

田晟,肖佳将.锂离子电池模组热管-铝板嵌合式散热结构温度仿真分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):67-72. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.010

TIAN S, XIAO J J. Temperature Simulation and Analysis of Lithium-Ion Battery Module Based on Heat Pipe-Aluminum Plate Chimeric Cooling Structure[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):67-72. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.010

锂离子电池模组热管-铝板嵌合式散热结构 温度仿真分析

田晟*,肖佳将

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要:动力电池合适的工作温度对电动汽车的安全、可靠运行至关重要,为了强化换热,提高电池组的散热性能,设计了热管-铝板嵌合式散热结构应用于锂离子电池模组,通过仿真分析对比了3种不同散热条件下电池模组的散热效果和均温性.结果表明,采用热管-铝板嵌合式散热结构比单一使用热管或铝板具有更好的散热效果和均温性.对电池间铝板厚度和热管数量对模组最高温度的影响进行了双因素方差分析,发现铝板厚度和热管数量的增加都能降低模组的最高温度,随着其进一步增加,影响效果逐渐降低;在自然对流条件下,铝板厚度对最高温度的影响更为明显,同时从性价比的角度出发,应优先考虑适当增加铝板厚度以优化电池组散热性能.

关键词:锂离子电池;热管理;热管;仿真;双因素方差分析

中图分类号:U463 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)02-0067-06

Temperature Simulation and Analysis of Lithium-Ion Battery Module Based on Heat Pipe-Aluminum Plate Chimeric Cooling Structure

TIAN Sheng, XIAO Jiajiang

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The proper working temperature of power battery is very important for the safe and reliable operation of electric vehicles. In order to strengthen heat transfer and improve the cooling performance of the battery pack, a heat pipe-aluminum plate chimeric cooling structure was designed and applied to the lithium-ion battery module. The cooling effect and temperature uniformity of the battery module under 3 different cooling conditions were compared by simulation. The results show that the use of heat pipe-aluminum plate chimeric cooling structure has a better cooling effect and temperature uniformity than the single use of heat pipe or aluminum plate. In addition, a Two-Way ANOVA was performed on the influence of the thickness of aluminum plates between the batteries and the number of heat pipes on the maximum temperature of the module. The increase in the thickness of aluminum plates and the number of heat pipes can reduce the maximum temperature of the module, as they increase further, the effect decreases. The thickness of the aluminum plates has a greater influence on the maximum temperature under the condition of natural convection, and from the perspective of cost, the thickness

收稿日期:2019-05-20

基金项目:国家留学基金项目资助(201706155003);广东省科技计划项目资助(2015A080803001)

*通信作者, E-mail:shitian1@scut.edu.cn

of the aluminum plates should be given priority to optimize battery cooling performance.

Keywords: lithium-ion battery; thermal management; heat pipe; simulation; two-way ANOVA

锂离子电池由于其比能量和比功率高、自放电率低、容量大、使用寿命长等优点,是电动汽车最常用的动力电池之一^[1-2]。但是,锂离子电池在充、放电过程中会产生大量的热量,容易造成电池组温度过高,且大型、成组化地使用电池增大了电池内部温度的不均匀性,电池温度过高和分布不均会影响电池的使用性能,加速衰减,对车辆安全行驶造成威胁。温度升高还会进一步触发电池内部的其他热化学反应,导致更多热量的积聚,当电池温度超过 80 °C 可能引发电池组热失控发生燃烧或爆炸^[3-6]。

热管具有导热能力强、结构紧凑灵活、使用寿命长、维护费用低等优点,这些优良特性使得热管在动力电池热管理领域具有良好的应用前景^[7-8]。Feng 等^[9]和曾健等^[10]设计了基于热管的锂离子电池散热系统,研究表明:使用热管散热能有效地降低电池温度,但在单独使用热管的条件下均温效果并不明显。Murashko 等^[11]和 Smith 等^[12]将铝板引入电池热管散热系统中,通过铝板的集热作用将电池在充、放电过程中产生的热量传导至热管蒸发段,再通过热管冷凝段与外界进行热量交换实现散热,取得了更好的散热效果和均温效果。

本文设计了热管-铝板嵌合式散热结构用于锂离子电池模组散热,结合电池生热模型,对不同散热条件下的模组温度场进行了仿真,并对电池间铝板厚度与热管数量对模组最高温度和温差的影响进行了双因素方差分析。

