

文章编号:0253-4339(2026)04-0054-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250502001

基于鲨鱼鱼鳞结构仿生的电池热管理优化研究

肖鑫 许文强

(东华大学环境科学与工程学院 空气环境与建筑节能研究所 上海 201620)

摘要 为强化电动汽车电池热管理的散热效果,本文提出了一种仿生鲨鱼鳞片结构用于优化相变材料散热片,并耦合轴向风冷对电池进行控温。在完成电池发热特性实验后,构筑三维模型,模拟对比研究了自然对流、风冷、风冷耦合PCM及风冷耦合仿生学优化PCM的电池散热情况。结果表明:在2 C放电倍率情况下,风冷耦合仿生学优化的PCM电池温升仅为纯自然对流的33.6%,电池表面平均温度为41.8 °C,可将电池控制在合适温度范围。且仿生学结构可使风道进出口压降降低4%,有效减少风机能耗。

关键词 电池热管理;复合相变材料;仿生学优化;风冷

中图分类号: TM912;TB34

文献标识码: A

Optimal Investigation on the Thermal Management of Battery Based on a Bionic Shark Scale Structure

Xiao Xin Xu Wenqiang

(Institute of Air Environment and Building Energy Conservation, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620, China)

Abstract To improve heat dissipation in the thermal management of batteries for electric vehicles, this study proposes a bionic structure based on shark scales. The design optimizes a phase-change material (PCM) heat sink in conjunction with axial air cooling to regulate battery temperature. Based on performance tests of the battery, a three-dimensional model was built to investigate and compare the heat dissipation of the battery under different conditions, including natural convection, forced convection, forced convection coupled with PCM, and forced convection coupled with bionics-optimized PCM. The results indicate that the temperature rise of the battery with the forced convection coupled with bionics-optimized PCM is only 33.6% of that with natural convection at a 2 C discharge rate, and the average temperature of the battery is 41.8 °C, which keeps the battery within a suitable temperature range. In addition, the bionic structure can reduce the pressure drop at the inlet and outlet by 4% compared with the traditional method.

Keywords battery thermal management; composite phase change materials; bionic optimization; forced convection

近年来,“双碳”目标的提出使绿色低碳成为全国各行各业的发展方向。为实现净零碳排放,能源结构的转变成为重中之重。汽车行业也一直在寻找替代燃油车的可行技术,努力使汽车行业转向零排放。电动汽车被认为是一种减少化石燃料需求的可行解决方案^[1]。截至2023年底,全球有超过4 000万辆电动汽车,是2018年电动汽车存量的7倍多^[2]。电动汽车为环境、经济进步和零排放提供了可能。

纯电动汽车需要有支持高续航里程和快速充电的能量存储方式。锂离子电池因具有比功率高、循环寿命长、充电时间短等优点^[3],使其在电动汽车中得到广泛应用。然而,在车辆运行过程中,由于电池内的电化学反应,电池放电过程将产生大量的热量。

研究表明,若锂离子电池的表面温度超过50 °C,其生命周期和充电时的电池容量会明显降低^[4]。因此,为了保持电池的安全工作温度,需要一个有效的电池热管理系统(battery thermal management system, BTMS)来帮助释放电池舱内产生的热量。主流的BTMS主要分为4类:风冷^[5]、液冷^[6]、热管冷却^[7]、相变材料冷却^[8]。风冷和液冷BTMS主要的问题是空气/液体分配系统、泵送附件和运行功耗等^[9]。热管BTMS则存在冷却效果不佳、温度均匀性差等问题^[10]。而相变材料(phase change material, PCM)在BTMS的应用降低了系统组件的复杂性,适合在电动汽车中应用。但传统的填充方式使得PCM质量较大,不利于散热且影响能量密度;单靠相变材料,在

一些极端情况下难以将电池温度控制在合理范围。

传统的 PCM 填充方式为填埋式,其质量大且中间电池容易出现热量堆积不易散热,一些学者针对该问题进行了若干研究。R. D. Jilte 等^[11]使用 PCM 包裹的电池设计了风冷通道,该通道由包裹 4 mm 厚 PCM 的电池及 PCM 连接而成。该填充方式可在环境温度和送风温度为 40 °C 的极端条件下,将电池温升控制在 5 °C 内,但是该风道流阻较大,不利于后排电池散热。M. Safdari 等^[12]搭建了 PCM 耦合风冷的 BTMS,研究不同的 PCM 封装形状(圆形、矩形、六边形)在自然对流及风冷中对电池散热效果的影响。研究发现,在自然对流情况下,圆形的电池封装冷却效果较好;在强制对流情况下,矩形的封装热效率是圆形的 2 倍,但在经历 2 C 充/放电循环后,电池温度仍超过 60 °C。蛇形板具有高形状稳定性、更大的表面积,吕又付^[13]针对柱状电池开发设计了 PCM 蛇形散热片耦合风冷的 BTMS。该结构相较于传统 PCM 耦合方式,减重达 70%,将电池模块的能量密度从 107.80 W·h/kg 提升至 121.6 W·h/kg;同时该结构在经历 10 次充/放电循环后电池表面最高温度为 51.90 °C,相较于传统 PCM 耦合方式降低了 3.60 °C,但该蛇形板在外力作用下易折断破损。填充方式经优化的电池模组,其散热能力增强,但存在流道阻力大,部分形状易破损等问题。

