

# 动力电池冷热双向循环热管理系统性能分析

梁坤峰<sup>1</sup>, 米国强<sup>1</sup>, 徐红玉<sup>2</sup>, 董彬<sup>1\*</sup>, 李亚超<sup>1</sup>, 王莫然<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 河南科技大学土木工程学院, 洛阳 471003)

**摘要:** 基于工质相变换热和无泵循环思路, 提出了一种动力电池冷热双向热管理系统。以某款三元锂电池为研究对象, 试验测试了冷热双向循环热管理系统的散热和加热工况。结果表明: 该系统能实现电池箱低温工况加热与高温工况散热的运行切换管理。散热工况下, 换热板采用 4 根竖管比单根蛇形管的散热能力强; 冷凝器侧强制风冷散热与自然对流散热相比, 能将系统一换热功率提高 10%~44.2%, 系统二换热功率提高 20%~48.6%; 电池箱温度为 60 °C 时, 自然对流散热系统换热板的最大温差小于 2 °C, 强制对流散热系统换热板的最大温差小于 1 °C; 在电池初始温度 25 °C 时, 1C、2C、3C 放电倍率下, 放电结束强制对流散热在能将 8 块电池的平均温度分别降低 2.1、3.9、4.7 °C。加热工况下, 多组试验电池箱的升温效果一致性较好。考虑车辆行驶中换热板倾斜的影响, 受制于工质的流量分配, 散热工况时温度均匀性优于加热工况。

**关键词:** 电; 储能; 系统设计; 双向循环热管理; 切换; 相变换热; 热虹吸; 温度均匀性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.014

中图分类号: TB61+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-14-0114-07

梁坤峰, 米国强, 徐红玉, 等. 动力电池冷热双向循环热管理系统性能分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 114-120.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.014 <http://www.tcsae.org>

Liang Kunfeng, Mi Guoqiang, Xu Hongyu, et al. Performance analysis of power battery cooling or heating two-way cycling thermal management system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 114-120. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.14.014 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

采用锂电池作为动力源, 可有效提高电池组的能量密度及其安全性能、使用寿命, 不仅被用于电动汽车、飞机、潜艇、小型船只和航天器等高科技行业<sup>[1-2]</sup>, 同时随着现代智慧农业的快速发展, 农用车辆电动化已成为国家重点发展的领域, 相关应用研究亦得到格外关注<sup>[3]</sup>。

然而, 电池作为动力电源使用时常产生大量热量, 加上更为复杂的农用车辆工作条件, 以及电池组紧密的布置, 不可避免会引起电池的热堆积, 造成其温度超出最佳工作温度区间, 严重影响电池的性能甚至会直接导致电池的报废。当前见诸报道的动力电池组热管理系统研究主要集中在散热方面, 如农用车辆中的电池采用风冷散热方式<sup>[4]</sup>, 徐晓明等<sup>[5]</sup>对强迫风冷散热条件下的电动农用车辆电池包进行了研究。但是在高温或者持续作业等特殊工况下, 电池产热的快速积聚容易导致电池包的热失控, 甚至发生燃烧或爆炸<sup>[6-7]</sup>, 需要引入更好的热管理方式, 当前已经在电动汽车上使用的更为高效的散热方式有液冷<sup>[8]</sup>、热管冷却<sup>[9]</sup>、相变材料冷却等<sup>[10-13]</sup>。同时, 由于锂离子电池低温充放电循环易造成不可逆的容

量损失, 在北方寒冷地区使用时, 还需要考虑电池的加热, 受制于成本及空间限制, 普遍采用 (PTC, Positive Temperature Coefficient) 加热, 虽设计简单但耗电严重。因此, 为了保证农用电动车电池组的使用寿命和安全性等指标, 需要开发设计良好、行之有效, 兼顾加热与冷却 2 种工况的动力电池组热管理系统。

基于此, 本文基于工质 (制冷剂) 相变换热思路, 结合液冷和热管冷却 2 种高效热管理方式, 利用液态工质吸热气化产生热虹吸效应, 作为热管理系统循环的推动力, 提出一种冷热双向循环热管理系统, 研究该系统的散热与加热热管理特性。

## 1 装置原理与电池产热计算

### 1.1 双向循环系统组成与原理

图 1 为双向循环热管理系统图, 包括热管理模块 A、数据采集模块 B 和模拟热源 C。热管理模块由加热棒、气泡泵、单向阀、翅片管式冷凝器、前换热板、导热硅胶片组成, 内部循环制冷剂。模拟热源由溶液罐、恒温箱、直流电源和循环水泵组成, 内部流动乙二醇水溶液。数据采集模块包括安捷伦 34970A 和 T 型热电偶温度传感器 (图中圆点为测温点)。为便于验证冷热双向热管理系统的工作性能, 采用后换热板替代动力电池, 动力电池产热量按电池产热规律由模拟热源等量生成。系统工作原理: 散热工况下, 阀 3 和阀 5 打开, 阀 4 关闭, 待电池箱 11 稳定在设定温度后, 开启循环水泵 10。前换热板下部管中积聚液态制冷剂。制冷剂选用 R141b, 在常压

