

· 综 述 ·

# 锂离子电池组热管理系统研究现状

白帆飞<sup>1,2</sup>, 宋文吉<sup>1</sup>, 陈明彪<sup>1</sup>, 冯自平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 归纳锂离子电池组结构设计的要点, 包括冷却介质的流通方式、进出口设置和电池的排列。总结现有电池冷却和预热技术的优缺点。空气冷却系统结构简单、应用广泛, 但效果较差; 液体冷却系统效果显著, 能耗较大、密封要求高; 相变材料的应用需要提高导热率和比热容; 热管冷却系统结构紧凑, 配合风机冷却效果更佳。相对于内部加热系统, 电池组外部加热系统结构简单, 但加热速度较慢。冷却/加热一体化电池组热管理系统的开发, 将是研究的方向。

**关键词:** 锂离子电池; 电池热管理系统; 结构设计; 冷却技术; 预热技术

中图分类号: TM912.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-1579(2016)03-0168-04

## Statues quo of research on Li-ion battery thermal management system

BAI Fan-fei<sup>1,2</sup>, SONG Wen-ji<sup>1</sup>, CHEN Ming-biao<sup>1</sup>, FENG Zi-ping<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The points of Li-ion battery pack structure design were overviewed, including the flow modes of cooling medium, inlet and outlet settings and the arrangement of cells. The advantages and disadvantages of the existing battery cooling and preheating technology were summarized. Air cooling system with a simple structure was widely used, but the performance was relatively poor. Liquid cooling system performed well, while the energy consumption and the sealing requirements were high. The improvement of thermal conductivity and specific heat would promote the application of phase change materials. Heat-pipe cooling system was more compact and performed well with a fan. In contrast of the internal heating system, the battery external heating system was simple structure but heating up slowly. The development of battery thermal management system with heating and cooling function would be the research direction.

**Key words:** Li-ion battery; battery thermal management system; structure design; cooling technique; preheating technique

锂离子电池组在快速充放电的过程中会产生大量的热, 若散热不及时, 会造成电池温度过高、模块间温度分布得不均衡; 在高寒地区或低温环境下, 容易导致电量流失严重、充电缓慢<sup>[1-2]</sup>。为保证电池组的正常输出功率及延长电池循环寿命, 人们在电池成组结构设计、热管理系统的开发方面进行了大量的研究<sup>[3]</sup>。

本文作者归纳了电池组结构设计的要点, 总结了电池冷

却技术和预热技术的优缺点, 对现状及发展进行介绍和评价, 指出各种热管理技术的局限性; 最后探讨了电动汽车锂离子电池热管理的研究方向。

### 1 电池成组结构设计

#### 1.1 冷却介质的流通方式

冷却介质在电池组内的流通方式主要有串行、并行。串

作者简介:

白帆飞(1989-) 男, 河南人, 中国科学院广州能源研究所、中国科学院大学硕士生, 研究方向: 储电系统热管理;

宋文吉(1978-) 男, 山东人, 中国科学院广州能源研究所副研究员, 博士, 研究方向: 大规模储电系统控制技术, 本文联系人;

陈明彪(1986-) 男, 广东人, 中国科学院广州能源研究所助理研究员, 硕士, 研究方向: 大规模储能控制技术;

冯自平(1968-) 男, 宁夏人, 中国科学院广州能源研究所研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向: 先进储能技术。

基金项目: 广东省科技计划项目(2014B010128001), 广州市科技计划项目(201509010018, 201509030005)

行流通时,冷却介质与电池进行热交换,不断被加热,使得工质入口侧区域电池的冷却效果优于出口侧,电池组内的温差较大。并行流通时,冷却介质从电池组底部流入、上部流出,电池组各流道之间冷却介质流量相等,电池组的温度一致性较好。