此外,在长期高倍率放电条件下,单纯使用 PCM 的 BTMS 控温能力差。V. G. Choudhari 等^[14]使用 18650 锂电池,模拟了在自然对流情况下,电池 1 C、2 C、3 C 放电倍率下表面温度变化,分别达到约 36、62、105 °C。而包裹 8 mm 厚的相变材料后,电池表面温度分别降低了 2.23、15.7、20.07 °C,但 3 C 工况下温度为 85 °C,依然远超电池安全温度。Wu Weixiong 等^[15]使用大单体磷酸铁锂电池进行电池热管理研究,该电池在自然对流情况下,1 C、3 C、5 C 放电倍率下电池表面温度分别达到约 41.70、57.20、74.60 °C。而在仅使用复合 PCM 包裹电池后,除 1 C 温度变化不大,3 C、5 C 分别降低了 6、9.5 °C,温度依然超过电池安全温度。最终使用翅片加 PCM,并耦合 4 m/s 的风冷,使电池在 5 C 放电倍率下温度控制在 54.40 °C。因此,若想将电池模块维持在合适的工作温度,需要对电池模块进行辅助散热。

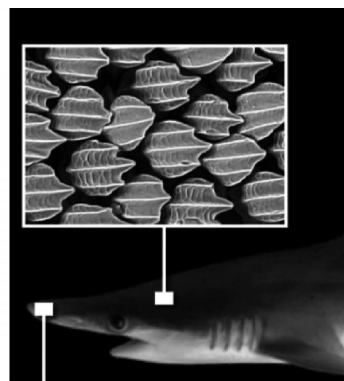
因现有 PCM 电池热管理中对 PCM 填充方式的优化存在流阻增大,外力作用下易破损等问题,而依靠单一相变材料的电池热管理系统控温能力不佳。本文提出了一种基于鲨鱼鳞片结构优化的相变材料散热片,耦合轴向风冷,用于电池热管理。在 25 °C、2 C

放电倍率下,模拟研究自然对流、风冷、风冷耦合 PCM 及风冷耦合仿生学优化 PCM 的电池散热情况。

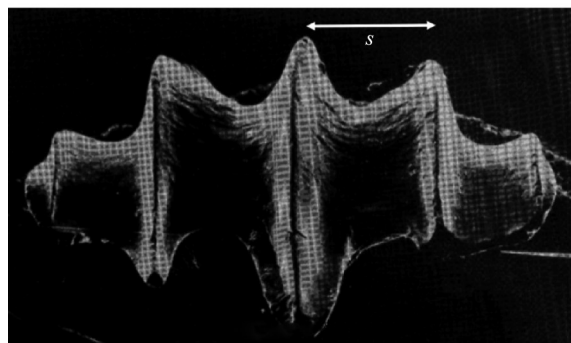
1 电池实验及模型构建

1.1 仿生结构设计

本研究对鲨鱼鱼鳞结构为何能够减少流动阻力、强化电池散热进行了相关总结。鲨鱼鱼鳞结构最大的特点是其鳞片上密布的小凹槽^[16-17],如图 1 所示。鲨鱼鳞片的这种三维形状,其来流方向的二维结构与传热学中的凹抛物线肋及流体力学中的减阻肋极其相似。而对于凹抛物线肋的研究,已有许多学者进行过相关探究,本文选取 D. W. Bechert 等^[18]对凹抛物线肋的相关研究进行说明。



(a) 鲨鱼鱼鳞 SEM 图片-俯视^[16]



(b) 鲨鱼鱼鳞 SEM 图片-正视^[17]

图 1 鲨鱼鱼鳞 SEM 图片

Fig.1 Schematic diagram of battery thermal management system

对于凹抛物线肋减阻理论的发展,D. W. Bechert 等^[18]发现纵向流与横向流之间的起点高度差 Δh ($\Delta h = h_{pl} - h_{pc}$)是影响横向流动的重要因素,如图 2 所示。而对于给定的几何形状,通过实验可知, Δh 是横向肋间距 s 的线性比例(凹抛物线肋 $\Delta h = 0.132s$)。因此,随着 s 的增加,起点高度差 Δh 也会增加。由于纵向肋对横向流的阻碍作用增强,横向流靠近表面的波动会减少,与之相伴的动量交换和阻力也会减少。黏性子层上方的湍流为该横流的起源,因此,黏性子层的

厚度增加了 Δh ,即纵向流和横向流起点高度之间的差值。而黏性子层的厚度增加对应于测试板和平滑参考板之间的剪应力差 $\Delta\tau$ 减小,而这将使凹抛物线肋测试板阻力减小,这就是D. W. Bechert对于凹抛物线肋阻力减小的理论基础。而基于此,该研究者提出了高度差 Δh 与减阻曲线初始斜率的定量关系,如式(1)和式(2)^[18]所示。

$$\frac{\Delta\tau}{\tau_0} \propto \frac{\Delta h}{s} s^+ \quad (1)$$

$$s^+ = \frac{su_\tau}{\nu} \quad (2)$$

式中: s^+ 为凹抛物线表面的雷诺数; ν 为运动黏度, m^2/s ; s 为肋间距, mm ; u_τ 为在相同流动条件下参考板的壁面摩擦速度, $u_\tau=(\tau_0/\rho)^{0.5}$, m/s ; τ_0 为测试板上的剪应力, Pa ; $\Delta\tau$ 为测试板和平滑参考板之间的剪应力差, Pa 。 $\Delta\tau/\tau_0$ 的负值对应于减阻。

