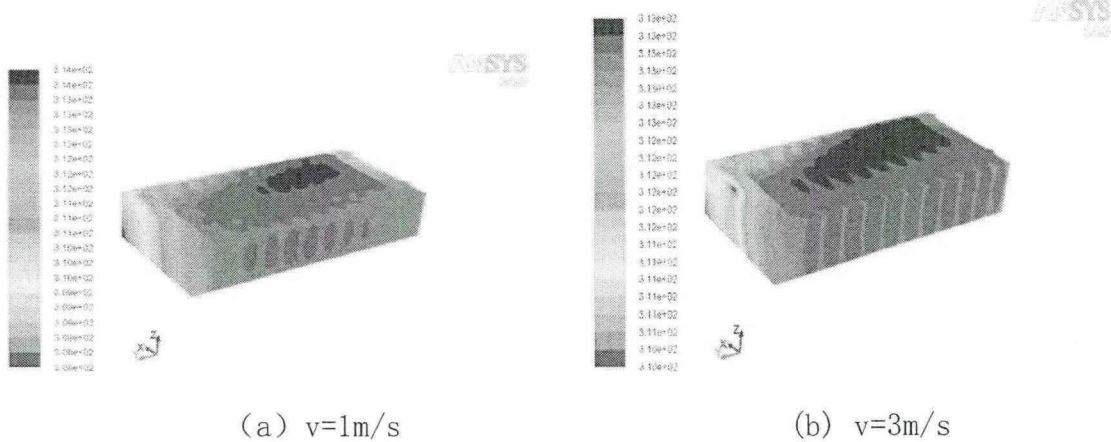
图3.15 $v=10\text{m/s}$ 中央缝隙处的速度矢量图 (上左)

图3.16 1号电池左侧缝隙的回流区速度矢量图 (上右)

3.2.3 不同环境温度的环境风冷却温度场分析

上一节对环境温度 303K 时的环境风冷却效果做了对比分析，接下来将对环境温度 313K 的情况进行对比分析：

(1) $T=313\text{K}$, $v=1, 3, 5, 10\text{m/s}$ 时，电池组以 1/3C 倍率恒流放电的散热温度场。



(a) $v=1\text{m/s}$

(b) $v=3\text{m/s}$

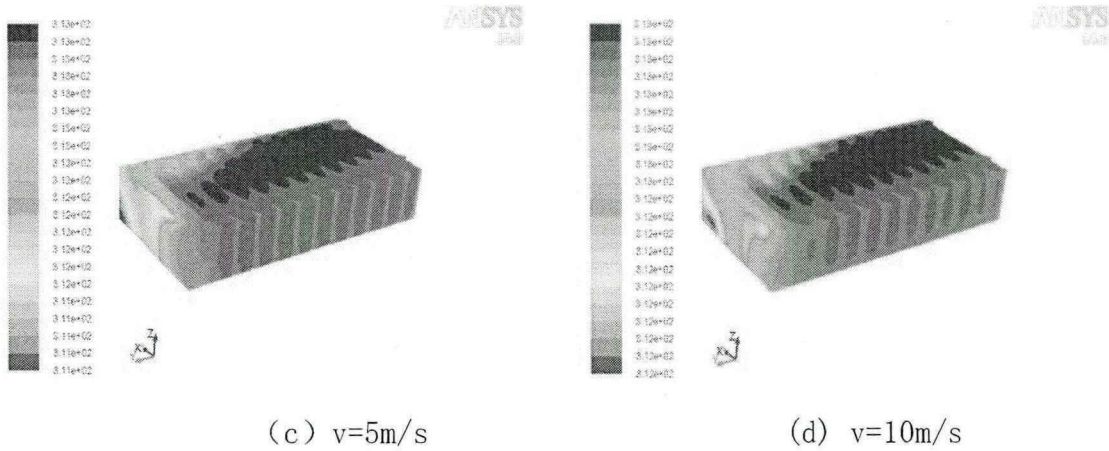


图 3.17 $T=313\text{K}$ 电池组 1/3C 倍率放电时不同冷却风速的冷却温度场

表3.5 空气强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 ($T=313\text{K}$, 1/3C)

空气入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
1m/s	308.0	314.0	6.0
3m/s	310.3	313.5	3.2
5m/s	311.0	313.4	2.4
10m/s	311.6	313.3	1.7

由以上云图可知，当环境温度升高后，直接以环境风作为冷却介质的冷却效果明显下降，各风速条件下电池组表面温度（如最高温度、最低温度）的升高基本与环境温度升高的幅度一致，电池组内最大温差也较303K时有所增加。

结合下面的各电池中心点的温度散点图（图3.18）：

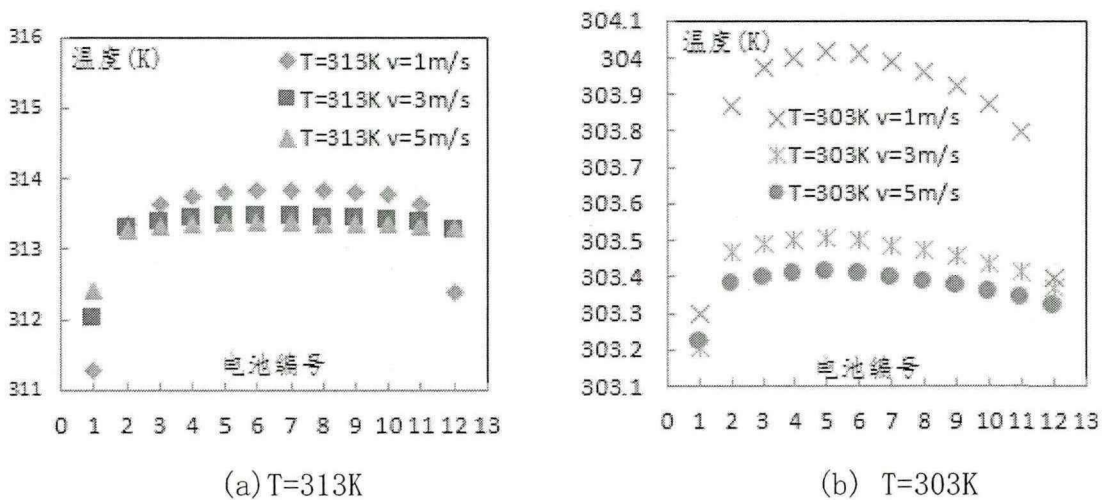


图3.18 $v=1, 3, 5\text{m/s}$ 时，电池组以1/3C倍率各电池中心点温度

可知，313K 时各风速的温度水平均在 303K 之上，表明在小倍率放电的环境风对流冷却中，环境风温度对电池内部温度的影响大于环境风速度的影响。313K 的环境风达到 1m/s 以上的风速也基本满足小倍率放电状态下电池内外的冷却条件。

(2) $T=313K$ ， $v=1, 3, 5, 10m/s$ 时，电池组以2/3C倍率恒流放电的冷却温度场。

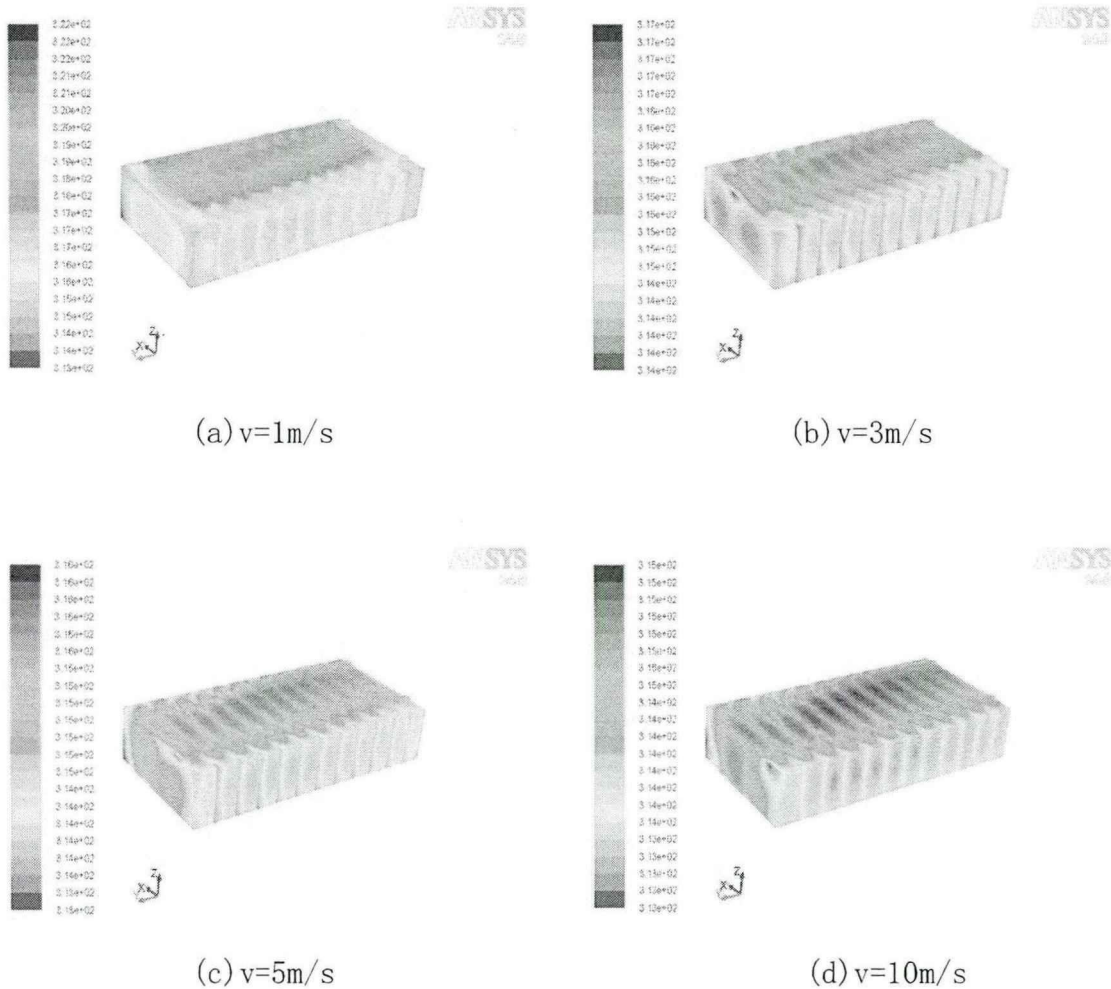


图 3.19 $T=313K$ ，电池组 2/3C 倍率放电各冷却速度下的冷却温度场

表3.6 空气强制对流冷却方式下的电池组表面温度状况 ($T=313K$ ，2/3C)

空气入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
1m/s	313.3	322.4	9.1
3m/s	313.6	317.3	3.7

5m/s	313.3	316.3	3.0
10m/s	313.0	315.5	2.5

由图3.19可知，与小倍率放电状况相似，当环境温度升高后，电池组表面温度整体分布提高，但3m/s的风速可以满足电池组表面的冷却需求。

结合下面的各电池中心点的温度散点图以及入口位置、中间位置、出口位置电池单体沿长度方向的温度曲线可知，在中倍率放电的环境风对流冷却中，环境风温度对电池内部温度的影响被略微减弱。

