

[引用本文]田浩,潘垂宇,张群.一种基于热力学焓理论的车载锂电池组水冷系统设计优化[J].暖通空调,2021,51(5):79-87

一种基于热力学焓理论的车载锂电池组水冷系统设计优化

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 田浩[☆]

中国第一汽车股份有限公司新能源开发院 潘垂宇

中国移动通信集团有限公司 张群[△]

摘要 基于热力学焓理论,对车载锂电池组的水冷系统进行了优化设计,建立了焓损失模型。针对一款电动 SUV 车型锂电池,通过理论分析和实际测试,比较了 4 种典型水冷布局的控温效果。在不同放电条件下,分别测试了 4 种水冷布局下单体电池的最大温差及出现位置。测试结果表明:当冷却水首先流经电池组中央区域时,锂电池组传热网络的焓损失最小,电池组的实测最大温差为 3.1 K,低于其他 3 种水冷布局,各单体电池的最高温度也比其他 3 种水冷布局低 1.1~5.9 K。理论分析和实验结果较吻合,证明焓理论可用于车载锂电池散热优化设计和改进。

关键词 汽车 锂电池 焓分析 热管理 水冷系统 优化

Design optimization of water cooling system for vehicle lithium battery pack based on thermodynamic exergy theory

By Tian Hao[☆], Pan Chuiyu and Zhang Qun

Abstract Based on the thermodynamic exergy theory, optimizes the water cooling system of vehicle lithium battery pack and establishes an exergy loss model. For the lithium battery of an electric SUV car, compares the temperature control effects of four typical water-cooled layouts by means of theoretical analysis and practical test. Under different discharge conditions, tests the maximum temperature difference and location of single cell in four kinds of water-cooled layout. The test results show that the exergy loss of heat transfer network for the lithium battery pack is the smallest when the cooling water first flows through the central area of the battery pack. The measured maximum temperature difference of the battery pack is 3.1 K, which is lower than the other three water-cooled layouts, and the maximum temperature of each single cell is 1.1 to 5.9 K lower than the other three water-cooled layouts. The theoretical analysis is in good agreement with the experimental results, which proves that the exergy theory can be used in the optimization design and improvement of the heat dissipation of the vehicle lithium battery.

Keywords vehicle, lithium battery, exergy analysis, thermal management, water cooling system, optimization

★ Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, China

0 引言

近年来,随着新能源汽车的快速普及和性能的提升,锂电池组功率密度不断提高,电池发热对电池组性能的影响及锂电池充放电过程的热安全性越来越受到重视^[1]。研究表明,在相同的充放电倍率下,锂电池内部温度均匀性越高,其整体动力输出性能越好^[2-3]。与传统的风冷式散热相比,水冷

散热效果更好,热安全性更高,特别是对锂电池包内部各单体电池温度均匀性的控制效果远好于风

☆ 田浩,男,1985 年 1 月生,博士,副高级研究员

△ 张群(通信作者)

100032 北京市西城区金融大街 29 号中国移动通信集团有限公司采购共享中心

E-mail: 13911209604@139.com

收稿日期:2021-01-11

修回日期:2021-01-28

冷。近年来世界各大新能源汽车企业都投入巨资改善锂电池液冷技术^[4],一方面降低充放电过程的过热风险,另一方面提高电池组内部温度均匀性,从而提升整车动力性能。

在现有的电池液冷技术中,水冷具有成本低、热容量大、可控性好、安全性高等优势,是未来主流的锂电池高效冷却方式^[5],因此,对锂电池组水冷架构设计进行热力学分析和优化,具有实用性和应用前景。

1 锂电池组水冷布局设计与优化

目前,市场上单体锂电池包集成后的车载锂电池组如图 1 所示。由于内部包含许多传感器和线路、管路,加上整车安装空间的限制,锂电池组结构设计十分紧凑,导致其在充放电过程中产生的热量容易在内部聚集。因此,有必要优化锂电池组冷却架构(水冷布局),在相同的充放电条件和冷媒流量下,使管路结构冷却效果最好。

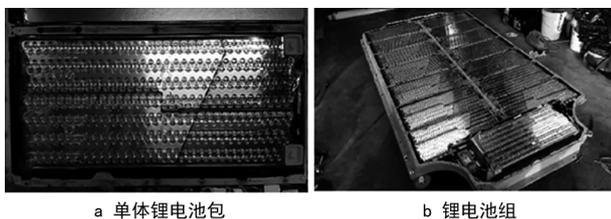


图 1 锂电池结构图

目前国际上较主流的锂电池组冷却架构研究方向包括:

1) 优化管路形状和布局,强化管路内部冷媒流动与传热性能。例如,用交错排列的单元网格结构增强流体的扰动^[6];选用多孔介质增加接触换热面积^[7];优化风道尺寸和形状,设计不规则形状的微流体通道,修正空气的流动边界层,强化换热效果^[8-9];在锂电池封装材料中掺入高热容性材料,以降低汽车行驶过程中急速放电行为对电池的热应力冲击^[10];等。

2) 建立锂电池的热-电耦合模型,从电化学生产热机理层面提出更高效、更经济的散热方式。例如,通过对不同电极材料在不同环境下放电性能和产热特性的联合测试,建立新的锂电池电极热分布模型,预测锂电池在不同放电状态下的产热密度分布^[11-13];通过建立等效电路模型实现对锂电池热管理过程中 SOC(荷电状态,表征电池剩余容量)和续航能力的预测^[14];用单粒子模型模拟锂电池

电极的产热行为特征^[15-16];将不同热动力学特性的多孔介质模型融入电化学模型中,优化电极热流密度分布,从而提高锂电池的放电热均衡特性^[17];等。

3) 添加新型材料,改变锂电池包的热响应特性。例如,利用辅助相变材料(PCM)和金属膜材料,改善锂电池在不均衡热冲击下的峰值温度分布,提高锂电池在复杂使用环境下的温度均衡能力^[18-19];通过引入铝基多孔金属膜,改善锂电池在特定温度区间内的相变蓄热特性,提高锂电池在某些极端低温或高温应用场景下的热耐受能力,延长使用寿命^[20];利用环路热管极强的相变传热能力,设计一组特殊结构的微型热管,并优化其布局,在不同的放电热流分布条件下实现对锂电池包的快速温度均衡^[21];利用锂电池电化学生产热机理,用添加了方向性导热能力更强的特种磁性材料的液体,进行微流量、高效散热设计和实验验证^[22];等。

上述研究方法在特定的锂电池结构和使用场景下,针对锂电池传热优化设计、新型材料选择、新型产热模型构建等方面取得了突破,并在相关的实验测试中获得了成功,但其成果大多停留在理论建模或者实验室原理样机层面,在工程领域的可复制性和可推广性相对较弱。从分析方法上看,目前的研究普遍采用针对特定问题提出特定解决方案,再用实验观察和场景测试作为方案验证和修订的手段^[23-25],相对来说,缺少一种普适性的优化设计工具。

2 锂电池组散热过程焓模型

近些年,随着焓理论在化工、太阳能等诸多能源领域研究和相关工程实践中越来越多的成功应用,其对从微纳米尺度到宏观尺度的流动和传热过程的设计指导、热力学优化效果得到了越来越多的验证^[26-30]。利用焓理论对锂电池组冷却架构进行热力学优化设计是可行的。Shah 研究了服务器散热过程的焓损失特性,提出了空气流经服务器发热主板表面时的焓损失模型^[31]:

$$\Psi_t = \Psi_h + \Psi_f = \frac{Q^2}{Lmc_p} \frac{D}{St} \frac{T_a}{T_a^2} + \frac{8m^3L}{\rho^2} \frac{f}{DA^2} \frac{T_a}{T_a} \quad (1)$$

式中 Ψ_t 为总焓损失, W; Ψ_h 为传热焓损失, W; Ψ_f 为流动焓损失, W; Q 为热流, W; D 为管路直径, m; T_a 为冷却水进口温度, K; L 为管路长度, m;

m 为管路中冷却水质量流量, kg/s ; c_p 为冷却水比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; St 为斯坦顿数; \bar{T}_a 为沿主表面的冷却水平均温度, K ; ρ 为冷却水密度, kg/m^3 ; f 为管路的摩擦阻力系数; A 为有效传热面积, m^2 。

其中:

$$Q = hA(T - \bar{T}_a) \quad (2)$$

$$\bar{T}_a = T_a + \frac{(T - T_a) - (T - T_o)}{\ln\left(\frac{T - T_a}{T - T_o}\right)} \quad (3)$$

$$St = \frac{h}{\rho v c_p} \quad (4)$$

式(2)~(4)中 h 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T 为主板表面温度, K ; T_o 为冷却水出口温度, K ; v 为管路中冷却水流速, m/s 。