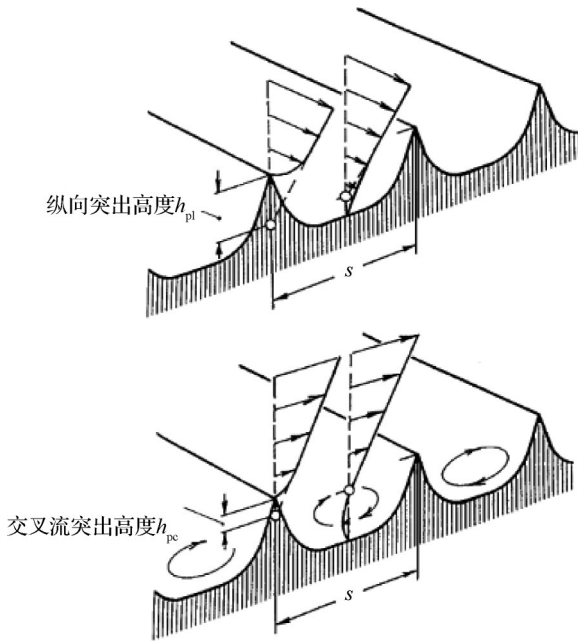


图2 凹抛物线肋的纵向与横向黏性流动^[18]

Fig.2 Longitudinal and transverse viscous flows of concave parabolic ribs^[18]

流体无量纲速度 u^+ 与壁面摩擦速度 u_τ 关系如式(3)^[18]所示,流体外掠平板的平均 Nu 表达式为式(4), Re 计算如式(5)所示:

$$u^+ = u/u_\tau \quad (3)$$

$$Nu_m = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$Re = \rho_f u l / \mu \quad (5)$$

式中: u^+ 为流体无量纲速度; u 为流体速度, m/s ; Nu_m 为流体外掠平板的平均努塞尔数; Re_L 为流体外掠平板的平均雷诺数; Pr 为流体的普朗特数; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; l 为电池长度, mm ; μ 为流体动力黏度, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。

式(3)中, u^+ 与 u_τ 成反比,而 $u_\tau=(\tau_0/\rho)^{0.5}$,黏性子层的厚度增加对应测试板和平滑参考板之间的剪应力差 $\Delta\tau$ 减小,由式(1)可得 τ_0 减小,所以 u_τ 减小, u^+ 增加, Re_L 增大, Nu_m 增大。而 Nu_m 的物理含义为流体对流传热强度的无量纲数。

因此根据D. W. Bechert的理论,可通过模拟获得一定风速下光滑表面的剪切应力,计算出对应高宽比下的最利于减阻的肋间距。

1.2 电池实验台及电池物性测试

1.2.1 公式和化学方程式

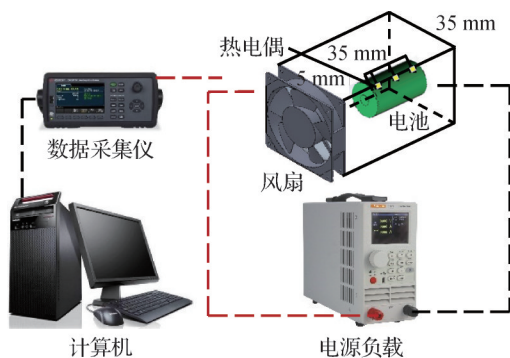
本文采用比亚迪4680锂电池作为实验对象,电池相关参数如表1所示,电池热管理系统如图3(a)所示,实物图如图3(b)所示。实验装置由电源负载(DP3030型)、安捷伦采集仪(DAQ970A型)、T型热电偶、计算机、锂电池组成。使用电子负载对电池进行放电,使用热电偶与安捷伦采集仪进行温度采集。环境温度由空调控制,设置为 25°C 。铂电阻分别安装在靠近电池正负极处和电池中间,圆柱形电池正极发热会更明显。

PCM使用自研的PEG1500/h-BN/EG/TPE(PBET)复合相变材料^[19],采用差式扫描量热仪(Mettler DSC1型)测得熔化温度为 43.83°C ,凝固温度为 40.74°C ,潜热为 99.99 kJ/kg 。根据前文1.1节仿生学的原理,经过光滑壁面在风速 1.3 m/s 下的剪应力为 0.00335 Pa ,壁面摩擦速度为 0.05495 m/s , $h/s=0.7$ 的情况下,最佳减阻效果对应的凹抛物面雷诺数 s^+ 为15,计算获得最佳的凹槽宽度 s 约为 4.1 mm ,高度 h 约 2.88 mm ,本设计取 $s=4\text{ mm}$, $h=2.8\text{ mm}$ 。仿生学结构尺寸长、宽、高、分别为 10 、 10 、 3.5 mm ,鱼鳞结构散热片如图3(c)所示。每个散热片上布置16列鱼鳞,每列鱼鳞8枚,如图3(d)所示。

