# [新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.04.015

# 水泵驱动的动力电池组高效液冷及 热管理技术研究

# 沈姗姗<sup>1</sup>,章宜明<sup>2</sup>

(1. 浙江工业职业技术学院 机械工程学院,浙江 绍兴 312099;2. 中国铁路北京局集团公司 北京动车段,北京 102600)

摘 要:动力电池的温度呈非均匀分布,常规等强度冷却的空冷或者 PCM 热管理技术难以满足动力电池温度均匀性的 要求。为了对动力电池进行更好地热管理,课题组基于分形理论与电池温度分布设计了由水泵驱动的3种高效液冷流 道,并采用共轭传热模型进行了数值模拟分析。数值模拟研究结果表明:树型流道在获得较好的流动均匀性的同时具有 较低的流阻,在相同泵功耗下能够实现较低的压降损失和良好的均温性能。

关键 词:动力电池;液冷流道;分形理论;共轭传热

中图分类号:TH314;TM912 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)04-0079-05

# Research on High Efficiency Liquid Cooling and Heat Management Technology of Power Battery Driven by Water Pump

SHEN Shanshan<sup>1</sup>, ZHANG Yiming<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing, Zhejiang 312099, China;
2. China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing Bullet Train Section, Beijing 102600, China)

Abstract: The temperature distribution of the power battery is non-uniform. The conventional air cooling or PCM thermal management technology with equal strength cooling cannot meet the requirements of the temperature uniformity of the power battery. In order to improve the thermal management of power battery, three kinds of efficient liquid cooling channels driven by water pump were designed based on fractal theory and temperature distribution of battery, and the conjugate heat transfer model was used for numerical simulation analysis. The results of numerical simulation show that the tree channel has better flow uniformity and lower flow resistance. At the same pump consumption, it can achieve lower pressure drop loss and better temperature uniformity.

Keywords: power battery; liquid cooling channel; fractal theory; conjugate heat transfer

锂离子动力电池发展迅速并且被越来越多的应用 于新能源电动汽车等需大功率、高电流放电的领 域<sup>[1-2]</sup>。可是由于冷却不足或空间有限等原因,随之产 生的电池热安全问题却在不断制约动力电池组的发展 脚步,因此电池热管理成为当前锂离子动力电池研究 的热点之一<sup>[3-6]</sup>。

当前的动力电池热管理技术中,研究较为广泛的 2种电池冷却方式是强制空冷和强制液冷<sup>[7]</sup>。强制空 冷系统的优点是结构简单、质量小,可以排除毒害气体 且成本低廉,同时其可与整车其他特性设计结合,易于 优化;但强制空冷换热能力有限,冷却效率低<sup>[8]</sup>,无法 满足高温或较大功率放电情况下的冷却需求<sup>[9]</sup>。强 制液冷由于冷却液本身热容较大因而具有散热能力 强、冷却效率高和系统紧凑性好等优势。采用水泵进 行强制液冷的另一个优势是电池表面温度一致性较 好,Pesaran等提出如果要保证锂离子电池高效安全工 作,不仅电池温度需要保持在 25~40 ℃,而且温度一 致性也要维持在 5 ℃<sup>[10]</sup>。因此由水泵驱动的动力电

#### 收稿日期:2020-03-27;修回日期:2020-05-08

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y201839218);绍兴市科技计划项目(2018C10006)。

第一作者简介:沈姗姗(1986),女,浙江绍兴人,硕士,讲师,主要研究方向为机电控制技术。E-mail:shenshanshan63@163.com

池组高效液冷系统已经成为现阶段最广泛应用于动力 电池热管理的冷却方式<sup>[11]</sup>。

但电池实验流程复杂、操作困难并且具有一定的 危险性,仿真实验和数值模拟均采用模拟热源或者均 匀发热源假设,而无法准确描述电池单体产热规律,因 而对于完全解决电池热管理问题还有一定的距离。课 题组在探究动力电池产热机理的基础上建立具有电化 学反应内核的实际电池散热模型,并针对实际电池的 温度分布设计由水泵驱动的高效动力电池热管理系 统,同时对于不同冷却流道的流动阻力与传热性能进 行数值模拟与讨论。

