

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-367-08

基于平板微热管阵列的 无人机充电仓热管理系统研究

李文舟 唐易达 刘雨璐 刘 勇

(西南科技大学 绵阳 621010)

【摘 要】 针对无人机锂电池充电温度过高而导致其充电时间长甚至发生安全问题, 提出一种基于平板微热管阵列的热管理系统。以某无人机锂电池为对象进行建模并验证, 分析在不同阶段热管冷凝端温度、环境温湿度、空气域厚度和充电倍率对电池散热特性的影响。仿真结果表明: 在冷却阶段, 环境温湿度对电池温度场几乎无影响, 微热管放热端温度及空气域厚度存在较大影响; 充电阶段, 在不同的充电倍率 1c、2c、3c 下电池温度都能得到有效的控制, 充电倍率 3c 时电池最高温度为 36.98℃, 且在充电时间段内电池温度都能维持在 20~45℃的适宜温度区间, 能够有效减少电池寿命衰减。

【关键词】 无人机; 锂电池; 平板微热管阵列; 热管理系统; 充电倍率
中图分类号 V231.1 **文献标志码** A

Research on Thermal Management System of UAV Charging Compartment Based on Flat Plate Micro Heat Pipe Array

Li Wenzhou Tang Yida Liu Yulu Liu Yong

(Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010)

【Abstract】 Aiming at the long charging time and even safety problems caused by the high charging temperature of UAV lithium battery, a thermal management system based on flat micro heat pipe array is proposed. In this paper, a UAV lithium battery is modeled and verified. The effects of heat pipe condensing end temperature, ambient temperature and humidity, air domain thickness and charging rate on the heat dissipation characteristics of the battery at different stages are analyzed. The simulation results show that in the cooling stage, the ambient temperature has little effect on the temperature field of the battery, and the temperature of the heat release end of the micro heat pipe and the thickness of the air domain have a great influence. In the charging stage, the battery temperature can be effectively controlled at different charging rates of 1c, 2c and 3c. When the charging rate is 3c, the maximum temperature of the battery is 36.98 °C, and the battery temperature can be maintained in the appropriate temperature range of 20-45 °C during the charging period, which can effectively reduce the attenuation of battery life.

【Keywords】 Unmanned air vehicle; Lithium battery; Flat micro-heat pipe array; Thermal management system; Charging rate

0 引言

随着无人机技术逐渐成熟和成本降低, 其应用

领域不断地加快扩展^[1]。充电仓作为无人机的充电设备, 可以有效支持无人机长时间、高效地执行任

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2014GZ0050)

作者简介: 李文舟 (1999-), 男, 硕士研究生, E-mail: 2507077010@qq.com

通讯作者: 唐易达 (1976-), 男, 副教授, E-mail: 7745219@qq.com

收稿日期: 2024-11-15

务而受到重视^[2]。无人机大多采用锂离子动力电池,充电最佳温度区间为 20~45℃,以提高电池的充电效率和安全性^[3]。

目前,电池热管理技术主要包括空气冷却、液体冷却、相变冷却、冷媒直冷和热管冷却等^[4,5]。空气冷却采用空气作为换热介质,散热效率低,正逐渐被其他冷却方式替代^[6];液体冷却以冷却液替代空气,有效提高了散热效率,当前已成为电池冷却的主流技术^[7];相变冷却利用相变材料替代冷却液来吸收电池的热量,可有效改善电池的均温性^[8]。冷媒直冷采用制冷系统带走电池热量,具有更为高效的散热能力^[5]。但是,由于液体冷却、相变冷却和冷媒直冷技术的结构复杂,重量较大,限制了它们在微型无人机电池散热领域的应用。随着热管冷却技术特别是平板微热管阵列(MHPA)技术的推进,使热管散热具有更高的可靠性、均温性和热响应速度^[9-12]。随后,王颖盈^[13]等通过数值计算分析发现,MHPA 可以有效的降低电池组的温度和温度不均匀度。叶欣^[14]等通过实验研究证明,MHPA 具有良好的电池散热效果,常温条件下能够将电池模块的温度和温差控制在 40℃和 5℃以内。王悦齐^[15]等通过仿真和实验等方式,分析了 MHPA 复合风冷的散热效果,发现其与液体冷却具有相当的散热效果,但受环境等外界因素的影响明显。综上所述,MHPA 由于其结构简单、质量轻以及良好的传热性能,可为无人机电池散热及其一体化提供新途径。

