



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

中图分类号: TM912.9

论文编号: HBLH 2015-127

U D C: _____

密 级: 公 开

硕 士 学 位 论 文

锂电池储能特性及关键技术研究

作者姓名: 贾永丽

学科名称: 热能工程

研究方向: 新能源开发

学习单位: 河北联合大学 学习时间: 2.5 年 提交日期: 2014 年 11 月 30 日

申请学位类别: 工学硕士

导师 姓名: 李海英 教授

单位: 河北联合大学 冶金与能源学院

论文评阅人: 匿名

单位: _____

匿名

单位: _____

论文答辩日期: 2015 年 1 月 13 日 答辩委员会主席: 于海东 正高工

关 键 词: 磷酸铁锂; 充放电性能; 温度特性; 热管理

唐山 河北联合大学

2015 年 03 月

**Study on the Energy Storage Properties and Key
Technology of Lithium Battery**

Dissertation Submitted to

Hebei United University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Science in Engineering

by

Jia Yongli

(Thermal Power Engineering)

Supervisor: Professor Li Haiying

March, 2015

独创性说明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，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的研究成果，也不包含为获得河北联合大学以外其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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做了明确的说明并表示了谢意。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解河北联合大学有关保留、使用学位论文的规定，即：已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校有权保留、送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以将学位论文的全部或部分内容采用影印、缩印或编入有关数据库进行公开、检索和交流。

作者和导师同意论文公开及网上交流的时间：

自授予学位之日起

自 年 月 日起

作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

摘要

锂离子电池因其具有能量密度大、自放电小、不含有毒有害物质等优点，被称为绿色电池。随着新能源及电动汽车等新兴产业迅速发展，锂电池在储能领域中的应用研究成为热点问题。

分别采用了现场实验、理论分析及数值模拟等方法，对锂电池的充放电特性、产热特性及不同热管理体系的温度场进行了深入研究。通过对锂离子电池组不同环境温度及北方典型月份中电动汽车锂电池的充放电性能测试，结果表明，锂离子电池组的充放电性能在 25℃ 时优于其他温度下的性能，低温运行性能较差，但电池组一致性良好，电动汽车中电池组模块温度和平均单体电压变化稳定，但冬夏季节运行性能下降。通过建立电池组的传热模型，对型号为 GBS-LFMP100Ah 的锂电池的产热特性及温度特性进行研究，结果表明虽然理论上电池组能够将自身的产热散发出去，但是随着环境温度的升高，电池组内部的温度大幅度增加，需要对电池组进行热管理。采用 Fluent 软件对 PCM 散热系统、热管散热系统和小型热泵系统 3 种不同方式对锂电池组进行热管理数值模拟，研究发现 PCM 散热系统能够使电池组温度保持在相变温度 42~43℃，热管散热系统能使电池组温度保持在 35~37℃，小型热泵系统在高温下能使电池组温度保持在 32~38℃，低温下能使电池组温度保持在 20~25℃。

研究表明，锂电池充放电性能稳定，低温和高温性能较差，锂离子电池组的最佳工作温度区间在 20~45℃，通过科学的热管理方案能够延长电池组寿命和运营稳定性。研究结果可为锂电池在新能源发电及电动汽车的储能等应用中提供理论参考和技术借鉴。

图 40 幅；表 9 个；参 51 篇。

关键词：磷酸铁锂；充放电性能；温度特性；热管理

分类号：TM912.9

Abstract

Lithium-ion battery (LIB) has a high energy density and low self-discharge rate, and it contains less toxic metals than other types of batteries. Because of the advantages mentioned above, LIBs are called environmental friendly batteries. With the fast development of alternative energy and electric vehicle industry, LIB has become increasingly popular in the application of stored energy.

The charge-discharge property, heat generation property, as well as temperature fields of the LIB under various thermal management systems were studied in this paper via experiments, theoretical analysis and numerical simulation. The charge-discharge property of LIBs at different temperatures and LIBs used in electric vehicles in typical months of Northern China were tested respectively. Result shows that the LIB pack has the best charge-discharge property at 25°C than that at other temperatures. The performance of LIB pack at low temperature is poor. Module temperature and average monomer voltage changed stably in electric vehicles, but the performance declined in winter and summer. A battery pack thermal conduction model was established to study the heat generation and thermal property of the GBS-LFMP100Ah LIB. The result shows that, although theoretically heat generated within the battery can be reduced by radiation, the temperature increased significantly when worked at elevated temperatures. Thermal management numerical simulation was carried out using Fluent under PCM radiator system, heat pipe system, and small heat pump system respectively. Results of the simulation show that PCM radiator system can keep the temperature of the battery pack within a range of 42~45°C; heat pipe system can keep the temperature of the battery pack within a range of 35~37°C; and small heat pump system can maintain the battery pack within a temperature range of 30~34°C at high temperatures and 20~22°C at cooler temperatures.

This study shows that LIB has a stable charge-discharge property and the performance is poor in high and low temperature. The best working temperature range is 20~45°C and the battery life can be extended and operation stability can be enhanced through proper thermal-management method. Results of this study can provide theoretical and technical reference for the application of LIB in power generation and energy storage as alternative energy and in electric vehicle industry.

Figure 40; Table 9; Reference 51

Keywords: LiFePO₄ batteries, charge-discharge property, temperature property, thermal management

Chinese books catalog: TM912.9

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 引 言..... | 1 |
| 第 1 章 文献综述..... | 2 |
| 1.1 课题研究背景..... | 2 |
| 1.2 锂电池的研究现状..... | 2 |
| 1.2.1 锂离子动力电池特性..... | 2 |
| 1.2.2 电动汽车锂电池国外发展现状..... | 3 |
| 1.2.3 电动汽车锂电池国内发展现状..... | 4 |
| 1.2.4 锂电池储能的应用..... | 5 |
| 1.3 锂电池热管理系统的研究现状..... | 6 |
| 1.3.1 相变材料散热热管理技术发展现状..... | 6 |
| 1.3.2 热管散热式热管理技术发展现状..... | 6 |
| 1.3.3 小型热泵技术发展现状..... | 7 |
| 1.4 论文研究内容..... | 8 |
| 第 2 章 锂电池充放电性能研究..... | 9 |
| 2.1 锂电池实验台简介..... | 9 |
| 2.1.1 实验台主要结构..... | 9 |
| 2.1.2 实验台控制系统..... | 11 |
| 2.2 实验室磷酸铁锂电池的充放电特性..... | 12 |
| 2.2.1 放电特性分析..... | 12 |
| 2.2.2 充电特性分析..... | 14 |
| 2.3 电动汽车锂电池的充放电特性..... | 16 |
| 2.3.1 充电特性分析..... | 17 |
| 2.3.2 放电特性分析..... | 19 |
| 2.4 小结..... | 21 |
| 第 3 章 锂电池热特性研究..... | 22 |
| 3.1 锂离子电池的结构及工作原理..... | 22 |
| 3.1.1 锂离子电池的结构..... | 22 |
| 3.1.2 锂离子电池工作原理..... | 23 |

| | |
|-------------------------|----|
| 3.2 系统产热机理分析..... | 24 |
| 3.2.1 锂电池组产热..... | 24 |
| 3.2.2 锂电池组与环境热交换..... | 24 |
| 3.2.3 锂电池组热量计算..... | 26 |
| 3.3 磷酸铁锂电池温度特性分析..... | 27 |
| 3.4 小结..... | 30 |
| 第4章 锂电池热管理系统研究..... | 31 |
| 4.1 相变储能系统性能研究..... | 31 |
| 4.1.1 PCM 工作原理..... | 31 |
| 4.1.2 PCM 的选择..... | 32 |
| 4.1.3 PCM 特性..... | 33 |
| 4.1.4 PCM 用量与装置结构..... | 33 |
| 4.1.5 PCM 系统冷却性能研究..... | 36 |
| 4.2 热管散热系统性能研究..... | 39 |
| 4.2.1 热管工作原理..... | 39 |
| 4.2.2 热管散热系统结构设计..... | 40 |
| 4.2.3 热管各部分构件选择..... | 40 |
| 4.2.4 热管散热系统模拟..... | 42 |
| 4.3 小型热泵系统分析..... | 44 |
| 4.3.1 小型热泵工作原理..... | 44 |
| 4.3.2 热泵系统理论循环..... | 45 |
| 4.3.3 热泵系统的设计原理..... | 46 |
| 4.3.4 热泵系统关键部件选型计算..... | 47 |
| 4.3.5 热泵系统模拟研究..... | 48 |
| 4.4 小结..... | 52 |
| 结 论..... | 53 |
| 参考文献..... | 54 |
| 致 谢..... | 57 |
| 导师简介..... | 58 |

目 次

| | |
|--------------|----|
| 作者简介..... | 59 |
| 学位论文数据集..... | 61 |

引 言

随着电子科技的快速发展电池的应用更加广泛，呈现出多种多样的电池种类。采用不同材料研制而成的电池，在各个领域都有着独特的用处。其中，磷酸铁锂电池作为储能电池，具有很多优势，比如使用寿命长、安全性能高、容量大以及对环境友好等，因此，受到了电池行业的重视，近年来进入了飞速发展时期。

随着环境的日益恶劣，电动汽车将成为取代燃油车辆的新型交通工具。而对于电动汽车的核心部件锂电池，其性能要求更加成为研究的热点。目前，具有显著增长速度的电动汽车动力电池，在 2013 年的电池产量已达到 3.6 亿瓦时，而 2014 年上半年的产量就是 2013 年的 2.2 倍左右，约为 8 亿瓦时。其主要原因是我国政府对新能源汽车的补贴，使得新能源汽车的生产呈现出快速增长的趋势，仅 2014 上半年就超过了 2 万辆，高出了 2013 年全年的新能源汽车产量，推动了动力电池行业市场的发展。

目前，中国对锂电池的供应在世界上所占的比例十分小。美国的两家公司（Valence 和 A123）以及加拿大 Phostech 公司占据了全球磷酸铁锂电池行业的主要市场份额。而中国的磷酸铁锂材料企业已达到数家以上，但是行业的规模很小，产品的主要性能与国外存在差距。

锂电池在储能应用中，具有很多优点，比如有很好的容量一致性，在不稳定的充电环境中，有更强的充电接受能力，并且使用寿命长，可以减少维修和维护成本，降低系统总体投资。但是，通过研究锂电池的充放电性能、温度特性等，发现锂电池在低温和高温下的性能会下降，需要对电池组进行适当的热管理，以延长整体的使用寿命。

随着节能环保的进行，锂电池的重点应用领域将集中在电动工具、轻型电动车、新能源汽车和能源存储系统等，这些领域内的产业规模将在未来几年保持成倍的增长趋势，将会促进锂电池市场的快速发展。对锂电池的研究能够为电动汽车锂电池和其他新能源发电系统的储能提供理论数据支撑。

第 1 章 文献综述

1.1 课题研究背景

目前, 交通行业化石燃料的消耗日益增大, 加速了全球温室气体的排放。我国的汽车总量从 2003 年到 2013 年间增加速度十分显著, 以平均每年约 1100 万辆的速度增加, 到 2013 年总量已达到 1.37 亿辆, 约为 2003 年的 5.7 倍, 预计该数字在未来几年内将以年均 7% 的速度增长。而随着全球汽车数量的不断增加, CO₂ 的排放量急剧增加, 据报道, 2004 年中国交通运输业的 CO₂ 的排放量已达到 2.9 亿吨, 并且预计到 2030 年将达到 11.08 亿吨, 将是 2004 年的约 3.8 倍。而电动汽车凭借其节能环保的优势备受各界关注^[1]。

据德国相关报告, 2016 年德国政府当局计划购买的车辆中约有 30% 数量的大型电动汽车或混合动力汽车。除此之外, 政府机构可以为新能源汽车建立停车位, 以及建立更多的能源充电站。报告称, 长期来看, 中国的充电站和加油站的数量相当。

据预测, 到 2020 年中国电动汽车将达到五百万台。随着电动汽车数量的急剧增加, 其核心部件锂离子电池也成为目前研究的焦点。动力锂电池在使用过程中有很多优点, 如高能量密度、低维护成本、无毒、良好的循环寿命和高充电率等, 适用于电动汽车、混合动力汽车以及新能源供电系统等的能量储存装置^[2-3]。目前, 锂离子动力电池作为储能电源, 需要对其比能量进行改进与提高。全球许多汽车商家均竭尽全力将锂离子动力电池用作新能源汽车电源的开发中, 比如美国福特、克莱斯勒, 日本的丰田、三菱, 韩国现代等^[4]。

为了满足电力需求, 锂离子电池通过串联或并联的形式组成电池组, 因此, 整组电池温度的均匀性会影响锂电池组整体的使用寿命。总体来看, 我国的锂电池的发展仍处于起步阶段, 政府的大力支持将会促进我国锂电池工业产业的发展^[5]。

1.2 锂电池的研究现状

1.2.1 锂离子动力电池特性

目前, 主要的储能形式有机械储能、电化学储能和电磁储能, 而电池储能技术最为成熟、已经大规模产业化应用, 在环保要求和市场竞争环境下, 技术不断改

进，安全性和环境友好性日益提高，且随着生产规模扩大、成本也持续降低，占据市场主导地位；而其他类型的储能技术仍不成熟，存在安全性和经济性问题，仍需要较长时间研究发展。锂离子电池作为储能电池，具有很多优点，主要表现在以下方面：

1) 高能量密度。锂电池的能量密度能达到 120~200W·h/kg，是目前常用蓄电池中能量密度最高的电池。

2) 工作电压高。锂电池应用的电极是具有高电负性的，因此，磷酸铁锂动力电池的标称电压为 3.2V，锰酸锂和钴酸锂电池达到了 3.6V^[6]。

3) 低自放电。存储在非使用状态几乎没有化学反应，非常稳定。因为锂电池在初始充电时将形成一层固体电解质膜，具有只让离子通过而不允许电子通过的特性，从而可以防止自放电。

4) 充电效率高。在电池的正常使用过程中，没有副反应，电池充放电的库伦效率可达 100%。

5) 循环寿命长。目前，磷酸铁锂电池的循环寿命可以达到两千次以上，高的达到四千次以上，国外研究者开发了一种锂电池寿命达到八千次以上。

6) 无记忆效应。锂电池的充电和放电可以在任何时间进行，而不影响容量和循环寿命。

锂离子电池的缺点：

1) 安全性问题。虽然制造厂商称已解决锂电池的安全性问题，但在根本上，锂电池的内部采用易燃的有机电解液体系，同时，锂很活泼，则仍存在很大的安全隐患。

2) 低温性能差。电解液为有机体系，使其低温性能受限。目前还没有能够满足车辆低温性能的锂电池。

3) 过放电能力差。在过放电过程中，电极结构被破坏，分解了部分物质，电池性能不能恢复。

4) 过充电能力差。充电电压超过一定值时，电解液会发生分解，产生大量的热，导致电池故障。

5) 管理系统复杂，必须管理到每只单体电池，否则一旦有电池出现过充过放就容易造成整租电池失效或安全性问题^[7]。

1.2.2 电动汽车锂电池国外发展现状

在 2012 年 8 月份，美国政府宣布出台 2025 年企业平均燃油经济性法规，预计

未来美国的新车的燃油标准将提高一倍，并且将增加约 2 千亿美元的花费，而可以节约 5 千亿美元的燃油费用。

目前韩国 LG 松下电池厂、LG 化学、AESC 和三星四大企业电池出货量在世界上前列，而韩国 LG 化工企业和三星均在涉足于中国行业市场，扩大了其生产能力，抢占动力电池市场。

锂电池在电动汽车市场的应用广泛，1993 年至 2013 年，美国通用、福特、克拉斯勒 3 大集团及其子公司的新能源汽车数量占销售总量的 66% 左右，专业人士认为，从性能和设计理念来看，特斯拉代表的纯电动汽车的发展将成为汽车行业的发展方向。

韩国政府计划 2017 年将快速充电站由现有的 177 增加到 620 多个，包括汉城、周边地区的大型超市的首都圈、公路休息站、公共停车场等，将成为新建充电设施的重点区域。电动汽车充电站的普及，加速了锂电池产业的发展。

法国政府在 2008 年至 2012 年的期间，总计投入约 23 亿欧元的购车优惠补贴金额。在 2011 年，德国联邦经济部与交通部共同发表了《德国联邦政府国家电动汽车发展规划》，预计到 2020 年，电动汽车和混合动力汽车将超过 100 万辆，到 2030 年，达到 600 万辆的目标，至 2050 年，德国市区将会全部完成电动交通网的普及。

此外，锂离子动力电池在各国电网储能方面进行了试运营。电网储能的运营成为了锂离子电池应用的新领域，一些处于国际领先技术的锂动力电池企业正在向这一应用方向拓展业务领域。目前锂电池产业还处于试运营阶段中，各国将通过不断的试验来发现并解决问题。其中美国，欧盟，日本和一些国家致力于发展智能电网和能源存储技术。

1.2.3 电动汽车锂电池国内发展现状

我国经过不断的探索与努力，在新能源车辆电池、电控等关键技术上取得了很大突破，并已经开始产业化。

目前，我国的清华大学以及天津清源电动车辆有限公司研制的纯电动轿车和纯电动客车已经通过国家质检中心的型式认证试验。

对于我国目前的电池工业而言，环境污染和资源浪费严重是目前存在的主要问题。为了减少环境污染，保护现有的生态环境，维护生态平衡，应该扩大资源的应用类型，同时使用新的资源。因此，锂离子电池是目前最具有发展前景的储能应用电池。

为了实现节能、低污染、零排放的目标，我国政府出台了大量对新能源汽车的扶持补贴政策，锂离子动力电池是国家“863”的重点研发项目，在研发上，国家从人力和物力方面都给予了大量的支持。国内对锂电池的研发公司有：比亚迪、万向集团、深圳比克电池、天津力神电池等^[8]。

截至目前，我国能进行锂电池大容量生产的主要科研院和相关企业有：中科院有色研究院、中科院物理所、清华大学核研院、比亚迪、苏州星恒电源有限公司、青岛华光锂离子电池有限公司、雷天能源集团、天津力神、中信国安盟固利新能源科技有限公司、北大先行科技产业有限公司等^[9]。

目前，我国蓄电池行业面临很大挑战，针对这种情况中国电池工业协会采取一定措施，积极引导蓄电池企业进行产品结构调整，发展更加多元化；企业应加强技术等的改革与努力，合理利用资源，极力减少由于成本高造成的不利影响；生产工艺进行改进，淘汰落后的产业能源，实现快速转型，推动电池行业向着生产高效、环保、节能方向进行，电池行业才会得到可持续发展。

1.2.4 锂电池储能的应用

随着节能环保的大力倡导，以及新能源发电的使用，储能成为目前电力发展中重要的一环。锂电池储能主要应用于以下几个方面：

1) 风光互补系统的能量存储系统

风光互补系统进行供电时，由于太阳能和风能在转化为电能的过程中存在间歇性和不可控性，会影响电网的稳定性^[10]。因此，需要配置合理的储能系统。当发电量小于用电量时，风光互补发电量全部供给负载使用，不足的部分由锂电池组放电提供；当发电量大于用电量时，一部分电能供给负载使用，其余的电能储存于锂电池组中，当电池充满时，多余电能通过卸荷器消耗掉。