两种流通方式<sup>[4]</sup>的对比见表 1。

表 1 两种流通方式的对比

Table 1 Comparison of two circulation models

流通方式	图示	适用电芯形状	优点	缺点
串行		圆柱形	换热系数高	进出口压力差较大
并行		方形	温度场一致性好	换热系数较低

### 1.2 冷却介质进出口的设置

冷却介质进出口的设置对电池组的冷却效果有较大的影响<sup>[5]</sup>。

对于串行通风的圆柱形电池组,冷却介质流速较低时,相邻两排电池进出口设置相反,两侧冷却介质呈逆流状态,可提高电池组温度场的一致性,但效果并不显著;流速较高时,整个电池组应采用相同的冷却介质流向<sup>[6]</sup>。对于并行通风的方形电池,根据进出口的位置和冷却介质的流动轨迹,电池组结构可以大致分为 3 种:U 型、Z 型和 T 型。

表 2 对比了 3 种结构的水冷效果<sup>[7]</sup>。

表 2 3 种进出口设置的对比

Table 2 Comparison of 3 kinds of inlet and outlet settings

进出口设置	图示	优点	缺点
U 型		压降小,能耗小	温度场一致性较差,最高温度较大
Z 型		温度场一致性好	压降大,能耗大
T 型		压降小,能耗小,温度场一致性好	结构复杂,密封要求较高

U 型进出口设置:压降小,能耗小;但进出口近端电池的冷却效果好,远端效果差,电池组温度的一致性差。Z 型进出口设置:电池组内各个流道压力、介质流速比较均衡,电池组温度一致性较好,最高温度明显下降。相对于常规 U 型和 Z 型进出口设置,用一进口二出口(中间底部设置一个进口、顶部左右两侧分别设置一个出口)的 T 型进出口设置时,泵的功耗、电池最高温度都更低,电池组温度的一致性也得到了提高。

### 1.3 单体电池的排列

圆柱形电池成组时,可采用顺列和错列两种排布方式,如图 1 所示。

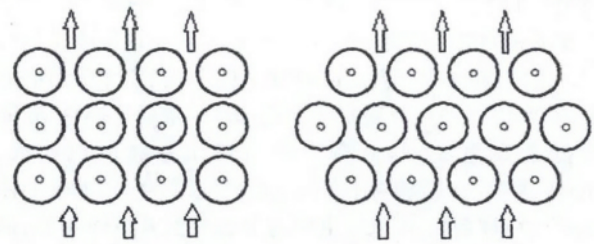


图 1 圆柱形电池排列方式示意图

Fig. 1 Arrangement sketch of cylindrical cells

顺列排布时,冷却介质的流动阻力较小,散热效果一般;错列排布时,冷却介质的扰动增强,换热系数和能耗都有所增加。电池单体的横向间距增加时,温升变大,温度的一致性提高,风机能耗下降;纵向间距增加时,顺列排布的电池组温升减小,错列排布的电池组温升增大<sup>[8]</sup>。二维传热与一维电化学耦合模型仿真结果显示:圆柱形的 26650 型磷酸铁锂锂离子电池,顺列排布时的最佳纵向、横向间距分别为 34 mm 和 32 mm<sup>[8]</sup>。圆柱形电池采用顺列排布时,电池直径增大,最佳的间距/直径比相应减小。

方形电池成组时,单体电池的间距是重要的结构参数,对电池组温度分布有较大的影响。L. W. Fan 等<sup>[9]</sup>采用水平导流板,将冷却空气送入方形电池组底部用于冷却,发现风速固定时,电池间距增加,电池组内的最高温度上升,温度场的一致性提高,边缘电池相比于中心电池,温度一致性更好;采用不同间距可提升电池组的温度一致性,但降低最高温度的效果不明显;对于相同的冷却风速和电池组总体积,电池采用单侧冷却时,温度一致性较好。