微型无人机通常需要进行中继充电来提高续航能力,中继充电前,无人机需要降落并停放到充电仓上,此时电池温度通常较高,有时高达 60℃以上,为了提高电池充电效率并缩短充电等待时间,需要对无人机电池进行快速降温。基于此,本文提出一种 MHPA 复合冷媒直冷的电池热管理方案,并通过实验和仿真,分析了热管冷凝端温度、环境温湿度、空气域厚度和充电倍率等因素对无人机充电仓电池热管理系统的影响。

1 物理模型及相关设置

1.1 散热方案设计

充电仓散热系统原理如图 1 所示。将 MHPA 与无人机一体化,MHPA 吸热端置于电池仓内部,放热端伸出电池仓,并紧贴机体腹部。冷媒直冷系

统的压缩机、冷凝器和节流装置设置在充电仓的内部,蒸发器置于充电仓的平台上,当无人机降落于充电仓准备充电时,MHPA 放热端与蒸发器紧贴,电池热量通过 MHPA 导出电池仓,并在 MHPA 放热端被蒸发器吸收。

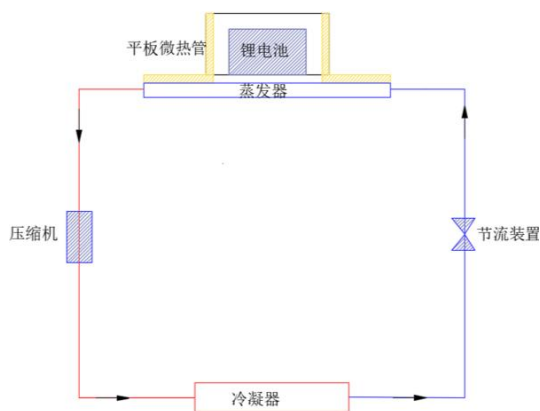


图 1 充电仓散热系统原理图

Fig.1 Charging warehouse cooling system

1.2 建模及布点

本文充电仓热管理系统散热模型主要由电池、空气域、热管、冷媒直冷和充电装置等部分组成,MHPA 放热端与蒸发器紧贴,两者之间的传热温差小,可用 MHPA 放热端温度代替蒸发器温度,为了减小计算资源,物理模型中忽略蒸发器,如图 2 所示,电池的尺寸为 127mm×48mm×8mm,额定容量为 5.2ah,额定电压为 3.6V,最大充电倍率为 3c,比热容为 1100J/(kg·K), xy/z 方向热导率为 35/0.48W/(m·K),质量为 118g,密度为 2630kg/m³;热管厚度为 3mm,工质为丙酮,充液率为 50%,比热容为 880J/(kg·K),热导率为 14000W/(m·K)^[16],密度为 2700kg/m³;空气域比热容为 1006.43J/(kg·K),热导率为 0.0242W/(m·K)^[16],密度为 1.225kg/m³。

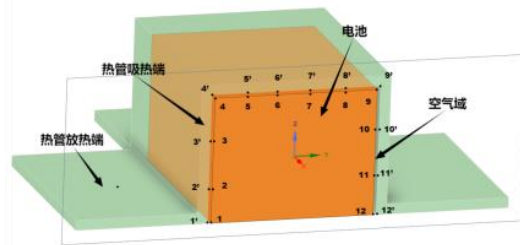


图 2 物理模型及测点

Fig.2 Physical model and measuring point

如图 2 所示,在热管蒸发段的侧面和上表面的

中线上, 以及一一对应的电池表面上进行测点布置, 各测点在各面上的间距相等。

相关假设:

- (1) 将电池组结构简化为均匀发热体;
- (2) 电池比热容、密度、导热系数不随自身工作状态而变化;
- (3) 忽略电池内部的接触热阻、辐射传热和对流换热;
- (4) 不考虑任何电化学反应过程;
- (5) 电池充放电过程中压力不变。

2 实验及模型验证

本文通过搭建实验平台, 对无人机电池进行散热特性实验, 用实验数据与数值计算数据进行误差分析, 验证仿真模型的可靠性。

2.1 实验

实验主要仪器有电池(本实验采用 Du Pu 公司生产的无人机用钴酸锂聚合物电池, 电池组由四块单体电池并联组成)、电池充放电仪器、tp700 多路数据记录仪(精度 0.01°C)、T 型热电偶(测试范围 -200 至 350°C)、温湿度记录仪精创 RC-4(精度 0.1°C)。

电池性能测试试验平台如图 3 所示, 将电池与电池充放电仪器连接进行充放电, 将电池表面测温点用 PVC 胶带与 T 型热电偶工作端连接, T 型热电偶另一端自由端与 tp700 多路数据记录仪连接, 并每隔 10s 自动记录数据记录数据, 最后导入电脑进行分析。



图 3 电池性能测试试验平台

Fig.3 Battery performance test platform

将电池放电后置于室温 25°C 的空调房内下静置 1h, 再进行 1c 倍率恒流充电, 充电完毕后需放电再静置 1h, 再进行下一组充电试验, 重复 1c、

2c、3c 三组试验。恒流条件下, 1c、2c、3c 充电倍率将电池充满所需时间分别为 3600s、1800s 和 1200s。

2.2 数学模型

通过 ANSYS workbench 对热管理系统进行仿真过程中, 需要考虑质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒、电池仓内的自然对流、空气结露、传热过程以及电池生热率等, 展开方程如式(1)~式(8):

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \quad (1)$$

式中: ρ 为电池仓内流体密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为电池仓内流体速度矢量; $\text{div}(\rho \mathbf{u})$ 为 $\rho \mathbf{u}$ 的散度。

(2) 动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) \mathbf{u} = \text{div}(\mu \text{grad} \mathbf{u}) - \text{div}(\mathbf{P}) \quad (2)$$

式中: μ 为流体动力粘度; $\mathbf{P}$ 为电池仓内部流体压力; $\text{grad} \mathbf{u}$ 为速度矢量的梯度。

(3) 能量方程

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \text{div}(\rho c_p \mathbf{u} T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + S_h \quad (3)$$

式中: c_p 为物质比热容; T 为流体温度; λ 为传热系数; S_h 为内热源。

由于电池与热管之间存在温差, 需要考虑电池仓中空气的自然对流, 其浮力诱导流的强度用瑞利数来衡量, 方程如式(4)所示:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3 \rho}{\mu \alpha} \quad (4)$$

式中: β 为体积膨胀系数, $\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$;

α 为热扩散系数, $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$; g 为重力加速度一般取 9.8m/s^2 ; ΔT 为空气温差; L 为空气域当量长度。通过计算, 瑞利数 Ra 为 3.12×10^5 , 其小于 10^8 , 电池仓内空气流动判定为层流。

表面凝结露的相变速率如式(5)所示:

$$m_{\text{phase}} = \frac{(\rho D / \delta)}{\rho D / \delta + C_{\text{phase}}} C_{\text{phase}} (y_{\text{sat}} - y_i) \quad (5)$$