2) 电动汽车供电系统

作为储能系统，锂电池可以为电动汽车进行充电，锂电池性能稳定，节能环保，对电动汽车进行充电时安全可靠。

3) 通讯基站的后备电源

在通讯基站的应用中，锂电池储能节能环保，每个基站每年可以省电约 7200 度，同时，锂离子动力电池不含有重金属，对环境无污染。

除此之外，锂电池在太阳能路灯中的储能、家庭用电的储能等领域也受到广泛关注，随着国家政策的支持以及能源的危机，锂电池储能能在智能电网、微电网、风光互补等领域有着巨大的潜在应用价值与市场。

1.3 锂电池热管理系统的研究现状

锂离子电池的寿命和安全性能与电池温度密切相关。温度过高，导致电池组内部副反应加快，严重时甚至会引发安全事故。温度过低，电池的容量、电压等都会明显下降，甚至造成不可逆的衰减^[11]。

1.3.1 相变材料散热热管理技术发展现状

目前，世界各国都在倡导工业节能的应用，储能技术的研究也成为行业关注的热点。由于 PCM 储能密度大，热惯性小，因此，各工业发达国家开始重视 PCM 材料的应用与研究。

国外对相变材料锂电池热管理中应用的研究较早，Khateeb S.A 等人在 2004 年研究了相变材料在电动踏板车锂离子电池中的应用^[12]。Sabbah 等人在 2008 年对混合动力电动汽车用锂离子电池组的风冷和相变材料冷却进行了对比，表明相变材料散热具有更好的一致性^[13]。Duan X. 等人在 2010 年研究了相变材料应用于电动汽车锂电池的应用效果^[14]。

国内也对相变材料进行了研究，其中，2008 年中国科学院广州能源研究所张仁元等人对金属相变储能锅炉在太阳能热发电中的应用进行了深入研究分析^[15]。PCM 在电池组热管理中的应用主要有两种方式，一种是将蓄电池单体放置于相变材料中，另一种是用相变材料将电池单元夹在中间^[16]。两种模式各有利弊，可以根据实际的环境条件确定应用模式。

凌子夜等人对锂离子电池的热管理系统进行了研究，主要是对传统热管理方式和相变材料热管理进行对比，研究结果表明，相变材料散热系统对锂离子电池热管理效果明显，可以被广泛使用^[17]。

张国庆、张海燕对相变材料热管理系统的设计和效果进行了实验研究，具有良好的效果^[18]。

1.3.2 热管散热式热管理技术发展现状

到目前为止，电池冷却系统可以使用空气、液体（水/油/制冷剂）、相变材料（PCM）或这些方法的组合，每个解决方案都有其优点和缺点。空气冷却解决方案是被动的。风冷系统的最明显的好处是消除车载制冷装置和冷却剂泵，节约能源。然而，散热过程中空气对流不足导致电池组散热不均匀。因此锂电池的温度分布不均匀是难以避免的^[19]。与空气冷却相比，液体冷却提供了更高的冷却能力，

但更昂贵。由于使用泵、水箱、热交换器等装置，液体冷却系统的保养和维修也比较复杂。PCM 系统的高热能存储容量可以使电池温度保持在其熔点附近^[20]。然而，存在的缺点导致 PCM 系统的不能广泛使用。

众所周知，热管具有非常高的热导率，能够保持均匀蒸发器表面几乎恒定的温度。此外，热管设备灵活性适合可变面积的几何空间。这些特点使热管成为电动汽车电池冷却的良好选择。到目前为止，由于复杂的制造过程和使用铜、灯芯和其他昂贵材料导致热管成本高，限制了大型热管系统的使用。然而，近年来研究的铝热管能够有效降低热管成本，使用安全可靠^[21-22]。此外，铝的使用还有助于减少冷却系统的重量，在混合动力汽车/电动汽车应用中非常明显。

此前，M. S. Wu 等人的研究发现，热管与铝翅片的冷凝段可以显著降低电池温度，尤其是在应用冷凝器的冷却风扇时，温度的降低更加显著^[23]。近年来，Z. Rao 等人实验研究了采用水冷却模块下管式热管冷凝器部分的冷却性能。热生成率低于 50W 时，电池最高温度已经低于 50℃。加上所需的电池温度梯度，热生成率不应超过 30W。也就是说，通过精心设计的热管，温升和温差电池可以有效地控制在所需的范围内^[24]。

Thanh-Ha Tran 等人实验研究了热管冷却在混合动力电动汽车和电动汽车锂离子中的应用，实验表明，热管冷却系统可以工作在封闭的空间，能够促进其在车辆发展中的应用^[25]。

1.3.3 小型热泵技术发展现状

近几年，我国的热泵技术发展较快，使用热泵节能环保，而热泵主要用电驱动，电能可以长距离高效输送，没有污染。

目前，热泵在很多领域都广泛应用。热泵在物料干燥中的应用，主要包括热泵和干燥两大系统。主要对木材、茶叶、种子、谷物和农副产品等进行干燥。把热泵干燥技术应用于食品物料越来越得到行业关注。使用热泵进行干燥的条件温和，可以成功地控制干燥过程中的相关参数，最终产品和冷冻干燥的条件下得到的质量相似，因此，具有很大的应用价值。热泵在进行干燥食品物料等的材料时的干燥温度一般在零下 20℃ 到 60℃ 的范围内，并且进行恰当的控制技术，可使系统在常压下实现冷冻干燥^[26]。

热泵在建筑中应用相当广泛，建筑节能的一个重要的应用领域就是建筑物的供暖。近年来，中国一些地区已经开始使用可再生能源，如地源热泵技术，水源热泵技术，太阳能热水器、空气源热泵技术，这些技术的应用效果十分显著，具有很高

的应用价值。

中国的居民生活热水及采暖的能耗正在不断增加，而热泵系统的节能效果显著，并且安全可靠，能够将低品位热能转换为高品位热能，减少了高品位热能的消耗。与其他燃气型热水器和锅炉等相比，热泵热水系统更加安全可靠。目前，电、燃油/气价格持续升高的情况下，热泵热水系统的广泛应用更加显著^[27]。

除此之外，热泵在工业、以及化工中的应用同样显著，包括余热、废热的回收，制药工业基本环节中的应用等。

在锂电池的热管理中的应用研究较少，其中欧阳东研究的纯电动汽车热泵空调与电池交互热管理系统中，将热泵系统应用于电动汽车，并对系统进行仿真模拟，结果表明，热管理效果良好，可以控制电池组的最高温度，降低电池组内部温度的不均匀性^[28]。

1.4 论文研究内容

1) 锂电池充放电实验

对电动汽车实验室的磷酸铁锂动力电池以及唐山市南湖电网运营车辆的锂电池充放电进行实验研究，并且对实验数据进行采集与分析，研究锂离子电池在不同环境温度及北方典型月份下的充放电性能。

2) 锂电池热特性分析

在锂离子电池的研究中，锂电池的热性能会影响电池组寿命和安全性能。对锂电池产热机理进行分析，研究了温度对锂电池性能的影响，锂离子电池的性能与温度密切相关，因此，要对电池组进行热管理。

3) 热管理系统研究

锂离子电池组的热管理主要是使电池单体的温度均衡，并保持在最佳工作温度区间内，对高温下的锂电池进行冷却降温，对低温下的锂离子电池组进行保温。针对锂离子电池组高温和低温条件下的性能下降的特性，对锂电池的关键技术进行了研究，主要包括 PCM 散热系统、热管散热系统和小型热泵系统在锂电池储能中的应用。

第 2 章 锂电池充放电性能研究

2.1 锂电池实验台简介

能量储存系统在许多能源发电系统（如可再生能源）中至关重要，不同类型的电动汽车和混合动力电动汽车以及新能源发电系统中最重要的环节就是能量存储系统。而对于电动车辆以及发电系统等，能量储存系统会限制电动汽车的行驶里程并影响发电系统的稳定安全性^[29]。

2.1.1 实验台主要结构

根据研究的实际情况，锂电池储能装置基本组成为：风力发电机组，光伏电池阵列，蓄电池组，控制器，逆变器等。图 1 为系统的结构图。

其中风力机发出的交流电经过 AC/DC 变换器变换成直流电，由光伏电池阵列发出的直流电经过 DC/DC 变换器调整电压后直流进入充放电控制器，充放电控制器根据系统的状态发出指令，当发电量小于用电量时，电能通过逆变器变换为交流电后全部供给负载，不足的部分由蓄电池组放电提供；当发电量大于用电量时，一部分电能可在逆变器中转换为交流电后直接供给负载使用，蓄电池将会储存剩余的电能，当蓄电池充满时，多余电能通过卸荷器消耗掉。并且利用蓄电池辅助充电后仍不能满足负载电动汽车需求时，可以利用电网直接给电动汽车充电，也可以利用电网的谷电对储能电站蓄电池进行充电。电网的谷电可以保证系统的可靠性，确保系统在极端气候下依然能够满足负载的需求。

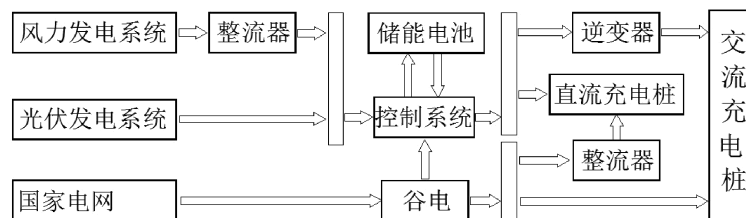


图 1 实验系统图

Fig.1 Experimental system diagram

风光互补系统置于 15m 高的楼顶，锂电池组置于一层室外，控制系统置于室内与风光互补系统和锂电池组进行连接。研究所用锂离子电池组整体参数见表 1。

表 1 锂电池组参数

Table1 Parameters of lithium battery

| 项目 | 单位 | 规格参数 |
|----------|-----|--------|
| 额定容量 | Ah | 400 |
| 标称电压 | V | 120 |
| 充电方式 | / | 恒流/恒压 |
| 充电限制电压 | V | 150 |
| 放电终止电压 | V | 114 |
| 最大持续放电电流 | A | 200 |
| 最大瞬时放电电流 | A | 400 |
| 充电电流 | A | 70-80 |
| 充电时间 | h | 5-6 |
| 工作温度 | °C | -20-60 |
| 储存温度 | °C | 5-40 |
| 储存大气压力 | kPa | 86-106 |
| 储存相对湿度 | / | 小于 90% |

实验室电池组共 4 组，每组选用 40 只 100Ah 单体蓄电池串联，最终实现容量为 100Ah/120V，各组再进行并联，最终实现 400Ah/120V 的蓄电池组。整个电池组电池连接图如图 2 所示。

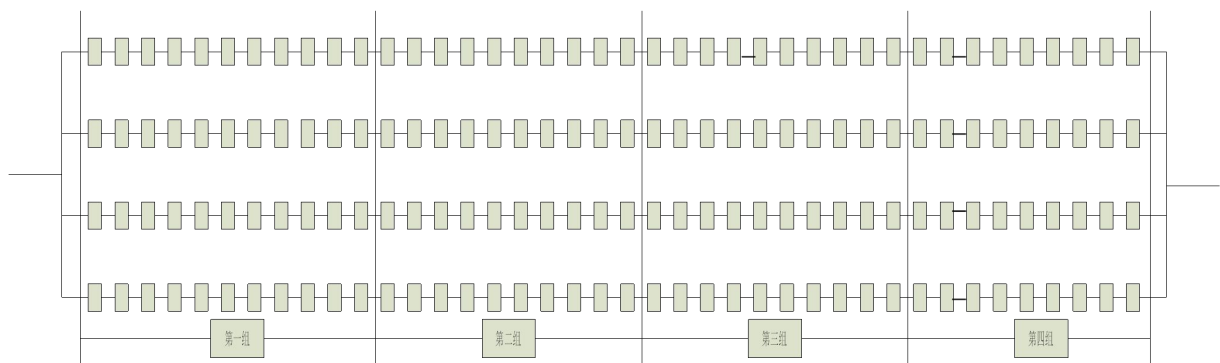


图 2 锂电池组连接图

Fig.2 Connection diagram of lithium battery

实际连接中，将锂离子电池单体置于四个电池箱中，每个电池箱中包含 40 个电池单体，每个电池箱中的电池单体每 8 只打包成一组，共 5 组，四个电池箱及其内部的连接方式如图 3 所示。

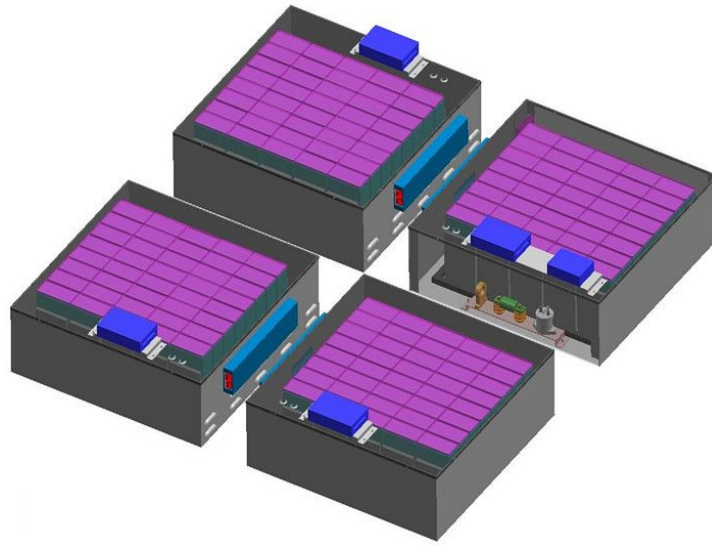


图 3 锂电池箱内部连接图

Fig.3 Connection diagram inside the lithium battery box

2.1.2 实验台控制系统

实验台所用控制系统可以实时查看充电过程中电流、电压、功率等信息，并且能够实时记录数据和查询历史数据。充放电过程中电池组数据可以独立查询，该设备能够实时查看锂离子电池组基本信息。

锂电池组的控制系统主界面和电池组管理系统设备界面如图 4 和 5 所示。

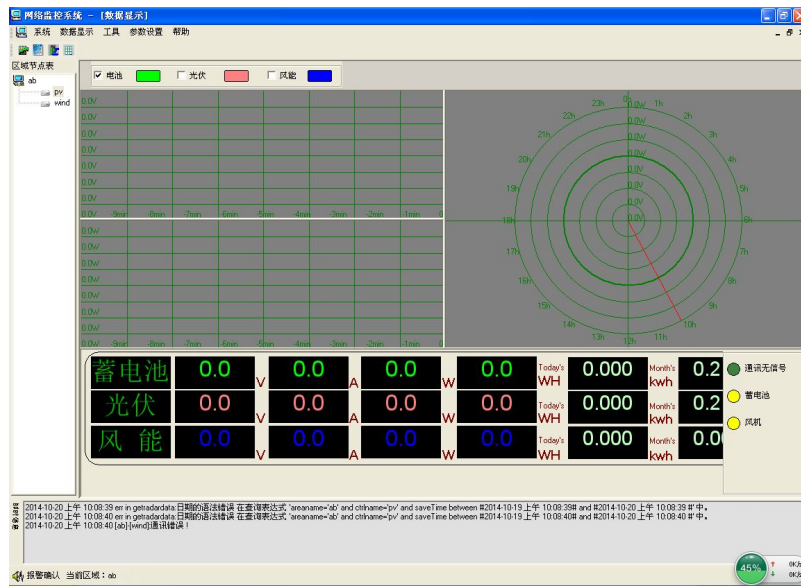


图 4 控制系统主界面

Fig.4 Main interface of control system



图 5 电池组管理系统主界面

Fig.5 Main interface of battery management system

管理系统需要满足以下要求：

- 1) 需要提供电池组的存放环境（DOD 的影响）。
- 2) 充电器恒流充电电流 80A，充到 150V 停止充电，放电最大工作电流不能超过 200A。
- 3) 对电池箱要求做到防尘排热。

2.2 实验室磷酸铁锂电池的充放电特性

对电池组在不同环境温度下的充放电性能进行了研究。在实际应用中，磷酸铁锂电池作为能量存储系统，应当合理的利用锂电池的优点，减少造成电池损害的因素，从而延长电池的使用寿命^[30]。实验过程中，对磷酸铁锂电池组进行反复的实验测定，选取实验数据的平均值进行分析与研究，研究结果具有普遍意义，避免了实验的偶然性。

2.2.1 放电特性分析

目前，锂电池的普遍标称电压为 3.7V，电动汽车实验室所选用的 GBS-LFMP 100Ah 型号的锂离子电池的标称电压为 3.2V，在 80%DOD 时，循环寿命能达到 3000 次，最大持续放电电流能达到 300A。

放电电量由 100%到 50%的过程中，分别测定环境温度为 5℃、15℃、25℃和

35℃的电池组的总电压、单体最大电压和单体最小电压随放电时序的变化，电池组电压的变化情况可以反映整体的性能优劣，放电曲线如图 6~8 所示：

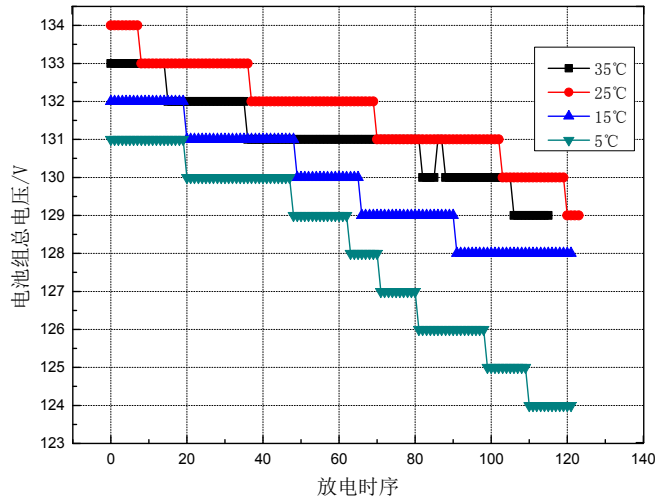


图 6 放电时电池总电压在不同温度下的变化

Fig.6 Changes of battery total voltage at different temperatures during discharging

由于放电时间较长，在放电过程中，每隔 15 分钟进行数据的采集，在中午和晚上不进行实验，为了保证实验曲线的连贯性，横轴用放电时序表示，每一个时序代表的时间间隔为 15 分钟。充电过程与放电过程一样，每一个充电时序代表的时间间隔为 10 分钟。

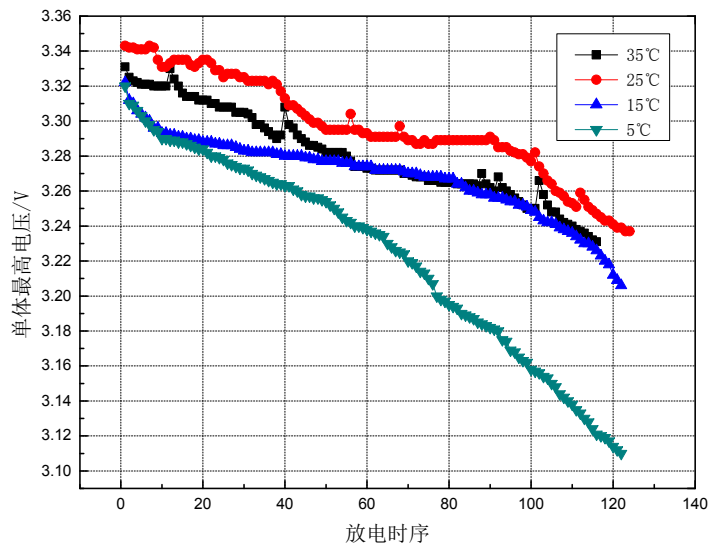


图 7 放电时电池单体最高电压在不同温度下的变化

Fig.7 Changes of battery monomer highest voltage at different temperatures during discharging