式(1)表明,总熵损失由传热和流动 2 个环节的熵损失构成。

整理得到上述冷却过程熵损失的计算模型:

$$\Psi_i = \Psi_h + \Psi_f = \frac{4A}{\pi DL} \frac{(T - \bar{T}_a)T_a}{\bar{T}_a^2} Q + \frac{8m^3 L}{\rho^2} \frac{f}{DA^2} \frac{T_a}{T_a} \quad (5)$$

锂电池热流量设定为 30 W , 换热器传热面积设定为 0.12 m^2 , 对流传热系数为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。冷却水进口温度 T_a 分别设定为 $278, 283, 293, 300 \text{ K}$, 冷却水流速范围设定为 $0.1 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 。通过逐渐增大冷却水的流速, 应用式(5), 对锂电池与冷却水之间的流动和传热过程进行熵损失计算, 得到如图 2 所示的热力学分析结果。

为了突出主要影响因素, 图 2 中的纵坐标采用归一化处理。归一化熵损失定义为每个工况熵损失与所有工况中最大熵损失之比, 即 $\Delta E_x / \Delta E_{x, \max}$; 归一化温度定义为每个工况锂电池温度与所有工况中最高温度之比, 即 $T_b / T_{b, \max}$ 。

从图 2 可以看出, 在给定锂电池热流 Q 和换热面积 A 的前提下, 系统的最小熵损失工况对应的冷却水最优流速 v_0 随着冷却水入口温度变化而改变。由于冷却水入口温度 T_a 为整个系统的最低温度, 因此可以作为系统零熵参考点温度 T_o , 便于分析系统热力学效率和能源效率。根据文献 [31] 的建议, 在某个给定工况下, 当体系的熵损失低于其相同工况下最大熵损失的 20% 时, 可以认

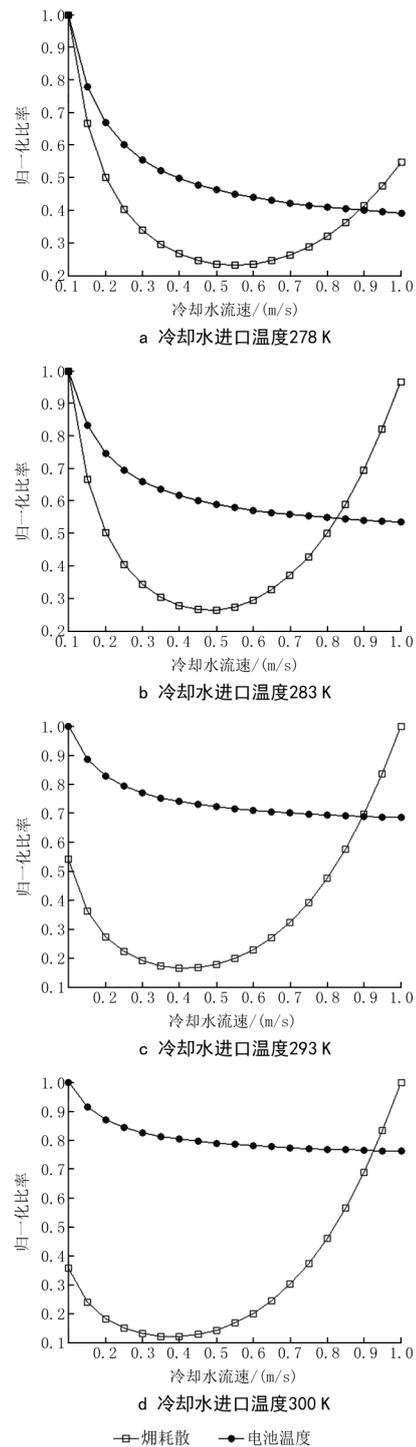


图 2 单体锂电池在不同冷却水进口温度下熵损失分布

为体系达到了最低可以接受的热力学优值状态, 此时体系的热力学效率达到优值区间。当图 2a~d 4 种工况归一化熵损失取值为 20% 时, 对应的冷却水速度区间为 $0.35 \sim 0.55 \text{ m/s}$, 计算得到此流速区间内锂电池包温度范围为 $278 \sim 300 \text{ K}$, 对应的水泵效率为 $46\% \sim 88\%$, 即为当体系取得热力学