收稿日期: 2020-01-04 修订日期: 2020-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1304521、51706060、51876055); 河南科技大学创新团队资助 (No.2015XTD004)

作者简介: 梁坤峰, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂多相系统建模、仿真与热过程控制研究。Email: lkf@haust.edu.cn

\*通信作者: 董彬, 博士, 讲师, 主要研究方向为传热与传质过程强化研究。Email: db8003@aliyun.com

下其沸点为 32.1 ℃，属于非可燃性液体，化学稳定性好。电池产热后，其温度与液态制冷剂之间建立温差，制冷剂吸收后换热板 9 的热量气化，气体携带液态制冷剂提升进入冷凝器 6，气液两相流体冷凝为纯液态流至气泡泵 2，气泡泵 2 的底部与前换热板下部管道相通，以此完成工质循环。

加热工况下，阀 4 打开，阀 3 和阀 5 关闭。气泡泵 2 中的液态制冷剂吸收加热棒 1 的热量气化，气液两相流体提升进入前换热板，后换热板 9 吸收前换热板的热量使电池箱 11 的温度升高，前换热板中的气液两相流体冷凝为液态，通过前换热板下部管道回流至气泡泵 2，完成循环。

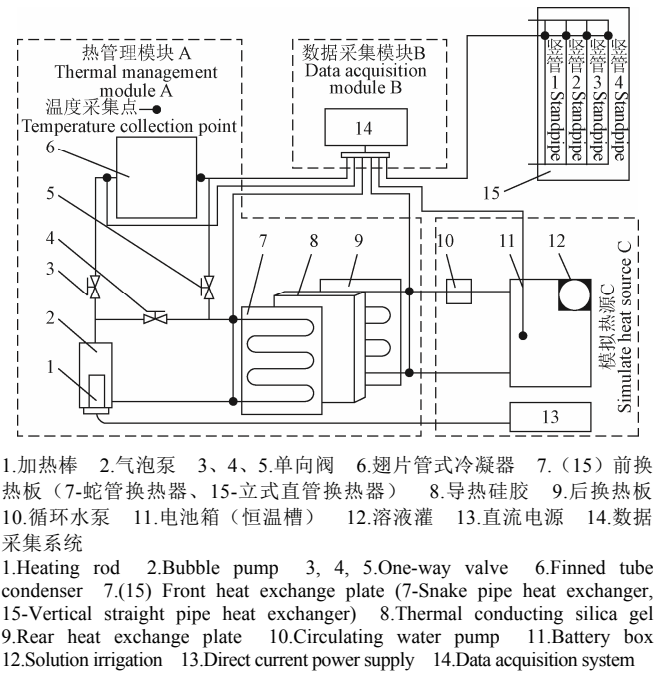


图 1 双向循环热管理系统图

Fig.1 Bidirectional circulating thermal management system

前换热板循环制冷剂。考虑到回路热管中多管蒸发器和单管蒸发器设计均可实现高效换热<sup>[14]</sup>，将前换热板设计成单根蛇形换热板 7 系统和 4 根立式直管换热板 15（与冷凝器距离由近及远为竖管 1、2、3、4）系统二 2 种结构，以此考察换热板内工质气化后，热虹吸效应下，不同的循环驱动力及冷凝器不同散热方式（自然、强制对流散热），对该热管理系统的影响。后换热板循环来自恒温箱（后文简称电池箱）的乙二醇水溶液。前后换热板之间填充导热硅胶，外部包裹保温棉，保证热量仅在换热板之间传递。

导热硅胶已普遍应用于电池散热，刘一凡等<sup>[15]</sup>研究了导热系数为 0.5 W/(m·℃)的导热硅胶在电池包内的应用。王聪<sup>[16]</sup>使用导热系数为 4 W/(m·℃)的导热硅胶片对电池组的热管理系统进行研究。本文试验系统使用的导热硅胶片的导热系数为 3 W/(m·℃)，能及时将电池产热传递给热管理系统。

电池箱产热和耗热量由乙二醇水溶液的热容量等量衡算，通过温度变化计算出试验系统的换热功率，如式

(1) 所示。

$$p = \frac{Q}{\tau} = \frac{Cm\Delta t}{\tau} \quad (1)$$

式中  $Q$  为总换热量，即电池产热量，J； $\tau$  为试验时间，s； $C$  为乙二醇溶液比热容，J/(kg·℃)； $m$  为溶液质量，kg； $\Delta t$  为溶液温度差，℃； $p$  为系统换热功率，W。