1 电池模组散热结构与生热模型

1.1 热管-铝板嵌合式散热结构设计

设计的电池模组由 6 块锂离子电池单体串联而成,为提高模组的散热效果和单体间的均温性,在电池间隙间添加导热能力优良的铝板作为传热材料,同时将热管应用于散热装置。考虑到在薄铝板上加工方形孔的制造工艺比较复杂,在铝板上开设与热管厚度相等的凹槽,交错分布在铝板两侧,热管嵌入凹槽中呈等距排列,热管蒸发段与冷凝段长度比为 1 : 0.6^[13]。电池产生的热量绝大部分传导至铝板再传至热管的蒸发段,另外一部分直接通过电池与热管的接触面传给热管蒸发段,热管冷凝段暴露在空气中与空气自然对流换热。电池模组初始散热结构设计如图 1 所示。电池单体的参数参考文献[14],如表 1 所示。

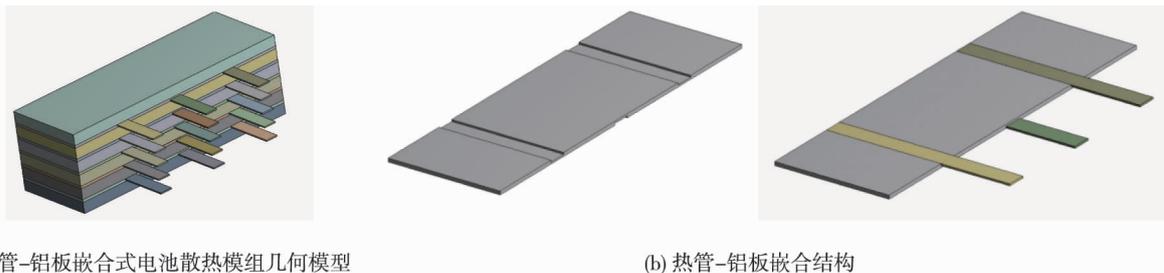


图 1 电池模组散热结构

表 1 电池单体参数

参数特性	参数名称	参数值
几何特性参数	长/mm	190.0
	宽/mm	65.0
	厚/mm	8.8
电特性参数	标称电压/V	3.6
	标称容量/Ah	10.0
	常温下内阻/ Ω	5.5×10^{-3}
热物性参数	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 950.7
	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	300.0
	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda_x = \lambda_y = 1.5, \lambda_z = 1$

1.2 生热模型的建立

由于锂离子电池内部结构和生热过程中所包含的电化学反应较为复杂,因此假设:(1)电池的各部分材质均匀,物理特性不变;(2)相同材料同方向上各处导热系数恒定一致;(3)电池内部不存在对流换热和辐射换热;(4)电池各处电流密度相同.依据傅里叶导热基本定律和能量守恒定律,在直角坐标系中得到电池的瞬态导热微分方程如式(1)所示.

$$\rho_b c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_v \quad (1)$$

式中: ρ_b 为电池等效密度; c_p 为电池等效比热容; T 为电池热力学温度; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 为电池各方向等效热导率; q_v 为电池生热速率.

1.2.1 热物性参数的获取

电池单体的热物性参数主要为式(1)中的密度、比热容和各方向的导热系数,可根据(2)~式(6)获得.

$$\rho_b = m/V = \sum_i \rho_i V_i / V; \quad (2)$$

$$c_p = \sum_i \rho_i c_i V_i / \rho_b V; \quad (3)$$

$$\lambda_x = \sum_i \lambda_i d_{x_i} / L_x; \quad (4)$$

$$\lambda_y = \sum_i \lambda_i d_{y_i} / L_y; \quad (5)$$

$$\lambda_z = L_z / \left(\sum_i d_{z_i} / \lambda_i \right). \quad (6)$$

式中: m 为电池单体质量; V 为电池体积; ρ_i 为电池各组分的密度; V_i 为电池各组分的体积; c_i 为电池各组分的比热容; L_x, L_y, L_z 为电池各方向的长度; λ_i 为电池各组分热导率; $d_{x_i}, d_{y_i}, d_{z_i}$ 为第 i 层串联热阻层的厚度.