优值状态时,锂电池包的优值温度区间和输配系统的优值经济运行区间。具体分析结果见图 3。

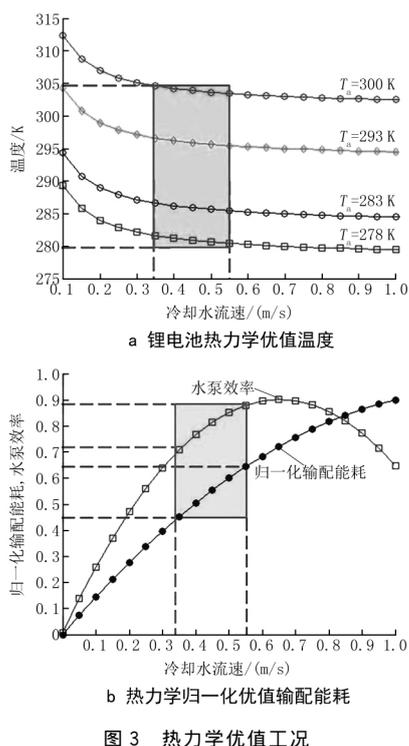


图 3 热力学优值工况

进一步观察图 2、3,在给定冷却水入口温度 T_a (系统零焓点参考温度 T_0) 条件下,系统最小焓损失工况点不仅对应冷却水最经济流量 m_e (代表系统最经济输配能耗),同时也对应锂电池的最佳平衡温度 T_{op} ,因此,最小焓损失模型可以作为系统最优热力学效率和最小能耗的评价模型,为后续锂电池组水冷架构的优化设计提供有效的分析工具。

3 水冷架构及工况设计

为了进一步验证上述焓损失模型的正确性,设计了图 4 所示的 4 种典型车载锂电池组散热系统架构,图 4a~d 分别将 24 个锂电池包(从左至右编号 1~24,每个电池包包含 4 个串联单体锂电池)设计成下进上出、左进右出、中进侧出、分区并联 4 种典型水冷架构。其中,实线代表冷却水进水管路,虚线代表冷却水出水管路。

目前,国际上较常用的锂电池组水冷布局为图 4a 和 4b 2 种,如特斯拉 MODEL 和宝马 i3。但根据汽车厂商实测结果,图 4a、b 架构中间区域的电池包(编号 10~15)因热量积累易发生过热现象,影响电流、电压的一致性,降低电池组整体充放电性能。图 4c、d 架构是在图 4a、b 基础上进

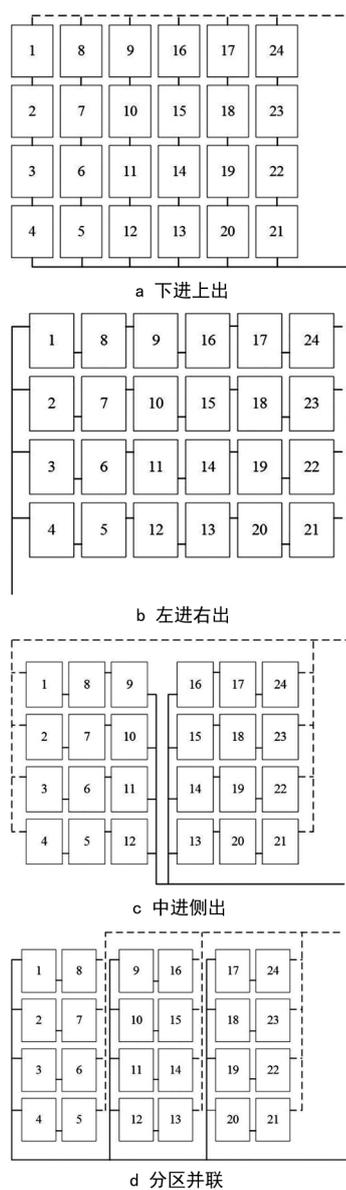


图 4 车载锂电池组水冷布局设计

行优化设计的,在增加有限的水系统外包络尺寸,少量的加工、装调成本及基本不改变水压分布的前提下,从热力学角度进一步优化中心区域锂电池包的温度均匀性和热力学平衡温度,可达到更好的控温效果,有效提升锂电池的充放电性能和汽车续航里程,在工程上是可以接受的^[11-12]。

为便于比较,将系统零焓点参考温度(即冷却水进口温度)统一设定为工程上常用的 3 种温度: 283、293、300 K。表 1、2 给出了锂电池包基本信息和水冷测试条件,图 5 给出了锂电池标准产品图,图 6 给出了锂电池组水冷架构的实物图片。