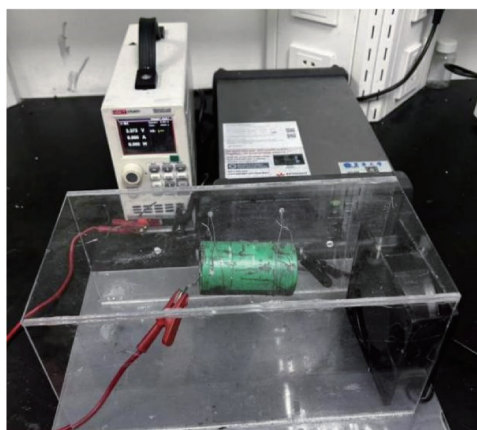
1.2.2 电池内阻测试

锂电池内阻通常分为极化内阻和欧姆内阻,欧姆内阻主要指由电极材料、电解液、隔膜电阻及各部分零件的接触电阻组成,与电池的尺寸、结构、装配等有关;极化电阻是指电池的正极与负极在进行电化学反应时极化所引起的内阻,包括电化学极化内阻和浓差极化内阻。考虑到后续仿真工作中电池产热量的估算主要取决于充/放电时的焦耳热,因此电池的内阻测试结果至关重要并将直接影响仿真结果的准确性。

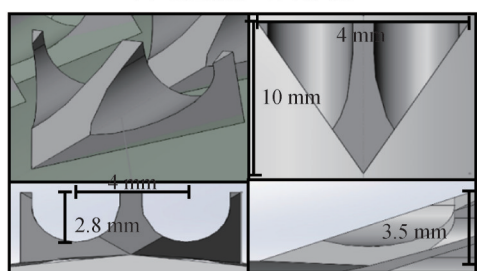
本研究采用脉冲电流法(hybrid pulse power characteristic, HPPC)对不同的荷电状态(state of charge, SOC)下的比亚迪磷酸铁锂电池(15 Ah)进行恒倍率脉冲响应以获得电压变化和内阻特性。脉冲



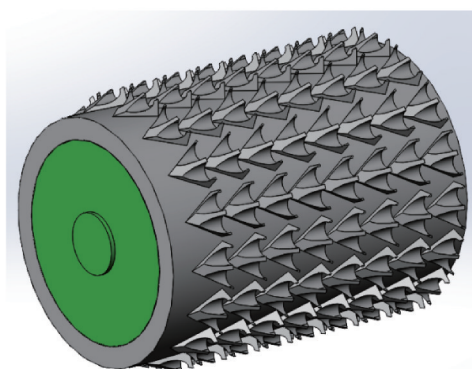
(a) 电池热管理系统



(b) 电池热管理系统实物



(c) 散热片中鱼鳞结构



(d) 鱼鳞结构散热片

图 3 电池热管理系统

Fig.3 Battery thermal management system

响应过程描述如下:选择一定 SOC(如 0.6)的电池,以 1 C 倍率恒流放电,持续 10 s 并静置 40 s,随后以 0.75 C 倍率恒流充电,持续 10 s 并静置 40 s 完成一次测试。放电过程中,电池电压表现为欧姆内阻导致的阶跃下降 ΔV_{dc1} 和随后极化内阻导致的缓慢下降

表 1 比亚迪 4680 锂电池技术说明书

Tab.1 Technical manual of BYD 4680 lithium battery

项目	参数
电池类型	磷酸铁锂
尺寸	46 mm×80 mm
容量	15 Ah
标称电压	3.2 V
最大充电电压	3.65 V
放电截止电压	2 V
正电极耳材质	铝
负电极耳材质	不锈钢

ΔV_{dc2} , 充电过程则是欧姆内阻导致的阶跃上升 ΔV_{c1} 和随后极化内阻导致的缓慢上升 ΔV_{dc2} 。测试时电池 SOC 分为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1, 每个 SOC 下进行 3 次测试取平均。充/放电过程中的欧姆内阻和极化内阻计算如式(6)~式(9)所示。

$$R_{ec} = \Delta V_{c1} / I_c \quad (6)$$

$$R_{pc} = \Delta V_{c2} / I_c \quad (7)$$

$$R_{edc} = \Delta V_{dc1} / I_{dc} \quad (8)$$

$$R_{pdc} = \Delta V_{dc2} / I_{dc} \quad (9)$$

式中: R_{ec} 为电池充电时的欧姆内阻, Ω ; ΔV_{c1} 为充电时欧姆电压, V; I_c 为充电电流, A; R_{pc} 为电池充电时的极化内阻, Ω ; ΔV_{c2} 为充电时极化电压, V; R_{edc} 为电池放电时的欧姆内阻, Ω ; ΔV_{dc1} 为放电时欧姆电压, V; I_{dc} 为放电电流, A; R_{pdc} 为放电时极化电压, Ω ; ΔV_{dc2} 为电压的缓慢下降, V。