在放电过程中，电池的总电压不断下降，从图 6 中可以看出，在 25℃时电池的总电压最高，变化稳定，平均总电压为 132V，在 5℃时的平均总电压为 128V，在 15℃时为 129V，在 35℃时为 130V。在一定的范围内，电池组的放电总电压越高，电池组的放电性能越好，电池组整体的使用寿命越长。

从图 7 中可以看出放电过程中电池组的单体最高电压在 25℃时电压最高为 3.343V，最低为 3.237V， $\Delta V=0.106V$ ，35℃时最高为 3.331V，最低为 3.231V， $\Delta V=0.1V$ ，15℃时最高为 3.322V，最低为 3.206V， $\Delta V=0.116V$ ，5℃时最高为 3.32V，最低为 3.11V， $\Delta V=0.21V$ 。

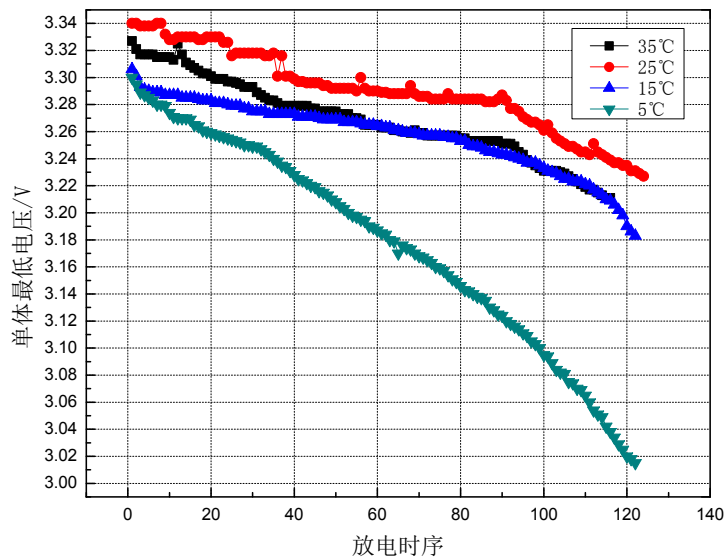


图 8 放电时电池单体最低电压在不同温度下的变化

Fig.8 Changes of battery monomer minimum voltage at different temperatures during discharging

图 8 中可以看出，电池的单体最低电压的变化在 25℃时电压最高为 3.34V，最低为 3.227V，差值为 0.113V，35℃时电压最高为 3.327V，最低为 3.211V，差值为 0.116V，15℃时电压最高为 3.306V，最低为 3.183V，差值为 0.123V，5℃时最高为 3.3V，最低为 3.015V，差值为 0.285V。可见电池组在 5℃的一致性较差，而且在 25℃时的放电性能优于其他工况条件。整体来看，电池组在 25℃、15℃、35℃的性能相对较好，在低温下性能明显下降。

2.2.2 充电特性分析

GBS-LFMP 100Ah 型号的锂电池的过放保护电压 2.6V，过放释放电压 2.8V，过温保护温度 60℃，过温释放温度 45℃，过充保护电压为 3.65V，过充释放电压

为 3.4V，欠压报警电压为 2.9V，欠压释放电压为 3V。在整个实验过程中，电池组整体运行良好，未出现报警、故障等现象。

对实验室锂电池进行了不同环境温度下（5℃、15℃、25℃和 35℃）电池组充电特性的研究，电池的充电中的总电压、单体最高电压以及单体最低电压随充电时序的变化如图 9~11 所示：

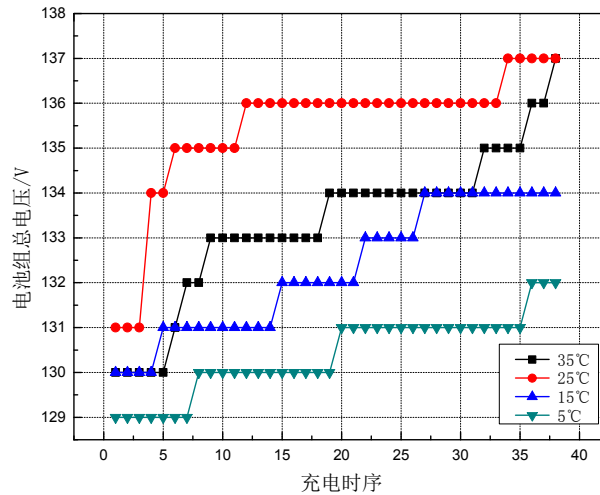


图 9 充电时电池总电压在不同温度下的变化

Fig.9 Changes of battery total voltage at different temperatures during charging

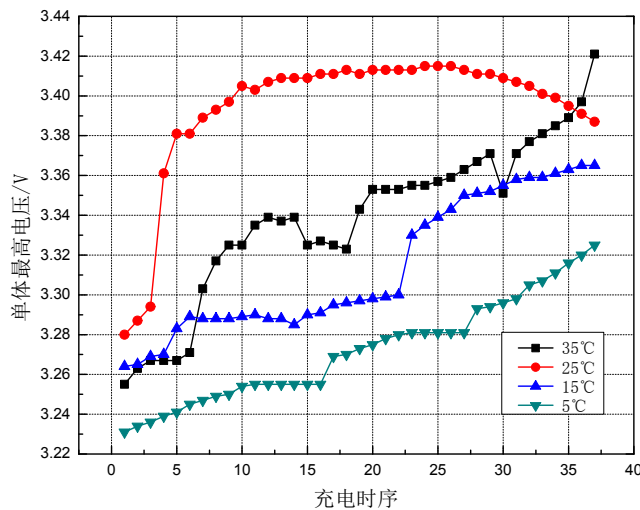


图 10 充电时电池单体最高电压在不同温度下的变化

Fig.10 Changes of battery monomer highest voltage at different temperatures during charging

从图 9 中可以看出，在充电过程中，电池组的总电压不断升高，在 25℃时锂离子电池组的总电压最高为 137V，在 5℃时的最高电压为 132V，在 15℃时为

134V，在 35℃时为 137V，但达到这个值需要的时间更长。

从图 9 和图 10 中可以看出，在 25℃对电池进行充电时，电池的总电压高于其他环境温度下总电压，而单体最高电压在 25℃时为 3.415V，在 35℃时为 3.397V，在 15℃时为 3.365V，在 5℃时为 3.325V。

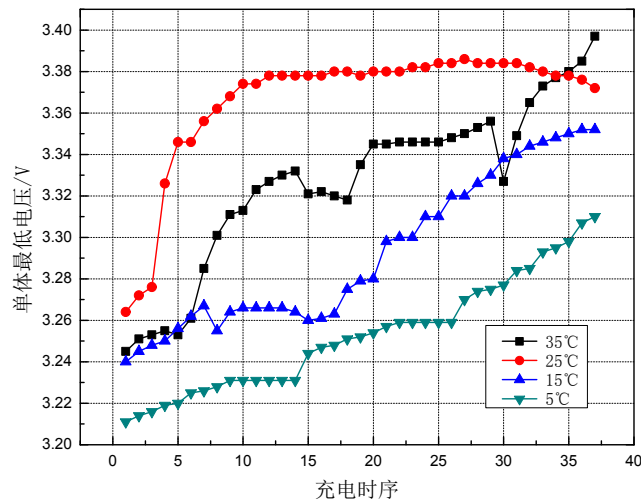


图 11 充电时电池单体最低电压在不同温度下的变化

Fig.11 Changes of battery monomer minimum voltage at different temperatures during charging

从图 11 可以看出，随着充电过程的进行，电池组的单体最低电压不断增加。电池充电时的单体最低电压变化时在 5℃时最低为 3.211V，15℃时最低为 3.24V，在 25℃时最低为 3.265V，在 35℃时最低为 3.245V，电池组在 25℃时的单体最低电压的变化稳定。由于充电中电压高低可以反映电池组的性能，可见电池在 25℃情况下的性能最好，在 5℃、15℃和 35℃条件下充电时，电池的充电性能都会下降，但是在 5℃下降最快。整体来看，电池组的一致性较好。

2.3 电动汽车锂电池的充放电特性

电动汽车智能监测与控制系统，不仅可以对电池组整体进行管理，同时能够及时发现使用中的问题。系统能够对各逻辑单体电池的总电压、温度信息及电池簇的充/放电电流进行实时的监控与记录，并且设置了电压、电流、温度等多级报警与故障诊断、故障恢复等保护措施为系统长期安全可靠运行提供保障。

为了保证研究结果的可靠性，选取同一型号的车辆在典型月份（1 月份、4 月份、7 月份和 10 月份）下运营中的数据进行了分析，根据车辆每天运营中的数据的平均值，分析车辆电池在一个月内的充放电性能，并将四个典型月份的数据进行

比较, 研究车辆锂电池组的充放电性能, 对于实际中车辆的运营推广普及具有指导意义。

2.3.1 充电特性分析

对唐山市南湖电动汽车电站的锂离子动力电池特性进行分析, 车辆在充电时, 操作规范, 冬季天气寒冷时, 电池组充电的最低温度为 5°C , 主要为了延长电池组的寿命并提高整车的性能, 在低于该温度时停止对车辆进行充电。电池的容量为 300AH , 共9箱168组。

车辆经过两年的运行, 性能良好, 充电电流为 80A , 锂电池的SOC由30%增加到100%的过程中, 选取了典型月份(1月份、4月份、7月份和10月份)进行数据的分析, 研究锂电池的充电性能, 使用过程中每天对车辆进行充电, 电池组单体最大电压、单体最小电压以及电池组的最高温度的变化如图12~14所示。运营电动汽车磷酸铁锂电池的单体标称电压为 3.6V , 电池的电压变化情况能够反映出电池性能的优劣。

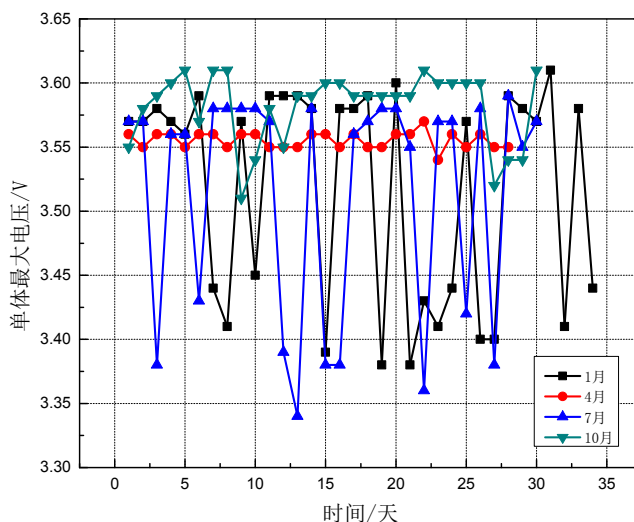


图12 充电时不同月份下电池组单体最大电压对比图

Fig.12 Contrast figure of battery pack monomer maximum voltage in different months during charging

由图12可以看出, 在1月份和7月份电池的单体最大电压的波动比较大, 1月份单体最大电压的最大值为 3.61V , 最小值 3.38V , $\Delta V=0.23\text{V}$; 7月份的最大值为 3.59V , 最小值 3.34V , $\Delta V=0.25\text{V}$; 而在4月份的最大值为 3.57V , 最小值 3.54V , $\Delta V=0.03\text{V}$; 10月份的最大值为 3.61V , 最小值 3.51V , $\Delta V=0.1\text{V}$ 。

电池组的单体最大电压的变化与多种因素相关, 环境温度、电池内部的化学反

应以及充电设备等都会对电池的性能产生影响。

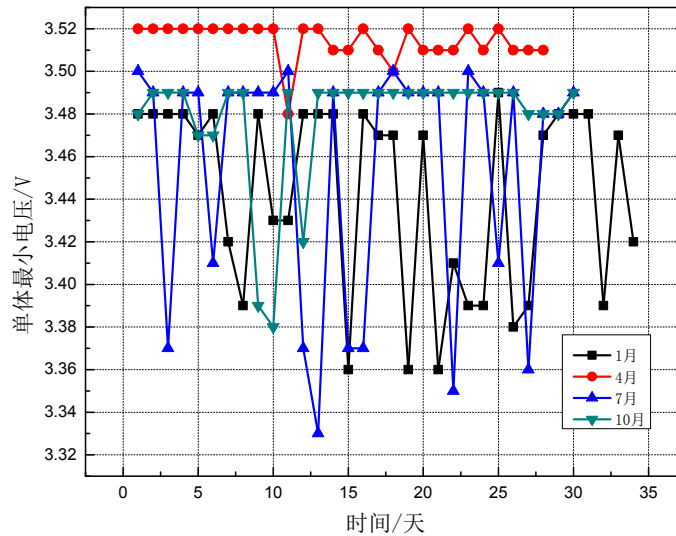


图 13 充电时不同月份下锂电池单体最小电压对比图

Fig.13 Contrast figure of lithium battery monomer minimum voltage change in different months during charging

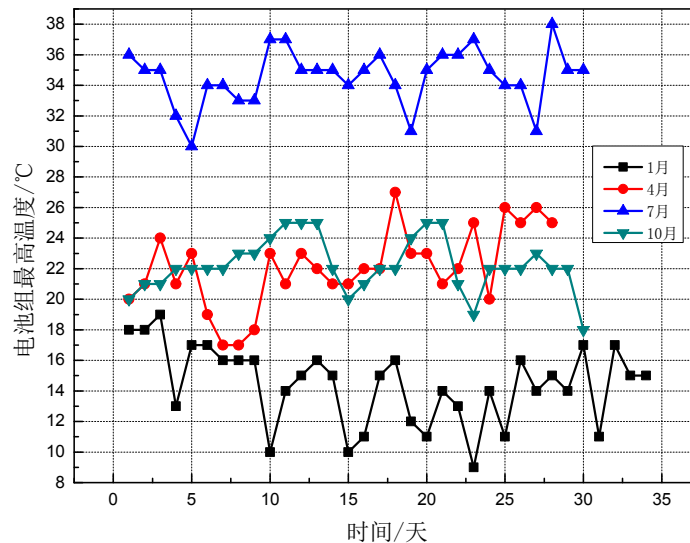


图 14 充电时不同月份下锂电池最高温度变化对比图

Fig.14 Highest temperature change contrast of lithium battery in different months during charging

图 13 可以看出，电池组最小单体电压变化与图 12 中单体最大电压变化趋势一致，电池组在 1 月份和 7 月份电池的单体最大电压的波动比较大，1 月份单体最大电压的最大值为 3.49V，最小值 3.36V， $\Delta V=0.13V$ ；7 月份的最大值为 3.5V，最小值 3.33V， $\Delta V=0.17V$ ；而在 4 月份的最大值 3.52V，最小值 3.48V， $\Delta V=0.04V$ ；10

月份的最大值 3.49V，最小值 3.38V， $\Delta V=0.11V$ 。在冬季和夏季的时候电池组的电压变化比较大，而在春秋季节相对稳定。整体电池组的单体电压的最小值为 3.33V，下降较少，说明在使用过程中电池组的一致性较好。

由图 14 可以看出，电池组在 1 月份充电过程中最高温度的变化范围在 9~19℃；4 月份的最高温度的变化范围在 17~27℃；7 月份的最高温度的变化范围在 30~38℃；10 月份的最高温度的变化范围在 18~25℃。而在 1 月份的天气温度的变化范围在 -14~7℃，并且冬季要求电池的充电温度不低于 5℃；在 4 月份的天气温度的变化范围在 3~27℃；在 7 月份的天气温度的变化范围在 19~35℃；在 10 月份的天气温度的变化范围在 1~22℃。可见电池组内部的温度一般比环境温度要高，主要是因为是在充放电过程中，电池组内部的化学反应、电化学极化、内阻等的热力学过程的进行而产生热量，除此之外，充电电流的大小以及周围环境温度的影响都会导致电池组温度的升高。电池在冬季和夏季使用中应当考虑对电池组进行适当的热管理，以免温度过高或者过低对电池组的性能和使用寿命等造成影响。

2.3.2 放电特性分析

运营电动汽车锂离子电池的放电过程即车辆的运行过程，整个运行期间，电池组的各项参数变化稳定，选取同一型号车辆的运行数据进行研究，在一年的运行时间里，同样选取典型月份（1 月份、4 月份、7 月份和 10 月份）下对锂电池组的放电性能进行了研究，锂离子电池组的模块温度和平均单体电压与时间的关系如图 15~17 所示：

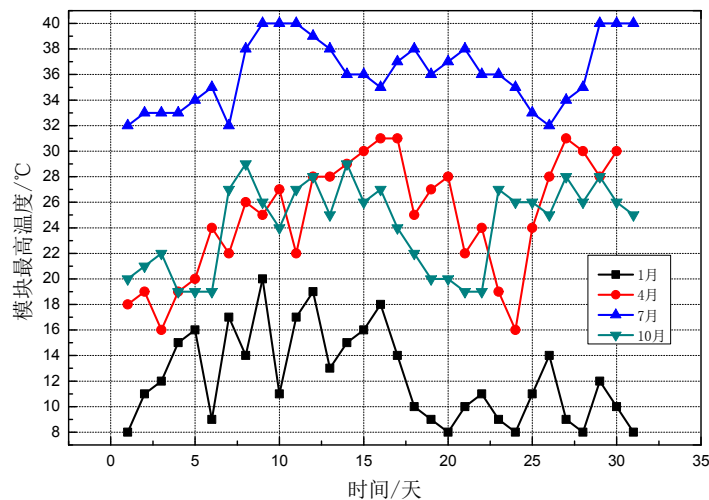


图 15 放电时不同月份下锂电池最高温度变化对比图

Fig.15 Highest temperature change contrast figure of lithium battery in different months during discharging

从图 15 可以看出，运营车辆的锂电池组在运行中的最高温度的变化情况，1 月份温度变化范围在 8~20℃，4 月份温度变化范围在 16~31℃，7 月份温度变化范围在 32~40℃，10 月份温度变化范围在 19~29℃，都要高于当时的平均环境温度。

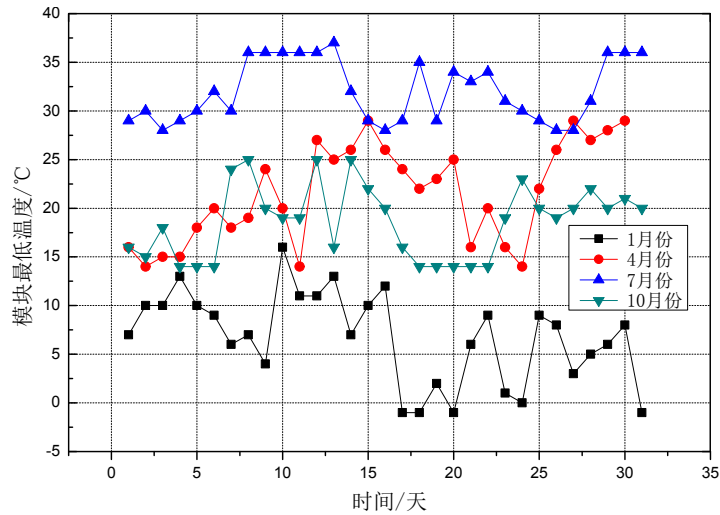


图 16 放电时不同月份下锂电池最低温度变化对比图

Fig.16 Lowest temperature change contrast figure of lithium battery in different months during discharging