表 1 锂电池包基本信息

锂电池种类	产品标准	电池包模型	电芯	封装类型	产品图
18650 圆柱形锂电池	ROHS	INR18650 7S16P 25.2 V 51.2 A	INR18650 3200 mA·h DLG	7S16P+PCM+Socket	见图 5

表 2 锂电池水冷测试条件

电池包数量	进口水温/K	放电温度/K	放电倍率	冷却水流速/(m/s)	水冷系统架构
24(6×4,封装见图 6a)	283,293,300	273,300,313	1C,3C	0.1~1.0	见图 6b

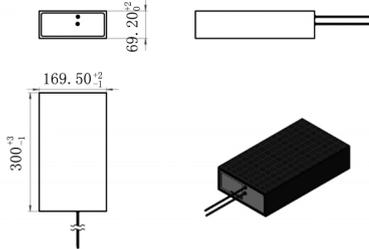


图 5 18650 锂电池产品图



图 7 车载锂电池组动力集成测试分析平台



a 锂电池包封装布局 b 水管和冷板布局

图 6 锂电池包水冷系统架构实物图

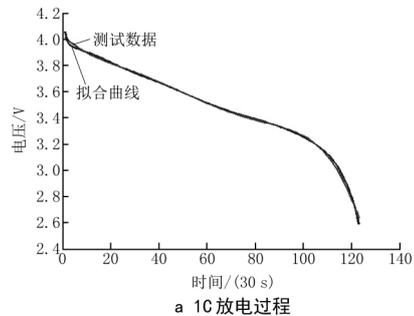
电池在规定的时间内放出其额定容量时所需要的电流值,在数值上等于电池额定容量的倍数,通常以字母 C 表示。1C 表示 1 h 完全放电时的电流强度。如标称为 2 200 mA·h 的 18650 锂电池在 1C 强度下 1 h 放电完成,此时该放电电流为 2 200 mA。

电池充放电过程使用如图 7 所示的车载锂电池组动力集成测试和分析平台,对充放电过程的电流、电压等参数进行实时采集、记录和分析,该平台具备高度的自动化、集成化和智能分析功能,结合图 6 的水冷架构平台,对图 4 设计的 4 种冷却布局进行逐一测试分析。

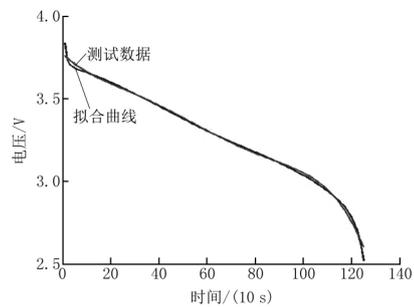
4 结果分析

根据集成测试平台给出的实时监测结果,图 8 给出了 18650 型单体锂电池在 1C(3 A 持续 3 600 s,300 K)和 3C(9 A 持续 1 200 s,300 K)标准放电条件下的放电过程电压拟合曲线。

利用图 8 的电压拟合曲线,对图 2 所示算例的锂电池,在 1C 和 3C 的标准放电工况下的水冷过程进行归一化焓损失分析,计算结果见图 9。



a 1C 放电过程



b 3C 放电过程

图 8 1C 和 3C 标准放电过程电压拟合曲线

从图 9 可以看出,在不同的放电倍率、放电功率和冷却水进口温度条件下,锂电池水冷过程的焓损失随着冷却水流速的变化分布规律相似,即在给定的 1C 和 3C 放电边界下,当焓损失最小时,冷却水的最优流速集中在 0.3~0.5 m/s 范围,这也证