1.2.2 生热速率的计算

电池单体的生热速率计算采用 Bernardi 等^[15] 提出的电池生热模型,其具体表达式如式(7)所示.

$$q_v = \frac{I}{V} \left[(E_{oc} - U) - T \frac{dE_{oc}}{dT} \right] = \frac{1}{V} \left(I^2 R_r - IT \frac{dE_{oc}}{dT} \right). \quad (7)$$

式中: I 为充放电电流; E_{oc} 和 U 为电池开路电压和端电压; R_r 为电池内阻,为简化计算将其视为定值^[14]; dE_{oc}/dT 为温度影响系数,其变化范围极小,取 $2.2 \times 10^{-4} \text{ V/K}$ ^[16].

代入相关数据,式(7)可写成电池生热速率 q_v 关于放电电流 I 的二次函数

$$q_v = 50.607I^2 - 593.421I. \quad (8)$$

对电池在 2C 放电倍率下的温度场进行仿真分析,放电电流取负值,可得到相应电池单体的生热速率为 $32\ 111.22 \text{ W/m}^3$.

2 温度场仿真

2.1 网格模型的建立

网格质量会影响计算结果的精度和计算时间,一般情况下网格划分越细密得到的计算结果越精确,但网格数量过于庞大会造成计算量过大,增加计算时间.以电池模组散热结构的最小边界尺寸 1 mm 为最大网格尺寸,得到电池模组网格模型如图 2 所示,对网格进行质量检查,单元质量均在 0.9 以上,畸变度接近 0,其他网格质量检查条件均很好地满足要求.

2.2 初始及边界条件的确定

热量传递方式主要有热传导、热辐射和热对流 3 种方式,忽略辐

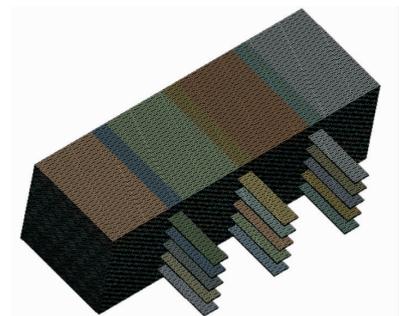


图 2 电池模组网格模型

射换热, 模組的传热方式为热传导和对流换热. 热传导包括电池与铝板接触壁面、铝板凹槽与热管接触壁面及热管与电池直接接触壁面的热量传递. 对流换热包括电池、铝板、热管冷凝段与空气接触壁面的自然对流换热, 为第3类边界条件, 对流换热系数 $h = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [17], 模組的初始温度设为 293.15 K . 不考虑热管内部复杂的相变过程, 将其视为高导热率的均匀导热体, 热管当量导热系数达到 10^3 数量级后, 实验与仿真结果吻合度较高 [18], 因此设定热管当量导热系数 $\lambda = 8 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

2.3 仿真结果分析

在 Fluent 中对电池模組进行温度场仿真, 选择基于压力-速度耦合的 SIMPLE 求解算法, 能量和动量控制方程选用二阶迎风差分格式, 时间步长设为 1 s , 单位时间步长迭代 20 次. 计算时间为电池在 2C 放电倍率下放电 80% 所需的时间 1440 s , 仿真结果如图 3 所示.

从图 3 的仿真结果可以得知: 电池模組的最高温度为 $53.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低温度为 $50.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 温差为 $3.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 电池的最高温度处于模組的中心位置并从模組两侧至中心逐渐增加且基本对称分布. 这是因为处于最边缘侧的电池与空气的热交换面积大, 而中心位置与空气的热交换面积小, 散热量小, 同时还受相邻两侧电池的热量传导, 导致电池单体受热条件的不同, 越往中心处热量聚集越多, 虽然有通过高导热率的热管传导热量, 在没有强制对流的条件下, 热管冷凝段与空气的对流换热量较小, 所以中心位置温度较高.

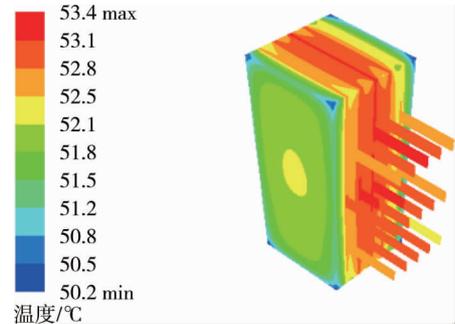


图3 热管-铝板嵌合式散热结构
电池模組温度分布

2.4 不同散热结构下的冷却效果

对电池模組在单独使用热管和单独使用铝板条件下分别进行温度仿真. 对于电池模組单独使用热管散热情况, 电池间隙间的空气流动比较缓慢, $h = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 其他初始条件和边界条件保持不变. 图 4 为在 2C 放电倍率下放电 1440 s , 电池模組分别在热管-铝板嵌合式散热结构、单独使用热管和单独使用铝板 3 种不同散热条件下的最高温度、最低温度和温差变化.