## 2 电池组热管理技术

### 2.1 空气冷却技术

空气冷却技术是以低温空气为介质,降低电池温度的一种散热方式。该技术利用自然风或风机,配合汽车自带的蒸发器为电池降温,在电动汽车电池热管理系统中应用广泛。

空气冷却系统结构简单、便于维护,但冷却效果较差,可通过增加肋片来提高换热效果。圆柱形电池嵌套在有金属肋片的圆柱形腔体内,电池和腔体间填充导热介质,以减少接触热阻;电池组成模块时,肋片外围可采用方形外壳包裹。这种设计不仅增加了风冷效果,也提高了圆柱形电池成组时的结构强度。方形电池成组时,可在电池间隙设置针形金属肋片,用以增加空气的扰动,提高换热系数,设计时要综合考虑肋片分布、高度的影响。采用这种设计时,提高入口冷却风的温度,可提高温度场的一致性,但提升了最高温度;入口风速提高时,电池组内的最高温度下降,温度场的标准差呈现先增加、然后缓慢递减的规律<sup>[10]</sup>。在该设计的基础上,在电池间隙添加泡沫铝,以降低孔隙度,可降低电池最高温度;高孔隙度、低渗透率,都可保证温度场的一致性<sup>[11]</sup>。

普通单向流动的空气冷却系统中,空气流入电池组换热后,温度不断上升,下游出口附近的电池冷却效果不如上游

入口附近的电池, 电池组内的温度方差较大。往复式空气冷却系统通过调节电池组两侧的双向阀门, 周期性地改变空气的流动方向, 减小上下游造成的温度差; 同时, 空气流向的周期性改变, 也使得边界层不断生成、破坏, 增强了换热, 有助于降低最高温度, 但提高了进出口压差和风机能耗。M. Rajib 等<sup>[12]</sup>发现: 相对于单向空冷系统, 周期为 120 s 的往复式空气冷却系统, 可以使电池组的最大温差下降 4 °C, 最高温度下降 1.5 °C。

## 2.2 液体冷却技术

液体冷却技术通过液体对流换热, 将电池产生的热量带走, 降低电池温度。液体介质的换热系数高、热容量大、冷却速度快, 对降低最高温度、提升电池组温度场一致性的效果显著, 同时, 热管理系统的体积也相对较小。根据冷却液流道的设置, 液体冷却系统可分为外部液冷和内部液冷。

外部液冷系统中, 冷却液通过与电池外表面换热, 以达到冷却电池的目的。该冷却系统形式多样: 可将电池单体或模块沉浸在液体中, 也可在电池模块间设置冷却通道, 或在电池底部采用冷却板。电池与液体直接接触时, 液体必须保证绝缘(如矿物油), 避免短路。J. T. Zhao 等<sup>[13]</sup>在 42110 型电池周围布置 4 个微型通道, 电池模块产生的热量由管道内的冷却液带出, 当流量为 0.001 kg/s 时, 可将电池温度控制在 40 °C 以内。

内部液冷系统中, 冷却液流过电池内部的通道将电池热量带走。可在圆柱形电池中心设置轴向通道; 也可在方形电池电解液内部设置冷却通道, 以流动的电解液为冷却介质, 在泵的驱动下, 在电池内部循环散热<sup>[14]</sup>。

采用外部液冷系统时, 要优化冷却通道的数量、尺寸、几何形状等参数, 以降低导热热阻。相对于外部液冷, 内部液冷系统可更好地降低电池内部温度、提高温度场的一致性和安全性, 但改变了电池的原有结构, 对电池内部电化学反应的影响, 有待进一步研究。

## 2.3 相变材料冷却技术

相变材料(PCM)是一类特殊的功能材料, 能在恒温或近似恒温的情况下发生相变, 同时吸收或释放大量的热。石蜡的毒性低、价格便宜, 单位质量的相变潜热较高, 相变温度位于电池安全运行温度范围内, 适合用作锂离子电池组热管理的 PCM。目前, 主要可采用石蜡与多孔物质相结合、添加高导热系数添加剂的方式, 提高石蜡的导热性能。

泡沫铜吸附石蜡可用于电动汽车电池组的热管理, 在运行工况发生变化时, 电池组的最高温度和最大温差可得到很好的控制<sup>[15]</sup>。石蜡与石墨片制成的复合材料, 具有较高的导热性能和机械强度, 应用于电池组热管理, 不仅可降低电池组的最高温度和模块间的温差, 降低电池组容量衰减率, 在寒冷条件下还可对电池组进行持久保温<sup>[16]</sup>。向石蜡中添加碳纤维也可提高导热性能, 当碳纤维的长度为 2 mm、质量分数为 0.46% 时, 电池组的最高温升下降了 45%<sup>[17]</sup>。