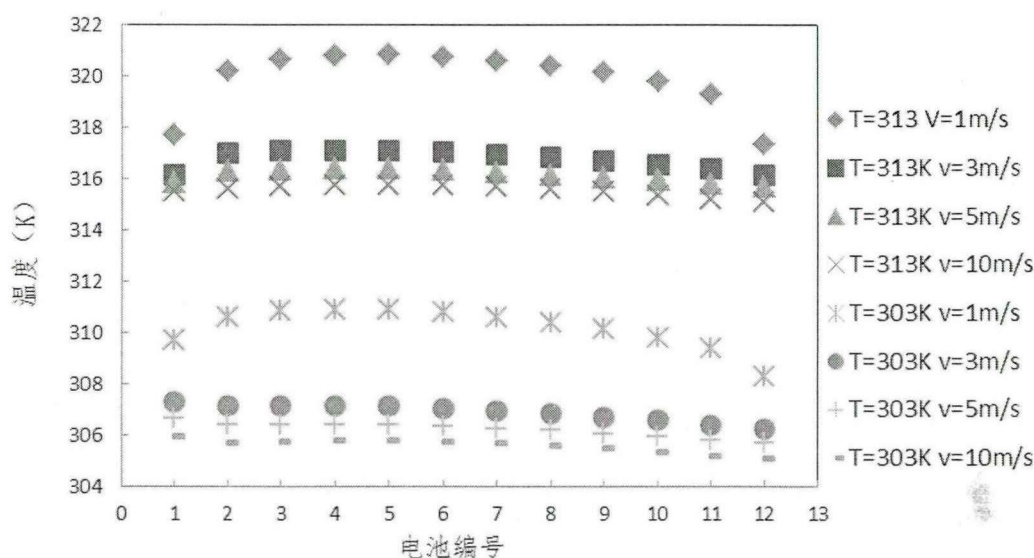
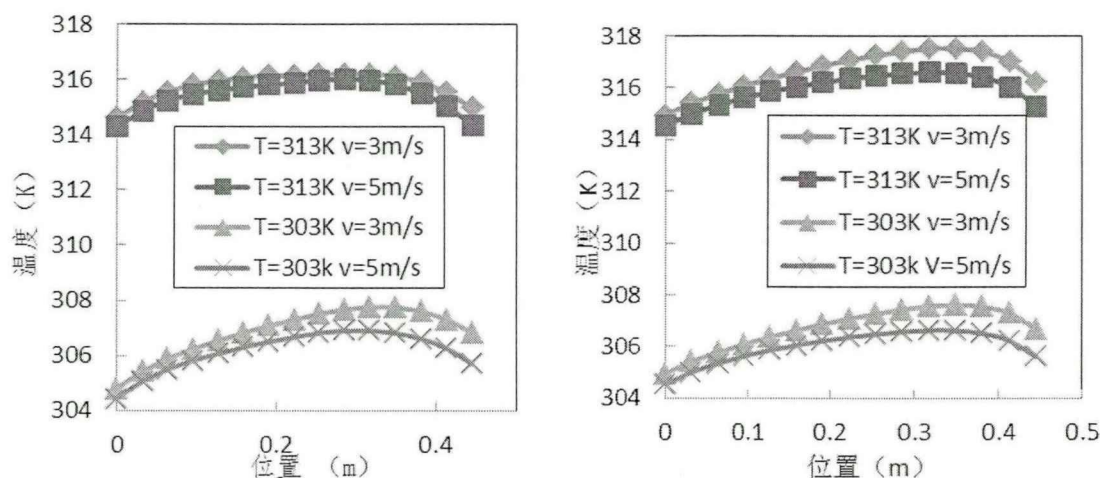
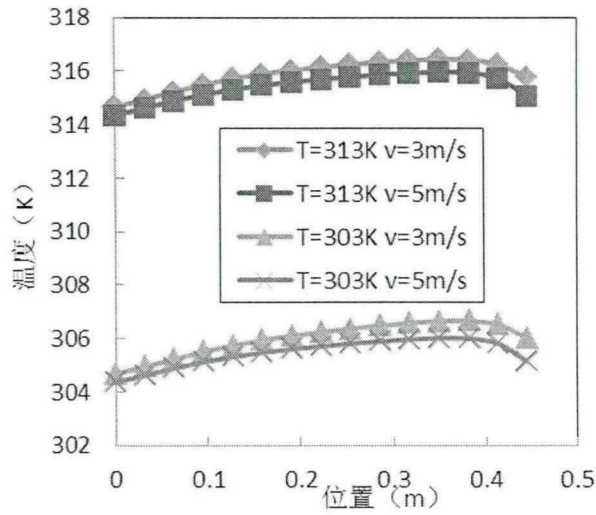


图3.20 v=1, 3, 5, 10m/s时，电池组以2/3C倍率各电池中心点温度曲线



(a) 入口位置电池沿x方向温度

(b) 中间位置电池沿x方向温度

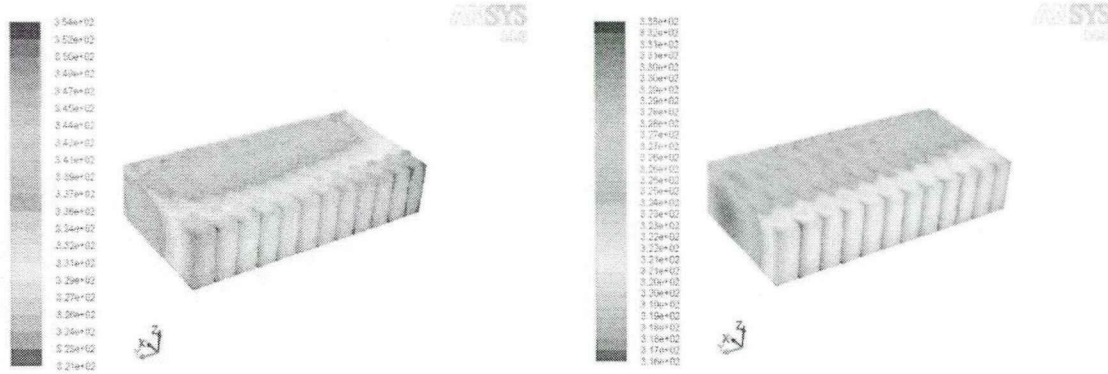


(c) 出口位置电池沿x方向温度

图3.21 2/3C倍率放电 不同温度下电池组内部温度分布状况

综上所述，313K的环境温度下，环境风强制对流速度达到3m/s及以上时可以满足电池组中倍率放电时的冷却需求。

(3) T=313K, v=1,3,5,10m/s 时，电池组以 1C 倍率恒流放电的冷却温度场。



(a) v=1m/s

(b) v=3m/s

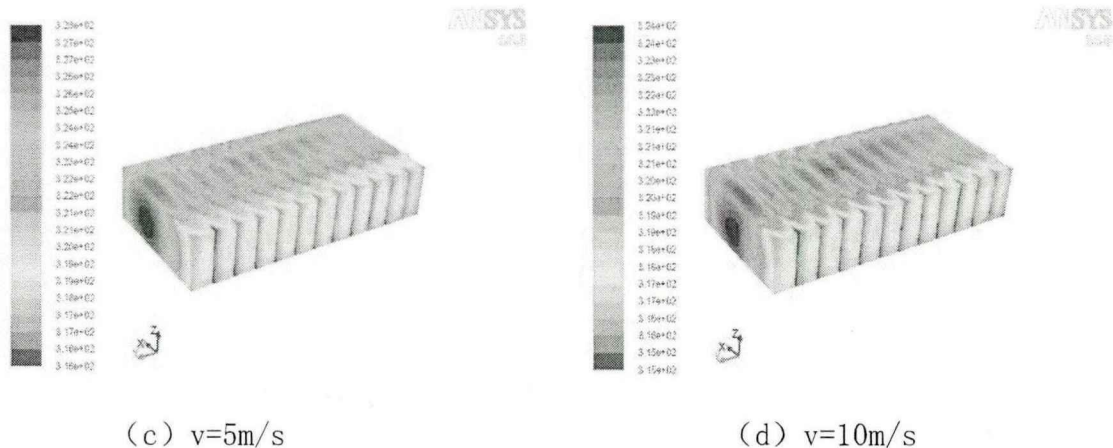


图3.22 T=313K, 电池组2/3C倍率放电各冷却速度下的冷却温度场

表3.7 空气强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 (T=313K, 1C)

空气入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
1m/s	320.9	353.6	52.7
3m/s	316.5	332.5	16.0
5m/s	315.6	328.0	12.4
10m/s	314.8	324.3	9.5

在1C放电倍率时，即使是10m/s的环境风冷却，电池组表面最高温度已接近50℃，温差9.5℃，其冷却效果不理想。

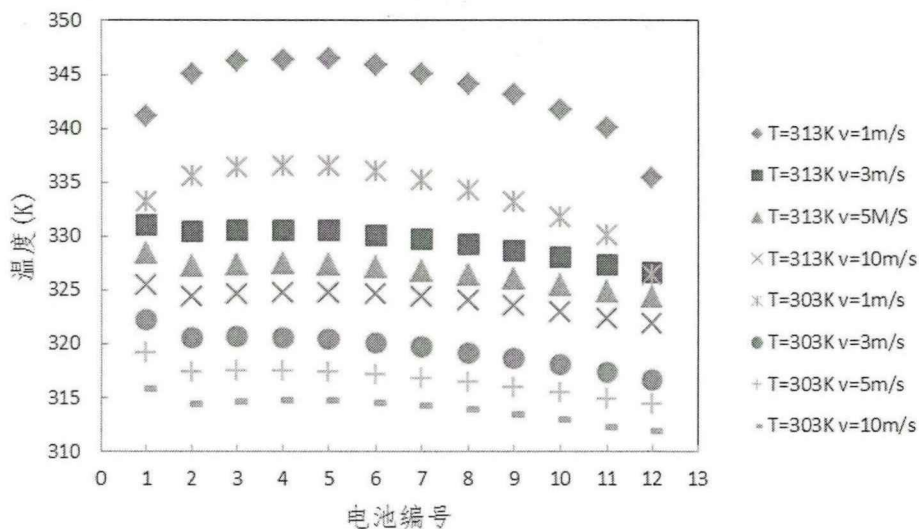


图3.23 不同温度下电池组1C倍率放电各电池中心点温度

结合各电池单体中心点温度图可以看出, 1C大倍率放电条件下, 313K的环境温度下, 即使10m/s的风速也不能满足电池内部或表面的温度需求。进一步可以说明, 当环境温度提升到一定程度后(如高于313K), 单纯依靠提高风速已不能满足电池组表面和内部的温度要求。

本小节首先对比了采取环境风强制对流冷却方式后, 与自然冷却条件下的电池组温度分布的变化, 结果表明, 即便只引入较低流速(如1m/s)的常温(如303K)环境风, 也能显著地降低电池组的整体温度水平, 包括组内最高温度、最低温度、最大温差等指标, 且电池组温度分布趋势受到空气流场的影响, 不再是简单的“中间高、两边低”, 而是各个电池靠近楔形进气流道的一侧温度较低, 靠近楔形出口流道的一侧整体偏高。电池组整体温度水平随放电倍率的增大而升高, 在高倍率放电条件下, 低流速的环境风强制对流冷却并不能完全满足电池的工作温度要求。

接下来对比了不同环境风进口速度的冷却效果, 结果表明, 随着风速的提高, 可以进一步降低电池组整体温度分布。小倍率放电时, 1m/s的环境风风速已经可以满足电池表面及内部的冷却需求, 此时风速的提高对电池组表面及内部冷却效果的提升作用微弱。中放电倍率下, 环境风速度的提高有助于提高对电池组表面及内部的冷却效果。3m/s及以上的环境风可以满足电池组中倍率放电时的冷却需求。高倍率放电条件下环境风速度的提高对电池组表面及内部的冷却强度提升明显, 但效果有限, 10m/s及以上的环境风勉强满足电池组中倍率放电时的冷却需求。