## 1 电池数值模型的构建与有效性验证

### 1.1 电池产热及导热模型

Bernardi 等<sup>[12]</sup>建立了电池产热的一般计算模型, 将锂离子电池在充放电过程中的生热量具体分为4个 部分:反应热 Q<sub>r</sub>、欧姆热 Q<sub>g</sub>、极化热 Q<sub>p</sub> 和副反应热 Q<sub>s</sub>。其中,副反应热 Q<sub>s</sub>在热源中所占比例较小<sup>[13-14]</sup>, 通常可以忽略不计。

极化热 Q<sub>p</sub> 可以和反应热 Q<sub>r</sub> 一起处理为不可逆的 反应热<sup>[15]</sup>

$$Q_{\rm r} = n \cdot m \cdot Q \cdot I/(MF)_{\circ} \tag{1}$$

式中:n 为电池数;m 为电极的质量,g;Q 为动力电池 2 个电极发生化学反应产生热量的代数和,J/mol;I 为电 池的充放电电流,A;M 为电池内部介质的摩尔质量, g/mol;F 为法拉第常数,其值为 96 484.5 C/mol。

欧姆热 Q<sub>s</sub>即锂离子动力电池在充放电过程中电 池内部材料因电流通过所产生的热量,这部分热量在 充放电过程表现为标量,为正值。计算公式为:

$$Q_{\rm g} = I^2 R_{\rm e\,o} \tag{2}$$

式中 $R_{e}$ 为电池材料的欧姆内阻, $\Omega_{o}$ 

针对方形电池,假设:①元素内部各材料密度和比 热容均一;②元素内部工作过程产热速度均一;③元素 表面与外界环境温差有限,且辐射对于电池散热的影 响可以忽略不计。根据能量守恒,进入电池内部的热 量加上内部产热等于流出电池的热量加上电池内能的 增加。

考虑导热系数,各向异性的方形电池三维热传导 方程<sup>[16]</sup>为

$$\rho C_{p} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( -k_{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( -k_{y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_{z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{g}$$
(3)

式中: $\rho$ 为电池密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$ 为电池热容, J·kg<sup>-1</sup>·

 $K^{-1}$ ; $k_x$ , $k_y$ 和 $k_z$ 为方形电池沿径长、宽、高3个方向的 平均导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ; $q_g$ 为电池的单位体积 生热速率,W。

等式右边前3项为电池在单位时间内由于导热产 生的内能,第4项表示电池单位体积的产热速率。

单体电池电芯的热物性参数如表1所示。

表1 单体电芯热物性参数

Table 1	Thermo-physical para	ameters of battery
密度/	比热容/	导热系数/
$(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$(\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{kg}^{-1} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{K}^{-1})$	$(W\boldsymbol{\cdot}m^{-1}\boldsymbol{\cdot}K^{-1})$
2 478	806	13.15

## 1.2 边界条件和网格独立性测试

使用 COMSOL 5.5 软件中的锂离子电池模型对单体电池的产热与导热进行瞬态模拟。边界条件如下: 假设电池在自然对流条件下进行对流换热,其表面对流换热系数设为 25 W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-1</sup>;流动方程和能量方程采用二阶迎风格式进行离散,时间步长设为 0.01 s,发热周期为 60 s,当连续性和能量方程的残差分别达到 10<sup>-5</sup>和 10<sup>-4</sup>时认为计算收敛。

将方形单体电池简化为长 100 mm,宽 100 mm,厚 2 mm 的长方体,采用六面体结构网格进行网格划分, 得到 7 种不同网格数量的网格模型。以电池最高温度 的计算结果作为评估网格密度的依据,网格无关性验 证如图 1 所示,可见当电池网格数量大于 68 万时,其 最高温度的变化基本不受网格数量的影响,因此选定 电池数值模型的网格数为 68 万。







在自然冷却条件下,在10C的放电速率下动力电 池的表面温度与温差分布如图2所示。从图中可以看 出,实际运行状态下电池的表面温度分布极不均匀,呈 现出左高右低的分布趋势,因此在动力电池液冷流道 设计时应考虑到这些因素,进行动力电池液冷板冷却 流道的设计。



图2 电池温度与温差分布

Figure 2 Distribution of temperature and temperature difference

#### 2 液冷板数值模型构建

首先,为了验证液冷流道模型的有效性,建立与文献[17]一致的液冷流道模型,如图3所示。冷却工质选择水(water-liquid),液冷流道的材料为铝,其物性参数如表2所示。

化二 一个一次人又做的的任务	冷板的物性参数	.冷	质及	却工	冷	. 2	表
----------------	---------	----	----	----	---	-----	---