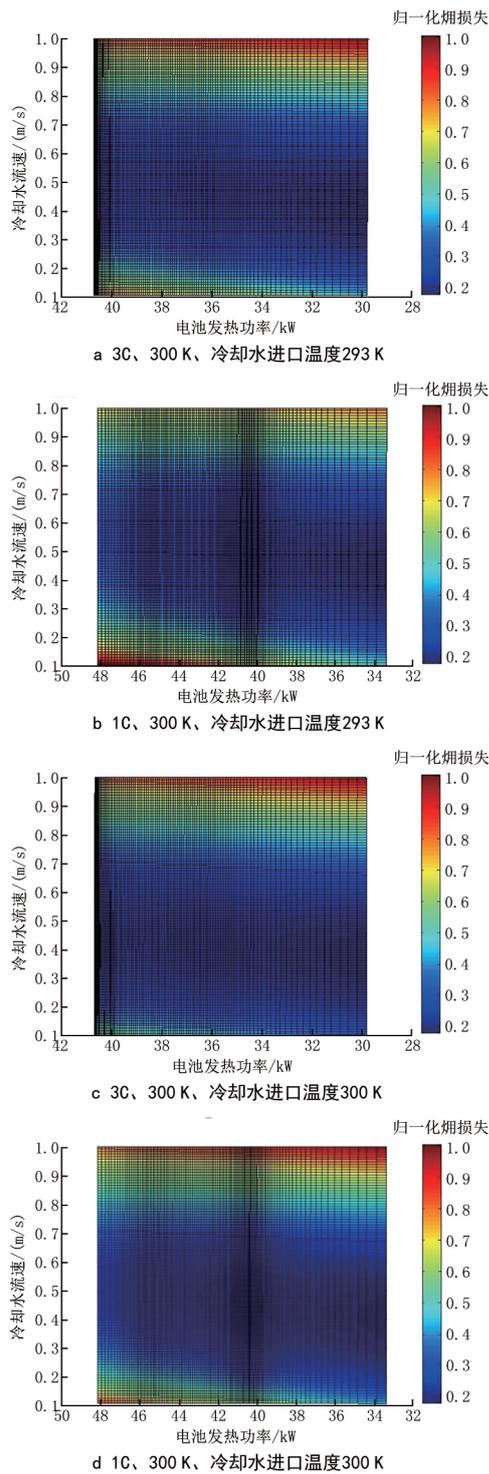


图9 锂电池水冷过程归一化焓损失分析

明了用焓损失模型对锂电池放电过程水冷散热的热力学性能进行定量分析的可行性,也为后续的实际测试给出了最优参数选择。

利用焓分析模型对图 4a~d 所示的锂电池组水冷架构进行优化分析,并进行实际测试。在达到

系统焓损失最小时,也就是在冷却水取得最优流速条件下,4 种水冷架构下的 24 个锂电池包在电池放电过程中的最优热力学平衡温度分别如图 10、11 所示。

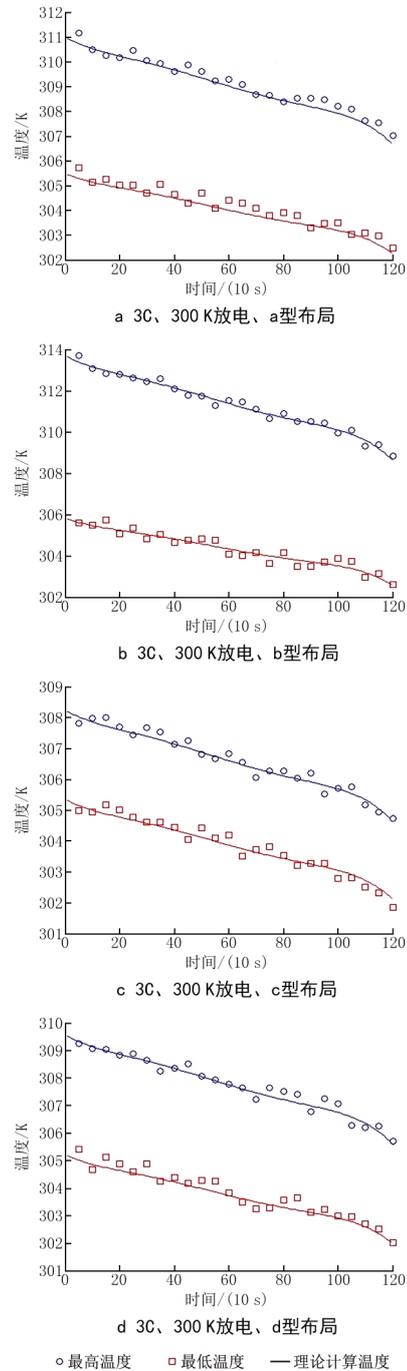


图 10 锂电池包放电过程最优热力学温度分布 1 (3C、进口水温 293 K)