式中: ρ 为混合气体密度; D 为蒸汽种类的物质扩散系数; δ 为单元中心到壁面的距离; C_{phase} 为相变常数, 包括冷凝常数与蒸发常数; y_{sat} 为饱和物质质量分数, $y_{sat} = \frac{P_{sat}(T) M_i}{P \bar{M}}$ (P_{sat} 为饱和压力; P 为绝对压力; M_i 为蒸汽种类的分子量, $\bar{M}$ 为混合气体的分子量, $\log_{10} P_{sat} = -2.1794 + 0.02953(T - 273.17) - 9.1837 \times 10^{-5}(T - 273.17)^2 + 1.4454 \times 10^{-7}(T - 273.17)^3$); y_i 为蒸汽种类单元中心质量分数; 当蒸汽质量分数超过饱和和质量分数 $y_{sat} < y_i$ 时即凝结。

电池传热微分方程如式 (6) 所示:

$$\frac{\partial(\rho_b c_p T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q_{rad} + q \quad (6)$$

式中: ρ_b 为电池密度; c_p 为电池比热容; T 为电池温度; λ 为传热系数, q_{rad} 为电池热辐射量; q 为电池单位体积生热率。

电池热辐射选择 S2S 辐射模型, 满足斯蒂芬玻

尔兹曼定律:

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_e^4) \quad (7)$$

式中: σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数; ε 为发射率; T_e 为环境温度。

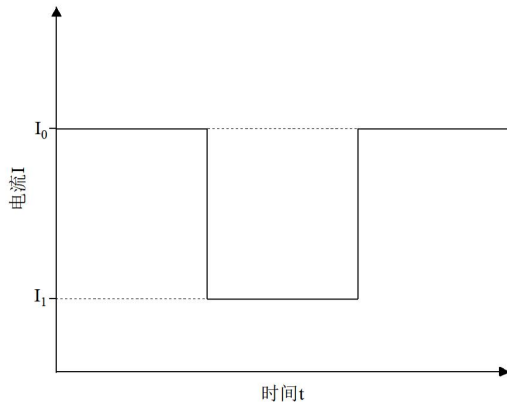
电池在不同充放电倍率下的生热率 q 可通过简化的 Bernardi 电池生热模型进行计算:

$$q = \frac{1}{V_b} \left(I^2 R_b + IT \frac{\partial U_0}{\partial T} \right) \quad (8)$$

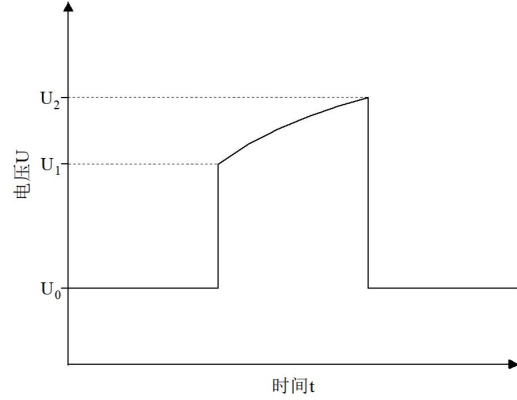
式中: V_b 为电池体积; I 为电池的充放电电流;

R_b 为电池内阻; U_0 为开路电压; $\frac{\partial U_0}{\partial T}$ 代表温度影响因素。

电池内阻主要由电池的极化内阻与欧姆内阻组成, 与温度 T 、荷电状态 SOC 、电流大小、充放电状态都有关系, 其中电流大小影响较小, 本文主要考虑 T 与 SOC 对锂电池充电时内阻的影响。通过脉冲电流法 (HPPC) 法测定不同温度 T 和 SOC 工况下的电池内阻。可以得到电流电压示意图, 如图 4 所示。



(a) 电流示意图



(b) 电压示意图

图 4 电流电压示意图

Fig.4 Current and voltage diagram

随着恒流充电, 电压首先是从 U_0 升到了 U_1 , 这个过程当中电压的变化极为迅速, 主要是由于锂电池的欧姆内阻 R_j 所引起的; 在电压从 U_1 到 U_2 的变化过程则是平缓过渡, 这是由于电池内部的极化反应所导致, 电池两端的电压与工作电压有差异, 这一部分压降可以视为极化内阻 R_p 所引起。根据已知的电流和电压, 可以通过式 (9) 和式 (10) 计算欧姆内阻和极化内阻。

$$R_j = \frac{\Delta U_j}{I} = \frac{U_1 - U_0}{I} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{\Delta U_p}{I} = \frac{U_2 - U_1}{I} \quad (10)$$