由图 4 的仿真结果对比可知: 单独使用热管散热虽然能使电池模組的最低温度最小, 但电池间的温差最大, 放电结束电池间的温差达到了 $8.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 这是由于尽管热管具有很强的导热能力, 但热管与电池表面的接触不紧密, 接触面积小, 热流量小, 电池的散热表面小. 在电池间添加铝板能够有效地降低电池间的温差, 但就最高温度而言, 其散热效果最差. 使用热管和铝板嵌合式散热结构综合了铝板的集热作用和热管高效的传热能力, 不仅使得电池模組的最高温度最小, 电池间的温差也最低, 相比于单独使用热管电池间的温差降低了 $5.6 \text{ }^\circ\text{C}$.

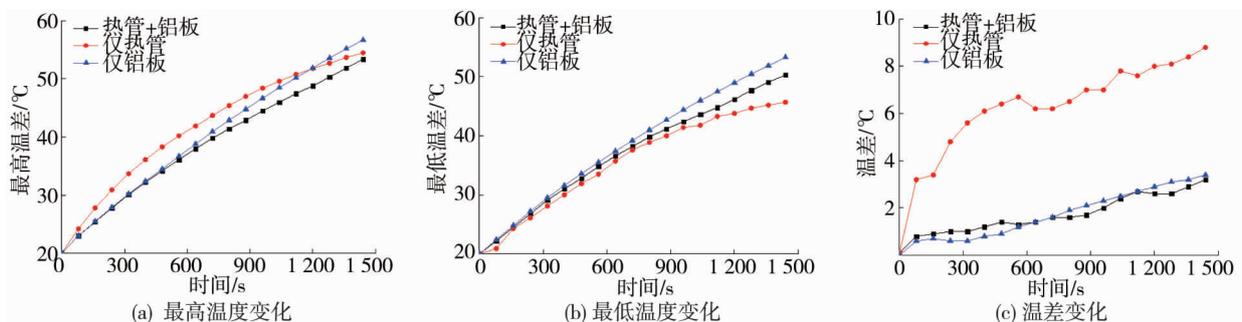


图4 不同散热条件下电池模組温度变化

3 双因素方差分析

3.1 试验设计

利用双因素方差分析可以同时检验 2 种因素对试验结果的影响程度. 除了电池本身的材料性能和运行工况外, 散热模組的结构参数也能在一定程度上影响电池组的散热性能. 为了分析电池间的铝板厚度和

热管数量对电池模组散热性能的影响,对其各取3个水平,不考虑两因素间的交互作用,在不同的水平组合下各进行1次仿真,仿真条件同第2节,共进行9次仿真计算,试验指标为模组的最高温度,其试验方案及结果如表2所示。

表2 试验方案及结果

试验编号	试验方案		最高温度/℃
	铝板厚度/mm	热管数量	
1	2	3	53.4
2	2	4	50.6
3	2	5	48.4
4	3	3	49.4
5	3	4	46.8
6	3	5	45.1
7	4	3	46.4
8	4	4	45.1
9	4	5	43.9

3.2 数据分析

使用SPSS软件对表2中的数据进行双因素方差分析,选择只含主效应的双因素方差分析模型,显著性水平 $\alpha = 0.05$,具体分析结果如表3所示。不同铝板厚度与不同热管数量下电池的最高温度如图5所示。

表3 双因素方差分析

源	III类平方和	自由度	均方	F	显著性
修正模型	73.018	4	18.254	42.507	0.002
截距	20 458.534	1	20 458.534	47 639.537	0.000
铝板厚度	49.669	2	24.834	57.829	0.001
热管数量	23.349	2	11.674	27.185	0.005
误差	1.718	4	0.429		
总计	20 533.270	9			
修正后总计	74.736	8			