1.3 模型构建

1.3.1 单体电池模拟

在 Ansys 18.0 中构建同尺寸模型,通过自定义解释型函数(user defined function, UDF)实现电池的发热及变对流换热系数,进行数值计算。为简化模型,电池发热仅设置为内阻发热,计算如下:

$$Q = I^2 R_{pdc} \quad (10)$$

式中: Q 为电池发热量, W。

将电池热量除以电池内芯体积,赋予电池内芯一个体积内热源,计算如下:

$$q = Q/V \quad (11)$$

式中: q 为电池内芯的体积内热源, W/m³; V 为电池内芯体积, m³。

电池外壁面的自然对流传热,受来流温度及对流换热系数影响,来流温度设置为室温 25 °C,对流传热系数通过式(12)~式(14)确定。

$$h_{wall} = \lambda_{air} Nu / l_{eff} \quad (12)$$

$$Nu = m (Gr Pr)^n \quad (13)$$

$$Gr = g l^3 \beta \Delta t / \nu^2 \quad (14)$$

式中: h_{wall} 为外表面对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; λ_{air} 为空气热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Nu 为努塞尔数; l_{eff} 为定性尺寸, 取 80 mm; m 为系数, 取 0.1; n 为系数, 取 0.33; Gr 为格拉晓夫数; g 为重力加速度, m/s^2 ; β 为体积膨胀系数; Δt 为表面与来流流体温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

由于模型涉及电池产热、PCM 相变以及自然对流过程, 控制方程如式(15)~式(19)所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \quad (15)$$

动量方程:

$$x: \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (16)$$

$$y: \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} v) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (17)$$

$$z: \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} \omega) = \nabla \cdot (\mu \nabla \omega) - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (18)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} T) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) + \frac{S_T}{c_p} \quad (19)$$

式中: u, v, w 为流体流速, m/s ; p 为压力, Pa ; S_T 为产热量, W ; c_p 为电池比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.3.2 电池模块模拟

针对本文所用的 PBET 复合 PCM, 测试其 42、57 $^{\circ}\text{C}$ 的热导率分别为 1.802、1.995 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。该材料通过添加膨胀石墨、热塑性弹性体等材料, 具有良好的防泄漏效果和形状稳定性。对于 PBET 相变时的蓄热能力通过焓法模型实现, 通过相变区间内表观比热容的改变代替潜热, 材料表观比热容如图 4 所示。为简化 PCM 储放热过程、提高仿真效率, 对所进行的电池热管理模拟作以下假设:

- 1) 电池热物性不在充/放电过程中发生改变;
- 2) 实验过程忽略电池与外界辐射传热;
- 3) 复合 PCM 定型效果好, 不考虑 PCM 熔化及熔化后流动;
- 4) 环境温度保持 25 $^{\circ}\text{C}$ 不变。

通过空气的流速可计算出风道的 Re , 用于确定黏性模型。对于 PCM, 其能量方程如下:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (20)$$

总比焓 H 为显热和潜热之和, 如式(21)~式(22)所示:

$$H = \int_{T_0}^T c_{p, \text{PCM}} dT + L\gamma \quad (21)$$

$$\begin{cases} L = 0 & T < T_s \\ L = \frac{T - T_s}{T_1 - T_s} & T_s < T < T_1 \\ L = 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: ρ 为 PCM 的密度, kg/m^3 ; H 为 PCM 的总焓值, kJ/kg ; t 为实验时间, s ; λ 为 PCM 的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为 PCM 温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为起始温度, $^{\circ}\text{C}$; $c_{p, \text{PCM}}$ 为 PCM 的比定压热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; L 为 PCM 的液相分数; γ 为 PCM 的潜热, kJ/kg ; T_s 为 PCM 的凝固温度, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为 PCM 的熔化温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

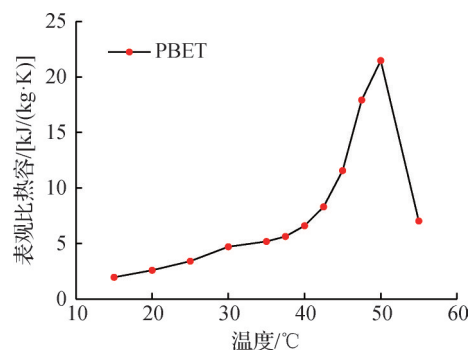


图 4 PBET 表观比热容^[19]

Fig.4 Apparent specific heat capacities of PBET^[19]

2 实验及模拟

2.1 单电池网格无关性验证

首先进行网格无关性验证, 减少过密网格浮点运算耗时和造成的舍入误差。通过电池相关实验, 建立了单体电池仿真模型, 该模型相关参数如表 2 所示。电池外表面设置对流边界条件, 来流温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 对流传热系数通过 1.3.1 节所设 UDF 计算得出。设置时间步长取为 1 s, 连续性方程、速度方程收敛残差为 10^{-3} , 能量方程收敛残差为 10^{-6} 。本研究中, 网格形状采用正多边形结合正六边形网格绘制, 电池网格如图 5(a) 所示, 单体电池网格数量分别为 11 万、26 万和 57 万, 将不同数量的模型进行 2 C 放电模拟, 模拟结果如图 5(b) 所示。网格数量从 11 万提高至 57 万, 模拟结果并无明显改变, 考虑到计算耗时, 后续以 11 万网格数进行数值计算。

表 2 模拟各材料参数汇总

Tab.2 Summary of simulated material parameters

材料	密度/(kg/m^3)	比热容/ [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	热导率/ [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
PBET	1 110	线性设置	线性设置
铝	2 719	0.871	202.4
不锈钢	7 930	0.5	16.3
电解液	2 410.67	943.08	轴向:30;切向:2.8