1.2 电池产热

锂离子电池放电过程会产生大量的热<sup>[17-18]</sup>，为此，以某三元锂电池为研究对象，计算其放电产热量，电池单体具体参数参考文献<sup>[19]</sup>。目前，基于电池均匀产热的假设，Bernardi 等<sup>[20]</sup>提出的电池生热速率模型，得到广泛认同，该模型中电池内阻计算参考文献<sup>[21-22]</sup>获得，由此得到不同放电倍率下电池的热特性，具体结果如表 1 所示，其中，放电倍率（C）代表电池放电电流与额定容量的比值。在相同的电池放电规律下，与李海君<sup>[19]</sup>实测的电池温度相比，二者的最大误差小于 10%。

表 1 不同放电倍率下电池热特性参数  
Table 1 Thermal characteristics of the battery at different discharge rates

放电倍率 Rate of discharge	放电时间 Discharge time/s	生热速率 Heat generation rate/(J·s <sup>-1</sup> )	产热量 Quantity of heat production/J	温升 Temperature rise/℃
1C	3 868	1.57	6 071	9.5
2C	1 910	6.15	11 743	18.4
3C	1 260	13.26	16 709	26.2

2 结果与分析

2.1 散热工况

散热工况下，研究电池箱设定温度为 40、50、60 和 70 ℃时，2 种热管理系统的散热能力。图 2 给出了电池箱设定温度 60 ℃时，热管理模块启动后，各测温点温度变化曲线。图 2a、2b 是系统一的温度变化曲线，图 2c、2d 是系统二的温度变化曲线。由图可知，散热循环建立之前，系统各测温点温度均快速升高，循环建立后，各测温点温度均匀降低。在图 2a 中约 660 s 时，制冷剂侧温度出现明显波动，是因为系统一采用蛇形管换热，气液两相制冷剂流通距离长，阻力大，且自然对流散热与强制对流散热相比，系统建立制冷剂循环需要克服更大的阻力。不断积聚的制冷剂两相混合物使系统温度压力不断升高。当积聚的量足够多，推动力足够大，气液两相制冷剂通过冷凝器冷凝成为纯液体，循环建立起来。而强制对流散热时，气液两相制冷剂在冷凝器中能迅速冷凝，冷凝后的液态制冷剂受重力流动时又产生虹吸力加速循环，故在图 2b 中未出现明显波动。而在系统二中，4 根换热管供液充足，相同温度下更有利于产生制冷剂气体，提升力大，提高了系统的散热能力，故图 2c 和 2d 也未出现明显波动。

表 2 是电池箱设定温度为 40 ℃、50 ℃和 70 ℃时，3 个状态点的试验参数。其中，电池箱开始试验时为初始状态，对应电池箱的初始温度；达到电池箱设定温度且系统稳定循环，即电池箱温度开始下降时为稳定状

态, 对应电池箱的稳定温度, 并记录此时的时间; 试验结束时在结束状态点测得电池箱的结束温度。由表可知, 电池箱设定温度为 40 °C 时, 2 个系统达到稳定的时间普遍较短, 这是因为此时电池箱的温度处于其合适工作温度范围, 电池产热量小, 换热板内的液态制冷剂吸热, 即可有效抑制电池温升, 热量储存在换热板中的液态制冷剂中, 并未建立循环。电池箱设定温度为 50 °C 时, 系统达到稳定的时间较长, 此时电池温度升高, 制

冷剂吸热形成热虹吸效应, 进而完成工质在系统内部的循环, 才能有效散热, 而建立循环需要时间, 因此系统达到稳定的时间较长。随着电池温度继续升高, 产生的制冷剂气液两相混合物量更大, 建立循环更快, 系统达到稳定的时间缩短, 故在电池箱设定温度为 70 °C 时系统达到稳定循环的时间又缩短。表中, 系统二达到稳定的时间均快于系统一, 说明系统二更有利于工质热虹吸效应的形成。