最后, 对环境温度升高至 313K(夏季靠近地面处的空气温度)时各冷却强度的温度场进行了分析对比, 此时环境风冷却能力明显下降。在小倍率放电状态下, 环境风温度的影响大于环境风速度的影响。313K的环境风达到1m/s以上的风速也基本满足小倍率放电状态下电池内外的冷却条件。中倍率放电状态下环境风温度对电池内部温度的影响被略微减弱。313K环境风速度达到3m/s及以上时可以满足电池组中倍率放电时的冷却需求。大倍率放电条件下, 313K的环境温度下, 即使10m/s的风速也不能满足电池内部或表面的温度需求。并进一步分析得出当环境温度提升到一定程度后, 单纯依靠提高风速已不能满足电池组表面和内部的温度要求。

3.3 空调风强制对流冷却模式

空调风冷却模式利用车载的空调系统,将经过降温的空调风引入电池组的冷却流道对其进行冷却。它的优点在于冷却空气的温度不依赖于环境温度,在环境温度较高的夏季,比环境风冷却具有更强的换热能力。本部分将对该种冷却方案进行计算对比研究。

3.3.1 不同放电倍率的空调风冷却温度场分析

首先设定空调冷风温度为 293K,冷却入口流速为 0.1m/s。该条件下,电池组以 1/3C、2/3C、1C 倍率恒流放电至热平衡状态下时,仿真结果如下:

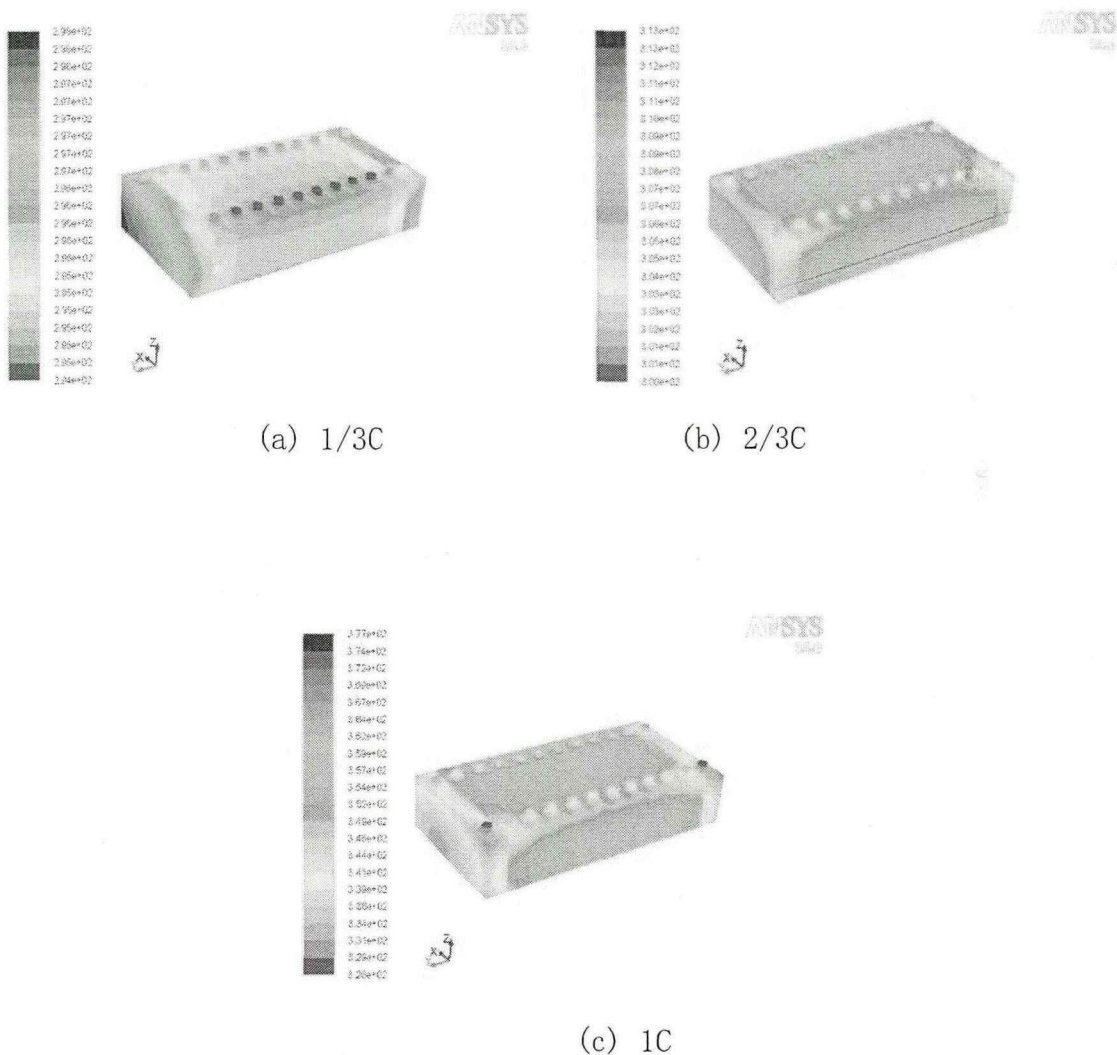


图 3.24 $T=293K$, $v=0.1m/s$ 时, 电池组各倍率放电的冷却温度场

由上三图可见, 与环境风冷却条件下相似, 随着放电倍率的增大, 电池组

整体温度水平不断升高，由于风速较低，流场对电池组的整体温度分布的影响并未显现，整体温度分布基本是边缘位置电池组温度低，中间位置电池温度高。中高放电倍率下，电池组内的各个电池间温度一致性较差。对比引入空调风强制冷却后与自然对流时电池组的几项温度指标，得到表3.8：

表 3.8 引入空调风强制对流冷却后的电池组温度变化表 ($T=293K$, $v=0.1m/s$)

	1/3C	2/3C	1C
最低温度	294.3	301.8	326.1
最低温度（自然冷却）	297.4	304.3	334.9
温度变化	-3.1	-2.5	-8.8
最高温度	298.0	313.2	377.0
最高温度（自然冷却）	299.6	318.2	395.7
温度变化	-1.6	-5.0	-18.7
最大温差	3.7	11.4	50.9
最大温差（自然冷却）	2.2	13.9	60.8
温度变化	-1.5	-2.5	-9.9

由表可见，在低温的空调风强制对流作用下，电池组各倍率放电下的表面最高温度、最低温度以及最大温差明显下降。但在1/3C低倍率条件下，电池表面最低温度仅有21.3℃，已经接近理想温度范围下限，有过度冷却的危险；2/3C中倍率放电条件下，电池温度范围合适，但一致性不理想，组内个体温差最大达到11.4℃；1C高倍率放电条件下，虽然冷却空气温度较低，但受0.1m/s的流速限制，电池组表面温度范围控制以及温差控制均非常不理想。

下图是各电池中心点温度分布图：

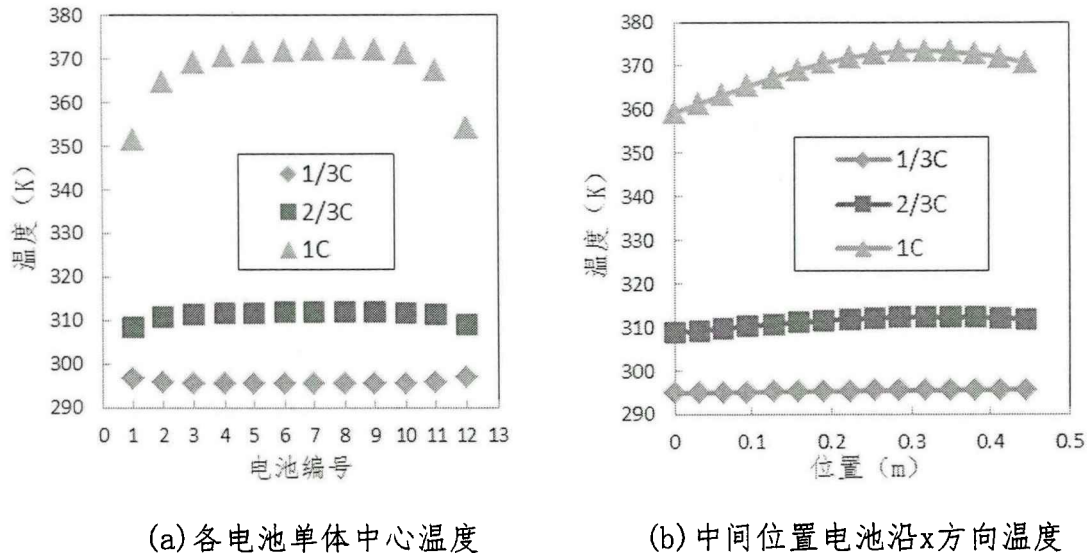


图3.25 T=293K, v=0.1m/s时电池组内部温度

根据各电池单体中心温度可知，1C高倍率放电时，电池内部中心点温度接近100℃。整体趋势与表面温度分布趋势一致，中间高，两边低。根据中间位置电池轴线的温度分布曲线，在中低倍率下电池内部温度范围及一致性良好，高倍率下电池内部温度水平过高，一致性较差。

综上所述，293K的空调风以0.1m/s的速度进行冷却时，仅仅可以满足电池组1/3C低倍率放电条件下的冷却需求。

3.3.2 不同冷却强度的空调风冷却温度场分析

在上一节中，可以看到中高倍率（2/3C、1C）放电时，0.1m/s 的空调风流速并不能满足电池组的冷却需求，本节将通过改变空调冷却风风速条件，研究不同冷却强度对电池组温度场的影响。