由图 10、11 可见,对于 4 种水冷架构,在 1C 和 3C 的标准放电条件下,24 个锂电池包温度的焓模型理论计算结果和实际测试结果偏差均在 ± 0.2

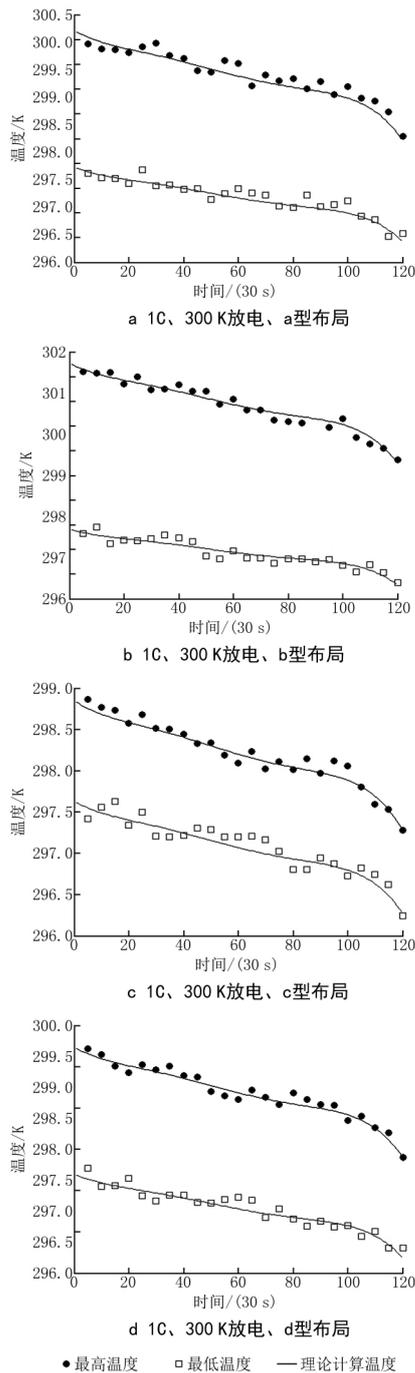


图 11 锂电池包放电过程最优热力学温度分布 2 (1C、进口水温 293 K)

K 内,模型计算精度满足分析需求。模型分析结果和实测结果分布趋势一致,证明了焓模型对锂电池水冷过程热力学分析和优化设计的可行性和正确性。

综合上述分析和测试结果,表 3、4 给出了 4 种锂电池水冷架构的最优热力学性能。其中,最高温度定义为 24 个锂电池包在放电过程中出现的最高

温度;最大温度梯度定义为在相同的放电时刻,24 个电池包中的最高温度与最低温度之差。表 3、4 中的每一组数据都代表在对应水冷布局下,系统最小焓损失工况时的最优热力学参数。

表 3 锂电池组最优热力学性能(3C、300 K)

架构编号	最高温度/K	最大温度梯度/K	最小焓损失/W
a	311.2	5.5	50.53
b	313.7	8.1	52.76
c	307.8	3.1	47.22
d	309.3	4.4	48.43

表 4 锂电池组最优热力学性能(1C、300 K)

架构编号	最高温度/K	最大温度梯度/K	最小焓损失/W
a	300.0	2.6	7.06
b	301.5	4.2	7.52
c	298.9	1.5	6.51
d	299.6	2.2	6.78

从表 3、4 可知,在相同的放电条件(倍率、温度)和冷却水进口温度下,水冷架构 c,即冷却水先流经电池组中心区域的布局热力学性能最好。其在放电过程中锂电池包出现的最高温度、最大温度梯度和系统最小焓损失均低于其他 3 种水冷布局,即:水冷架构 c 的热力学性能最优,可以作为对现有锂电池组水冷架构的优化设计。未来对于锂电池组的集成式设计可以参考水冷架构 c 的布局,有助于降低电池生产和配套控温成本。

5 结论与展望

基于最小焓损失模型,通过理论分析,给出了车载锂电池组最优水冷架构设计,以及对应的热力学参数的最优取值。实际测试验证了该方法的可行性和正确性。得到的结论如下:

1) 将传热量 Q 、传热面积 A 及管路总长度 L 作为约束条件,焓损失模型可以定量给出热力学最优的冷却水流速 v_0 。

2) 在给定冷却水入口温度 T_{0a} (系统零焓点参考温度 T_0)条件下,系统最小焓损失工况点不仅对应冷却水最经济流量 m_0 (代表系统最小输配能耗),同时也对应锂电池的最佳平衡温度 T_{op} ,因此,最小焓损失模型可以作为系统最优热力学效率和最小能耗的评价模型。