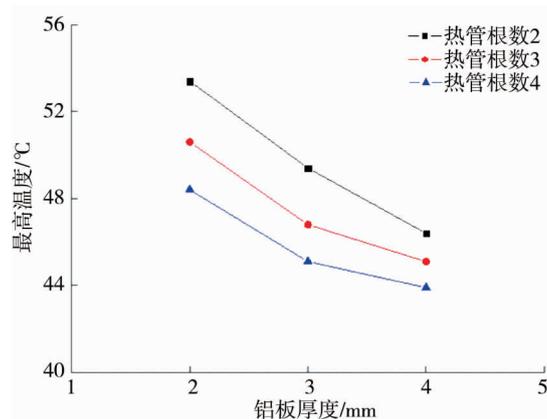


图5 不同铝板厚度与不同热管数量下电池最高温度

由表3和图5可知:铝板厚度和热管数量的显著性均远小于0.05,两者对电池模组的最高温度均具有较大影响,铝板厚度和热管数量的增加都能降低模组的最高温度,但影响效果逐渐降低。由F检验可知:铝板厚度的F值为57.829,大于热管数量的F值27.185,因此,铝板厚度对电池模组最高温度的影响更大。现阶段热管复杂的制造工艺和主要使用金属铜作为壳体和吸液芯材料导致其成本高昂,有关质量较轻、价格相对低廉的铝基超薄微热管的研究还未成形^[19],综合考虑性价比等因素,在热管数量能满足电池组散热要求的条件下,可通过合理选择铝板厚度以优化电池组的散热性能。

4 结论

1) 设计了热管-铝板嵌合式散热结构用于电池模组散热,在2C放电倍率下仿真得到模组的最高温度为53.4℃,温差为3.2℃,与单一使用热管和铝板散热相比,该结构具有更好的散热性能和均温效果。

2) 铝板厚度和热管数量的增加都能降低模组的最高温度,但随着其进一步增加影响程度逐渐减小,双因素方差分析结果表明自然对流条件下,铝板厚度对模组最高温度的影响更大。

3) 主要分析了2C放电倍率下热管-铝板嵌合式散热结构的散热性能,对电池组散热系统结构设计具有一定参考价值。在车辆实际运行过程中会出现各种不同的工况,为了使电池组始终工作在最佳温度范围内,通常需要对热管冷凝段复合强制风冷或水冷等。

参考文献:

- [1] Chen K, Wu W X, 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.
- [2] Bahiraei F, Farta A, Nazrib G A. Electrochemical-thermal modeling to evaluate active thermal management of a lithium-ion battery module[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 254: 59-71.
- [3] 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.
- [4] Siddique A R M, Mahmud S, Heyst B V. A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 401: 224-237.
- [5] Li Y B, Zhou Z F, Wu W T. Three-dimensional thermal modeling of Li-ion battery cell and 50V Li-ion battery pack cooled by mini-channel cold plate[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 147: 829-840.
- [6] Kim G H, Gonder J, Lustbader J, et al. Thermal management of batteries in advanced vehicles using phase-change materials[J]. *The World Electric Vehicle Journal*, 2008,2(2): 134-147.
- [7] Kim J, Oh J, Lee H. Review on battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019,149:192-212.
- [8] 王小平.动力电池组热管冷却系统传热特性分析[D].长春:吉林大学,2016.
- [9] Feng L Y, Zhou S, Li Y C, et al. Experimental investigation of thermal and strain management for lithium-ion battery pack in heat pipe cooling[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 16: 84-92.
- [10] 曾健,陆龙生,陈维,等.基于热管技术的锂离子动力电池散热系统[J].*化工进展*,2015,34(1): 37-43.
- [11] Murashko K, Pyrhönen J, Laurila L. Optimization of the passive thermal control system of a lithium-ion battery with heat pipes embedded in an aluminum plate [C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, 2013.
- [12] 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.
- [13] 王建,郭航,叶芳,等.热管散热装置对车用锂离子电池组内温度分布影响数值模拟[J].*化工学报*,2016,67(2): 340-347.
- [14] 胡春娇.纯电动汽车锂离子电池模块设计及热特性分析[D].长沙:湖南大学,2016.
- [15] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery system[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1):5-12.
- [16] Zhang S J, Zhao R, Liu J, et al. Investigation on a hydrogel based passive thermal management system for lithium ion batteries[J]. *Energy*, 2014, 68: 854-861.
- [17] 侯永涛,赛羊羊,孟令斐,等.纯电动汽车锂离子电池热效应的建模及仿真[J].*电源技术*, 2016,40(6):1185-1188.
- [18] 谢小敏,顾伯勤.热管换热器模拟重要参数的选择[J].*轻工机械*,2013,31(3):23-27.
- [19] 汤勇,唐恒,万珍平,等.超薄微热管的研究现状及发展趋势[J].*机械工程学报*,2017,53(20): 131-144.