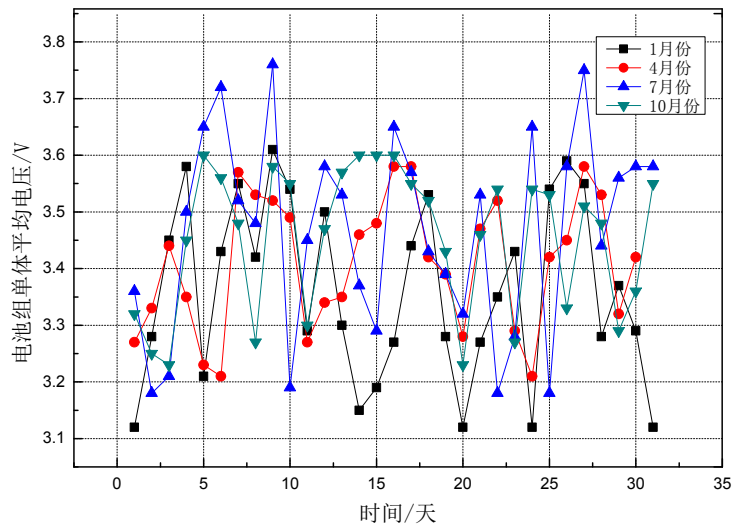


图 17 放电时不同月份下锂电池平均单体电压变化对比图

Fig.17 Average monomer voltage change contrast figure of lithium battery in different months during discharging

从图 16 可以看出，运营车辆的锂电池组在运行中的最低温度的变化情况，1

月份温度变化范围在-1~16℃，4月份温度变化范围在14~29℃，7月份温度变化范围在28~36℃，10月份温度变化范围在14~25℃，都要高于当时的环境最低温度。可见，在车辆运行中，对电池组进行适当的热管理十分必要，能够改善电池组的使用性能，并且延长使用寿命。

从图17可以看出，电池组平均单体电压变化趋势不定，但都在一定范围内波动。1月份平均单体电压变化范围在3.12~3.61V， $\Delta V=0.49V$ ；7月份的变化范围在3.18~3.76V， $\Delta V=0.58V$ ；而在4月份的变化范围在3.31~3.58V， $\Delta V=0.37V$ ；10月份的变化范围在3.23V~3.6V， $\Delta V=0.37V$ 。在1月份和7月份平均单体电压与4月份和10月份相比，变化范围更大，波动更不稳定，由于电池电压能够反映电池组性能的好坏，因此，在春秋季节下电池组的性能相对较好，但整体电池组的电压变化比较稳定，一致性良好。

2.4 小结

磷酸铁锂电池应用在电动汽车的储能中，不仅能够满足车辆运行需求，同时可以减少车辆燃油的消耗，绿色环保。通过对实验台和电动汽车中的锂电池组的充放电性能的研究，结果表明：

1) 实验室研究的GBS-LFMP100AH型号的锂离子电池组在5℃时的充放电性能较差，在其他温度条件下充放电性能差异较小，25℃时最佳，整体锂离子电池组一致性良好。

2) 车辆在实际运营时，锂电池在充电的过程中，冬季和夏季的单体电压的变化差值与春秋季节相比变化更大，需要对锂电池组进行适当的热管理，以延长电池组的使用寿命，总体来看，运营车辆的电池组的稳定性良好。

第3章 锂电池热特性研究

在储能应用中，锂离子电池储能已成为一种最常用的技术，尽管锂电池储能系统的应用不断增加，仍然有需要克服的问题以达到技术的完善和锂电池性能的提高。磷酸铁锂电池组可以用于风光互补系统的储能电池、电动车辆能量存储系统以及其他供电方面，应用范围广，具有很高的科研价值。

3.1 锂离子电池的结构及工作原理

目前，在新能源发展中，能源存储是关键的问题，相比于传统的储能方式。锂离子电池在储能中可以减轻资源的负担，绿色环保，因此，锂电池的应用推动了电池行业的快速发展^[31]。

3.1.1 锂离子电池的结构

锂离子动力电池的主要组成部分包括电池正极、电池负极、电解质、隔膜、正极引线、负极引线、中心端子、绝缘材料、安全阀、PTC（正温度控制端子）、电池壳体。锂离子电池具有显著的应用优势，体积比同类电池更小、具有更大的容量密度、对环境友好无污染、使用过程中无记忆效应。

将锂离子电池的单元体通过串并联或者组合的方式进行连接而组成锂离子电池组。通过对磷酸铁锂电池组为的研究，磷酸铁锂的结构为橄榄石晶体结构，每一个晶胞中含有4个磷酸铁锂的单元体。每个电池单元体的晶胞的参数可以表示成 $a=0.6008\text{nm}$ ， $b=1.0324\text{nm}$ ， $c=0.4694\text{nm}$ 。

在磷酸铁锂中，Fe与Li各自处于氧原子八面体中心位置，分别各自形成了 FeO_6 和 LiO_6 的八面体结构， FeO_6 八面体、 LiO_6 八面体和 PO_4 四面体的排列形式交错相间，最终形成层状脚手架的结构形式。在bc平面上， FeO_6 层由相邻的 FeO_6 八面体通过共用顶点的一个氧原子相连而组成。在b方向上，共用棱上的八面体连接两个相邻的 LiO_6 八面体，构成链式结构，位于 FeO_6 层之间。同一个棱上的两个氧原子连接一个 PO_4 四面体和一个 FeO_6 八面体，同时两个 LiO_6 八面体和 PO_4 四面体以及 FeO_6 八面体共用棱上的氧原子。

目前磷酸铁锂电池的理论比容量高达 $170\text{mA}\cdot\text{h/g}$ ，而实际比容量也可以达到 $160\text{mA}\cdot\text{h/g}$ 左右。稳定的橄榄石结构使得磷酸铁锂正极材料具有以下优点：1) 电池的理论比容量和工作电压高，每摩尔磷酸铁锂可以脱嵌 1mol 的锂离子，工作电

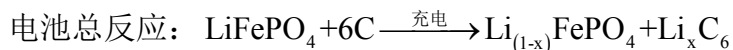
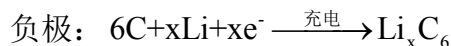
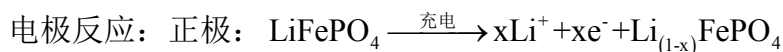
压约为 3.4V 作用；2) 良好的循环性能，尤其是高温循环性能，同时使用温度的提高能够使电池组高倍率放电性能增强；3) 优良的安全性能；4) 具有很高的堆积密度 ($3.6\text{mg}/\text{cm}^3$)、和高的体积能量密度。

然而，磷酸铁锂作为正极材料也有它的缺点，离子和电子导电性很低，在合成过程中的 Fe^{2+} 很容易氧化成 Fe^{3+} ，同时还需要纯净的惰性气体保护才能顺利进行。目前磷酸铁锂进行合成的工艺困难，而且电极材料的高倍率充放电性能较差，这是研究磷酸铁锂的主要工作难点。

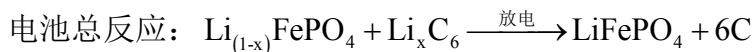
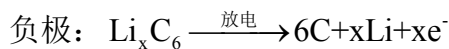
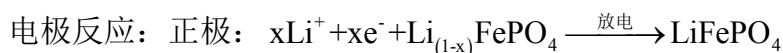
3.1.2 锂离子电池工作原理

锂离子电池是指其中的锂离子嵌入和脱逸电池正负极，并且能够充电和放电的高能电池的电极材料的总称。锂离子电池的工作过程可以实现化学能和电能的相互转换，为了研究的磷酸铁锂电池的储能特性，首先要明确锂离子动力电池的工作原理。

在充电过程中锂离子电池的正、负极电化学反应和总反应分别为：



在电池进行放电过程中，正极和负极的电化学反应和总反应分别为：



从上述的电化学反应方程式可以看出：锂离子电池实际上是一种浓差电池。在电池充电的过程中，锂离子从电池的正极脱出，经过有机电解液和隔膜移动到负极，嵌入到碳负极材料的微孔中，此时负极处于富锂态，正极处于贫锂态，同时电子的补偿电荷从外电路供给到碳负极，负极的微孔嵌入锂离子的量越多，表明锂电池充电容量越大。同理，放电时则相反，嵌在负极锂离子脱出，经过电解液运动回正极材料，此时正极处于富锂态。返回到正极材料的锂离子越多，表明锂电池的放电容量越大，在外电路上表现为电荷的迁移运动从而形成电流。这样在电池正负极

间的锂离子移动和外电路电子的流动产生电流和电压^[32]。

3.2 系统产热机理分析

锂电池的产热主要包括电池组自身的产热量和电池组与环境的产热量两个部分。通过研究确定磷酸铁锂电池组的最佳工作温度范围。

3.2.1 锂电池组产热

锂离子电池进行良好的控制后，充电过程和放电过程无不良反应发生，充放电效率高，充放电库伦效率可达到 100%。锂离子电池在使用过程中的主要的热量的来源为：欧姆热、电化学反应热和极化热，极化热包括欧姆极化、浓差极化、电化极化等，在充放电过程中，可以忽略锂离子电池的电化学反应热^[33]。

Sato 等人通过实验的方法对锂离子电池的生热率进行了测定，锂电池的欧姆热是电池在充放电过程中由于电池内部的欧姆内阻在电流的作用下产生的^[34-35]。热量计算公式为：

$$Q_J = I^2 R_e t \quad (1)$$

式中：

Q_J —焦耳热，J；

I —充放电电流，A；

t —充电时间，s；

R_e —欧姆内阻， Ω 。

极化热计算公式：

$$Q_p = I^2 R_p t \quad (2)$$

式中：

Q_p —焦耳热，J；

I —充放电电流，A；

t —充电时间，s；

R_p —极化内阻， Ω 。

在锂离子电池组实际工作中测量的单体电池的内阻为 1.0m Ω ，锂电池在充放电过程中实际产生的热量 Q 为：

$$Q = Q_J + Q_p = I^2 R t \quad (3)$$

3.2.2 锂电池组与环境热交换

根据传热学原理可知，电池主要在三个方面进行热能的传递：热传导、热对流和热辐射三种方式^[36]。

1) 热传导

热传导是指物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热能的传递。热传导是由于温差引起的，在电池箱内部，电池产生的热量传递给电池箱，发生热传导，热传导服从傅里叶定律：

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (4)$$

式中：

q —热流密度， W/m^2 ；

λ —导热系数， $W/(m \cdot K)$ ；

$\frac{\partial t}{\partial x}$ —温度梯度。

2) 热对流

由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移，冷、热流体相互掺混所导致的热量传递过程即热对流。对流传热主要包括自然对流和强制对流两种情况。对流换热的基本计算式可以表示为：

$$\Phi = hA\Delta t \quad (5)$$

式中：

Φ —对流换热热流量， W ；

h —表面传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

A —面积， m^2 ；

Δt —壁面温度与流体温度的温差， $^{\circ}C$ 。

3) 热辐射

热辐射是指物体通过电磁波传递能量。实际计算中，采用斯忒藩—玻尔兹曼定律的经验修正形式：

$$\Phi = \varepsilon_1 A_1 \sigma_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

式中：

Φ —辐射换热热流量， W ；

ε_1 —物体发射率，其值小于1；

A —辐射表面积, m^2 ;

σ_1 —斯忒藩—玻尔兹曼常量, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$;

T —黑体的热力学温度, K 。

对锂离子电池箱的传热分析中, 由于锂电池组的温度较低, 热辐射产生的影响极小, 因此, 只考虑热对流和热传导的影响, 忽略热辐射。

3.2.3 锂电池组热量计算

1) 电池组自身产热量计算

充电过程中, 锂电池组的平均充电电流为 $30A$, 放电过程中, 锂电池的平均放电电流为 $10A$, 锂电池组的总电阻为 $10m\Omega$ 。在充放电过程中最大电流为 $50A$, 单组电池尺寸为 $650 \times 504 \times 242mm$ 。

单位时间锂电池组充电过程中产生的热量:

$$Q_1 = I^2 R t = 30 \times 30 \times 0.01 \times 3600 = 32.4 kJ$$

单位时间锂电池组放电过程中产生的热量:

$$Q_2 = I^2 R t = 10 \times 10 \times 0.01 \times 3600 = 3.6 kJ$$

单位时间锂离子电池组最大产热量:

$$Q_3 = I^2 R t = 50 \times 50 \times 0.01 \times 3600 = 90 kJ$$

则可计算得到锂电池组最大生热率 $q_b = 78.125 W/m^3$ 。

2) 电池组与环境的热量交换

该型号的锂离子电池, 通过厂家提供的数据, 得到锂离子电池的平均导热系数为 $2.53 W/(m \cdot K)$ 。根据实际实验得到锂电池组温度梯度为 $4^\circ C$ 左右, 假设电池组热传导为稳态过程, 导热系数为常数, 锂电池组与环境交换的热量计算为:

$$\text{电池组在 } x \text{ 方向上的导热系数: } q_x = 2.53 W/(m \cdot K) \times \frac{4}{0.65m} = 15.57 W/m^2$$

$$\text{电池组在 } y \text{ 方向上的导热系数: } q_y = 2.53 W/(m \cdot K) \times \frac{4}{0.504m} = 20.08 W/m^2$$

$$\text{电池组在 } z \text{ 方向上的导热系数: } q_z = 2.53 W/(m \cdot K) \times \frac{4}{0.242m} = 41.82 W/m^2$$

则电池组总导热系数:

$$\Phi_1 = q_x \times 0.504 \times 0.242 \times 4 + q_y \times 0.65 \times 0.242 \times 4 + q_z \times 0.504 \times 0.65 \times 4 = 75.03 \text{ W}$$

在常温下，锂离子电池组与周围的空气发生自然对流换热，由空气的物理参数和电池的基本参数计算锂离子电池和环境交换的热量。

据牛顿冷却公式换热面积 $A=3.54\text{m}^2$ ，换热温差 $\Delta t=(25-22)\text{K}=3\text{K}$ ；代入数值得：

$$\Phi_2 = 2.53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \times 3.54 \text{ m}^2 \times 3 \text{ K} = 26.87 \text{ W}$$

故锂离子电池组通过热对流产生的热量为26.87W。

在不考虑外界环境影响，且电池组置于常温环境下时，理论分析计算表明：锂电池组能够将自身产生的热量及时导出。

3.3 磷酸铁锂电池温度特性分析

磷酸铁锂电池在低温（温度低于 0°C ）状态下，电池的放电能力显著下降。锂离子电池在低温充电，正极脱出锂快，锂的嵌入率在负电极缓慢，会使锂金属电极表面的聚集，导致枝晶的生成，使电池短路^[37]。温度升高时，各种化学反应速度加快，电池的自放电会加大。

将锂电池用于车辆电源系统时，电压判断的准确度直接影响整车对电源系统的控制策略，电池组内温度不一致，使得各电池即使在同一 SOC 下电压表现也不一致，会对电池组的参数出现误判断^[38]。所以，在磷酸铁锂动力电池的使用过程中，应该尽量避免电池长期在低温和高温条件下使用，这样才能保证电池组良好的性能和安全性。

Todd M. Bandhauer 等人对锂电池的热性能的研究中，对锂电池的低温性能进行了研究，低温下，电池的性能显著下降，电池的充电性能大大低于放电性能。在 0.2C 放电时，锂电池放电达到 90%，但是在相同的放电倍率和温度条件下，不能够完成 90% 的充电。同时，在低温下充电，容量容易造成不可逆转的损失^[39]。

田爽对锂电池的研究发现，温度对电池的发热量和放电容量都会有很大影响，电池在低温下工作时，电池内部的电解液的导电率会变小，导致内阻变大，增大电池组的发热量^[40]。

桂长清通过研究各种型号的不同温度下锂离子电池的特性，发现环境温度对锂离子电池的影响很大。主要与电池的电极材料、结构和电解液有关^[41]。

为了发挥电池的最佳性能并尽量延长电池寿命，必须让电池工作在适当的温度范围内。超出了这个范围，不但电池性能下降，电池寿命缩短，严重的还会造成安

全事故。充满电以后的磷酸铁锂电池，分别放在不同的温度下（ -5°C ， 5°C ， 15°C ， 25°C ， 35°C ）进行放电 5 个小时，锂离子电池组的放电量与环境温度的关系如图 18 所示：

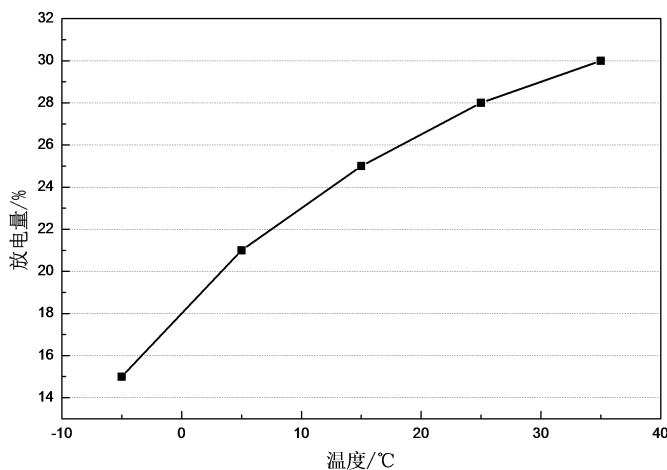


图 18 锂电池放电量与温度关系

Fig.18 Relationship between lithium battery discharging capacity and temperature

由图 18 可知，在研究的温度范围内，随着温度的升高电池的放电量呈增大趋势，在低温下，由于电池组内部化学反应进行缓慢，电池的放电量很小，仅有 15%，而在常温下，电池的放电量增大，温度再升高的过程中，放电量仍不断增大，但变化趋势缓慢。

充电时，将型号为 GBS-LFMP100Ah 的锂电池置于不同的环境温度下（ -5°C ， 5°C ， 15°C ， 25°C ， 35°C ），充电 5 小时，充电量与温度的关系如图 19 所示：

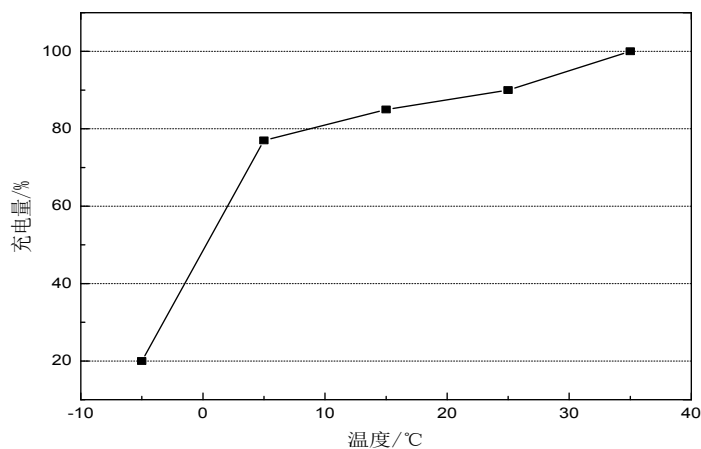


图 19 锂电池充电量与温度关系

Fig.19 Relationship between lithium battery charging capacity and temperature

由图 19 可知，在研究的温度范围内，低温条件下充电同样很难，在-5℃时，充电量为 20%，而在常温条件下，电池的充电速率很快，随着温度的升高，电池的充电量不断增加，在 35℃时能够达到 100%。

由图 18 和图 19 可以看出，研究的 GBS-LFMP100Ah 磷酸铁锂电池的充放电特性受温度的影响很大，电池组在低温条件下进行充放电时性能显著下降，在其他温度下充放电性能相对稳定，需要对电池进行热管理来改善电池组的使用性能。