3) 在不同的放电倍率、放电功率和冷却水进口温度条件下,锂电池水冷过程的焓损失随着冷却水速度的变化分布规律相似。

4) 在给定的 1C 和 3C 放电条件下,当焓损失最小时,冷却水的最优流速在 0.3~0.5 m/s 范围内。

5) 对于 4 种水冷架构,在 1C 和 3C 放电条件下,放电过程中 24 个锂电池包温度的焓模型理论计算结果和实际测试结果分布趋势一致,模型计算偏差均在 ± 0.2 K 内,满足分析需求。

6) 在相同的放电条件(倍率、温度)和冷却水进口温度下,冷却水先流经电池组中心区域的构型具有最好的热力学性能,相比其他 3 种构型,c 构型电池包最高温度低 $1.5\sim 5.9$ K,最大温度梯度低 $1.3\sim 5.0$ K,最小焓损失降低 $1.2\sim 5.5$ W。

7) 焓模型不仅可以对锂电池组的水冷系统进行优化设计和热力学性能评价,还为今后车载锂电池组的集成式设计提供了一条新的技术路线。

参考文献:

- [1] 谈秋宏. 电动汽车用锂离子电池的热特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2018:48-49
- [2] 黄维斐,常国峰. 车用动力锂离子电池热响应特性研究进展[J]. 电源技术,2017,41(2):321-324
- [3] 胡棋威,文斌,王兆聪. 锂离子电池组冷却技术研究进展[J]. 船电技术,2016(2):53-58
- [4] 李军求,吴朴恩,张承宁. 电动汽车动力电池热管理技术的研究与实现[J]. 汽车工程,2016,38(1):22-27
- [5] SUN H, DIXON R. Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack[J]. Journal of Power Sources, 2014, 272(1):404-414
- [6] YANG N, ZHANG X, LI G, 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]. Applied Thermal Engineering,2015, 80:55-65
- [7] MOHAMMADIAN S K, ZHANG Y. Cumulative effects of using pin fin heat sink and porous metal foam on thermal management of lithium-ion batteries [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 375-384
- [8] PARK H. A design of air flow configuration for cooling lithium-ion battery in hybrid electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2013, 239: 30-36
- [9] WANG T, TSENG K J, ZHAO J, et al. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies[J]. Applied Energy, 2014, 134: 229-238
- [10] YANG T, YANG N, ZHANG X, et al. Investigation of the thermal performance of axial flow air cooling for the lithium-ion battery pack [J]. International Journal of Thermal Science,2016,108: 132-144
- [11] BASU S, HARIHARAN K S, KOLAKE S M, et al. Coupled electrochemical thermal modeling of a novel Li-ion battery pack thermal management system [J]. Applied Energy,2016, 181: 1-13
- [12] LIN X, PEREZ H E, MOHAN S, et al. A lumped parameter electro-thermal model for cylindrical batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 257: 1-11
- [13] LUO W, LYU C, WANG L, et al. A new extension of physics-based single particle model for higher charge-discharge rates[J]. Journal of Power Sources, 2013, 241: 295-310
- [14] CHEN X, SHEN W, CAO Z, et al. Adaptive gain sliding mode observer for state of charge estimation based on combined battery equivalent circuit model [J]. Computational Chemical Engineering,2014, 64: 114-123
- [15] LIN C, TANG A. Simplification and efficient simulation of electrochemical model for Li-ion battery in EVs[J]. Energy Procedia,2016, 104: 68-73
- [16] GUO M, SIKHA G, WHITE R E. Single-particle model for a lithium-ion cell; thermal behavior [J]. Journal of Electrochemical Society,2011, 158: A122
- [17] GRECO A, JIANG X. A coupled thermal and electrochemical study of lithium-ion battery cooled by paraffin/porous-graphite-matrix composite [J]. Journal of Power Sources, 2016, 315:127-139
- [18] LI W Q, QU Z G, HE Y L, et al. Experimental study of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using porous metal foam saturated with phase change materials [J]. Journal of Power Sources, 2014, 255: 9-15
- [19] ALIPANAH M, LI X. Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 102: 1159-1168
- [20] WANG Z, ZHANG Z, JIA L, et al. Paraffin and paraffin/aluminum foam composite phase change material heat storage experimental study based on thermal management of Li-ion battery[J]. Applied Thermal Engineering,2015, 78: 428-436