(1) T=293K, v=0.1, 1, 3m/s 时，电池组以 2/3C 倍率恒流放电的冷却温度场：

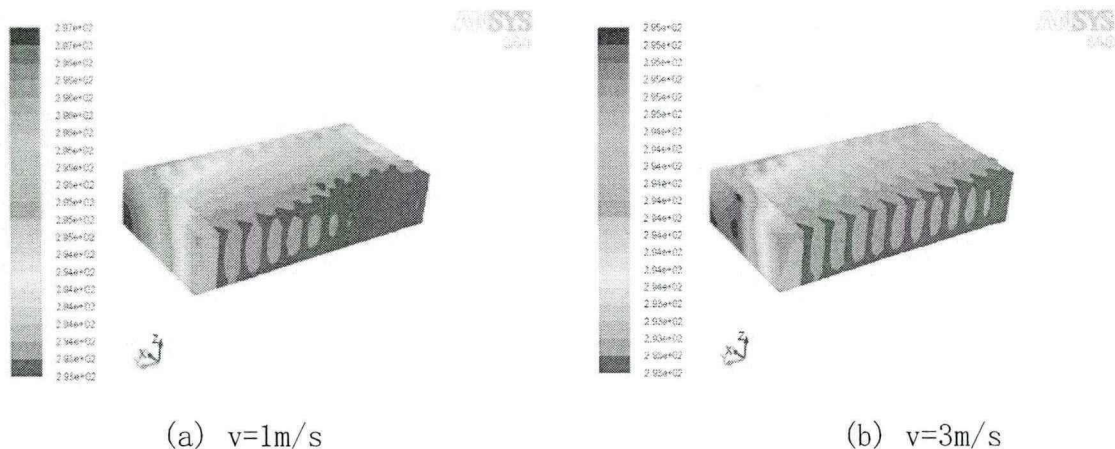
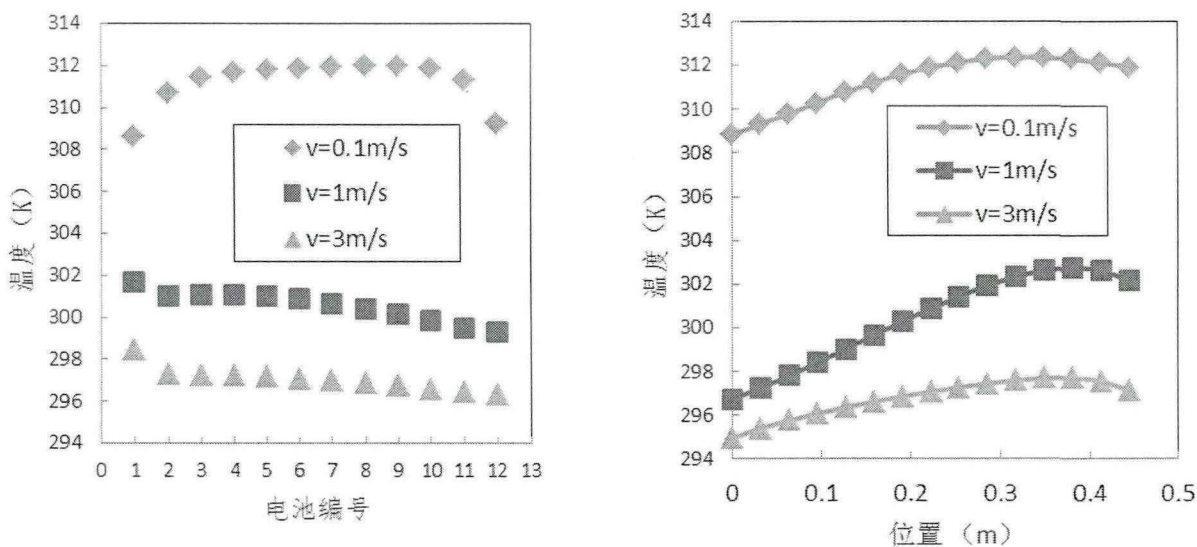


图 3.26 T=293K 电池组 2/3C 倍率放电各风速下的冷却温度场：

表3.9 空调风强制对流冷却方式下的电池组表面温度计算结果 (T=293K, 2/3C)

空调风入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
0.1m/s	301.8	313.2	11.4
1m/s	295.0	303.5	8.5
3m/s	293.8	299.4	5.6

此时中间位置电池轴线温度分布曲线如下图所示：



(a) 各电池单体中心温度 (b) 中间位置电池沿x方向温度分布

图3.27 T=293K 2/3C 电池组内部温度分布

(2) $T=293K$, $v=0.1m/s, 1m/s, 3m/s$ 时, 电池组以 1C 倍率恒流放电的冷却温度场:

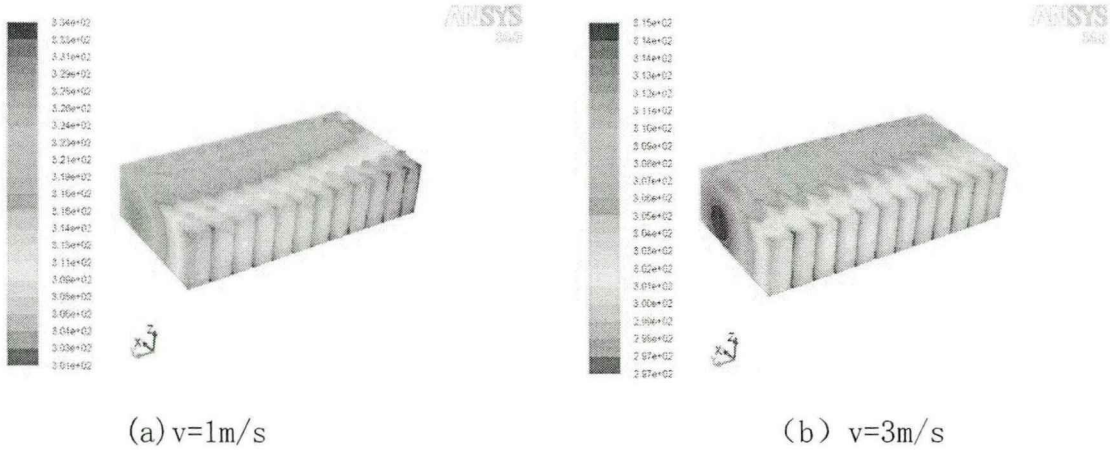


图 3.28 $T=293K$, 电池组以 1C 倍率恒流放电的冷却温度场

表3.10 空调风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 ($T=293K, 1C$)

空调风入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
0.1m/s	326.1	377.0	50.9
1m/s	301.1	324.2	23.1
3m/s	296.5	315.4	18.9

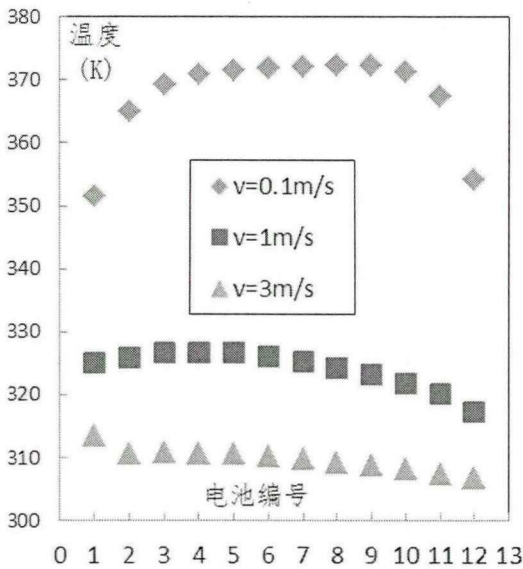


图3.29 各电池单体中心温度

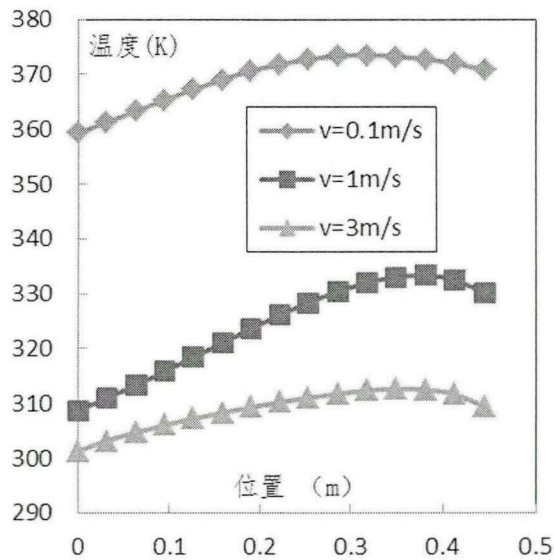


图3.30 中间位置电池沿x方向温度

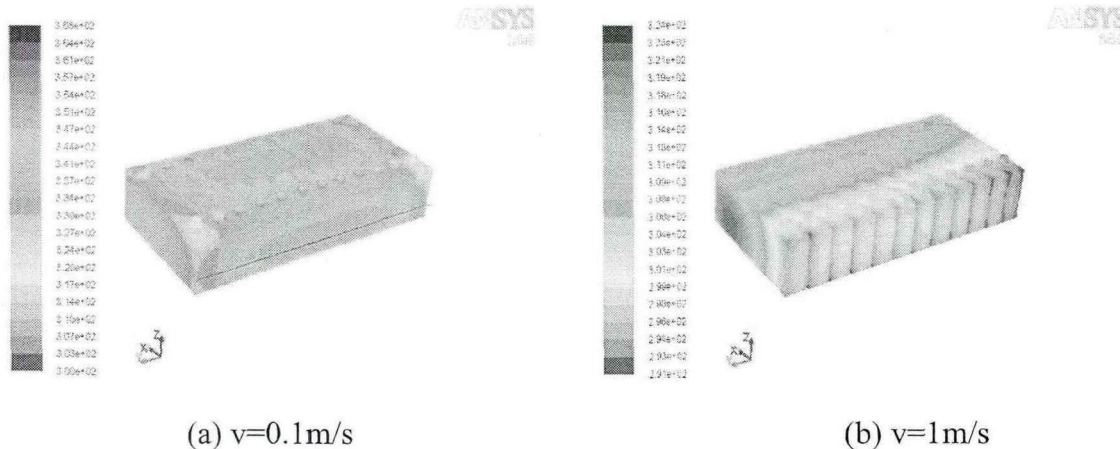
由以上各温度云图可以看出，随着空调冷却风速度的提高，电池组整体温度水平持续下降，体现在电池组表面最高温度、最低温度、最大温差都有逐渐下降的明显趋势；电池单体间的温度均匀性有所好转，温度不均匀性也随着冷却强度的提高而倾向于体现在电池单体内部，即出口楔形流道一侧整体高于进口楔形流道一侧。

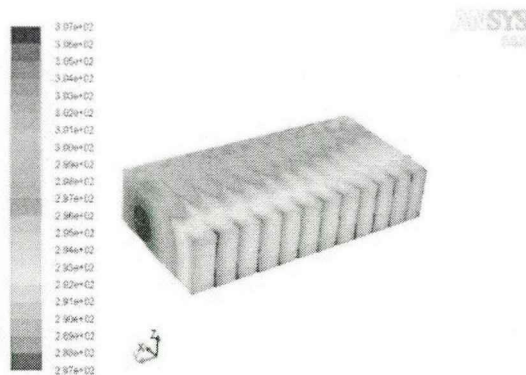
在 2/3C 中倍率放电时，空调风冷却速度的提高能够显著改善电池组表面及内部的温度条件。在 3m/s 的风速下，293K 的空调风基本满足最理想的温差要求，若风速进一步提高，有可能会造成电池的过度冷却。

1C 高倍率放电时，3m/s 的空调风速度也既无法满足电池表面温度及一致性要求，也无法满足电池内部温度及一致性要求。这表明，大倍率放电条件下，单纯提高 293K 的空调风速不能提高冷却效果。

3.3.3 不同温度的空调风冷却温度场分析

鉴于 293K 的空调冷却风已无法通过提高风速来冷却大倍率放电的电池组，本部分将采用更低温度（283K）的空调风来对比分析电池组的冷却效果：





(c) $v=3\text{m/s}$

图 3.31 $T=283\text{K}$ 1C 放电倍率下电池组冷却温度场

表 3.11 空调风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 ($T=283\text{K}$, 1C)

空调风入口速度	最低温度	最高温度	最大温差
0.1m/s	318.0	367.6	49.6
1m/s	291.2	324.5	33.3
3m/s	286.5	307.3	20.8

由图 3.31 和表 3.11 可知，虽然电池组表面整体温度水平随空调风温度而降低，但电池组内的温差比 293K 时还大，更低温度的空调风会加剧电池组表面温度分布的不均匀性。值得注意的是，在 3m/s 的风速下，电池最低温度已降至 13.5℃，出现冷却过度现象。

由图 3.32-3.35 可知，对于电池内部，总体冷却能力排序依次为 3m/s 的 283K 空调风、3m/s 的 293K 空调风、1m/s 的 283K 空调风、1m/s 的 293K 空调风。即：针对空调风冷却，温度对冷却效果的影响小于风速的影响。对于电池单体内部的温度分布，1m/s 的 283K 冷却温度不均匀性大于 3m/s 的 293K 冷却，即更低温度的空调冷却也会带来更大的内部温度不均匀性。