电池组在充放电过程中，不同环境温度下电池组的内部温度变化如图 20 和 21 所示。

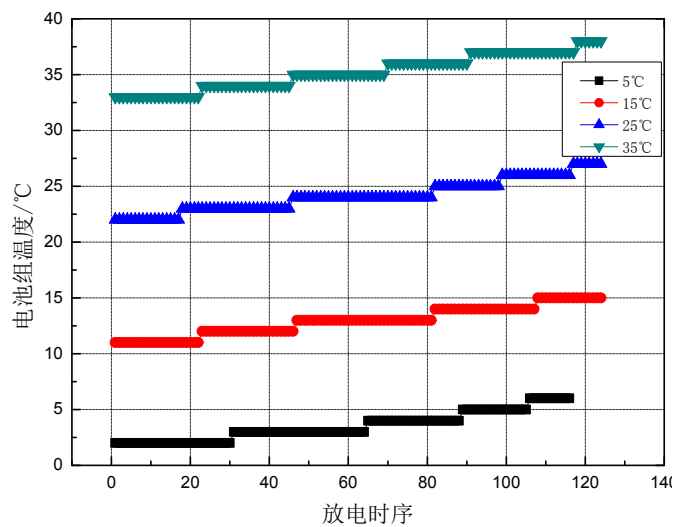


图 20 放电时不同环境温度下电池组温度的变化

Fig.20 Changes of battery temperature in different ambient temperatures during discharging

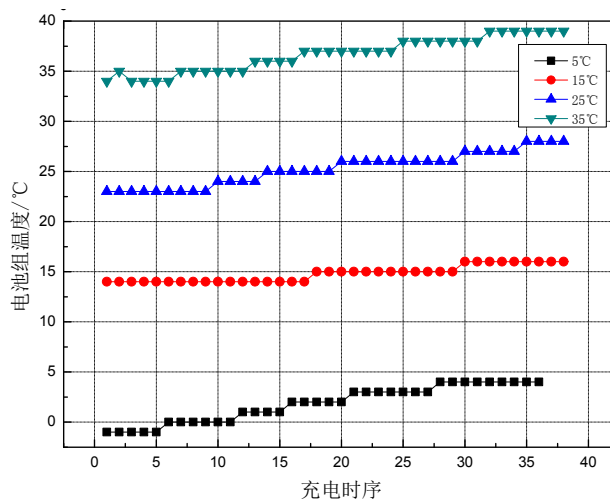


图 21 充电时不同环境温度下电池组温度的变化

Fig.21 Changes of battery temperature in different ambient temperatures during charging

从图 20 中可以看出, 在放电过程中, 电池组内部温度随着放电过程的进行不断升高, 最终会达到或超过环境温度, 内部温度的最大变化值为 5°C , 最小变化值为 4°C 。在放电过程中, 由于电池组内部化学反应的不断进行以及环境因素的影响导致电池组温度升高。

从图 21 中可以看出, 在充电的过程中, 电池组内部温度的最大变化值为 5°C , 最小变化值为 2°C 。

根据锂电池产热机理的理论分析, 在不考虑外界环境影响时, 电池组能够将自身的产热量及时导出, 但是随着环境温度的升高和季节的变化, 白天太阳辐射量很高, 都会造成电池组温度的升高。

在充放电过程中, 随着环境温度的升高, 电池组内部的温度也会发生变化, 随着充放电过程的进行, 电池组内部的温度会不断升高, 几乎达到或超过环境温度。而从图 18 和 19 中分析得知锂电池组在低温下充放电都十分缓慢, 在其他温度条件下变化相对稳定, 结合表 1 中锂电池组的具体参数以及第二章中锂电池充放电特性的分析, 确定锂电池组工作的最佳温度范围为 $20\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。

由于锂离子电池的性能与温度密切相关, 因此, 既要给电池组提供保温措施, 又要提供冷却系统, 保证锂电池组的稳定工作。

3.4 小结

主要运用理论分析与实验相结合的方法, 对 GBS-LFMP100AH 型号磷酸铁锂电池组的产热机理和温度特性进行分析研究。结果表明, 由于外界环境的存在, 低温和高温环境对电池组的影响很大, 温度对化学反应的影响是导致性能下降基本原因, 电量, 电池容量, 电压等都会受到影响。电池组的产热量主要包括电池组本身产热和与环境交换的热量。在实际运行中, 由于环境温度和太阳辐射的影响, 电池组的低温和高温性能也会随之下降, 整个电池组的最佳工作温度区间在 $20\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。因此, 必须对电池组进行热管理, 保证整个电池组的最佳性能和寿命。

第4章 锂电池热管理系统研究

虽然电池组本身产生的热量很少，但根据国际旅游天气数据显示，唐山地区夏季环境温度很高，平均气温 25.5℃，最高气温 40℃ 以上，同时，太阳辐射量也很强烈，导致锂离子电池组的温度升高。冬季平均气温 -7℃，最低气温可达 -26℃，影响电池组的使用性能和寿命。因此，对于大功率锂离子动力电池的放电和低温与高温条件下使用，电池的热管理是非常必要的。

4.1 相变储能系统性能研究

PCM 的热管理系统的作用是吸收和储存电池热量，降低电池堆的温度。选择 PCM 材料的要求包括：PCM 的相变潜热以及 PCM 的相变温度。这两个因素决定着吸收和储存热量的能力以及整个理系统在储热过程中的温度。

4.1.1 PCM 工作原理

PCM 在使用的过程中在自身的相变温度内可以进行物理状态的改变，比如发生固液相变的过程。在进行加热时，固态转变成液态，产生相变，而在熔化时，相变材料吸收并储存大量的潜热；进行冷却过程的时候，在相变温度的范围内，热量被释放到周围的环境中，完成从液体到固体的反变换^[42]。所谓的相变潜热就是，在这两种相变过程中，被储存或释放出来的能量。虽然 PCM 发生了物理状态的变化，但是材料自身的温度在相变完成前基本不会发生变化，并且能够吸收或释放很大的潜热。

在物理学中，升华是指固体到气体的转变，蒸发是指从液体到气体的变化，而凝结则是从气体变为液体，熔化或融化是指从固体变为液体，固化则是指液体变为固体。在液相中的分子比在固相中的分子的自由运动大得多，具有较高的能量。相比而言，气相中的分子的自由度最高，能量也很高。这三种相变形式所产生的相变潜热是呈现递减趋势的，而升华的相变潜热值则是熔化和蒸发热的和。

固体到气体和液体到气这两种相变，虽然潜热很高，但是由于在相变发生过程中，气体占有很大的体积，因此，在实际中应用较少。固液相变潜热比汽化潜热小得多，但比显热要大很多。但更重要的是，在固液相变过程中，体积的变化特别小，因此，固液相变储能更加合理有效。

固态相变，材料是从结晶状态到另一个状态的转变，同时也释放相变热。不过

这种相变潜热与固—液相变潜热比，一般情况下很小。但是固态相变的过程中，由于体积变化很小，导致很小的过冷，不再需要额外的容器，因此，也成为一种应用价值大并且可行的相变储热方式。

目前为止，固—液在相变相变储能方式中的实用价值的最大^[43]。共熔和转熔相变和溶解发生在该相变的熔化过程中，PCM 在熔化温度范围的熔化热也可以进行合理的利用。

4.1.2 PCM 的选择

研究的锂离子动力电池的最佳工作温度区间为 20~45℃，通常情况下环境温度不高于 35℃，所以，PCM 相变温度的在 35~45℃ 的范围内。如果选择的温度过低，会使 PCM 会从吸收周围环境中的热量而发生相变，无法进行降温，而选择的温度过高，对锂离子电池的性能和使用寿命都会产生影响。

将 PCM 用于锂电池的热管理系统具有很多应用优势：

- 1) 具有很高的融化潜热，在发生相变的过程中能够储存大量能量；
- 2) 在相变的过程中，具有良好的可逆变化性；
- 3) 所选用的材料的相变温度在电池的安全使用温度范围内；
- 4) 热导率大，密度大，比热容大；
- 5) 无毒且材料的性质稳定，在整个过程中体积的变化很小。

常见相变材料的基本参数见表 2^[7]。

表 2 常见相变材料的比热容及相变潜热

| 材料名称 | 相变温度/℃ | 比热容 J/(g·K) | 相变潜热 J/g |
|--|--------|-------------|----------|
| Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O | 36.1 | 1.34 | 146.95 |
| Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O | 48.5 | 1.46 | 208.8 |
| Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O | 35 | 1.55 | 278.84 |
| Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O | 32.4 | 1.76 | 254 |
| PEG1000(聚乙二醇) | 33-38 | — | — |
| 石蜡 | 40-44 | 1.77 | 195 |
| 月桂酸-肉豆蔻酸 (66: 34) | 34.2 | — | 166.8 |
| 月桂酸—棕榈酸 (69: 31) | 35.2 | — | 166.3 |

通过研究表明,水合盐虽然相变潜热大,但密度高、多次循环后易失效,而脂肪酸的相变温度不适宜,并且其对设备材质的要求比较高,石蜡虽然导热系数比较低,但相变温度合适,相变潜热大,价廉耐用。

与水合盐相比,石蜡具有更好的溶解热。石蜡不会出现过冷现象,结晶速率也比较快,物理化学性质稳定,无毒。虽然石蜡属于易燃物质,但由于蒸汽压力过低,所以发生燃烧现象的可能性很低,最终选择石蜡作为相变储能材料。

4.1.3 PCM 特性

石蜡被广泛用作为 PCM,在使用中具有很多优势,石蜡的相变潜热高,不会产生过冷现象,并且在熔化的过程中具有很低的蒸汽压力、难以发生化学反应且稳定性良好、价格便宜、能够自成核、不会产生相分离和腐蚀性等。但是它也有一些重要的缺点,如低导热率和低密度等。为了能够将石蜡的导热系数提高,并且强化石蜡的导热,可以将金属粉末、石墨、金属网等物质添加在石蜡中。

沈云飞等人对 PCM 在电动汽车用锂电池的热管理进行了研究,对国内外对相变材料的应用研究进展进行了总结^[44]。其中 Andrew Mills 等人研究的 PCM/发泡石墨复合材料有很好的应用效果^[45]。结合热管理系统要控制达到的温度范围,所选用 PCM 相变温度范围在 35~45℃。PCM/发泡石墨复合材料的热力学性质见表 3。

表 3 PCM/发泡石墨复合材料的热力学性质

Table3 Thermodynamic property of PCM/carbob foam composite material

| 导热系数 (W/(m·K)) | 相变潜热(kJ/kg) | 比热容 (kJ/(kg·K)) | 复合材料密度(kg/m ³) | 相变温度(℃) |
|-------------------|-------------|--------------------|----------------------------|---------|
| 16.6 | 185 | 1.98 | 789 | 42~45 |

4.1.4 PCM 用量与装置结构

PCM 散热系统对锂离子动力电池组进行热管理的工作原理是,当锂电池组的内部温度过高时,电池组放出的热量被 PCM 吸收,相变材料发生相变,使得整个锂动力电池组的温度下降^[46]。

石蜡的使用量非常重要,如果使用不当则会留下安全隐患等不利因素,例如,石蜡的用量太少,当石蜡吸收热量以后会全部融化,电池产生的热量将会过剩,并且不能排放到环境中,导致危险程度加剧;用量过多,则会增加电池的质量及制作

成本。因此，石蜡的用量必须适宜。假设被相变材料吸收全部的电池组产生的热量，整个电池组需要的相变材料的质量的计算公式为：

$$Q_{\text{dis}} = M_{\text{pcm}} C_p (T_m - T_i) + M_{\text{pcm}} H \quad (7)$$

公式变形可得：

$$M_{\text{pcm}} = \frac{Q_{\text{dis}}}{C_p (T_m - T_i) + H} \quad (8)$$

式中：

Q_{dis} — 电池放出的热量，J；

M_{pcm} — 需要的 PCM 的质量，kg；

H — PCM 的相变潜热，J/kg；

C_p — PCM 的比热容， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

T_m — PCM 熔点温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_i — PCM 初始温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

此外，PCM 熔化后的体积会变大，因此要预留 10% 的体积。

利用上式可以计算出一个能使得电池保持在稳定工作温度范围内所需 PCM 的质量。

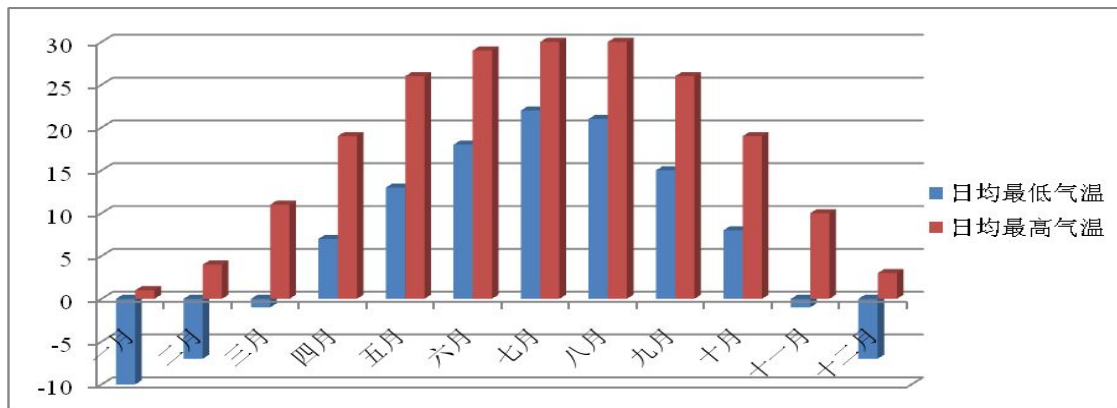


图 22 唐山全年温度曲线图

Fig.22 Temperature curves of all the year round in Tangshan

图 22 为来自国际旅游天气的唐山全年日均最高与最低气温分布图，根据温度的分布趋势可以得到环境温度的变化情况，最终计算所需的 PCM 的质量，表 4 和表 5 为夏季日均气温和冬季日均气温。

由图 22 及表 5 和表 6 可知：全市多年平均气温 10.6°C ，1 月份气温最低，月

平均气温 $-5\sim-8^{\circ}\text{C}$ ，最低气温可达 -26°C ；七月份的气温最高，达到平均值 $25\sim 36^{\circ}\text{C}$ ，最高温度为 40°C 。

- 1) 夏季日平均最高气温 T_{imax} 可达 30°C ；日平均最低气温 T_{imin} 也在 13°C 。
- 2) 冬季日平均最高气温 T_{imax} 只有 10°C ；日平均最低气温 T_{imin} 在零下 10 度。

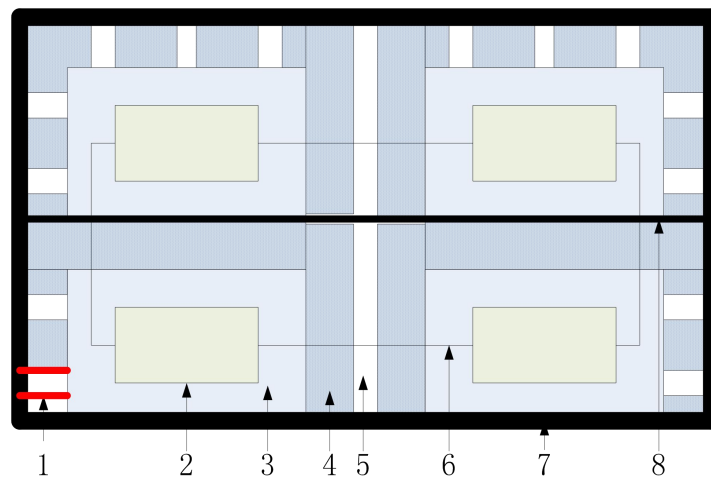
表 4 夏季日均气温

| Table4 Daily average temperature in summer | | | | |
|--|-----|----|----|----|
| 夏季每月天气 | 平均值 | 五月 | 六月 | 七月 |
| 日均最高气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 28 | 26 | 29 | 30 |
| 日均最低气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 18 | 13 | 18 | 22 |

表 5 冬季日均气温

| Table5 Daily average temperature in winter | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|
| 冬季每月天气 | 平均值 | 十一月 | 十二月 | 一月 |
| 日均最高气温/ $^{\circ}\text{C}$ | 5 | 10 | 3 | 1 |
| 日均最低气温/ $^{\circ}\text{C}$ | -6 | -1 | -7 | -10 |

采用 PCM 与风冷结合的热管理系统，锂电池组在电池箱中的布置结构如图 23 所示，系统正面图和俯视图如图 24 所示。



- 1-负载连接线；2-电池连接线板；3-电池组；4-相变材料；5-空气流道；6-电池组连接线；
- 7-电池箱外壳；8-隔板

图 23 PCM 热管理系统示意图

Fig.23 Schematic diagram of PCM thermal management system

系统主要包括锂离子电池组、相变材料散热箱、连接线、隔板等。相变材料散热箱内置有空气通道，每组电池箱被相变材料包裹，通过空气通道能够加快电池组散热。隔板起到支撑作用，支撑两组电池组。

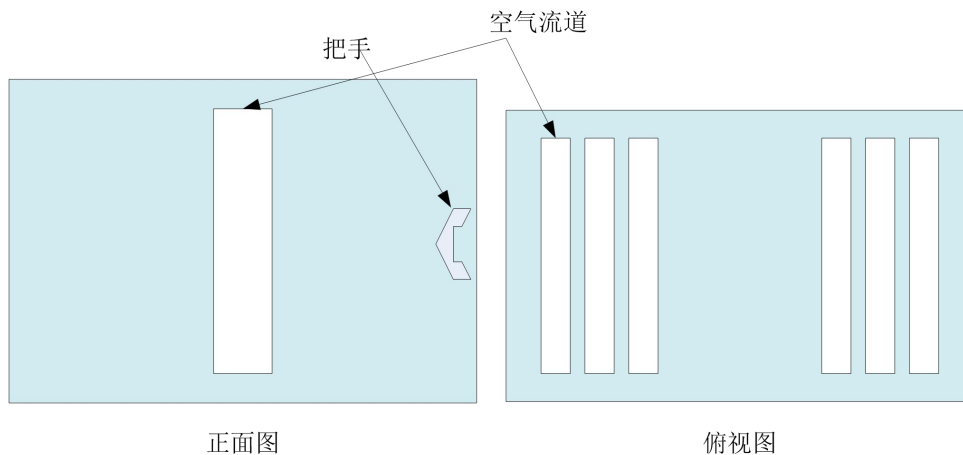


图 24 锂离子电池箱正面和俯视图

Fig.24 Front and top view of lithium battery box

研究的锂动力电池组的最佳工作温在20~45℃的范围内，相变材料的相变温度为42~45℃。由第三章的计算可知锂离子电池组最大产热量为90kJ。

假设使用相变材料前后换热面积相同，PCM 的初始温度为环境温度，取夏季环境平均温度 25℃，由能量守恒公式（8）得：

$$M_{\text{pcm}} = \frac{90000}{1980(42-25)+185000} = 0.41\text{kg}$$

故，所需 PCM 的质量为 0.41kg。

由于 PCM 熔化后的体积会变大，要预留 10%的体积，最终箱体的尺寸为 $2.068 \times 1.204 \times 1.105\text{m}$ 。

4.1.5 PCM 系统冷却性能研究

电池组热管理系统的模拟可以预测电池内部和外部的温度，以便提高设计过程的效率，减少产品的开发时间，根据模拟结果可以帮助改善热管理系统的设计。

采用 Gambit 软件进行模型的建立并生成网格，再将模型导入 Fluent 软件中。其中，前处理的目的是将具体问题转化为一个可接受的形式解。而 Fluent 软件是目前进行 CFD 模拟最常用的软件，模拟范围广，可以对不可压缩到高度可压缩范