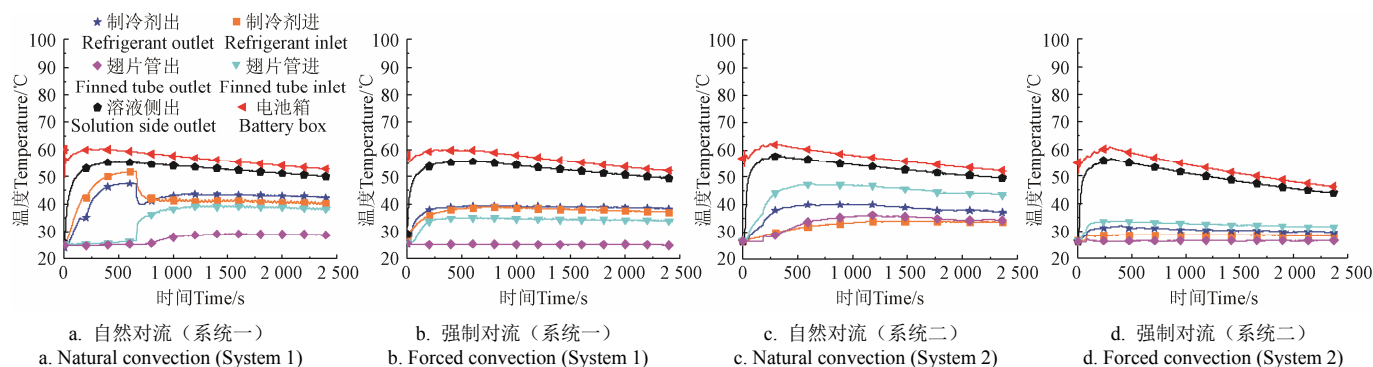


图 2 60 °C 时散热电池箱温度随散热时间变化曲线

Fig 2 Change curve of heat dissipation cell temperature with heat dissipation time at 60 °C

表 2 设定温度 40、50、60 °C 时实测电池箱 3 个状态点参数  
Table 2 Measured three state point parameters of the battery box when the set temperature is 40, 50, 60 °C

散热方式 Heat dissipation	状态 点 State points	40 °C		50 °C		70 °C	
		温度 Temperature/ °C	时间 Time/ s	温度 Temperature/ °C	时间 Time/ s	温度 Temperature/ °C	时间 Time/ s
自然对流 (系统一) Natural convection (System 1)	初始 Initial	37.3	-	40.9	-	71.5	-
	稳定 Stable	39.7	317	50.4	554	71	498
	结束 End	37.8	-	45.9	-	59.4	-
强制对流 (系统一) Forced convection (System 1)	初始 Initial	29.7	-	46	-	67.5	-
	稳定 Stable	40.1	301	50.3	416	70.6	412
	结束 End	37.5	-	43.8	-	58.1	-
自然对流 (系统二) Natural convection (System 2)	初始 Initial	39.3	-	48.5	-	67.6	-
	稳定 Stable	41.8	161	51.4	368	71.2	304
	结束 End	38.9	-	44.8	-	58.5	-
强制对流 (系统二) Forced convection (System 2)	初始 Initial	37.5	-	44.1	-	67.4	-
	稳定 Stable	41.2	155	50.5	265	70	140
	结束 End	36.2	-	40.7	-	50.2	-

图 3 为不同电池箱温度, 2 个系统换热功率变化曲线。由图可知, 随电池箱温度升高, 系统换热功率增大, 且强制对流比自然对流换热功率高。强制对流换热功率与自然对流换热功率相比, 系统一提高 10%~44.2%, 系统二提高 20%~48.6%, 且系统二的自然对流换热功

率与系统一强制对流换热功率几乎相同, 说明系统二散热更好。

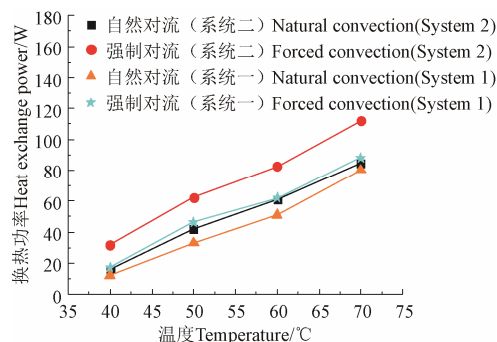


图 3 电池箱换热功率随电池箱温度的变化曲线

Fig.3 Variation curve of battery box heat exchange power with battery box temperature

### 2.1.1 温度均匀性试验

目前, 电动汽车电池组主要通过换热板传热进行换热, 而电池组的温度均匀性受换热板温度的影响较大。行业通常要求动力电池组内部的温差应不大于 5 °C [23]。

为探究散热工况下, 系统二中立式直管换热板的温度均匀性, 在电池箱设定温度为 60 °C 时, 在不同散热形式下对系统二进行试验, 4 根竖管的温度变化曲线如图 4 所示, 图 4a 是自然对流散热, 图 4b 是强制对流散热。由图可知, 初始温度相同, 试验开始后, 4 根竖管温度先剧烈升高并快速降低, 而后缓慢上升至系统建立起稳定散热循环, 之后 4 根管温度均匀缓慢降低, 2 图变化趋势相同。原因在于试验刚开始时, 系统内液态制冷剂吸收电池热量快速产生大量制冷剂气液两相混合物, 导致 4 根竖管温度剧烈变化。循环建立之后, 系统换热达到动态平衡, 随着换热时间增加, 4 根管温度缓慢降低。图 4a



中 4 根管温度普遍高于图 4b, 这是因为自然对流换热速率较慢, 系统内制冷剂气液两相混合物积聚较多, 故温度偏高。而强制对流散热系统产生的气液两相制冷剂能很快冷凝, 系统内流通性较好, 温度较低。自然对流散热形式下, 4 根管温度与平均值之差在正负  $1^{\circ}\text{C}$  之内, 强制对流散热形式下, 4 根管温度与平均值之差在正负  $0.5^{\circ}\text{C}$  之内, 均匀性较好。