考虑到后期仿生学结构设计需计算表面切应力, 而表面切应力的准确性与临界面网格尺寸强相

关,于是对带有仿生学优化的 PBET 的电池耦合风冷,进行表面切应力的网格无关性模拟。电池的网格数量根据之前的研究定为 11 万,总网格数分别为 94 万、139 万、182 万和 265 万,模拟结果如图 5(c)所示。结果表明,随着网格数的增加,计算所得表面切应力减小,当网格数达到 182 万后,表面切应力基本不变。考虑到计算资源,以网格数 182 万进行后续数值计算。

2.2 电池放热实验及模拟

在对模型进行网格无关性对比后,为探究仿真鱼鳞散热片与传统散热方式对比之下的优点,本研究将进行电池自然对流散热、电池不包裹 PBET 仅风冷散热、电池包裹光滑 PBET 耦合风冷散热几种工况的电池散热实验,先行明确不采用散热、使用风冷散热、使用 PBET 耦合风冷散热这几种方式能将电池温度控制到的具体温度。电池放热系统测试台的测试误差主要来源于导线损耗误差、风扇风速和 PCM 的质量。故系统的不确定度计算如下:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_i^2} \quad (23)$$

式中: δ 为系统不确定度,%;已知导线损耗误差 δ_1 为 1%/m;风扇风速误差 δ_2 为 $\pm 2\%$;电子天平的测量精度误差 δ_3 为 $\pm 0.3\%$ 。根据式(23)计算,电池放热测试系统的总不确定度在 2.51% 以内。

对各不同实验工况建立模型,并对仿生鱼鳞散热片建立模型,进行仿真模拟分析,与各工况实验进行对比验证,具体工况设置如下:

- 1)单电池不包裹 PBET 在 2 C 倍率下进行放电;
- 2)单电池不包裹 PBET 在 2 C 倍率下进行放电,耦合 1.3 m/s 轴向风冷;
- 3)单电池包裹 5 mm 厚 PBET 散热片,在 2 C 倍率下进行放电,耦合 1.3 m/s 轴向风冷;
- 4)单电池包裹 5 mm 厚仿生学优化的 PBET 散热片,在 2 C 倍率下进行放电,耦合 1.3 m/s 轴向风冷。