围内的复杂的流体流动进行模拟。对工程问题的流动，传热，化学反应等问题，可以用来进行分析。Fluent 模拟应用多种求解过程的方法和多重网格加速收敛技术，使最终的收敛速度及其求解精度都能够用最好的方式表现出来。锂电池组 PCM 散热系统网格模型如图 25 所示，采用结构化网格中的 Map 网格，网格数 29440。

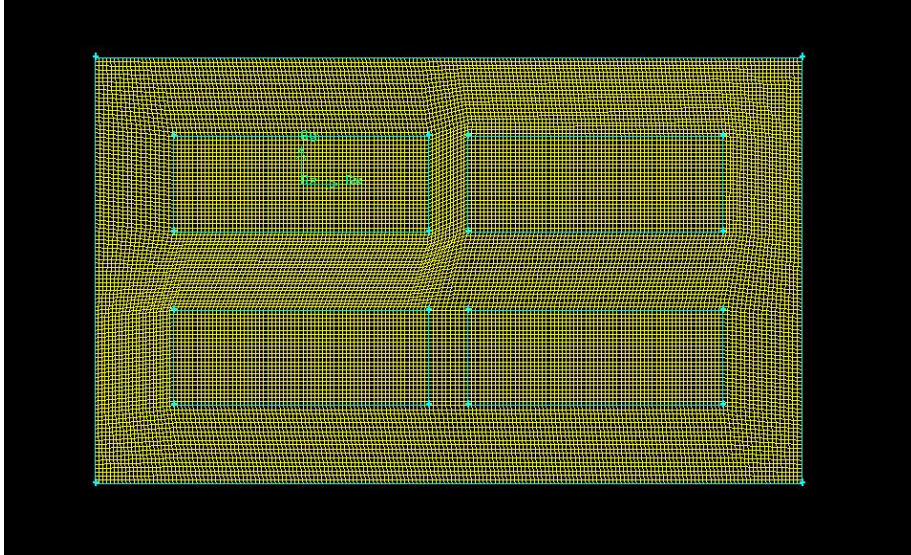


图 25 PCM 散热系统网格模型

Fig.25 Grid model of PCM cooling system

根据几何模型的特征，将整个相变材料散热系统简化为二维模型进行模拟，为了计算简便，在保证最终的结果在误差的范围内将电池组的模型进行简化：1、假设电池组内产热恒定且均匀；2、不考虑空气间隔的影响；3、不考虑电池组与周围空气的换热。

电池组的物性参数如表 6 所示：

表 6 电池组物性参数

Table6 Physical parameters of battery pack

| 名称 | 密度 kg/m ³ | 比热 J/(kg·K) | 导热系数 W/(m·K) |
|------|----------------------|-------------|--------------|
| 锂电池组 | 1461.0 | 932.149 | 2.53 |

设置的边界条件包括：

- 1) 壁面边界：在锂电池箱外壳与外部环境换热过程中，壁面设置为无移动、无转动界面。锂电池箱外壳为绝热，热流量设置为零。
- 2) 内热源边界：电池组的的发热量可通过第三章的计算得到。

3) 流固耦合边界: 电池组的表面为双壁面边界, 在 Fluent 中将流体和固体的交界面设置为 **coupled**, 在进行换热过程的模拟。

简化模型的仿真结果如图 26 所示, 在前处理 Gambit 软件中进行电池组的相变材料散热系统模型的建立, 将模型导入 Fluent 中进行模拟计算。由于采用结构化网格, 在经过 200 步的迭代之后, 各项参数的残差值就达到了收敛。

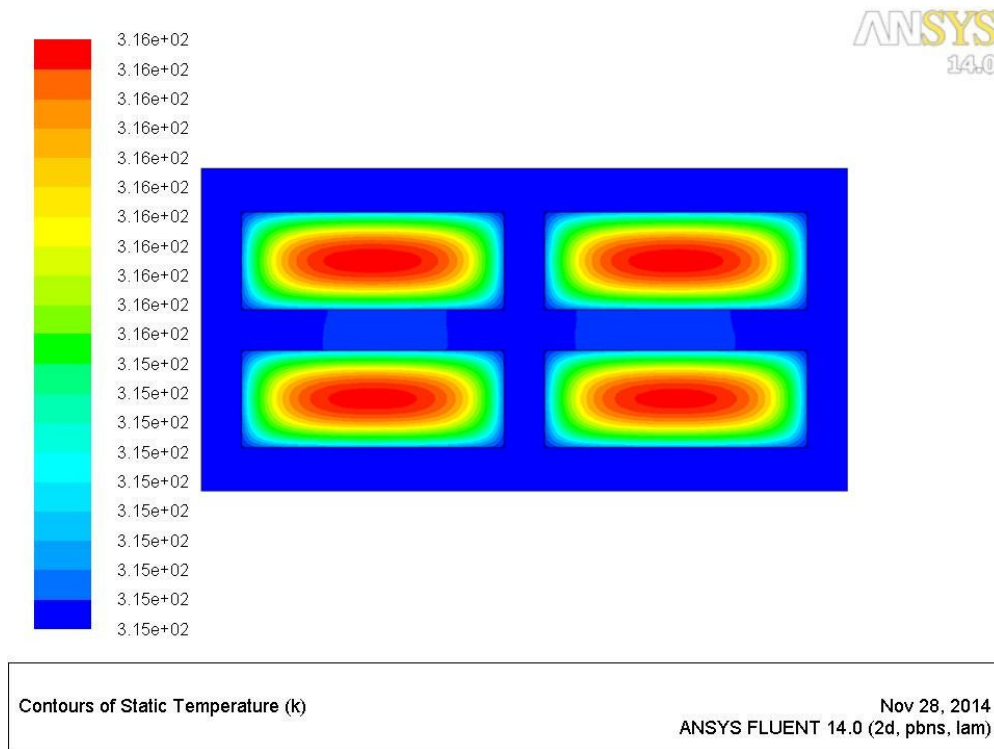


图 26 相变材料对锂电池组散热模拟结果

Fig.26 Results of PCM cooling simulation for lithium battery

从图中能够看出, 使用 PCM 散热系统对电池组进行热管理后, 锂离子电池组的温度在 $42\sim 43^{\circ}\text{C}$ 的范围内变化, 能够保证电池整体的温度在 PCM 的熔点附近变化, 将电池组热量通过 PCM 储存起来, 使得电池组内部温度变化稳定, 并且电池组在最佳工作温度范围内运行。

通过对 PCM 散热系统的研究, 发现系统能够保证电池组的温度在相变温度范围内变化, 锂电池组内部温度变化稳定, 但是 PCM 是一种吸热或储热的材料, 不能将储存的热量散发到周围空气中去。若将该系统应用于车辆热管理中, 在运行的过程中为了将电池产生的热量散发出去, PCM 散热系统需要附加其他散热系统应用, 因此, 该系统适合固定环境或小型电池组的应用。

4.2 热管散热系统性能研究

根据不同的原理和功能，有许多种类的热管。目前所使用的热管，一般工作范围在零下 20~150℃。热管的工作介质一般采用水、丙酮、氨等，材质一般采用导热性良好的铜或铝；结构形式大多为圆形普通热管和平板热管。

4.2.1 热管工作原理

热管的基本工作原理图如图 27 所示，主要由真空管壳、管芯构件和液体介质组成。热管真空并充少量液体介质，介质的量足以渗透管的核心部件是合适的。管内空气的压力是由汽液平衡确定的。

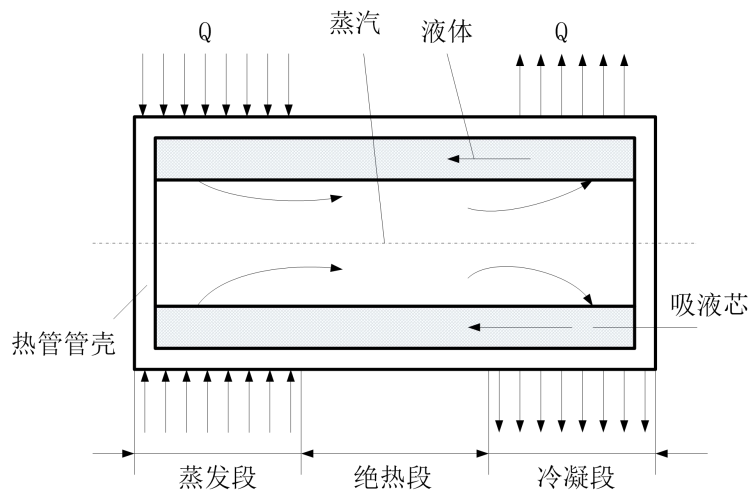


图 27 热管工作原理示意图

Fig.27 Working principle diagram of heat pipe

热管主要由三个部分组成分别为蒸发段、绝热段和冷凝段。蒸发段主要是将热源的热量从管外传递到热管内部的液体工质，使热量散发。冷凝段具有使气态制冷剂冷凝，将热量通过壁和管的散热器外面的作用。绝热段也被称为传输部分，其一方面的作用，作为流体的传输通道，另一方面是用来分隔的冷源、热源。在绝热的阶段内，热管内部的工质和外界不会进行热量的传递。热管工作时主要通过这三个阶段的循环来完成热量的传输。

热管工作是被动的，只能由热量高进行驱动完成。这种特性能够提高热管使用的可靠性，而且还可以延长热管的使用寿命。

由于蒸发和冷凝过程在几乎相同的大气压力下进行，管内温度的差异是非常小的。如果把热管和同体积的金属棒的两端置于同样温差之下，热管的导热速度比金

属棒要快上千倍。由于这一特性，热管通常被称为接近等温的热传导装置。

4.2.2 热管散热系统结构设计

热管散热系统用于电动汽车锂电池组散热的主要传热过程如图 28 所示。

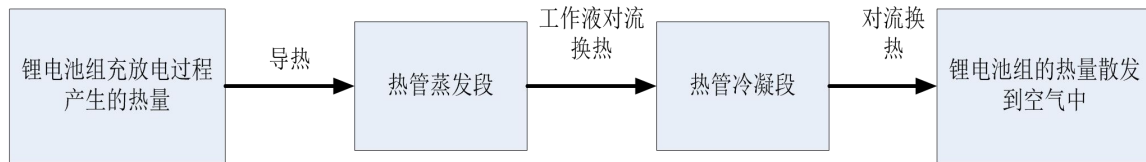


图 28 热管散热系统传热过程

Fig.28 Heat transfer process of heat pipe cooling system

该热管散热系统中热管蒸发段与锂离子电池组直接接触，可以把锂离子电池在充放电过程中产生的热量传递到热管的蒸发段，热管内的工作介质被加热以后吸收蒸发潜热，工作液经过热管的冷凝段，通过冷却介质将热量散发到空气中。

4.2.3 热管各部分构件选择

1) 热管管壳材料的选择

外壳材料应首先满足和工作液兼容性要求，此外，壳体材料应满足在工作温度下的强度和刚度的要求。热管的管壳是主要用于承受压力，这就要求在制造的过程中满足高导热率、耐压、耐热等的制造标准。选择热管的材料时，要保证热管的管壳在以后相当长时间的使用中不会产生腐蚀，管壳与热管内部的工作介质不能发生化学反应，也不能产生任何气体物质。

壳体有着多种多样的材料，最常见的是不锈钢、铜、铝、镍等。热管的管壳的主要是将热管工作的部分进行与外界隔离，在蒸发段和冷凝段将热量进行接收和导出，同时还要有一定的抗压性能。

在管壳的选择时，铝合金的应用十分广泛，研究中管壳材料选择铝，选用的壳体壁厚为 2mm。

2) 工作液体的选择

热管的工作液体的选择要满足以下要求：高汽化潜热和高的导热系数，适宜的沸点及其饱和压力，低粘度和优良的热稳定性能。工作介质不可以对毛细结构和管壁产生溶解，不然被溶解的物质将不断积累，最终在蒸发段破坏毛细作用。目前常用热管的参数性能见表 7^[47]。

表7 常用热管的具体参数性能

Table7 Common specific performance parameters of heat pipes

| 分类 | 工作介质 | 工作温度/°C | 相容管体材料 |
|------|----------------|-----------|--------------|
| 低温热管 | 氨 | -60-100 | 铝、不锈钢、低碳钢 |
| | 氟利昂 113(F-113) | -10-100 | 铜、铝、不锈钢、铜 |
| 常温热管 | 己烷、丙酮 | 0-100 | 铝、黄铜、不锈钢 |
| | 甲醇、乙醇 | 10-130 | 铜、不锈钢、碳钢 |
| | 甲苯 | 0-290 | 不锈钢、低碳钢、低合金钢 |
| | 水 | 20-250 | 铜、碳钢（内壁化学处理） |
| 中温热管 | 苯 | 147-350 | 铝、不锈钢、碳钢 |
| | 导热姆 | 150-395 | 铜、不锈钢、碳钢 |
| | 汞 | 250-650 | 奥氏体不锈钢 |
| | 钾 | 400-1000 | 不锈钢 |
| 高温热管 | 铯 | 400-1100 | 钛、铌 |
| | 钠 | 500-1200 | 不锈钢、因康镍合金 |
| | 锂 | 1000-1800 | 钨、钽、钼、铌 |
| | 银 | 1800-2300 | 钨 |

由于研究的磷酸铁锂电池的工作的最佳温度范围在 20~45°C，可以从常温热管工质中进行选择，结合已选用的管壳材料，最终选定丙酮作为热管工作介质。在不同压力下的丙酮物性参数见表 8。

表8 不同压力下丙酮的物性参数

Table8 Physical parameters of the acetone under different pressure

| 表压 MPa | 液态密度 kg/m ³ | 比热容 kJ/(kg·K) | 气体密度 kg/m ³ | 蒸发热 kJ/kg | 粘度 MPa·s | 沸点 °C |
|--------|------------------------|---------------|------------------------|-----------|----------|-------|
| 常压 | 761.18 | 2.244 | 2.1489 | 513.12 | 0.25 | 56.1 |
| -0.02 | 765.05 | 2.232 | 1.7540 | 518.99 | 0.26 | 49.7 |
| -0.04 | 769.79 | 2.218 | 1.3485 | 526.03 | 0.27 | 41.85 |
| -0.06 | 775.92 | 2.201 | 0.9294 | 534092 | 0.28 | 31.5 |

表9 多孔泡沫金属吸液芯的表征参数

Table9 Characterization parameters of porous foam metal liquid core

| 表征参数 | 比表面积/(m ⁻¹) | 孔隙率/% | 渗透率/m ² | 孔径/μm | 密度/(kg/m ³) | 有效导热系数/(W/(m·K)) |
|--------|-------------------------|-------|--------------------|-----------|-------------------------|------------------|
| 多孔泡沫金属 | >20000 | 40~98 | 1.30E-11~1.37e-9 | 100~10000 | 445~4450 | 0.59~29.57 |

3) 吸液芯的选择

在热管本身的稳定运行不产生或吸收热量，只是使热量通过热管传递到冷凝段并且释放到周围空气中^[48]。选择的多孔泡沫金属吸液芯，具体参数见表 9^[49]。

4.2.4 热管散热系统模拟

1) 几何模型

电池组的尺寸为 $650 \times 504 \times 242\text{mm}$ ，共四组相同的锂电池组，电池组间距为 100mm ，电池组上下两层放置，两层之间间距为 130mm ，通过隔板支撑，热管置于电池组的上中下三个位置，每一层均匀布置，所用热管的外径为 50mm ，管长 1468mm 。环境温度设置为 40°C ，热管的布置示意图如图 29 所示。

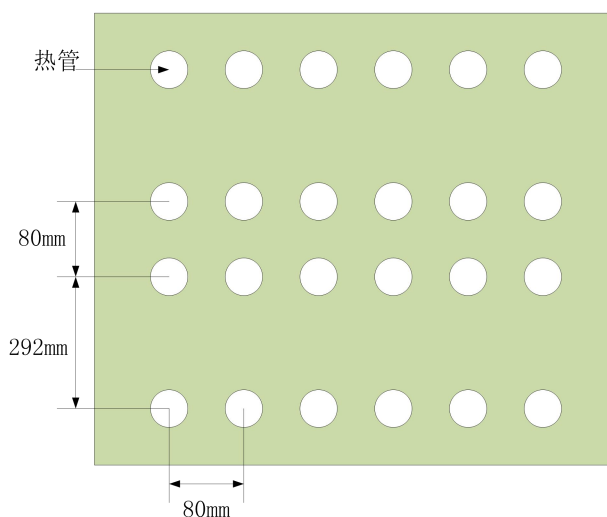


图 29 热管布置示意图

Fig.29 Arrangement schematic diagram of heat pipes

整个电池组产生的热量通过热管散发至环境中，使电池组温度维持在最佳工作温度区间。

2) 基本假设

模拟的三维、非稳态导热的换热问题中，由于电池组和热管均是对称布置，将电池组的模型进行简化：1、电池箱内的温差变化较小，不考虑辐射换热的影响；2、假设电池组内产热恒定且均匀；3、不考虑隔板、连接线等内部附属构件的影响；4、不考虑电池组与周围空气的换热。

整个系统的网格模型如图 30 所示，电池组网格数为 78000，单个热管网格数为 2688，空气流场的网格数为 286410。

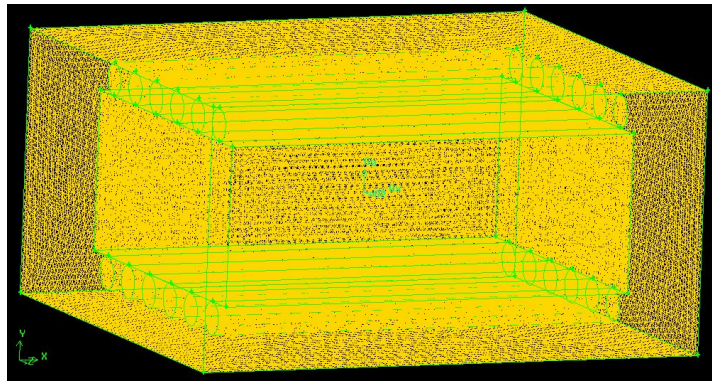


图 30 电池组网格模型

Fig.30 Grid model of battery pack

3) 边界条件设置

入口边界：热管散热系统周围设置空气场，入口边界为速度边界。空气温度设置 313K。出口边界：出口边界为压力出口，出口压力为背压。壁面边界：在锂电池箱与热管换热过程中，由于采用铝合金外壳，设置为具体材料的壁面。内热源边界：电池组的发热量同样可通过第三章的计算得到。流固耦合边界：电池组的表面为双壁面边界，在 Fluent 中将流体和固体的交界面设置为 *coupled*，在进行换热过程的模拟。

4) 求解器的选择

在 Gambit 中建立电池组的热管散热系统模型后，将模型导入 Fluent 软件中进行计算，动量方程中的速度和压力的耦合算法均采用 SIMPLE，压力、能量和动量的离散方法均选用二阶迎风格式^[50]。