 Table 2
 Physical parameters of coolant medium and cooling plate

			01	
反步	密度/	动力黏度/	导热系数/	比热容/
石ণ	( kg $\cdot$ m $^{-3}$	) ( kg $\cdot$ m <sup>-1</sup> $\cdot$ s <sup>-1</sup>	$)(W\boldsymbol{\cdot}m^{-1}\boldsymbol{\cdot}K^{-1})$	$(\mathbf{J} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{kg}^{-1} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{K}^{-1})$
冷却水	998.2	0.001	0.6	4 182
铝	2 719.0		202.4	871

湍流条件主要设置湍流强度和水力直径 2 个条件,选择 κ-ε 湍流模型。通过网格无关性分析后,选定 网格数为 470 万。得到了不同入口流速下的进出口压 降情况,并与文献[16]中的进出口压降数据进行对 比,如图 4 所示。

将仿真结果与文献数据进行计算对比,可以发现 流道流动阻力的变化趋势基本一致,相对误差在

# 3.5% 左右,表明课题组选用的仿真方法有效可信。



图3 冷却板三维模型[16]







#### 3 液冷流道设计与性能分析

根据动力电池实际温度分布与自然界的分形理 论<sup>[18]</sup>进行液冷流道的设计,分别为回型流道、螺旋型 流道以及树型流道,数值模型如图5所示。设置动力 电池的放电速率为10C,在保证各个液冷通道质量流 量不变的前提下改变液冷板入口流速,得到液冷板的 进出口温差、压降以及电池表面的温度分布等数据进 行对比分析。

通过 COMSOL 多物理场耦合方法建立电池与冷却流道的三维共轭传热模型,耦合过程中电池生热模型与导热模型得到电池的表面温度分布作为液冷板的外部温度边界,液冷流道非等温流动模型计算得到的液冷板表面对流换热系数作为热边界条件再施加到电池表面,如此耦合迭代直到残差小于 10<sup>-4</sup>时认为计算收敛。

在 10 C 电池放电速率及 0.01 kg/s 的液冷流道质 量流量下,电池表面的温度分布如图 6 所示。



图 5 3 种液冷流道模型 Figure 5 Three models of liquid cooling channels





Figure 6 Temperature distribution in three kinds of liquid cooling channels

从图 6 中可以看出回型流道与螺旋型流道的温度 分布较为均匀且平均温度较低,而树型流道的温度分 布均匀性较差,且高温区域分布面积较大。在 10 C 电 池放电速率及 0.01 kg/s 的液冷流道质量流量下,3 种 液冷流道的压力分布如图 7 所示。





Figure 7 Pressure distribution in three kinds of liquid cooling channels

从图 7 中可以看到,在相同流量下,不同的流道结构呈现完全不同的压力分布趋势,其中回型流道的沿程阻力损失最明显,螺旋型流道的阻力变化较为平缓, 而树型流道虽然流动阻力最低,但是其分布最为均匀。 分析其原因,这可能是由于流道内部的分叉使得流动 截面积增加,流速降低,从而减小了流动阻力。

各个流道下的最高温度、最大温差、平均温度及流 动阻力的性能数据如表3所示。

表3 不同液冷流道性能参数对比

Table 3	Comparison	of performan	ce in
differe	ent liquid co	oling channel	s

_			1	0	
	流道	最高温	最大温	平均温	流动阻
	类型	度/℃	差/℃	度/℃	力/kPa
	回型	27.7	5.5	23.8	11.51
	螺旋型	29.8	8.5	21.3	16.02
	树型	26.3	4.8	24.9	0.71

从表3中可以发现螺旋型流道的平均温度最低, 但是相应的流道阻力最大;树型流道的最高温度最低、 温差最小、流道阻力最小,但是其平均温度最高;而回 型流道在各个性能数据的对比中都没有优势。为了进 一步评价各个流道的性能,需要提取各个流道的无量 纲性能参数,课题组采用传热因子*j*、流动因子*f*对流 道性能进行无量纲化,比较各个流道性能的优劣。传 热因子

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{1/3}}$$
 (4)

流动因子

$$f = \frac{2\Delta p \cdot A}{\rho v_{\rm m}^2 L}$$
(5)