基于 PCM 的电池热管理系统结构简单、节省空间, 相变潜热大, 温度均匀波动较小; 但 PCM 冷却技术属于被动冷却, 如果不能及时将热量移除, 电池组在经历长时间连续充

放电循环后, 仅靠空气自然对流无法保证热量的排出, 最终会导致冷却系统的失效。可考虑结合强制风冷, 以保证电池组热管理效果的持续有效<sup>[18]</sup>。

## 2.4 热管冷却技术

热管是一种利用相变进行高效传热的热导体。封闭空心管内的工质, 在蒸发段吸收电池热量, 然后在冷凝端将热量传递到环境空气中, 使电池温度迅速降低。热管的种类主要分为重力热管、脉动热管及烧结热管等。

受限于形状, 热管不适合直接与电池接触换热, 常焊接在电池间的金属板上。受工质特性的影响, 不同的脉动热管适用于不同场合, 其中, 以水和正戊烷的混合物为工质、填充量为 60% 的脉动热管, 适用于低负荷的热管理; 当空气侧温度高于 40 °C 时, 以水或甲醇为工质的冷却效果较好<sup>[19]</sup>。热管形式多样, 有助于开发冷却/加热电池热管理系统, 保证电池组在高温和 0 °C 以下的环境中, 工作在最佳温度范围, 确保正常运行<sup>[20]</sup>。热管安装位置灵活多变, 可在热管下方设置空气通道, 利用烟囱抽吸效应辅助散热; 或在蒸发段增加翅片, 扩大散热面积, 热负荷高的时候结合强制风冷<sup>[21]</sup>。

## 2.5 电池组预热技术

锂离子动力电池组在高寒地区或低温环境下的电量流失严重、充电缓慢, 如何快速地恢复正常的充放电性能, 是电池加热系统所要解决的问题。在低温环境中, 需要对电池组进行预热, 预热方法可分为外部加热和内部加热。

外部加热主要利用加热板、加热套、加热膜和珀尔贴效应。目前, 电动汽车上主要采用电池组底部安装加热板的方法, 结构简单但加热时间长, 电池组内的温度不均匀, 且能耗较大。用加热套预热时, 电池受热均匀, 加热速度较快, 但不利于高温环境下电池的散热。加热膜预热以聚酰亚胺作为绝缘材料、合金箔为发热体, 加热电池单体的两个侧面, 成本较低, 对电池散热影响小, 但只适合方形电池单体。珀尔贴效应是指电流流过两种不同导体的界面时, 向外界吸收或放出热量。珀尔贴效应热泵通过改变电流方向和大小, 对电池进行加热和制冷, 可作为主动式电池组热管理系统<sup>[22]</sup>。

内部加热可提升单体电池的内部温度, 且升温较快, 方式有交流电加热、电池单体自加热。采用高倍率的交流电对电池电解液进行预热时, 速度较快, 但需要配备供给交流电的装置, 而且会影响电池寿命, 在动力电池上应用较少<sup>[23]</sup>。C. Y. Wang 等<sup>[24]</sup>将镍箔用于锂离子电池内部的自加热, 由温度传感器控制自加热电路的开关, 电池由 -20 °C 提升至 0 °C 所需时间为 20 s, 消耗的电量 3.8%。

## 3 总结与展望

锂离子动力电池组的实际运行环境较为复杂, 单一的冷却/预热方式常常无法满足要求, 可采用多种技术相结合的复合热管理系统。电池组热管理系统的设计应结合电池运行工况, 综合考虑电池功率、热管理方式和电池模块的空间布置, 设计电池热管理系统, 并通过计算流体力学软件仿真计算, 预测电池组的温度场。

目前, 电池组热管理采用的电池热模型较简单, 精度有

限,可采用多维的电化学热耦和发热模型,更加精准地计算电池发热量和温度场,指导电池模块的设计;新材料和新技术的出现,有助于开发冷却/加热一体化、多种方式相结合的热管理系统。