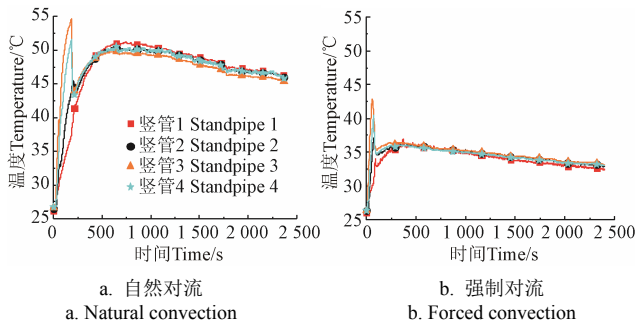


图 4 不同散热方式立式直管换热板温度变化

Fig.4 Temperature variation of vertical tube heat exchanger plate with different heat dissipations

### 2.1.2 倾角试验

考虑车辆实际行驶上下坡等路况, 在强制对流散热工况对系统二进行倾角试验, 温度取  $60^{\circ}\text{C}$ , 倾角取  $15^{\circ}$ , 不同倾角下立式直管换热板的 4 根竖管温度曲线如图 5 所示, 图 5a 为左倾  $15^{\circ}$ , 系统换热功率为  $79.8\text{ W}$ ; 图 5b 为右倾  $15^{\circ}$ , 系统换热功率为  $81.2\text{ W}$ 。与无倾角相比, 换热功率基本不变, 区别是 4 根管温差较大。这是因为有角度时, 液体制冷剂在竖管内分布不均, 产生的制冷剂气体量有多有少, 温差较大。左倾时, 大部分制冷剂积聚在气泡泵部分, 4 根管内制冷剂液体很少甚至没有, 制冷剂气体在竖管内无规律流动, 竖管 1 与竖管 3 最大温差达到  $11^{\circ}\text{C}$ 。右倾时, 竖管 4、3、2、1 内制冷剂由多到少, 导致每根管产生的制冷剂气体量不同, 温度也不均匀, 4 根管在  $300\text{ s}$  时达到最大温差  $15^{\circ}\text{C}$ , 平衡后温差维持在  $4^{\circ}\text{C}$  左右。说明倾角对系统温度均匀性不利, 需后期改进。

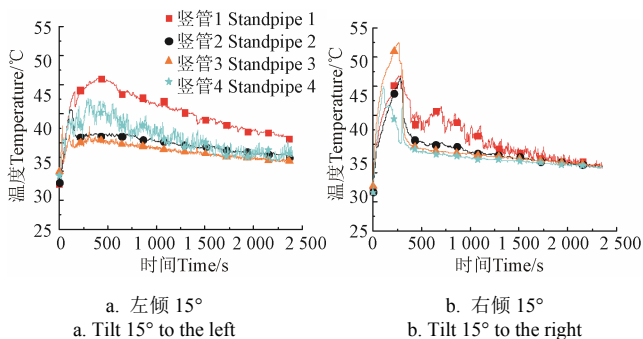


图 5 强制对流散热不同倾角立式直管换热板温度变化

Fig.5 Temperature variation of vertical straight tube heat exchange plate with forced convection and heat dissipation at different inclination angles

真实环境中车辆冲击和颠簸对电池的瞬间放电要求, 导致电池温度快速上升, 与本文热管理系统相近

的传热技术散热研究, 已有文献报导。Tran 等<sup>[9]</sup>认为颠簸环境下, 平板热管的换热效果不受影响; Connors 等<sup>[24]</sup>试验测试表明热管在军用车辆冲击和颠簸条件下的热性能没有下降; Guo 等<sup>[25]</sup>通过机械振动方式增加了矩形微槽润湿面积, 强化了微槽传热; 由此, 颠簸状态下电池热管理性能研究仅做倾斜状态下的换热效果分析。

### 2.2 电池箱加热工况

图 6 给出了 2 种系统加热工况下各测温点温度变化曲线。图 6a 为系统一的温度变化曲线, 加热棒功率为  $150\text{ W}$ ; 图 6b 为系统二的温度变化曲线, 加热棒功率为  $54\text{ W}$ 。由图可知, 加热开始后, 制冷剂侧温度迅速升高, 溶液侧温度随之均匀上升。图 6a 在  $500\text{ s}$  左右制冷剂进出口温度达到平衡并缓慢升高, 进出口温差维持在  $30^{\circ}\text{C}$  左右, 电池换热功率约为  $80\text{ W}$ , 与加热棒功率相差较大, 原因是加热棒放置在套管中, 热量损失较大, 故功率较低。图 6b 在  $300\text{ s}$  左右制冷剂进出口温度达到平衡并缓慢升高, 进出口温差维持在  $15^{\circ}\text{C}$  左右, 电池换热功率约  $53.7\text{ W}$ , 与加热棒功率基本吻合, 这是因为系统二加热棒与制冷剂直接接触, 热量不存在耗散。图 6b 达到平衡的时间、制冷剂进出口温度及温差均低于图 6a, 是因为立式直管换热器采用 4 根竖管布置, 流道缩短, 换热效率高, 故整体温度低且平衡建立较快。