热管散热模拟结果图如图 31 所示。

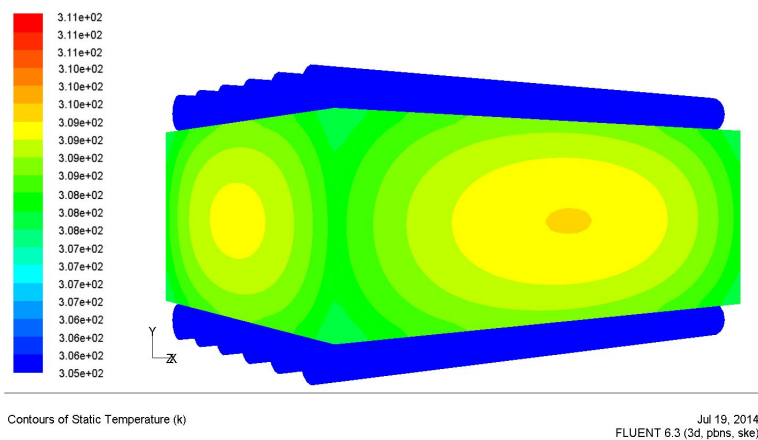


图 31 热管散热模拟结果

Fig.31 Results of heat pipe cooling simulation

从图 31 中可以看出, 通过热管散热, 整个电池组的最低温度为 35°C , 最高温度只有 37°C , 温差为 2°C , 保证了整个电池组的稳定工作, 电池组的温度变化稳定, 而且整体的一致性良好。

热管的传热效率很高, 同样可以保持电池组内部温度的均匀性。与相变材料的方式一样, 热管散热要增加其他的冷却系统。热管散热系统可以应用于电动汽车锂电池热管理中, 具有良好的应用效果。目前, 结合电动汽车车辆的实际运营状况, 热管理模式正在从单一的热量管理向多重模式发展, 将相变材料、热管及风冷或液冷相结合, 产生了很好的效果。

4.3 小型热泵系统分析

对于锂离子动力电池组来说, 在高温下, 电池会有大量的热量产生, 会对电池的结构和性能产生严重的影响, 因此必须考虑散热, 并配备冷却系统。而在低温条件下工作时, 随着温度的降低, 使得电池组的内阻增大, 降低电池组内部的电化学反应速率, 电池的极化内阻快速增大, 使电池组整体的放电容量不断下降, 最终对电池功率和输出的能量产生影响, 导致电池组整体的性能下降, 选用小型热泵对锂电池进行散热和保温, 系统工质选用目前常用的 R134a。

由于磷酸铁锂电池组的最佳工作温度范围在 $20\sim 45^{\circ}\text{C}$, 因此小型热泵需要在电池温度小于 20°C 的时候对锂电池组进行制热, 在电池组温度高于 45°C 的时候对锂电池组进行制冷, 以保证磷酸铁锂电池工作的最佳性能。

4.3.1 小型热泵工作原理

空气源热泵系统原理图如下图 32 所示。

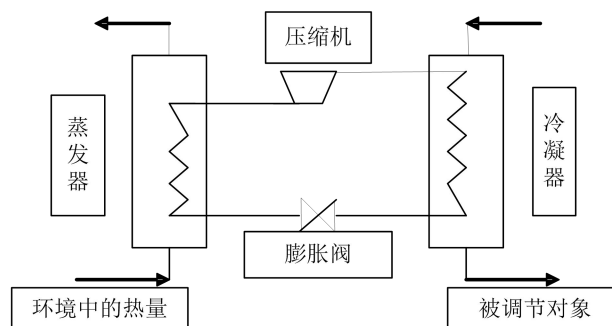


图 32 热泵工作原理图

Fig.32 Heat pump working principle diagram

系统主要构成部件是压缩机、冷凝器、节流器、蒸发器等装置。热泵的冷媒在通过压缩机在整个系统的内部循环流动。在压缩机中进行升温升压过程，然后进入冷凝器将高温高压的气体释放出来，在此过程中工质被冷却并最终转化为液体状态，然后进入蒸发器，在蒸发器中进行吸热而转化为气体状态存在，蒸发器吸收周围空气的热量，并将热量传递至冷媒。如此周而复始的进行完成整个能量转换的过程。

4.3.2 热泵系统理论循环

热泵的循环过程和制冷循环的热力学原理基本相同，但热泵装置与制冷装置两者的工作温度范围以及最终要达到的效果并不不同。根据工程热力学书中的温熵图 (a) 和压焓图 (b) 可以分析在制冷剂在理论状态下各点的热力学状态^[51]。如图 33 所示：

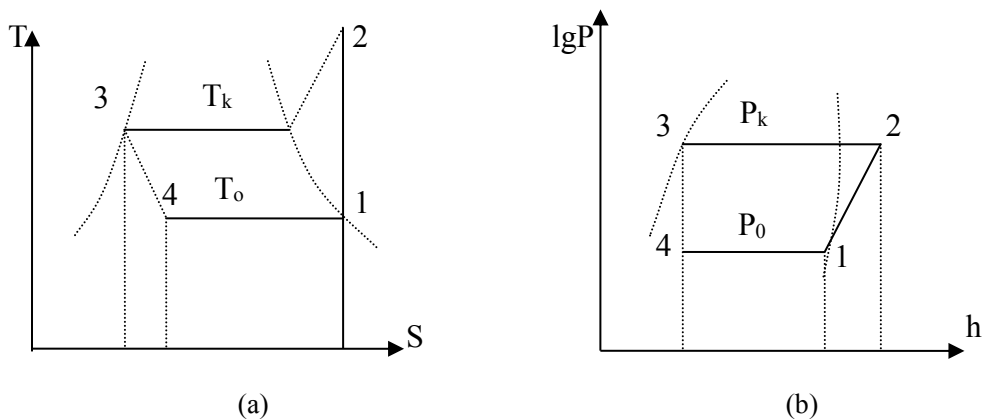


图 33 热泵系统制冷理论循环图

Fig.33 Theoretical cycle diagram of heat pump system in refrigeration process

制冷理论循环的热力学计算公式为：

1) 单位工质吸热量：

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (9)$$

2) 单位工质放出热能：

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (10)$$

3) 单位理论压缩功：

$$w_0 = h_2 - h_1 \quad (11)$$

4) 制冷性能系数：

$$\text{COP} = \frac{q_e}{w_0} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (12)$$

5) 制热性能系数:

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_0} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (13)$$

式中:

h_1 —状态 1 点的制冷剂焓值, kJ/kg;

h_2 —状态 2 点的制冷剂焓值, kJ/kg;

h_3 —状态 3 点的制冷剂焓值, kJ/kg;

h_4 —状态 4 点的制冷剂焓值, kJ/kg。

一般情况下实际循环装置的用能水平是由热力学第一定律的效率进行表示的。事实上,所有的实际测量的第一定律效率是有条件的,如在热源温度和压力的规定等。大多数相同类别的热力循环装置的第一定律效率的测定都是在相同工况或是相同热源条件下进行的,通过这种方法得到的测量结果的高低也就是装置的用能水平的高低。

4.3.3 热泵系统的设计原理

该热泵机组主要包括锂电池箱和小型空气源热泵系统。针对锂电池在低温和高温条件下,电池的各项性能下降的缺陷,用小型热泵系统使应用过程中不能直接利用的热能(冷能)转化成可直接利用的热能(冷能),同时消耗少量的电能。冬季用热泵提供约 3~4 倍于电能的热量,对锂电池箱进行保温,在夏季用热泵提供约 2~3 倍于电能的冷量,对锂电池箱散热,保证锂电池工作在最佳工作温度 20~45℃。系统夏季和冬季的工作原理图分布如图 34 和 35 所示。

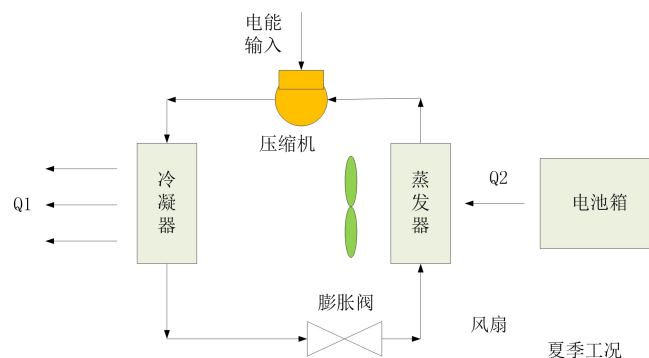


图 34 热泵机组夏季工作原理

Fig.34 Working principle of heat pump units in summer

在夏季进行工作时，小型热泵系统对锂离子电池组进行制冷，由压缩机释放的高压蒸汽，经过换向阀进入系统的冷凝器中，在冷凝器中通过冷凝作用将制冷剂蒸汽转化为液体，通过膨胀阀进入蒸发器中进行热量的吸收，主要吸收电池组的散发出的热量 Q_2 ，经过蒸发后的制冷剂蒸汽，再经过换向阀被压缩机进行吸入，如此反复进行，实现制冷循环，其中经过冷凝器产生的热量 Q_1 散发至周围空气中。

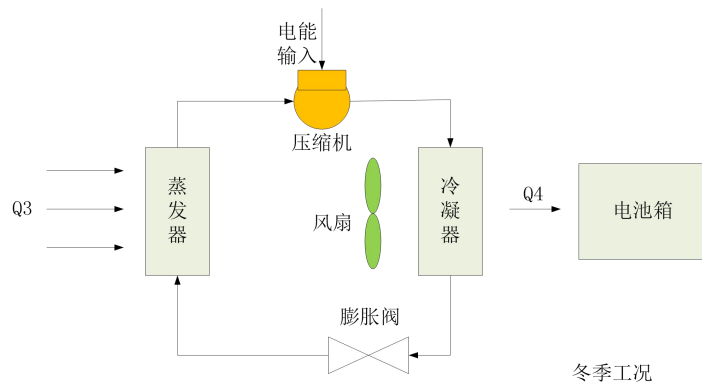


图 35 热泵机组冬季工作原理

Fig.35 Working principle of heat pump units in winter

在冬天寒冷的工况下，小型热泵系统内先将换向阀进行转换为热泵的工作位置，制冷剂吸收来自外部的空气能 Q_3 ，在蒸发器中进行蒸发和汽化，经由压缩机的工作提高制冷剂的温度，然后通过冷凝器完成制冷剂从汽化状态到液化状态转变的过程，在整个转化的过程中，系统将释放出大量的热量，利用风扇将产生的热量 Q_4 传递至电池箱进行保温。

4.3.4 热泵系统关键部件选型计算

磷酸铁锂电池组的产热量主要包括电池自身产热量和电池组与环境交换的热量，实验室位于北方寒冷地区，冬季平均气温 -7°C ，最低气温可达 -26°C ，实验数据具有一般性。在冬季热泵系统对电池组进行保温，电池组所需要的制热量主要来自于热泵管道的热对流提供。设计中冬季锂电池组工作的最低温度约为零下 10°C ，需要维持电池在最佳工作温度 20°C 的环境下工作，根据传热学相关知识，取气体强制对流换热系数为 $50\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，换热面积 $A=3.57\text{m}^2$ ，则冬季热泵工况下需要由热对流提供的制热量为 $\Phi=50\times 3.57\times 30=5355\text{W}$ ，这样才能满足电池组工作需求。

夏季热泵对锂电池组进行散热，电池组总最大产热量仅为 25W ，但是由于环

境因素的影响，随着环境温度的升高，电池组的温度几乎能达到甚至超过环境温度，在实际应用中，根据国际旅游天气提供的唐山市的气象资料，夏季最高温度达到 40℃，锂电池组的最佳工作温度范围在 20~45℃，为了最大的满足运行条件，设计中保证锂电池组的最佳温度取值为 20℃，根据传热学相关知识，取气体强制对流换热系数为 50W/(m²·K)，换热面积 A=3.57m²，则夏季热泵工况下需要由热对流提供的制冷量为 $\Phi=50 \times 3.57 \times 20=3570\text{W}$ 。因此，根据实际运行情况取压缩机最大匹配冷量为 3600W。所选用的压缩机的最大制冷/热量应不小于电池组自身的最大产热量和电池组与环境交换的热量之和，具有直流变频功能。

4.3.5 热泵系统模拟研究

通过对锂离子电池组在高温工况下利用热泵系统散热进行模拟分析，以及在低温条件下利用热泵系统进行加热的温度场分析。建立的电池组热管理模型时，对电池组表面的部件进行忽略，同时忽略电池箱内其他连接部件的影响，假定电池组产热恒定且均匀，采用二维模型进行模拟研究。

根据单个箱体的尺寸以及箱体的具体布置情况，最终的锂电池外壳箱体尺寸为 2×1.1×1.1m。

锂电池箱热泵热管理系统的网格模型如图 36 所示，采用结构化网格中的 Map 网格，网格数 26990。

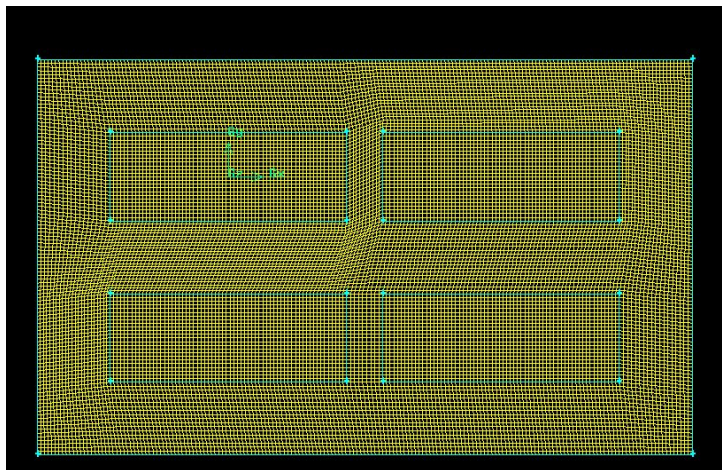


图 36 热泵系统散热的网格模型

Fig.36 Grid model of heat pump cooling system

在前处理器 Gambit 中可以对边界条件进行设置，然后导入 Fluent 求解器，进行具体的设置，设置的边界条件包括：

1) 入口边界: 根据热泵系统工作原理图, 在进行高温工况仿真时, 利用风扇将电池组散热, 入口边界为速度边界, 风速为 4m/s。空气温度为 313K。

2) 出口边界: 出口边界为压力出口, 出口压力为背压。

3) 壁面边界: 在锂电池箱与外部环境换热过程中, 与箱体内部的热交换相比非常小, 因此, 壁面设置为恒温、绝热。

4) 内热源边界: 电池组的发热量可通过第三章的计算得到。

5) 流固耦合边界: 电池组的表面为双壁面边界, 在 Fluent 中将流体和固体的交界面设置为 coupled, 在进行换热过程的模拟。

在 Fluent 计算中, 速度耦合方法采用 SIMPLE 算法, 压力、动量和能量的离散方法采用二阶迎风格式, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型中的 RNG 模型。在夏季高温环境条件下, 使用小型热泵系统对电池组进行散热, 最终的温度场模拟结果如图 37 所示, 电池组的速度场分布图如图 38 所示。

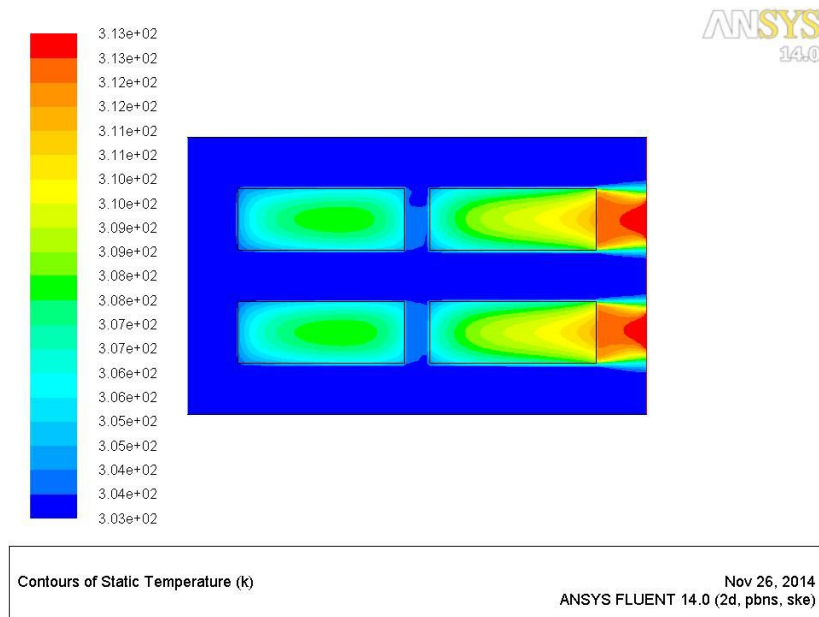


图 37 热泵系统散热的电池组温度场分布

Fig.37 Battery temperature field distribution of heat pump cooling system

从电池组散热的温度场分布图 37 中可以看出, 在锂离子电池组内部的最高温度为 38℃, 最低温度为 32℃, 温度差异只有 6℃, 左侧电池箱温度比右侧要低, 温度变化较小, 整体散热效果明显。磷酸铁锂电池组的最佳工作温度范围在 20~45℃, 通过热泵系统方案的散热情况, 能够达到电池组的最佳工作温度区间, 从而可以延长电池组的使用寿命。

由速度场的分布图 38 可以看出, 风速由左向右经过电池组, 将热泵产生的冷

量通过风扇使电池组的温度降低，结合图 37 可以看出，通过风扇将冷量传递至电池箱体部分，左边的箱体温度下降快，右边的箱体温度偏高，在远离风扇位置的部分空气温度与环境温度相当。而且从图中可以直观的看出由左向右风速越来越小，在两电池组中间狭缝会产生涡旋，与实际相符。

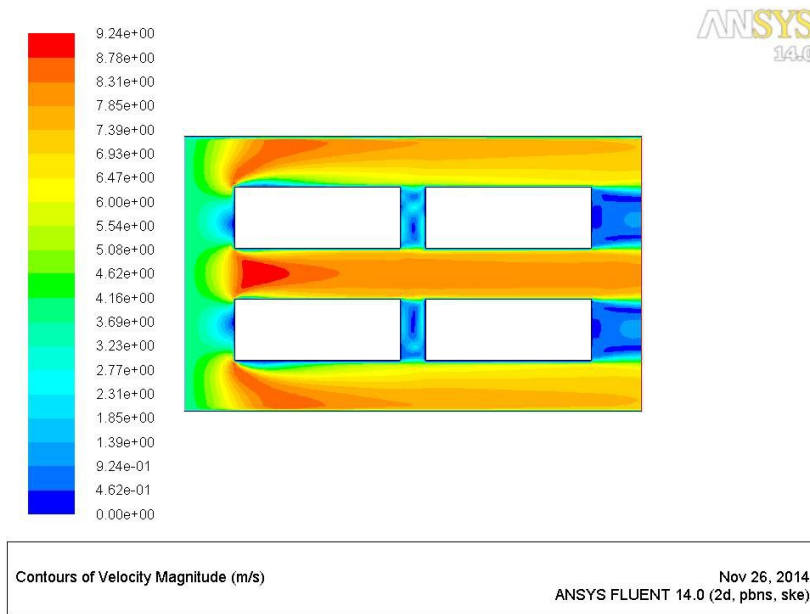


图 38 热泵系统散热的电池组速度场分布

Fig.38 Battery speed field distribution of heat pump cooling system

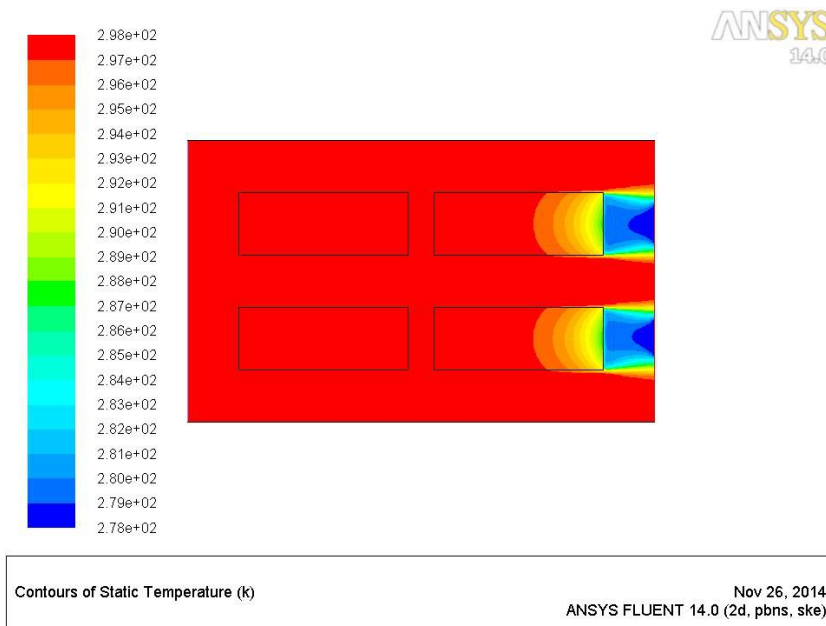


图 39 热泵系统加热的电池组温度场分布

Fig.39 Battery temperature field distribution of heat pump heating system

在冬季寒冷工况下，环境温度最低能达到零下 26℃，电池组自身的产热量很小，锂电池组在低温下的性能下降，而实际运行的锂电池组的工作温度要在零度以上，因此，在北方寒冷地区，尤其是冬季，有必要对锂电池组进行加热。采用小型热泵系统对锂离子电池组加热的温度分布图如图 39 所示，电池组的速度场分布如图 40 所示。