#### 参考文献:

- [1] LIU Xiao-hong(刘小虹). 快速充电高功率型锂离子电池的研制[J]. *Battery Bimonthly(电池)*, 2011, 41(4): 199-201.
- [2] LUO Ling(罗玲), SONG Wen-ji(宋文吉), LIN Shi-li(林仕立). 锂离子电池热模型的研究现状[J]. *Battery Bimonthly(电池)*, 2015, 45(1): 280-283.
- [3] AHMAD A P. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. *J Power Sources*, 2002, 110: 377-382.
- [4] RAO Z H, WANG S F. A review of power battery thermal energy management[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2011, 15(9): 4554-4571.
- [5] KARIMI G, DEHGHAN A R. Thermal analysis of high-power lithium-ion battery packs using flow network approach[J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2014, 38: 1793-1811.
- [6] KARIMI G, DEHGHAN A R. Thermal analysis of high-power lithium-ion battery packs using flow network approach[J]. *Int J Energ Res*, 2014, 38(10): 1793-1811.
- [7] ZHAO J T, RAO Z H, HUO Y T *et al.* Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles[J]. *Appl Therm Eng*, 2015, 85: 33-43.
- [8] YANG N X, ZHANG X W, LI G J *et al.* Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements[J]. *Appl Therm Eng*, 2015, 80(2): 55-65.
- [9] FAN L W, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. *J Power Sources*, 2013, 238: 301-312.
- [10] SHAHABEDDIN K M, ZHANG Y W. Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles[J]. *J Power Sources*, 2015, 273: 431-479.
- [11] MOHAMMADIAN S K, MOEIN S, MOUSAVI R *et al.* Thermal management improvement of an air-cooled high-power lithium-ion battery by embedding metal foam[J]. *J Power Sources*, 2015, 296: 305-313.
- [12] RAJIB M, PARK C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. *J Power Sources*, 2011, 196: 5685-5696.
- [13] ZHAO J T, RAO Z H, LI Y M. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery[J]. *Energ Convers Manage*, 2015, 103: 157-165.
- [14] MOHAMMADIAN S K, HE A L, ZHANG Y W. Internal cooling of a lithium-ion battery using electrolyte as coolant through microchannels embedded inside the electrodes[J]. *J Power Sources*, 2015, 293: 458-466.
- [15] RAO Z H, HUO Y T, LIU X J *et al.* Experimental investigation of battery thermal management system for electric vehicle based on paraffin/copper foam[J]. *J Power Sources*, 2015, 88: 241-246.
- [16] LIN C J, XU S C, CHANG G F *et al.* Experiment and simulation of a LiFePO<sub>4</sub> battery pack with a passive thermal management system using composite phase change material and graphite sheets[J]. *J Power Sources*, 2015, 275: 742-749.
- [17] BABAPOOR A, AZIZI M, KARIMI G. Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites[J]. *Appl Therm Eng*, 2015, 82: 281-290.
- [18] LING Z Y, WANG F X, FANG X M *et al.* A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling[J]. *Appl Energ*, 2015, 148: 403-409.
- [19] BURBAN G, AYEL V, ALEXANDRE A. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications[J]. *Appl Therm Eng*, 2013, 50: 94-103.
- [20] WANG Q, JIANG B, XUE Q F *et al.* Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes[J]. *Appl Therm Eng*, 2015, 88: 54-60.
- [21] TRAN T H, HARMAND S, SAHUT B. Experimental investigation on heat pipe cooling for hybrid electric vehicle and electric vehicle lithium-ion battery[J]. *J Power Sources*, 2014, 265: 262-272.
- [22] ALAOUI C, SALAMEH Z M. A novel thermal management for electric and hybrid vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 54(2): 468-476.
- [23] HAND A, STUART T A. HEV battery heating using AC currents[J]. *J Power Sources*, 2004, 129: 368-378.
- [24] WANG C Y, ZHANG G, GE S *et al.* Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures[J]. *Nature*, 2016, 529(7587): 515-518.

收稿日期: 2016-01-05

## 《电池》二维码

读者朋友们:

你们好!

《电池》网的二维码  
(见图),可以让你用手机  
扫一扫,浏览《电池》网了,  
省去了输入网址的麻烦。



谢谢你试用!