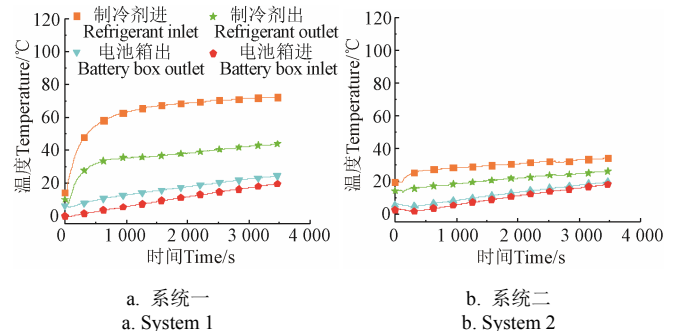


图 6 不同系统加热工况电池箱温度变化

Fig.6 Temperature variation of battery box under different heating conditions

图 7 为使用系统二对电池箱进行加热时, 不同电池箱初始温度, 系统二中立式直管换热板 4 根竖管温度变化曲线。图 7a、7b、7c、7d 的电池箱初始温度分别为  $-5^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $5^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$ 。由图可知, 竖管 1 温度升高最快, 竖管 2、3、4 依次随之。这是因为系统整体温度较低时, 高温制冷剂气体在先接触的竖管流通并换热, 当前排的竖管温度升高后, 多余的高温制冷剂气体才会进入后排竖管, 随着加热时间增加, 4 根竖管温度逐渐趋于均匀。

### 2.3 全工况测试分析

通过前文的试验分析, 发现热管理系统二在加热与散热方面的换热效果均优于热管理系统一, 因此, 使用系统二对电池箱进行加热和散热连续试验, 如图 8 所示。

图 8 为使用系统二对电池箱进行加热和散热连续试验, 电池箱随时间变化曲线。电池箱初始温度为  $0^{\circ}\text{C}$ , 热管理系统先对电池箱加热, 加热功率为  $54\text{ W}$ , 加热过程中电池不放电, 当电池箱温度达到  $25^{\circ}\text{C}$  时停止加热, 之后将热管理系统切换至散热工况, 电池箱开始放电至放电结束。电池箱散热的热量为 8 块前述电池的产热量, 由此获得基于系统二的动力电池加热与散热全工况测试。相

同加热功率下, 9 组试验电池箱达到  $25^{\circ}\text{C}$  的时间均在  $3\ 050\sim 3\ 150\text{ s}$ ; 全工况试验结束后, 可以发现 3 种放电倍率下, 电池箱温度无散热时最高, 自然对流散热居中, 强制对流散热最低; 与无散热相比,  $1\text{C}$  放电倍率下强制对流散热能将电池箱平均温度降低  $2.1^{\circ}\text{C}$ ,  $2\text{C}$  放电倍率下强制对流散热能将电池平均温度降低  $3.9^{\circ}\text{C}$ ,  $3\text{C}$  放电倍率下能将电池平均温度降低  $4.7^{\circ}\text{C}$ 。

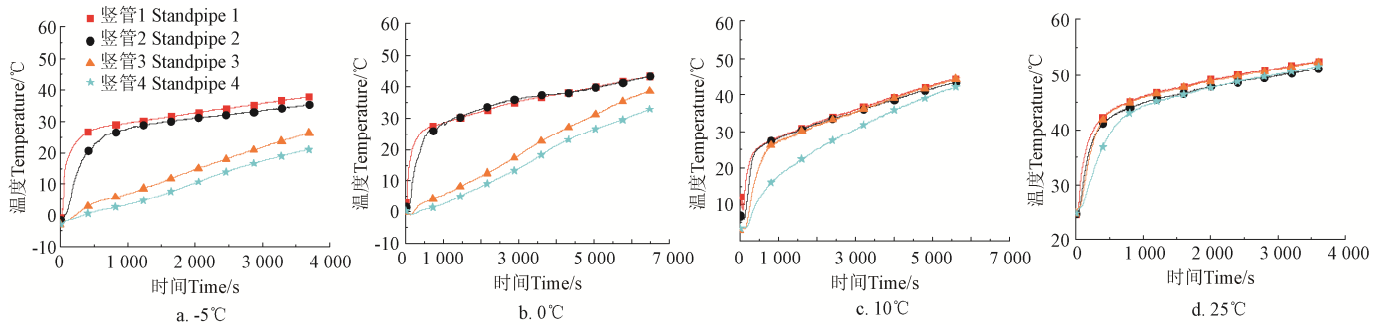


图 7 初始温度对竖管温度均匀性的影响

Fig.7 Influence of initial temperature on temperature uniformity of the vertical tube