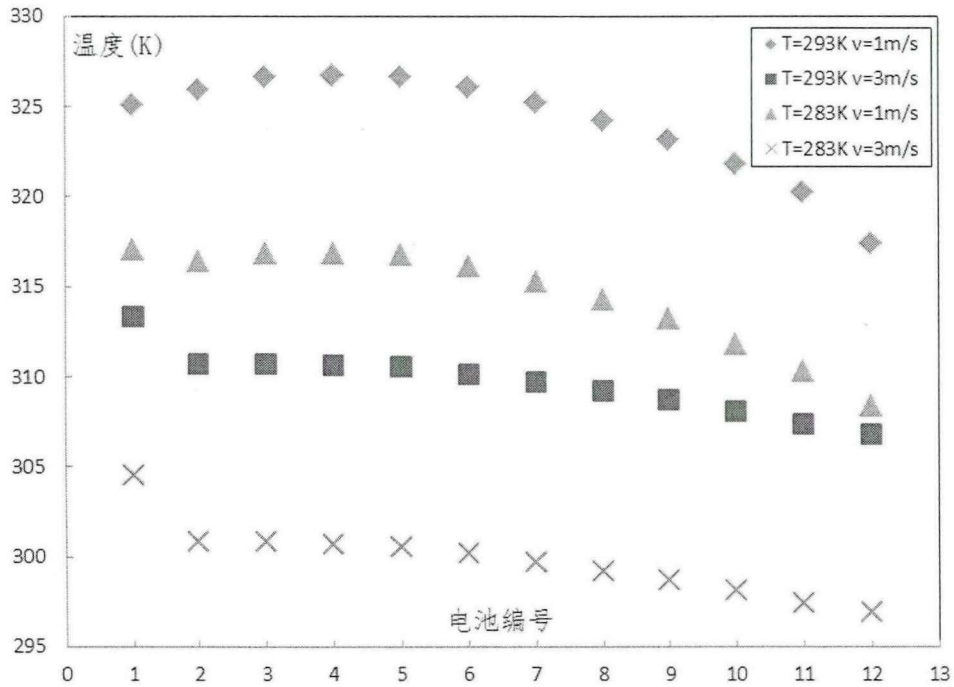


图3.32 电池组1C倍率放电各电池中心点温度

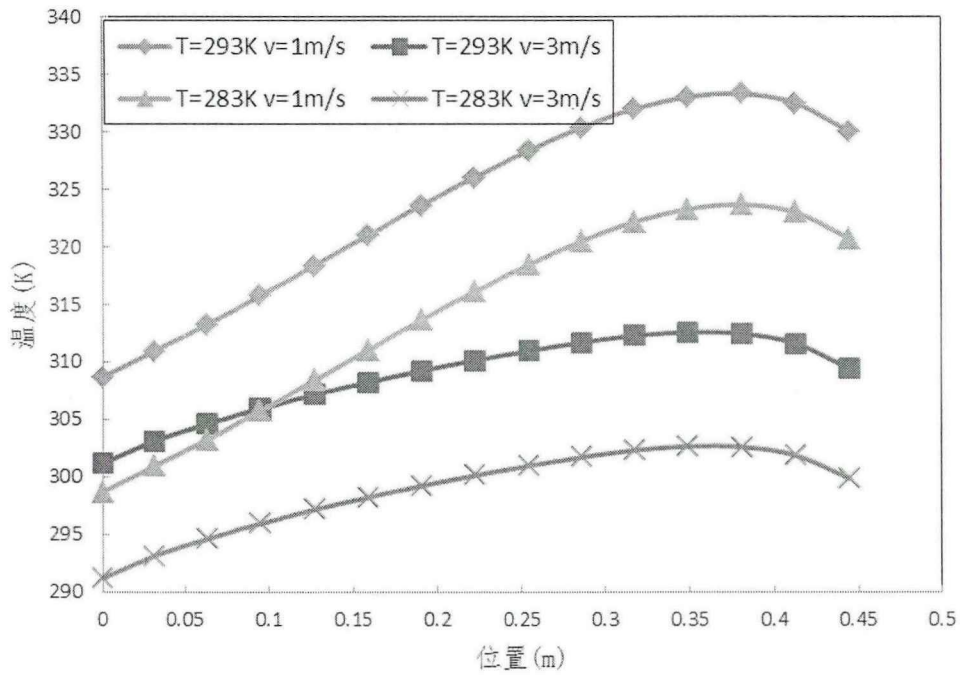


图3.33 中间位置电池沿x方向温度分布

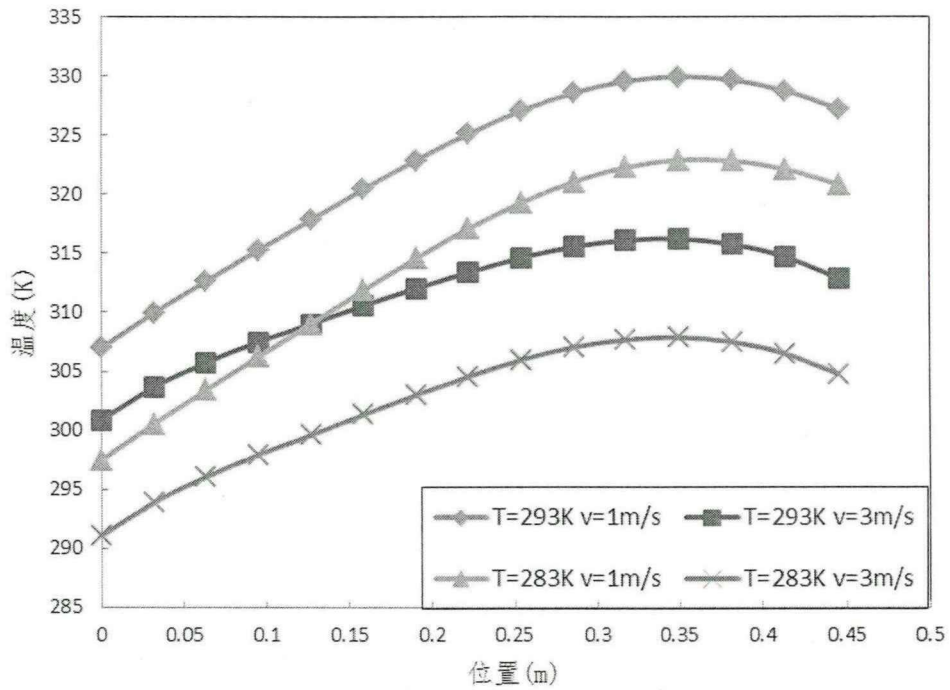


图3.34 进口位置位置电池沿x方向温度分布

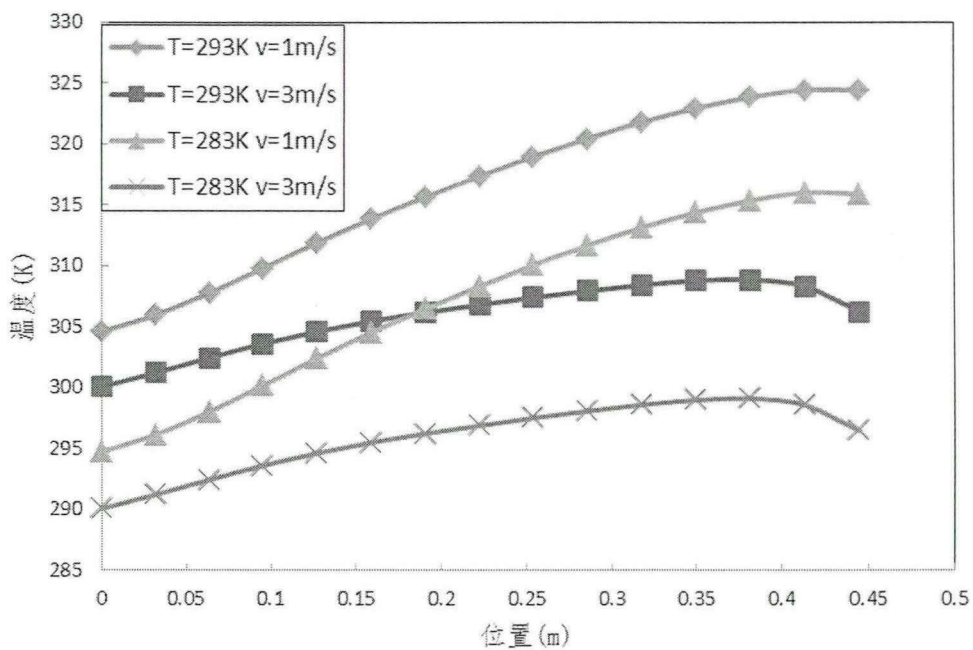


图3.35 出口位置电池沿x方向温度分布

综上所述，降低空调风温度会对加剧电池组表面和内部温度不均匀性，对电池组高倍率下的温度场起到负面作用。

本节针对利用车载空调产生的冷风进行冷却的方式，分析对比了其在不同放

电倍率状态、不同空调冷却风速度以及不同空调冷却风温条件下的冷却效果。结果表明：1. 空调风冷却方式虽然具有较低的换热温度，但它会加剧电池组表面和内部温度的不均匀性，且会造成低倍率放电条件下电池的过度冷却，空调风温度的降低对冷却效果起到负面作用；2. 293K的空调风在0.1m/s的条件下可以满足电池组低倍率放电时的冷却需求，3m/s的条件下可以满足电池组中倍率充放电的冷却需求，而进一步提高速度却无法满足不同倍率放电条件下的冷却需求；总之，由于对温差的控制力有限，空调冷却风对电池组的冷却范围非常狭小。

3.4 本章小结

本章首先建立了电池组-冷却通道模型，并运用 Ansys Fluent 软件，对环境风和空调风两种空气强制对流冷却方案进行了详细的数值仿真研究。具体到每一种冷却方式，以电池组表面最高温度、最低温度、最大温差、各个电池内部中心点温度、典型位置电池沿 x 轴方向温度分布情况等为主要指标，分别对不同放电倍率、不同空气流动速度、不同冷却空气温度对电池组冷却效果的影响做了详细的数值仿真分析。结果表明，电池组整体温度水平随放电倍率的增大而升高，但空气强制对流一经引入，即可以显著地降低电池组的整体温度水平，且电池组温度分布不再是“中间高、两边低”，而是各个电池靠近楔形进气流道的一侧温度较低，靠近楔形出口流道的一侧整体偏高。冷却空气温度的提高会降低空气强制对流的冷却能力，而随着风速的提高，其冷却能力也得到增强。中小倍率放电状态下，无论是环境风强制对流冷却还是空调风强制对流冷却，均在特定条件下可以保证电池组的最佳工作温度区间及温度均匀性，但高倍率放电状态下，仅依靠单一的提高空气流动速度或降低冷却空气温度并不能达到非常理想的冷却效果。

4 锂离子动力电池组导热油冷却方案的数值仿真研究

4.1 导热油强制对流冷却模式

在电池组高倍率电流放电时,空气强制对流冷却控制电池组工作温度范围和均匀性能力下降。为适应高倍率放电状态下的电池组工作温度需求,本文提出了一种冷却介质——导热油,对工作中的电池组进行冷却。相比较空气、水等常用冷却介质,导热油具有较高的导热系数,同时它的绝缘性可以保证电池组的电安全性。如果以它作为电池组的直接冷却介质,可以较快的转移走电池组内部热量,从而增强其冷却效果。

本模拟设定导热油的流入温度为 303K,采用的导热油相关参数如表 4.1 所示:

表 4.1 导热油相关物理参数

参数	数值
密度 (kg/m ³)	800
导热系数 (W/m•K)	0.14
比热容 (J/kg•K)	2000
黏度系数 (kg/m•s)	0.05

4.1.1 不同放电倍率的导热油冷却温度场分析

由于导热油的黏性远大于空气,故其在电池组间的流速将会大大降低,故我们分别设定其流速为 0.2m/s,计算结果如下:

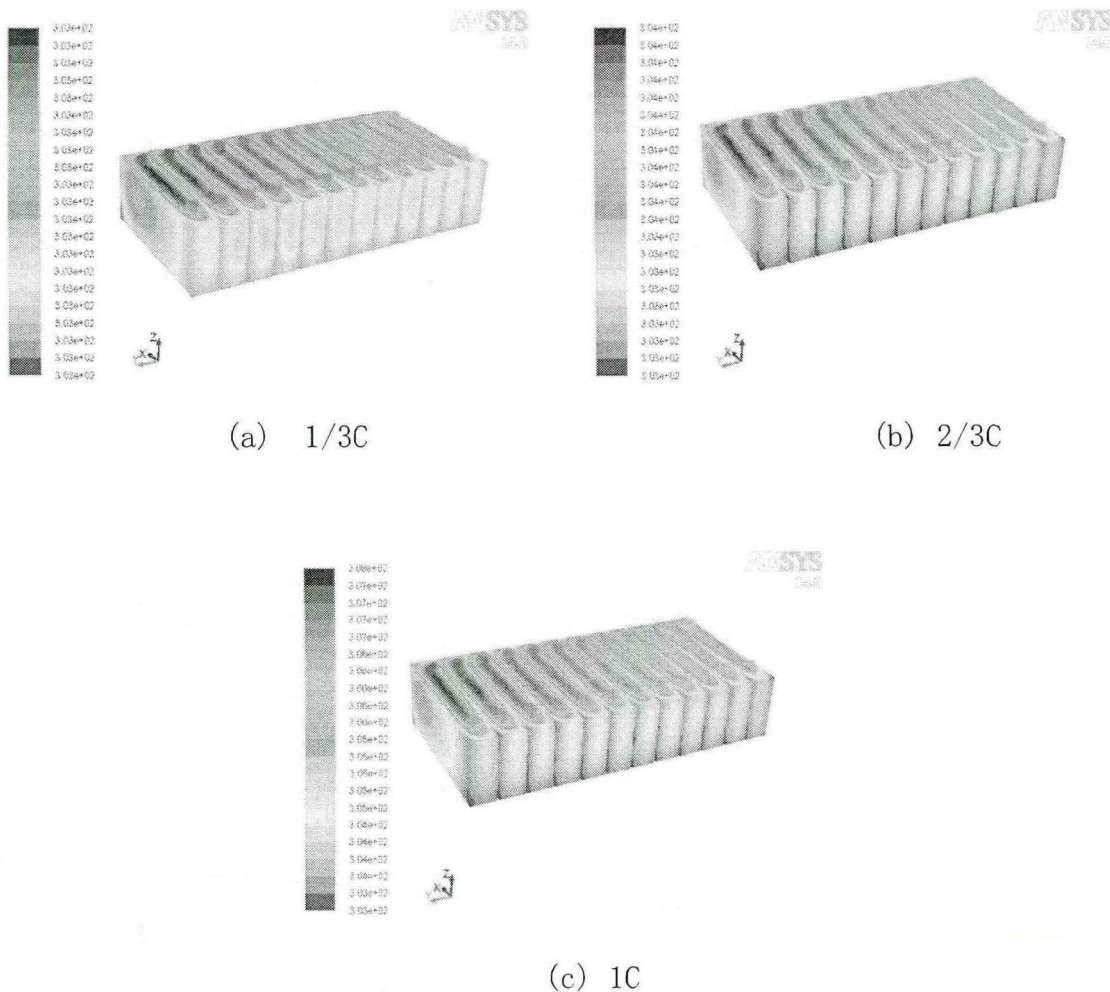


图 4.1 $T=303K$, $v=0.2m/s$ 时, 电池组冷却温度场

表 4.2 导热油冷却方式下各倍率恒流放电温度场仿真结果 ($v=0.2m/s$ $T=303K$)

放电倍率	最高温度	最低温度	最大温差
1/3C	303.0	303.1	0.1
2/3C	303.4	304.1	0.7
1C	303.2	307.6	3.4

由温度云图(图 4.1)可以看出, 电池组整体具有较好的温度均匀性, 即使在 1C 的高倍率恒流放电状态下, 很低的流速(如 0.2m/s), 导热油冷却也能够非常好地控制电池组温升幅度, 电池组整体维持在导热油的初始温度附近, 各单

体电池间的温差也骤降至 5℃以内，由以下曲线图可知，电池单体内部的温差也不超过 5℃，均匀性很好。

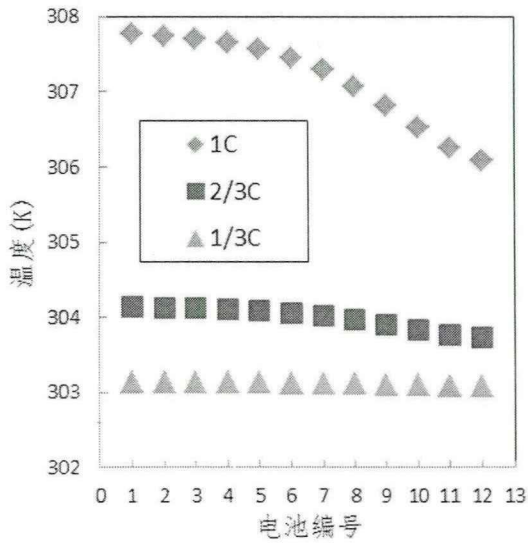


图4.2 各电池单体中心点温度

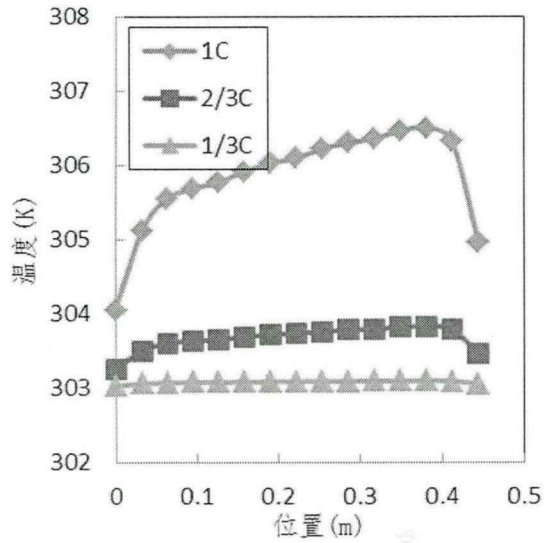


图4.3 出口位置电池轴线温度分布

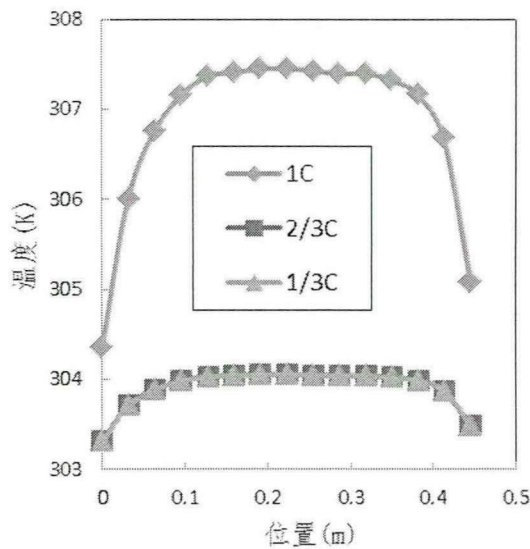


图4.4 中间位置电池沿x方向温度

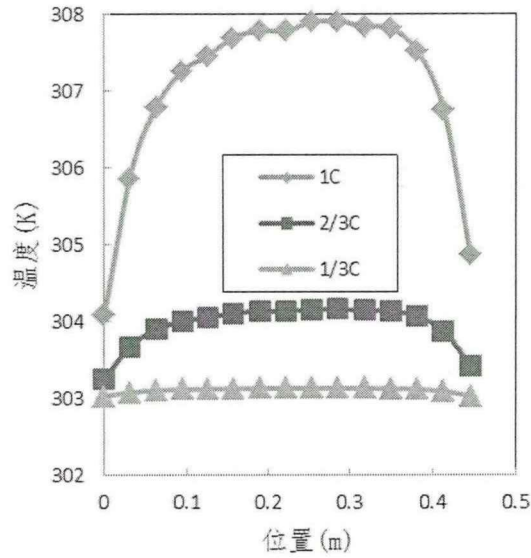


图4.5 进口位置电池沿x方向温度

4.1.2 不同冷却强度的导热油冷却温度场分析

当导热油的流动速度为 0.5m/s 时，电池组各倍率恒流放电至热平衡状态时，计算结果如下：

表 4.3 导热油冷却方式下电池组温度场仿真结果 ($v=0.5\text{m/s}$ $T=303\text{K}$)

放电倍率	最高温度	最低温度	最大温差
1/3C	303.0	303.1	0.1
2/3C	303.3	304.0	0.7
1C	303.1	306.3	3.2

可见，加快导热油流动速度可以继续降低电池组温升及温差，但幅度较小，说明低流速（如 0.2m/s ）状态已经完全可以满足电池组的冷却需求。

4.1.3 不同温度的导热油冷却温度场分析

由以下三个位置的电池单体内部温度分布曲线可知，导热油温度升高会提高电池组整体温度，但依然可以维持电池组内外温度及温差在理想范围内。

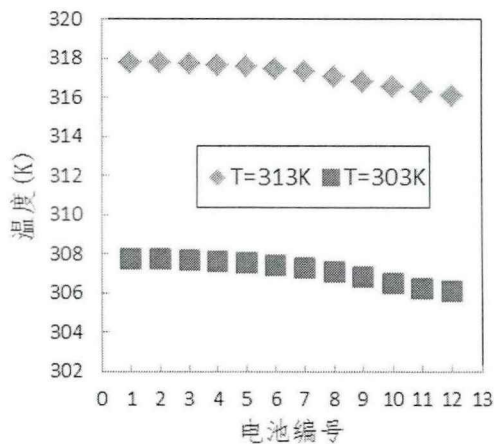


图 4.6 各电池单体内部中心点温度

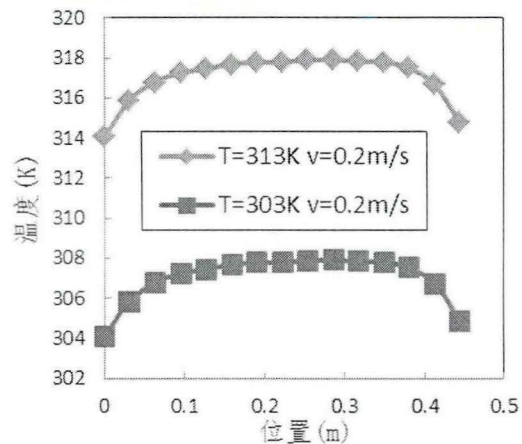


图 4.7 进口位置电池沿 x 方向温度

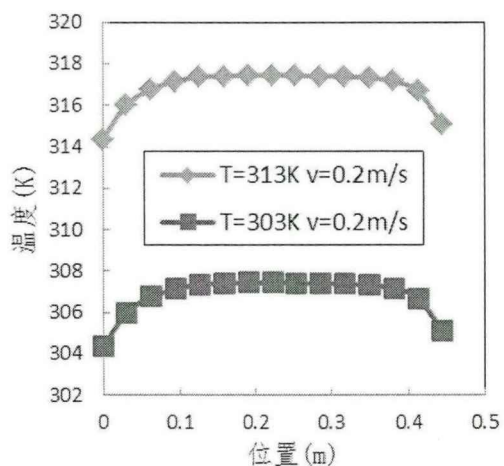


图4.8 中间位置电池沿x方向温度

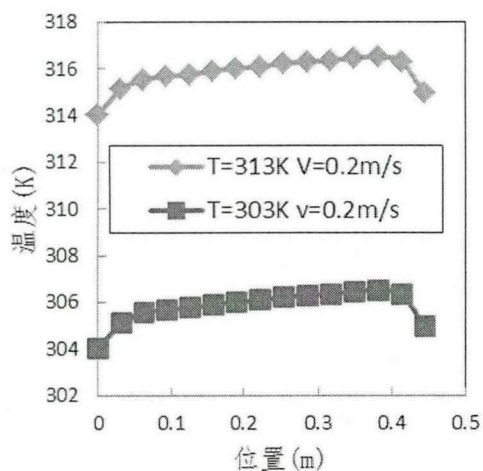


图4.9 出口位置电池沿x方向温度

4.2 本章小结

本节采用了具有较高导热系数的导热油代替空气作为电池组的冷却介质，分别对比分析了其在不同放电倍率及冷却强度下的冷却效果。结果表明，导热油可以较低的流动速度（如 0.2m/s）满足将高、中、低各倍率放电的电池组理想工作范围要求，是一种非常有效的冷却方式。