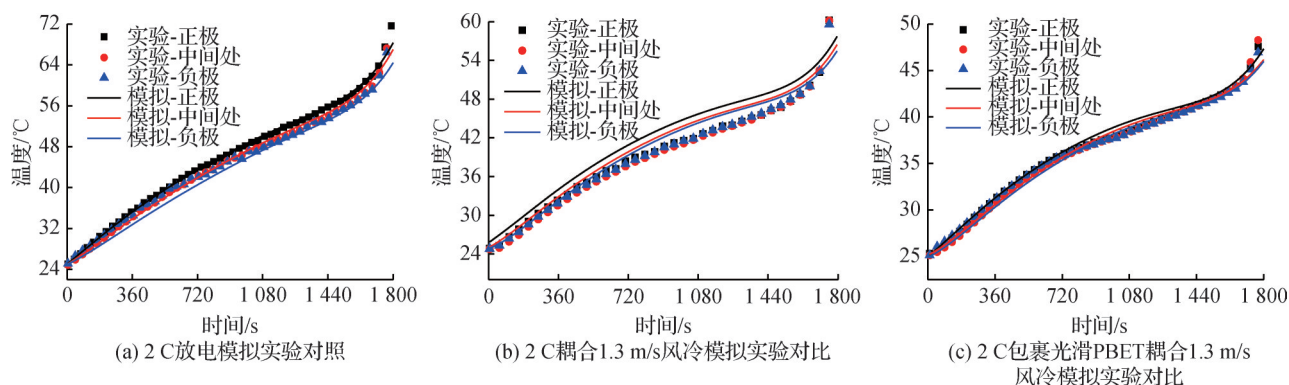


图 6 电池特性模拟与实验验证

Fig.6 Simulation and experimental verification of battery characteristics

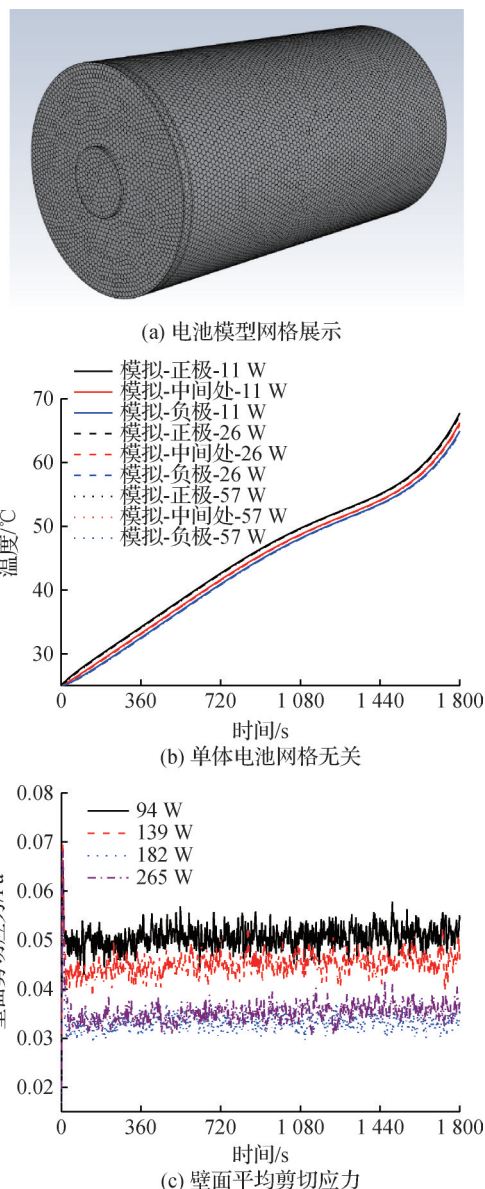


图 5 电池模型网格及网格无关验证

Fig.5 Battery grid model and grid-independent verification test

仿真模拟与各工况实验对比验证,对比结果如图 6 所示,各工况模拟云图如图 7 所示。

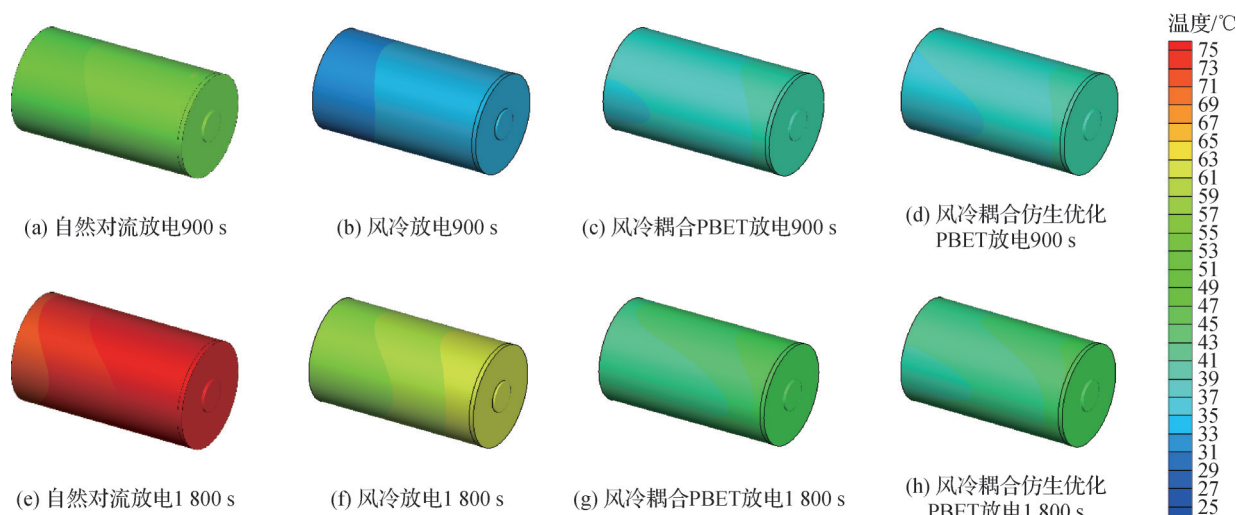


图 7 模拟各工况电池表面温度

Fig.7 Battery surface temperatures under various working conditions

由图 6 可知,未使用任何热管理手段,仅靠自然对流散热,电池 2 C 放电电池表面平均温度达到 73.47 °C,远远超出锂电池热舒适范围,电池表面温差达到了 4.2 °C,模拟的云图温差较实验结果略大。而使用风冷进行轴向散热,可使电池表面温度降低约 13 °C,但电池表面温度仍高于热舒适范围,而这组电池温差实验数据仅有 2.6 °C,与模拟结果较契合。当将 PBET 与风冷进行耦合作用于电池散热,可使电池表面温度降低约 30 °C,表面温度为 44.5 °C,电池表面温差除放电结束阶段的跃迁外,皆在 1 °C 内,升温幅度仅为自然对流的 43.4%。而将 PBET 的表面结构设计为仿生鱼鳞的结构后,电池表面温度为 41.8 °C,升温幅度仅为自然对流的 33.6%,通过模拟观测的正负极测点温差与包覆光滑 PBET 耦合风冷类似,但云图可看出其均温性较光滑 PBET 稍差,可能是鱼鳞结构在风冷时使风道内局部空气加速,导致稍大的温差。

而关于仿生学结构的减阻效果,通过对比包裹 PBET 的风冷通道进出口压降来体现。在使用仿生鱼鳞改善 PBET 表面形状后,对比光滑 PBET 表面,进出口压降如图 8 所示。采用仿生学结构的 PBET,在风速 1.3 m/s 的情况下,风道进出口压降较光滑表面平均降低 4%。

3 结论

为强化电动汽车电池热管理的散热效果,本文提出一种仿生鲨鱼鳞片结构用于优化相变材料散热片,并耦合轴向风冷对电池控温。对该系统的散热能力进行相关研究,得到结论如下:

1) 通过极化热阻构建的电池发热模块,耦合入

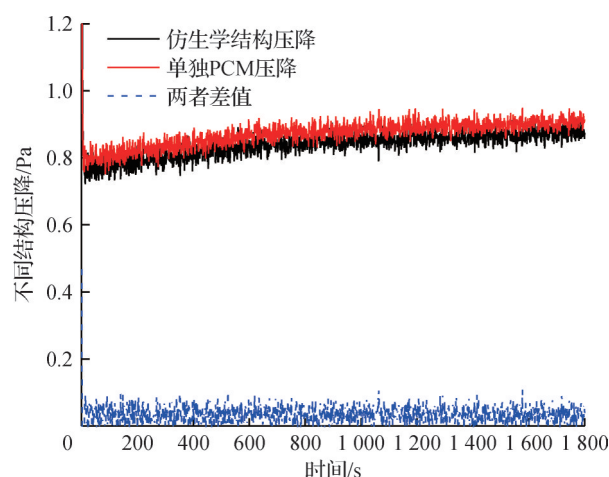


图 8 进出口压降

Fig.8 Pressure drop between inlet and outlet

单体电池仿真模型,模拟研究了各工况下电池放电的温升特性,与实验测试结果较为吻合。

2) 利用模拟对比了自然对流、风冷、风冷耦合 PBET 及风冷耦合仿生学优化 PBET 的电池放热情况。结果表明,在 2 C 放电情况下,风冷耦合仿生学优化的 PBET 电池温升仅为自然对流的 33.6%,电池表面平均温度为 41.8 °C,最大温差小于 1 °C,可将电池控制在合适温度范围。

3) 通过对比包裹光滑 PBET 和仿生学优化 PBET 的风冷通道进出口压降来探究仿生学结构的减阻效果。采用仿生学结构的 PBET,在风速为 1.3 m/s 的情况下,风道进出口压降较光滑表面平均降低 4%。

本文受云南省农村能源工程重点实验室开放基金重点项目(2022KF001)资助。(The project was supported by Yunnan Province Rural Energy Engineering Key Laboratory Open Fund Key Project (No. 2022KF001).)

参考文献

- [1] Eltoumi F M, Becherif M, Djerdir A, et al. The key issues of electric vehicle charging via hybrid power sources: techno-economic viability, analysis, and recommendations [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110534.
- [2] International Energy Agency. Global EV Outlook 2024 [EB/OL]. (2024-04-23)[2025-04-30]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- [3] Wen Jianping, Zhao Dan, Zhang Chuanwei. An overview of electricity powered vehicles: lithium-ion battery energy storage density and energy conversion efficiency [J]. *Renewable Energy*, 2020, 162: 1629-1648.
- [4] Yang Fan, Xie Yuanyuan, Deng Yelin, et al. Predictive modeling of battery degradation and greenhouse gas emissions from U.S. state-level electric vehicle operation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2429.
- [5] Yang Wen, Zhou Fei, Zhou Haobing, et al. Thermal performance of axial air cooling system with bionic surface structure for cylindrical lithium-ion battery module [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120307.
- [6] Zhao Gang, Wang Xiaolin, Negnevitsky M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119626.
- [7] Jouhara H, Serey N, Khordehgah N, et al. Investigation, development and experimental analyses of a heat pipe based battery thermal management system [J]. *International Journal of Thermofluids*, 2020, 1: 100004.
- [8] Liu Changcheng, Xu Dengji, Weng Jingwen, et al. Phase change materials application in battery thermal management system: a review[J]. *Materials*, 2020, 13(20): 4622.
- [9] Jilte R D, Kumar R, Ahmadi M H. Cooling performance of nanofluid submerged vs. nanofluid circulated battery thermal management systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118131.
- [10] 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.
- [11] Jilte R D, Kumar R, Ahmadi M H, et al. Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114199.
- [12] Safdari M, Ahmadi R, Sadeghzadeh S. Numerical investigation on PCM encapsulation shape used in the passive-active battery thermal management [J]. *Energy*, 2020, 193: 116840.
- [13] 吕又付. 退役磷酸铁锂动力电池的热-电化学特性及其热安全性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. (Lü Youfu. Investigation of thermo-electrochemical characteristic and thermal safety of retired LiFePO₄ power batteries[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [14] Choudhari V G, Dhoble A S, Panchal S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120434.
- [15] Wu Weixiong, Yang Xiaoqing, Zhang Guoqing, et al. An experimental study of thermal management system using copper mesh-enhanced composite phase change materials for power battery pack[J]. *Energy*, 2016, 113: 909-916.
- [16] Lauder G V, Wainwright D K, Domel A G, et al. Structure, biomimetics, and fluid dynamics of fish skin surfaces [J]. *Physical Review Fluids*, 2016, 1 (6) : 060502.
- [17] Boomsma A, Sotiropoulos F. Direct numerical simulation of sharkskin denticles in turbulent channel flow [J]. *Physics of Fluids*, 2016, 28(3): 035106.
- [18] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 338(1): 59-87.
- [19] 许文强. 柔性复合相变材料的仿鲨结构优化及耦合风冷的电池热管理系统研究[D]. 上海: 东华大学, 2025. (Xu Wenqiang. Research on optimization of shark-like structure for flexible composite phase change materials and battery thermal management system coupled with air cooling[D]. Shanghai: Donghua University, 2025.)

通信作者简介

肖鑫,男,副教授,东华大学环境科学与工程学院,18964749723,E-mail:xin.xiao@dhu.edu.cn。研究方向:相变蓄能及柔性热管理。

About the corresponding author

Xiao Xin, male, associate professor, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, 86-18964749723, E-mail: xin.xiao@dhu.edu.cn. Research fields: latent thermal energy storage and flexible thermal management.