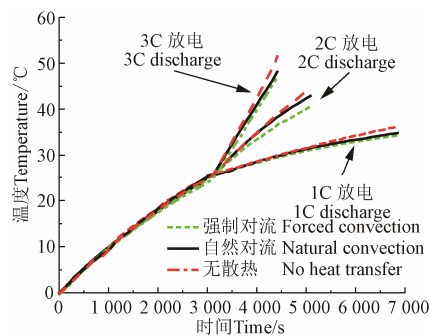


图 8 全工况测试

Fig.8 Test of the whole conditions

### 3 结论

1) 基于工质相变的饱和压力-饱和温度关系, 利用热虹吸原理, 构建的动力电池冷热双向热管理系统, 能实现电池箱加热与散热工况的运行切换, 实现电池箱温度的管理。

2) 电池箱散热工况下, 双向热管理系统的散热能力随电池箱温度的升高而增大, 对 2 种换热板结构而言, 冷凝器侧强制对流散热均比自然对流散热时有更好的散热特征, 且采用 4 根立式直管换热板也明显比单根蛇形管换热板的散热能力更强。

3) 电池箱加热工况下, 气泡泵内工质吸热能有效形成热虹吸效应, 工质在系统内的循环更为流畅, 相同加热功率下, 电池箱达到设定温度的时间一致性较好。

4) 无倾斜角度时, 相对于加热工况来说, 4 根竖管的温度均匀性在散热工况下较好, 即换热板的最大温差小于  $2^{\circ}\text{C}$ ; 而处于倾斜状况下, 由于工质的流动特征, 其在 4 根竖管内的流量分配不均, 致使其温度均匀性受到较大影响。

### [参考文献]

- [1] Wei Y, Agelin-Chaab M. Experimental investigation of a novel hybrid cooling method for lithium-ion batteries[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 375-387.
- [2] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A. A novel approach for performance improvement of liquid to vapor based battery cooling systems[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 187: 191-204.
- [3] 刘坤. 精准农业电动车结构分析与仿真[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [4] Liu Kun. Precision Agriculture Electric Vehicle Structure Analysis Design and Simulation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [5] Chen K, Wu W, Yuan F, et al. Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern[J]. Energy, 2019, 167: 781-790.
- [6] 徐晓明, 胡志超, 袁寿其, 等. 电动农用车横向电池包的散热性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 13-19.
- [7] Xu Xiaoming, Hu Zhichao, Yuan Shouqi, et al. Heat dissipation performance of electric farm-oriented vehicle with horizontal battery pack[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp. 1): 13-19. (in Chinese with English abstract)
- [8] Shah K, McKee C, Chalise D, et al. Experimental and numerical investigation of core cooling of Li-ion cells using heat pipes[J]. Energy, 2016, 113: 852-860.
- [9] Smith J, Singh R, Hinterberger M, et al. Battery thermal

- management system for electric vehicle using heat pipes[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 134: 517-529.
- [8] Jiaqiang E, Xu S, Deng Y, et al. Investigation on thermal performance and pressure loss of the fluid cold-plate used in thermal management system of the battery pack[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 145: 552-568.
- [9] Tran T, Harmand S, Desmet B, et al. Experimental investigation on the feasibility of heat pipe cooling for HEV/EV lithium-ion battery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(2): 551-558.
- [10] 赵佳腾, 饶中浩, 李意民. 基于相变材料的动力电池热管理数值模拟[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(6): 1275-1280. Zhao Jiateng, Rao Zhonghao, Li Yimin. Numerical simulation of power battery thermal management based on phase change materials[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(6): 1275-1280. (in Chinese with English abstract)
- [11] Ling Z, Wang F, Fang X, et al. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 403-409.
- [12] 张聪哲, 叶芳, 郭航, 等. 制冷剂冷却电池的纯电动汽车热管理系统夏季工况模拟[J]. *制冷学报*, 2019, 40(2): 12-19. Zhang Congzhe, Ye Fang, Guo Hang, et al. System simulation of pure electric vehicle thermal management with a refrigerant cooling battery under summer conditions[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(2): 12-19. (in Chinese with English abstract)
- [13] Qian Z, Li Y, Rao Z. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 126: 622-631.
- [14] 鲁得浦, 谢荣建, 文佳佳. 多蒸发器低温回路热管的运行特性[J]. *化工进展*, 2020, 39(4): 1235-1244. Lu Depu, Xie Rongjian, Wen Jiajia. Operating characteristics of multi-evaporator cryogenic loop heat pipe[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(4): 1235-1244. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘一凡, 周杰, 黄睿, 等. 导热硅胶形状对液冷式电池组热性能影响研究[J]. *电源技术*, 2020, 44(1): 107-109. Liu Yifan, Zhou Jie, Huang Rui, et al. Effect of thermal silica shape on thermal performance of liquid-cooled battery module[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(1): 107-109. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王聪. 导热硅胶耦合水冷的动力电池组热管理系统的设计与研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018. Wang Cong. Research of Power Battery Thermal Management System Based on Coupling of Thermal Silica Plate and Fluid[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [17] Wang L, Niu J, Zhao W, et al. Study on electrochemical and thermal characteristics of lithium - ion battery using the electrochemical - thermal coupled model[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(6): 2086-2107.
- [18] Dong T, Peng P, Jiang F. Numerical modeling and analysis of the thermal behavior of NCM lithium-ion batteries subjected to very high C-rate discharge/charge operations[J]. *International Journal of Heat And Mass Transfer*, 2018, 117: 261-272.
- [19] 李海君. 新能源汽车用锂动力电池热管理系统研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018. Li Haijun. Research on Thermal Management System of Lithium Power Battery for New Energy Vehicles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [20] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [21] 宋俊杰, 王义春, 王腾. 动力电池组分层风冷式热管理系统仿真[J]. *化工进展*, 2017, 36(S1): 187-194. Song Junjie, Wang Yichun, Wang Teng. Simulation of layered air cooling thermal management system for lithium-ion battery pack[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(S1): 187-194. (in Chinese with English abstract)
- [22] Omar N, Monem M A, Firouz Y, et al. Lithium iron phosphate based battery—assessment of the aging parameters and development of cycle life model[J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1575-1585.
- [23] Kim J, Oh J, Lee H, et al. Review on battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019: 192-212.
- [24] Connors M J, Zunner J A. The use of vapor chambers and heat pipes for cooling military embedded electronic devices[C]. Boston: MILCOM, IEEE Military Communications Conference, 2009.
- [25] Guo C, Hu X, Cao W, et al. Effect of mechanical vibration on flow and heat transfer characteristics in rectangular microgrooves[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 52(2): 385-393.