式中:A 为流道截面积;L 为流道长度;v<sub>m</sub>为流体平均速度。

采用*j*和*f*因子之间的比值可以综合评价传热性 能与流动性能之间的综合效果,当液冷板通过水泵驱 动时,可以采用*j/f*指标可以定量评估相同流速下的换 热能力大小;采用*j/(f<sup>1/2</sup>)*指标可以定量评估在相同 流动阻力下的换热能力大小;而采用*j/(f<sup>1/3</sup>)*指标可 以定量评估相同泵功率下的换热量大小。通过以上3 个指标的对比,可以进一步判断以上3种流道的综合 性能优劣,其综合性能对比如表4所示。

表4 不同液冷流道j和f指标对比

Table 4 Comparison of j and f indicator in

different liquid cooling channels

流道类型	j/f	$j/(f^{1/2})$	$j/(f^{1/3})$
回型	32 800	212	3.95
螺旋型	15 800	112	2.15
树型	204 000	3 120	3.59

从表4的分析中可以看到,虽然在动力电池温度 分布上树型流道没有优势,但是在相同流量下换热能 力的增加以及相同流动阻力下换热能力的增加上,树 型流道的性能相比其他流道高一个数量级,且在水泵 功耗的增加量方面与其他2个流道处于相同水平。这 说明树型流道在流动换热性能的提升方面仍然具有较 大潜力且不会带来水泵功耗的大幅增加,树型流道是 一种较为合适的动力电池液冷板流道形式,具有一定 的工程应用价值。

#### 4 结论

 1)课题组建立了单体动力电池的三维生热及导 热模型,得到了电池表面温度的非均匀分布特性;

2)根据分形理论及电池表面的温度分布特性,课题组设计了3种由水泵驱动的液冷流道,并验证了三

维共轭传热模型的有效性;

3)课题组采用j和f之间的比值评价了3种流道 换热能力与流速、流动阻力、泵功之间的关系,发现采 用树型流道时电池表面的温度均匀性最好,且在流动 换热性能方面仍然具有较大提升空间,同时不会带来 水泵功耗的大幅增加。

#### 参考文献:

- 袁昊,王丽芳,王立业.基于液体冷却和加热的电动汽车电池热管 理系统[J].汽车安全与节能学报,2012,3(4):371-380.
- [2] 周萍,孙林,郑岳久,等.车用镍钴锰三元锂离子电池过放电后的 性能实验研究[J].汽车安全与节能学报,2017,8(1):72-78.
- [3] 张晓强, 邹慧明, 刘稷轩, 等. 电动汽车电池温控的热负荷数值分析[J]. 制冷与空调, 2017, 17(1):22-26.
- [4] 于建新.电动汽车电池组热管理系统的研究与设计[D].长春:吉 林大学,2016:66-70.
- [5] 于振涛,纪聪.电动汽车磷酸铁锂电池组热特性研究[J].机械设 计与制造工程,2016,45(12):87-90.
- [6] 方凯,涂屾,汤玉婷. 电池组风冷系统结构设计与仿真优化研究
   [J]. 机电工程,2018,35(9):986-990.
- [7] 饶中浩,张国庆. 电池热管理[M]. 北京:科学出版社,2015:88-101.
- [8] LIU Zhongming, WANG Yuxin, ZHANG Jun, et al. Shortcut computation for the thermal management of a large air-cooled battery pack[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 66 (sup. 1/2):445 – 452.
- [9] HARMEL J, OHMS D, GUTH U, et al. Investigation of the heat balance of bipolar NiMH-batteries [J]. Journal of Power Sources, 2006,155(1):88-93.
- [10] PESARAN A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110 (2): 377 – 382.
- [11] 付正阳,林成涛,陈全世.电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J]. 公路交通科技,2005,22(3):119-123.
- [12] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energybalance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5-12.
- [13] HE Fan, LI Xuesong, MA Lin. Combined experimental and numerical study of thermal management of battery module consisting of multiple Li-ion cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72(9):622-629.
- [14] MAHAMUD R, PARK C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196 (13):5685 - 5696.
- [15] ZHANG Zhuqian, JIA Li, ZHAO Nan, et al. Thermal modeling and cooling analysis of high-power lithium-ion cells [J]. Journal of Thermal Sciences, 2011, 20:570 - 575.
- [16] 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.
- [17] 罗马吉,傅立运,詹志刚,等.质子交换膜燃料电池冷却流道的设计与分析[J].武汉理工大学学报,2011,33(4):601-603.
- [18] BEJAN A. Construactal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40:799-816.