由图 39 可以看出，在冬季环境温度很低的情况下，通过热泵系统加热能使电池组内部最高温度在 25℃，电池组内部的温度差异基本保持不变，只有远离热泵的部分空气温度在 5℃左右，可以调节风扇的风速使右侧部分温度升高，能够保证整体电池组的稳定工作。

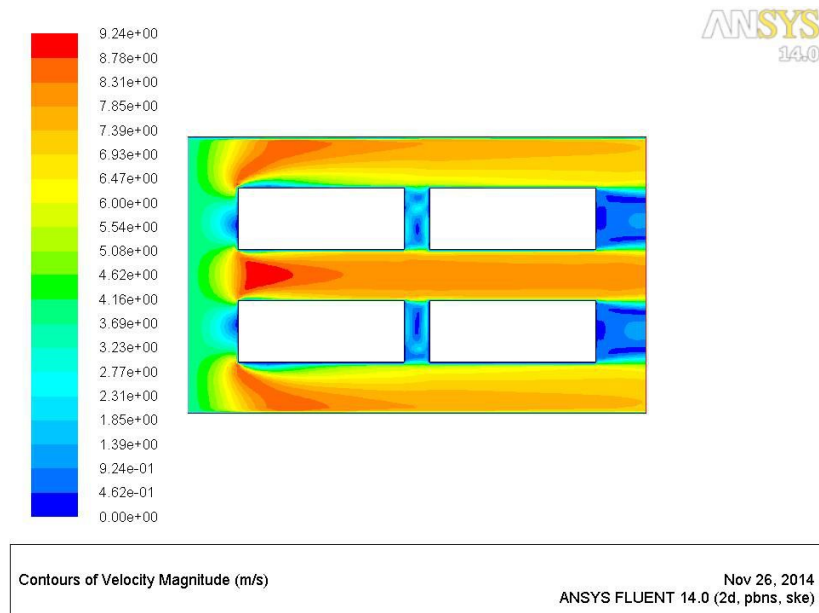


图 40 热泵系统保温的电池组速度场分布

Fig.40 Battery speed field distribution of heat pump heating system

小型热泵散热系统在电池组温度过高时能够将电池组进行散热，在寒冷条件下又能将电池组进行保温，但是小型热泵系统结构复杂，适用于固定式电池组的应用。该系统可用于锂电池组储能系统的热管理，如风光互补供电系统的热管理、电动汽车充放电系统中等。

风光互补发电系统在运行过程中采用小型热泵系统实现充放电过程的电池的温度控制，冬季采用制热循环，夏季采用制冷循环，对电池组进行保温和散热，达到锂电池的工作温度在 20~45℃的最佳工作范围。电动汽车动力电池充放电系统电池的热管理：利用锂离子电池驱动的纯电动汽车及混合动力汽车，在低温和高温环境下的充放电过程中利用小型热泵系统对锂电池组进行热管理。

4.4 小结

电池热管理系统是从用户的角度出发，以确保在整个锂电池系统的使用温度范围适当。将 PCM、热管和小型热泵系统应用于锂电池热管理，对每种热管理系统进行设计，并且用数值模拟的方法对其散热效果进行理论研究，研究结果表明，采用的三种热管理系统对电池组进行散热都达到了良好的效果，而小型热泵系统在此基础上还能够对电池组进行保温。最后通过对三种热管理系统的应用条件和散热效果进行了总结，以期对以后电动汽车用动力电池的研究提供理论支撑。

结 论

电动汽车核心部件锂电池的研究是目前行业研究的热点，锂离子电池的性能优劣决定了电动汽车的寿命、行驶里程等。通过实验分析实验台锂电池组和运营车辆锂离子电池的充放电特性，研究实验室 GBS-LFMP100AH 型号的锂电池组产热机理，同时，电池的温度特性进行实验研究。最终根据实验结果设计三种热管理系统应用于整个电池组，并且运用 FLUENT 模拟研究了热管理系统的应用效果。所得主要结论如下：

1) 运行电动汽车锂电池充放电性能的分析表明，实验台锂电池组在 25℃ 的充放电性能最佳，其他温度条件下，电池组性能都会有不同程度的下降，在低温条件下性能下降最快，但是整体一致性良好。运营车辆中锂电池组充放电过程中，模块温度的变化比较稳定，整体运行状况良好，但是春秋季节电池性能相对于夏冬季节的更加稳定。

2) 通过对 GBS-LFMP100AH 型号的锂电池组产热机理和温度特性实验研究，发现该型号电池组单位时间内最大产热量为 25W，而相同条件下与环境交换的热量为 101.9W，远大于电池组产热量，理论上电池组能够将自身热量及时导出。由于太阳辐射和周围环境的影响，温度特性实验表明，在充放电过程中，随着环境温度的升高，电池组内部的温度会不断升高，几乎达到或超过环境温度，锂电池组的最佳工作温度范围在 20~45℃，需要对电池组进行热管理以延长整体的使用寿命。

3) PCM、热管和小型热泵热管理系统中，通过 PCM 散热系统电池组温度会保持在相变温度附近（42~45℃），适合于固定环境或小型电池组的应用。热管散热系统数值模拟结果表明电池组的最低温度为 35℃，最高温度只有 37℃，温差为 2℃，可以应用于电动汽车锂电池热管理中。小型热泵系统研究结果表明从电池组散热过程中，内部的最高温度 38℃，最低温度 32℃，温度差异 6℃；保温过程中，内部最高温度在 25℃，基本没有温度的差异，该系统不仅可以在高温环境下对电池组散热而且能够在低温环境下对电池组进行保温，但由于结构复杂，适合用于固定式电池组中。

进一步研究工作：热管理系统在锂电池组中的应用实际研究，以及不同热管理系统的经济性分析等。

参考文献

- [1] 郭胜, 石琴, 李彦保, 等. 纯电动汽车与传统汽车能耗与排放对比分析[J]. 北京汽车, 2014(1):20-23.
- [2] CHIOKE B. HARRIS, MICHAEL E. WEBBER. An empirically-validated methodology to simulate electricity demand for electric vehicle charging[J]. Applied Energy, 2014, 126:172-181.
- [3] L.H. SAW, K. SOMASUNDARAM, Y. YE, et al. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2014, 249:231-238.
- [4] 刘春娜. 电动汽车电池应用与展望[J]. 电源技术, 2011, 35(1):12-14.
- [5] 魏宇锋, 张继东, 费旭东, 等. 锂离子电池产业政策研究及检测标准分析[J]. 电池工业, 2011, 16(3):189-192.
- [6] 杨洪. 纯电动汽车锂电池组充电均衡技术的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- [7] 李相哲, 苏芳, 林道勇. 电动汽车动力电源系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [8] 潘锐焕, 高子涵, 乔婧. 我国动力锂电池行业的发展现状[J]. 工业技术, 2013(12):66-67.
- [9] 曹金亮, 张春光, 陈修强, 等. 锂聚合物电池的发展、应用及前景[J]. 电源技术, 2014, 38(1):168-169, 188.
- [10] 沈晓彦, 黄钟琪, 周建新, 等. 锂电池在风光发电储能系统中的应用分析[J]. 电源技术, 2011, 35(5):602-604.
- [11] 张剑波, 卢兰光, 李哲. 车用动力电池系统的关键技术与学科前沿[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(2):87-104.
- [12] SIDDIQUE A. KHATEEB, MOHAMMED M. FARID, J.ROBERT SELMAN, et al. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. Journal of Power Sources, 2004, 128(2):292-307.
- [13] RAMI SABBAH, R. KIZILEL, J.R. SELMAN, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2):630-638.
- [14] X. DUAN, G.F. NATERER. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23-24):5176-5182.

- [15] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 王彦红, 张成亮, 俞会根, 等. 相变材料在动力电池热管理中的应用研究进展[J]. 功能材料, 2013, 44(22):3213-3218.
- [17] 凌子夜, 方晓明, 汪双凤, 等. 相变材料用于锂离子电池热管理系统的研究进展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(5):451-459.
- [18] 张国庆, 张海燕. 相变储能材料在电池热管理系统中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(8):9-12.
- [19] HEE JUNG PARK, JI YOUNG PARK. A promising high-performance lanthanum ferrite-based composite cathode for intermediate temperature solid oxide fuel cells[J]. Solid State Ionics, 2013, 244:30-34.
- [20] RIZA KIZILEL, RAMI SABBAH, J. ROBERT SELMAN, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs[J]. Journal of Power Sources, 2009, 194(2):1105-1112.
- [21] CHEN Yu Tang, KANG Shung Wen, HUNG Yu Hsun, et al. Feasibility study of an aluminum vapor chamber with radial grooved and sintered powders wick structures[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1-2):864-870.
- [22] M. AMELI, B. AGNEW, P.S. LEUNG, et al. A novel method for manufacturing sintered aluminium heat pipes (SAHP)[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2):498-504.
- [23] WU M. S., LIU K. H., WANG Y. Y., et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1):160-166.
- [24] RAO Zhong Hao, WANG Shuang Feng, WU Mao Chun, et al. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65:92-97.
- [25] THANH-HA TRAN, SOUAD HARMAND, BERNARD SAHUT. Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 2014, 265:262-272.
- [26] 张昌. 热泵技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 279-289.
- [27] 彭金梅, 罗会龙, 崔国民, 等. 热泵技术应用现状及发展动向[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2012, 37(5):54-59.
- [28] 欧阳东. 纯电动汽车热泵空调与电池交互热管理系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [29] MASOUD MASIH-TEHRANI, MOHAMMAD-REZA HA'IRI-YAZDI, VAHID ESFAHA. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for

- lithium battery life improvement[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 244:2-10.
- [30] 林超. 一款锂电池充电管理芯片的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [31] MICHEL GAUTHIER. GHGT-9 Phosphate Materials for Lithium Batteries and Energy Storage[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 46:234-254.
- [32] 张江云. 基于相变散热的动力电池热管理技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [33] 王峰, 李茂德. 电池热效应分析[J]. *电源技术*, 2010, 34(3):288-291.
- [34] 李斌, 常国峰, 林春景, 等. 车用动力锂电池产热机理研究现状[J]. *电源技术*, 2014, 38(2):378-381.
- [35] 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, 2012.
- [36] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [37] 陈玲. 二次电池锂金属电极及纳米电池的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
- [38] N. TERADA, T. YANAGI, S. ARAI, et al. Development of lithium batteries for energy storage and EV applications[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 100(1-2):80-92.
- [39] TODD M. BANDHAUER, SRINIVAS GARIMELLA, THOMAS F. FULLER. A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(3):1-25.
- [40] 田爽. 锂离子电池的热特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [41] 桂长清. 温度对 LiFePO₄ 锂离子动力电池的影响[J]. *电池*, 2011, 41(2):88-91.
- [42] 徐鹏. 建筑节能相变材料蓄能效果的计算机模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [43] 尚燕, 张雄. 相变储能材料的应用及研究现状[J]. *材料导报*, 2005, 19(z2):265-268.
- [44] 沈云飞, 程俊伟, 王健. 电动汽车锂离子蓄电池包热管理系统中相变材料的应用研究[J]. *上海汽车*, 2011(11):3-6.
- [45] ANDREW MILLS, MOHAMMED FARID, J.R. SELMAN, et al. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(14-15):1652-1661.
- [46] 张国庆, 饶中浩, 吴忠杰, 等. 采用相变材料冷却的动力电池组的散热特性[J]. *化工进展*, 2009, 28(1):23-27.
- [47] 张红, 杨峻, 庄骏. 热管节能技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [48] 余霞, 王文, 王如竹. 热管在空调中的应用[J]. *暖通空调*, 2004, 34(4):26-29, 46.
- [49] 郑丽, 王爱明, 李菊香. 热管吸液芯的研究进展[J]. *低温与超导*, 2011, 39(4):43-47.
- [50] 曹姿娟. 动力电池热管式散热器的数值模拟分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- [51] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

致 谢

岁月如歌，光阴似箭，转眼间两年半的研究生生活即将结束。回首往昔，校园生活的奋斗、辛劳、甜美和欢笑都将成为我人生中最宝贵的经历。在研究生生活即将结束之时，在毕业论文行将束笔之际，向所有关心、帮助过我的老师、朋友、同学呈上我最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

首先，我要感谢我的导师李海英教授，在研究生期间，李老师在学习和生活上都给予了我很大的帮助与关怀。在学习上，从最初论文的选题到研究方案的确定以及最终硕士论文的完稿，导师一直都对我耐心的指导，在我遇到学习的瓶颈时，导师总会帮助我开拓学习的思路和方法，使我的思维更加开阔；在生活上，导师时刻关心我的生活，将自己的生活经验传授给我，使我受益匪浅，李老师严谨的治学态度和朴实无华的生活作风都会影响着我今后的工作和生活，谨向李老师表示崇高的敬意和衷心的感谢。

其次，我要感谢姬爱民老师、王洪利老师、钟晓辉老师对我论文的建议与帮助，老师们敬业的工作态度深深感染着我，在此向教导过、关心过我的老师们表示最诚挚的谢意。

最后，我要感谢我的同学和朋友们：张丹、刘海云、杨潇潇、薛婷婷、唐琦龙、贾宁等等，感谢他们的鼓励和帮助；还要感谢与我一起生活两年半的舍友：周颖、尹晓盼、左佳对我的关心和帮助；感谢我的师弟师妹对我的支持，分别是曹赛师妹、刘旭师弟、王茹师妹、张涛师妹、滕军华师弟和赵荣萱师弟。

我还要特别感谢我的家人对我默默的支持和陪伴，他们是我求学路上的坚强后盾，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，他们对我无私的爱与照顾是我不断前进的动力。

感谢在百忙之中对论文进行评阅和参加答辩的各位专家教授。

导师简介

李海英（1971-）：女，汉族，河北省唐山市人；博士，教授，硕士研究生导师。现任河北联合大学冶金与能源学院热能工程系主任。主要研究方向为新能源开发与利用、工业节能技术、建筑节能技术等。

教育背景：

1994年7月毕业于河北理工大学，选矿专业，获学士学位；

1997年3月毕业于东北大学，矿物加工工程专业，获硕士学位；

2006年6月毕业于天津大学，环境工程专业，获博士学位。

科研成果：

近两年来在国内外核心期刊及国内外会议上发表论文23篇，其中12篇被EI、ISTP检索。获得河北省技术发明三等奖2项，唐山市科技进步奖2项；作为项目负责人或主要参与者完成了2项国家支撑计划子课题项目、8项省级科研成果鉴定、9项市级成果鉴定、1项中国博士后基金项目。目前负责承担2项省、市重大科研项目；获得授权国家发明专利2项，2009年入选河北省“三三三人才工程”三层次人选。

作者简介

贾永丽，女，1988年8月生，汉族，河北省石家庄市井陘县人。

2008.09-2012.06 毕业于河北联合大学冶金与能源学院热能与动力工程专业，获工学学士学位；

2012.09-今 河北联合大学研究生学院热能工程专业攻读硕士学位。

在学期间发表论文和著作：

- [1] LI Hai Ying, JIA Yong Li, ZHANG Dan, et al. Application of Electric Vehicle Battery Intelligent Monitoring and Management System[C], IEEE Transportation Electrification Conference & Expo. Beijing, 2014.
- [2] LI Hai Ying, ZHANG Dan, JIA Yong Li, et al. Research of Electric Vehicle Security Assurance and Monitoring System[C], IEEE Transportation Electrification Conference & Expo. Beijing, 2014.
- [3] 李海英, 贾永丽, 张丹, 等. 动力磷酸铁锂电池产热特性研究[J]. 电源技术, 已录用.
- [4] 贾永丽, 李海英, 张丹, 等. 动力锂电池在电动汽车中的应用[J]. 节能, 2014, 33(12):4-7.
- [5] 李海英, 张丹, 贾永丽, 等. 季节对风光互补发电特性的影响[J]. 节能, 2014, 33(11):63-66.

科研成果和奖励：

- [1] 工业余热驱动的多源热泵系统研究(编号：131302115a)，国内领先，第八完成人
- [2] 唐山典型生物质高效利用技术研究(编号：13120203a)，国内领先，第八完成人
- [3] 锂离子电池组技术指标关联因素分析及控制技术开发(编号：13130213A)，国内领先，第八完成人
- [4] 可再生能源电动汽车供电系统开发与示范(编号：11130201A-5)，国内领先，第十完成人

申请专利:

发明专利: 河北联合大学. 锂离子电池小型热泵热管理系统. 201420626569.4.

实用新型专利: 河北联合大学. 锂离子电池小型热泵热管理系统及其应用.
201410583760.X.

学位论文数据集

| | | | |
|--|--------------|--------|-----------------|
| 磷酸铁锂；充放电性能；温度特性；热管理 | | 锂电池储能 | TM912.9 |
| 480.40 | HBLH2015-127 | 公开 | |
| 河北联合大学 | | 硕士 | |
| 锂电池储能特性及关键技术研究 | | 中文 | |
| 资源形式： [文本 (√)] [图像 (√)] [视频 ()] [音频 ()] [其他 ()] | | | |
| 推荐形式 application/msword; application/pdf | | | |
| 贾永丽 | | 河北联合大学 | 10081 |
| 热能工程 | 新能源开发 | | 2.5 年 |
| 2014.11.30 | | | |
| 李海英 | 教授 | 河北联合大学 | |
| 唐山市新华西道 46 号 | 063009 | | |
| | | | 2015 年 1 月 13 日 |
| 河北联合大学 | | 唐山 | |
| 工学硕士 | 2015 年 | | |
| 61 | A4 | | |
| 注：共 37 项，其中标明（可选）项可不填，必填数据 24 项。 | | | |