## Performance analysis of power battery cooling or heating two-way cycling thermal management system

Liang Kunfeng<sup>1</sup>, Mi Guoqiang<sup>1</sup>, Xu Hongyu<sup>2</sup>, Dong Bin<sup>1\*</sup>, Li Yachao<sup>1</sup>, Wang Moran<sup>1</sup>

(1. College of Vehicle & Transportation Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. School of Civil Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** Green energy and clean vehicles have triggered the power improvement of electric vehicles, as most agricultural machine equipment are becoming much more electric. Large-scale battery and high current discharge have gradually served as a power supply, leading to the formation of much heat during rapid charge and discharge cycles at high current levels. Therefore, it is inevitable to cause the thermal accumulation in batteries, thereby to exceed the optimal operating temperature range, particularly in agricultural vehicles with the more complex working conditions and the compact layout of battery packs. An appropriate strategy of thermal management is necessary to control the battery temperature within a reasonable temperature range. In this study, a thermal management system of power battery was presented with cooling or heating functions, using the techniques of phase-change heat transfer and pump-free circulation. Taking ternary lithium batteries as the research objects, the two-way working modes of thermal management system were tested under cooling or heating conditions, thereby to investigate the influence of inclination angle on heat dissipation and temperature uniformity. In the case of cooling, the cooling capacities of two thermal management systems were studied under natural and forced convection cooling conditions, when the initial temperature of battery box was set as 40 °C, 50 °C, 60 °C and 70 °C. In the case of heating, the heating capacities of two thermal management systems were also studied, together with the initial temperature of different batteries, and the heat exchange uniformity of two thermal management systems. The results showed that the proposed system can realize the switching operation management of cooling and heating in two-way modes, based on high or low temperatures. Specifically, the switch of thermal management can be implemented by controlling the opening and closing of the valve at the preset temperature. Under the cooling condition, the heat dissipation capacity of heat exchanger plate with four vertical tubes was stronger than that of the single serpentine tube. Compared with natural convection, forced convection on the condenser side can increase the heat transfer power of system 1 by 10%-44.2%, and system 2 by 20%-48.6%; When the temperature of battery box was 60 °C, the maximum temperature difference of heat exchange plate was less than 2 °C in the natural convection heat dissipation system, whereas less than 1 °C in the forced convection heat dissipation system. At an initial battery temperature of 25 °C and the discharge rates of 1C, 2C, and 3C, the forced convection heat dissipation at the end of discharge can reduce the average temperature of battery box by 2.1 °C, 3.9 °C, and 4.7 °C, respectively. Under the heating condition, the power of battery box was consistent in many groups of experiments. The flow distribution of working fluid can be confined, considering the tilting effect of heat exchanger plate in the vehicle driving, indicating the temperature uniformity was better than that in the heating dissipation condition. The findings demonstrated that two systems of thermal management can provide better heat transfer in the complex agricultural vehicles.

**Keywords:** electricity; energy storage; system design; two-way thermal management; switch; phase change heat transfer; thermal siphon; temperature uniformity