5 锂离子动力电池组冷却方案优化策略

5.1 电池组冷却方案控制策略

车辆实际运行中，各工况条件下动力电池的运行状态是不一样的。图 5.1 是众泰某电动出租车一段时间内的实际车速与电流监测数据：

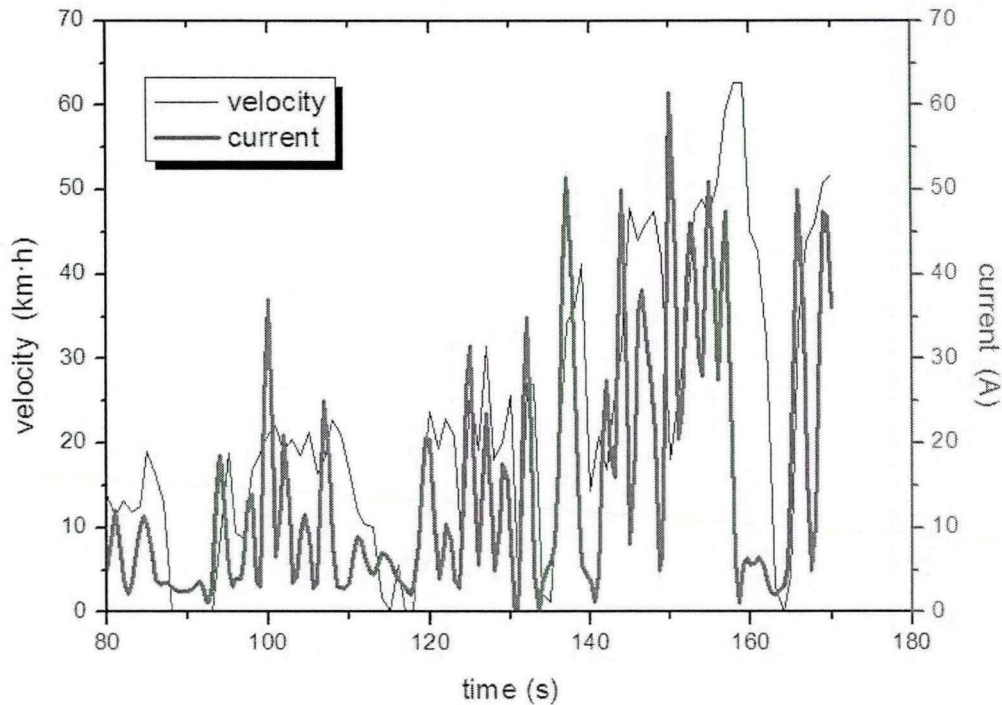


图5.1 某电动车一段时间内的实际车速与电流图

从中可以看出，在汽车以不同工况行驶时，电池的输出的电流是不断变化的，但整体与车辆行驶速度呈正相关趋势。

分析数据可知：当该车辆以15km/h的速度行驶时，电池组的放电电流维持在0.1C左右；当车辆以30km/h的速度行驶时，电池组的放电电流维持在1/3C左右；当车辆以50km/h的速度行驶时，电池组的放电电流维持在2/3C左右。当车辆以60km/h的速度行驶时，电池组的放电电流维持在1C左右。当车辆以最高限速85km/h的速度行驶时，电池组的放电电流维持在2C左右。根据相关统计数据，城市内汽车平均车速一般在20~40km/h之间，一般时速不会超过50km/h，即大部分运行工况下，电池放电倍率低于2/3C。

基于上一部分的电池组温度场分布及冷却方案的比较,我们建议整车加装优化风道,受限于仿真模型,选取其中一组分析其控制策略。

在不同的车辆行驶环境工况和动力工况下,经仿真分析对比,采取如下冷却方案控制策略:

(1) 环境温度低于283K时的电池组热管理系统冷却方案

当外界温度较低,且在较低放电倍率(小于1/3C)下,电池组自身产热较少,电池组的工作电压和放电容量都将大幅度降低,使电动汽车的续航里程降低,电池组所能提供的放电容量也降低,同时也对电池本身造成不可逆的损伤,因此必此时需要对电池组进行加热处理。利用现有的冷却空气流道,需要采用空调303K热风,以0.1m/s的风速加热电池组,可维持电池组的温度分布如下图,即较均匀的分布在303K至304K之间:

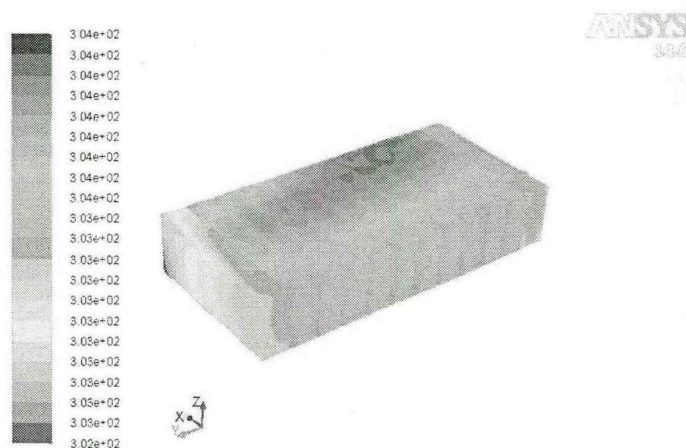


图5.2 加热温度场

随着放电倍率的增大,电池组自身产热增加,当放电倍率在2/3C左右,此时若采取环境风的强制对流冷却,能够降低电池组温升,却会增大电池组内的温度差;若采取温度高一些的空调风换热,虽然会提高电池组的温升,但不会超出理想工作温度范围内,且还减小了电池组的温度不均匀性,即通过空调热风强制对流来达到平衡电池温度场的功能。通过仿真比对,此时3m/s的303K的空调热风可以维持电池组温度范围在303K至308K之间。

当电池组放电倍率继续增大至1C左右时,电池组重新需要冷却措施。此时由于外界环境温度较低,5m/s的低温环境风强制对流冷却可以维持电池组温度范围在283K至294K之间。

(2) 环境温度在283K至293K的电池组热管理系统冷却方案

在较小倍率放电时仍然要考虑电池过冷现象,故该条件下的控制策略包含加热模块。电池放电倍率小于 $1/3C$ 时,开启空调热风,以 $0.1m/s$ 的入口速度加热电池组,维持电池组的温度较均匀的分布在 $303K$ 至 $304K$ 之间,防止工作温度过低影响电池性能的发挥。放电倍率超过 $2/3C$ 倍率时引入环境风冷却, $5m/s$ 的环境风强制对流可以维持电池组在 $286K$ 至 $294K$ 之间。当放电倍率在 $1C$ 左右时,采取 $10m/s$ 的环境风强制对流可以维持电池组在 $293K$ 至 $296K$ 之间。

(3) 环境温度在 293 至 $303K$ 的电池组热管理系统冷却方案

由于环境温度提高,低倍率放电时电池已不会产生过冷现象,该条件下的控制策略不需要加热模块。从 $1/2C$ 倍率开始引入环境风强制对流冷却,具体策略如图5.3:

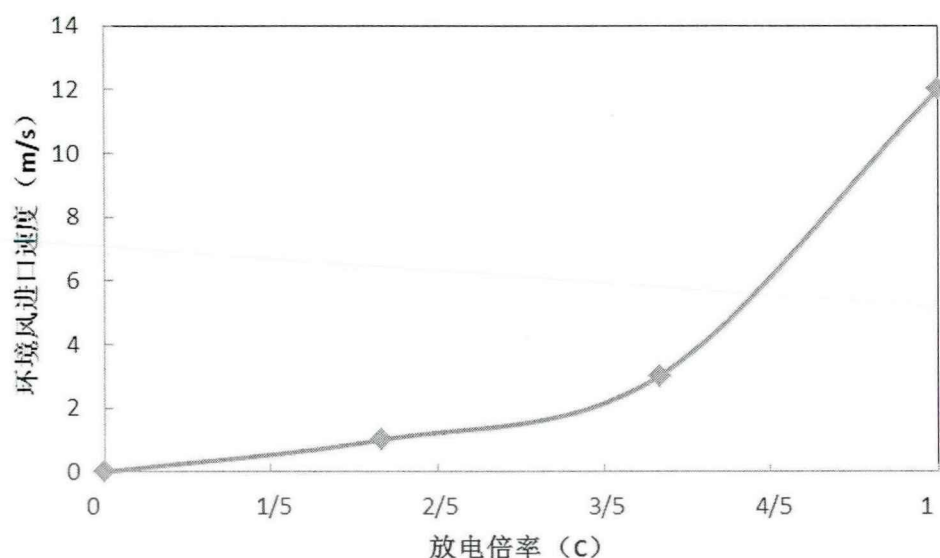


图5.3 环境温度在 293 至 $303K$ 的电池组热管理系统冷却方案

(4) 环境温度超过 $303K$ 的电池组热管理系统冷却方案

在夏季环境温度较高时,若采用环境风强制对流冷却,若想满足高倍率放电状态下的电池组冷却需求,需要 $10m/s$ 以上的高速环境风,且仅能维持温差在 $10^{\circ}C$ 左右,冷却效果一般;故在环境气温超过 $303K$ 时,对电池组统一采用导热油强制对流冷却,导热油以 $0.2m/s$ 的低速流动即可维持电池组的理想工作温度范围,且温差不超过 $3^{\circ}C$,冷却效果非常理想。

5.2 本章小结

本章通过动力匹配软件对动力电池模块的选择进行了匹配,得到了理想状况下车辆水平路面匀速行驶时车速与电池组放电电流的关系,从而将电动汽车复杂工况下的热管理控制策略便可转化为不同放电倍率下的冷却方案组合。之后从环境温度、放电倍率两个切入点,根据车辆不同运行工况下的电池单元的温度特性和工作要求,综合环境风冷却、空调冷风冷却及导热油冷却模式的应用,提出了相应电池组热管理系统的冷却方案。

6 总结与展望

6.1 全文总结

作为电动汽车的关键部件的锂离子电池对温度条件非常敏感,性能及寿命受温度影响很大,尤其在有限的车辆动力舱空间里,密集排布成组的锂离子电池在工作过程中所产生的热量更容易积聚。如果锂离子电池在这样缺乏冷却措施的环境中持续运行,将会出现电池组过热,温度均匀性变差等现象,从而降低电池使用效率,甚至带来安全隐患。为解决这一问题,本文主要做了如下几项工作:

(1) 结合能源、污染等方面的最新统计数据,分析了目前发展电动汽车的必要性,分析对比了主要动力电池类型的性能特点。并通过查阅国内外的相关文献资料,分析总结了目前动力电池热效应研究的主要方向及研究手段。

(2) 对磷酸铁锂离子电池的结构特点、工作原理以及生热特性、传热特性进行了分析,在此基础上,建立了电动汽车锂离子电池组的基本传热模型,通过Fluent 软件的计算,掌握了自然对流条件下的电池组温度分布特点,证明在中高放电倍率下仅依靠自然对流冷却,既无法满足锂离子电池组的理想温度范围,也无法满足电池组对个体间温度均匀性的要求,必须采取一定的强制对流冷却措施来保证电池组的正常运行。

(3) 在此基础上,进一步建立了电池组-冷却介质冷却模型,分别采用环境风强制对流冷却、空调风强制对流冷却以及导热油强制对流冷却三种冷却方式,以电池组表面最高温度、最低温度、最大温差以及各电池中心点温度等为指标,分析了放电倍率、冷却温度以及冷却强度等因素对电池组冷却效果的影响,详尽对比了这三种方式的冷却能力。结果表明以空气为冷却介质的强制对流冷却方案,无论是利用环境风还是冷却空调风,都有一定的适用范围,需要配合使用才能够完全满足锂离子电池组的冷却需求。以导热油介质的液体强制对流冷却对各工作状态下的电池组均具有较稳定的冷却效果。

(4) 最后,根据实车运行采集的数据,掌握了车辆不同运行工况下对应的电池工作状态,并结合环境温度与电池放电倍率的情况,综合多种冷却方式,提出了相应的冷却方案优化策略。

6.2 不足与展望

由于时间和条件的限制，本文的研究仍然存在一些不足，后续研究工作可以从以下几个方面进行考虑：

(1) 由于受限于计算机性能，本文将整个锂离子电池处理为均匀发热体，下一步工作可以细化内部分层结构，以达到对电池模型更精确的数值模拟结果。

(2) 在本文的数值仿真研究基础上，后续可以开展实车冷却方案优化策略的试验及反馈。

(3) 将低温状态下的电池组加热方案也纳入电池热管理系统的优化设计当中，以提高锂离子动力电池在全温度范围内的性能发挥。

参考文献

- [1] Gan W Q, Li Y P, Chang J. Energy shortage of nonthermal electrons in powering a solar flare[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, 552(2): 858.
- [2] Martinez J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants[J]. *Environmental pollution*, 2009, 157(11): 2893-2902.
- [3] 金之钧, 蔡立国. 中国海相层系油气地质理论的继承与创新[J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1017-1024.
- [4] 刘立力. 中国石油发展战略研究[J]. *石油大学学报: 社会科学版*, 2004, 20(1):1-6.
- [5] 贺军. 保障石油安全中国应打破石油进口垄断[R]. 北京, 安邦集团, 2012.
- [6] 张念立, 李明丽. 汽车的排放污染[J]. *科技信息*, 2008 (34): 205-205.
- [7] 刘乃峰. 汽车尾气污染综合治理的探讨[J]. *环境研究与监测*, 2011, 24(2): 44-46.
- [8] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究 [J]. *电力需求侧管理*, 2009, 11(5): 64-66.
- [9] 宋永华, 胡泽春, 阳岳希. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. *电网技术*, 2011, 35(4):1-7.
- [10] Plett G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation[J]. *Journal of power sources*, 2004, 134(2): 277-292.
- [11] Musardo C, Rizzoni G, Guezennec Y, et al. A-ECMS: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management[J]. *European Journal of Control*, 2005, 11(4): 509-524.
- [12] 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: 武汉理工大学汽车工程学院, 2009:22-30.
- [13] 邓元望, 王耀南, 陈洁平, 混合电动汽车驱动系统的分类方法及应用[J], *农业机械学报*, 2006(5):22-25.
- [14] 刘雪梅, 黄伟, 周云山. 插电式混合动力汽车动力系统参数研究[J]. *计算机仿真*, 2009 (10): 302-306.
- [15] 舒曼诺夫斯基, 陈清泉, 孙逢春. 混合电动车辆基础[M], 北京:北京理工大学出版社, 2001,16-38.
- [16] 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:重庆大学, 2011,19-36.
- [17] 陈清泉, 孙立清. 电动汽车的现状和发展趋势[J]. *科技导报*, 2005, 23(0504): 24-28.
- [18] Ambrosio J M. Parallel hybrid drive system utilizing power take off connection as transfer for a secondary energy source: U.S. Patent Application 12/217,407[P]. 2008-7-3.
- [19] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(17): 2771-2781.
- [20] 雷霞, 刘俊勇, 党晓强. 对电力大用户定价模式的研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2010 (3): 60-66.

- [21] 康继光, 卫振林, 程丹明, 等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究 [J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 64-66.
- [22] 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[D]. 重庆大学, 2013,28-41.
- [23] 王慧磊. 电动汽车锂动力电池组热管理系统研究与应用[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2012,12-21.
- [24] 夏兰, 李素丽, 艾新平, 等. 锂离子电池的安全性技术[J]. 化学进展, 2011, 23(2): 328-335.
- [25] 桂长清. 温度对 LiFePO_4 锂离子动力电池的影响[J]. 电池, 2011(2):88-91.
- [26] 于锋, 张敬杰, 王昌胤, 等. 锂离子电池正极材料的晶体结构及电化学性能[J]. 化学进展, 2010, 22(1): 9-18.
- [27] 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, 22(3): 119-123.
- [28] 汤依伟. 基于电化学—热耦合模型的锂离子动力电池放电行为研究[D]. 中南大学, 2013.
- [29] 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).
- [30] Botte G G, Johnson B A, White R E. Influence of Some Design Variables on the Thermal Behavior of a Lithium - Ion Cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(3):914-923.
- [31] S. Al Hallaj, H. Maleki, J.S. Hong, J.R. Selman. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 1999, 83(1-2):1-8.
- [32] Sato N. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2001, 99(1):70-77.
- [33] Al-Hallaj S, Selman J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications [J]. Journal of Power Sources, 2002, 110:341 - 348.
- [34] Ohshima T, Nakayama M, Fukuda K, et al. Thermal behavior of small lithium-ion secondary battery during rapid charge and discharge cycles[J]. Electrical Engineering in Japan, 2006, 157:17 - 25.
- [35] Wu M, Liu K H, Wang Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109:160-166.
- [36] Chen S, Wang Y, Wan C. Thermal analysis of spirally wound lithium batteries[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(4): A637-A648.
- [37] 王晋鹏, 胡欲立. 锂离子蓄电池温度场分析[J]. 电源技术, 2008, 32(2): 120-121.
- [38] 王晋鹏, 李阳艳. 锂离子电池三维温度场分析[J]. 电源技术, 2011, 35(10): 1205-1207.
- [39] Vlahinos A, Pesaran A A. Energy efficient battery heating in cold climates[R]. SAE Technical Paper, 2002.
- [40] Chen S C, Wan C C, Wang Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2005, 140:111-124.
- [41] Ma, Y., Teng, H., and Thelliez, M. Electro-Thermal Modeling of a Lithium-ion

- Battery System[J]. SAE Int. J. Engines, 2010, 3(2):306-317.
- [42] Cheng L, Ke C, Fengchun S, et al. Research on thermo-physical properties identification and thermal analysis of EV Li-ion battery[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE. IEEE, 2009: 1643-1648.
- [43] Kelly K J, Mihalic M, Zolot M. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing[C]. Battery Conference on Applications and Advances, the Seventeenth Annual. IEEE, 2002:247-252.
- [44] 陈磊涛, 许思传, 常国峰. 混合动力汽车动力电池热管理系统流场特性研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 224-227.
- [45] 戴海峰, 党丰玲, 朱维, 等. 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(4): 589-595.
- [46] 康海鹏. 锂离子动力电池生热特性分析及其选配[D]. 吉林大学, 2014, 45-77.
- [47] 李策园. 纯电动汽车锂动力电池组温度场特性研究及热管理系统实现[D]. 吉林大学, 2014, 15-34.
- [48] 兰晓平. 锂离子电池组温度控制的数值研究[D]. 天津大学, 2012, 46-71.
- [49] Endergast D R, Demauro E P, Fletcher M, et al. A recharge-able lithium-ion battery module for underwater use [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(2):793-800.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 饶中浩, 汪双凤, 洪思慧, 等. 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, 6:038.
- [53] Stephan P C, Busse C A. Analysis of the heat transfer coefficient of grooved heat pipe evaporator walls[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992, 35(2): 383-391.
- [54] 张国庆, 吴忠杰, 饶中浩, 等. 动力电池热管冷却效果实验[J]. 化工进展, 2009, 28(7): 1165-1168.
- [55] Wu M, Liu K H, Wang Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109:160-166.
- [56] Scott E R, Howard W G. Lithium-ion battery: U.S. Patent 20,070,077,496[P]. 2007-4-5.
- [57] 彭强. 电动汽车用锂离子动力电池热效应研究[D]. 吉林大学, 2012, 9-23.
- [58] Li H, Wang Z, Chen L, et al. Research on Advanced Materials for Li - ion Batteries[J]. Advanced Materials, 2009, 21(45): 4593-4607.
- [59] Li H, Huang X, Chen L, et al. A high capacity nano Si composite anode material for lithium rechargeable batteries[J]. Electrochemical and solid-state letters, 1999, 2(11): 547-549.
- [60] 赵卫兵. 电动车锂电池热管理系统研究[D]. 吉林大学, 2014, 36-51.
- [61] 黎林. 纯电动汽车用锂电池管理系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学,

- 2009,11-19.
- [62] Chen H, Qiu X, Zhu W, et al. Synthesis and high rate properties of nanoparticled lithium cobalt oxides as the cathode material for lithium-ion battery[J]. *Electrochemistry communications*, 2002, 4(6): 488-491.
- [63] 陈方元. 混合动力汽车用 Ni-MH 电池组温度均匀性的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010, 22-30.
- [64] 禹筱元, 胡国荣, 刘业翔. 锂离子电池非水电解液的研究[J]. *电池*, 2003, 33(3): 177-180.
- [65] Chartrand P, Pelton A D. Thermodynamic evaluation and optimization of the Li, Na, K, Mg, Ca/F, Cl reciprocal system using the modified quasi-chemical model[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(6): 1417-1430.
- [66] 黄彦瑜. 锂电池发展简史[J]. *物理*, 2007, 36(08): 13-15.
- [67] 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, 13-22.
- [68] D Bernardi, Pawlikowski E, Newman J. A General Energy Balance for Battery System[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [69] 杨世铭, 陶文铨, 传热学[M], 第3版, 北京: 高等教育出版社, 1998, 32-77.
- [70] 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: 吉林大学汽车工程学院, 2012: 51-52.
- [71] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *Journal of Power Sources*, 2002, 110(2): 377-382.
- [72] 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.
- [73] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 54-65.
- [74] 杨亚联, 张昕, 李隆键, 等. 混合动力汽车用镍氢电池的散热结构分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(4): 415-419.

作者简历

攻读学位期间发表的论文

彭影, 黄瑞, 俞小莉, 许建青. 电动汽车锂离子动力电池冷却方案的对比研究. 机电工程[J]. (已录用)

攻读学位期间完成的工作

浙江省电动汽车创新团队项目: 电动汽车动力电池热管理系统设计开发