通过在不同的温度 T 和 SOC 条件下, 得到不同的内阻测试结果, 图 5 为电池内阻在不同 SOC 和温度工况下拟合的变化曲面图。

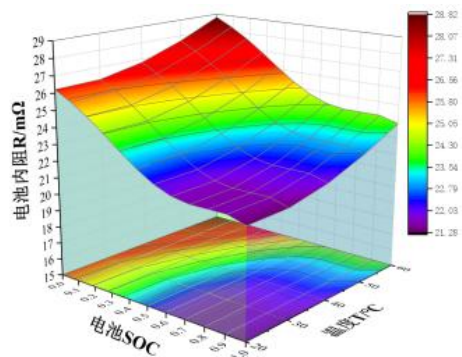


图 5 内阻随 SOC 和温度变化的曲面

Fig.5 Curved surface of charge internal resistance changing with battery SOC and temperature T

最后可以得出充电内阻随 S 和 T 变化的拟合方程如式 (11) 所示:

$$\begin{aligned} R = & 2.904 - 5.424SOC - 1.006SOC^2 - 34.446SOC^3 - 75.76SOC^4 \\ & - 39.81SOC^5 + 3.478T - 0.198T^2 + 0.0054T^3 - 6.978 \times 10^{-5}T^4 \\ & + 3.488 \times 10^{-7}T^5 \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 网格独立性验证

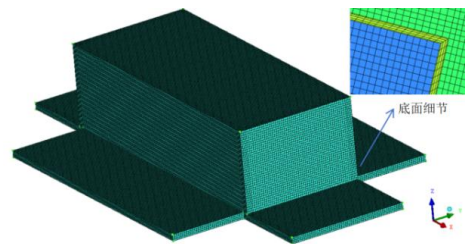


图 6 网格划分

Fig.6 Mesh generation

如图 6 所示, 本文采用 ICEM 进行网格划分, 并对网格进行独立性验证, 选择冷凝端温度 8°C , 环境温度 38°C , 环境湿度 60%, 空气域厚度 1mm 作为标准组, 以电池最高温度和最大液膜厚度作为独立性验证的评估标准。验证结果表明: 在整体网格尺寸为 $0.7\text{--}2\text{mm}$ 区间的网格模型中, 并且模型采用 1mm 整体网格尺寸时, 电池最高温度相差在 0.1°C 以内, 能够在保证准确性基础上提高仿真速度。由于空气域较为狭窄, 需考虑不同网格层数对

表 1 工况设置

Table 1 Operating condition setting				
工况	冷凝端温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	环境湿度/%	空气域厚度/mm
1	6/8/10/12/14/16	38	60	1
2	8	8/16/22/30/38/46	60	1
3	8	38	20/40/60/80/100	1
4	8	38	60	0.2/0.4/0.6/0.8/1

结果带来的影响, 模型网格层数通过分别采用 3-5 层进行验证, 发现网格数为 487858, 网格层数为 5 层时, 最大液膜厚度小于 $0.1\mu\text{m}$, 最终将该算例网格划分方式应用于其余算例的网格生成中。对时间步长进行独立性验证, 选择时间步长 1s 时, 能够达到较高模型计算精度同时节省计算时间。

2.4 模型验证

将实验数据与仿真结果进行对比分析, 在 1c、2c 和 3c 充电倍率下, 实验和仿真电池温度随时间变化曲线如图 7 所示, 其实验值和仿真值吻合较好, 相对误差不超过 6%, 平均误差低于 1°C , 温度变化趋势大致相同, 说明数值模拟的模型可靠。

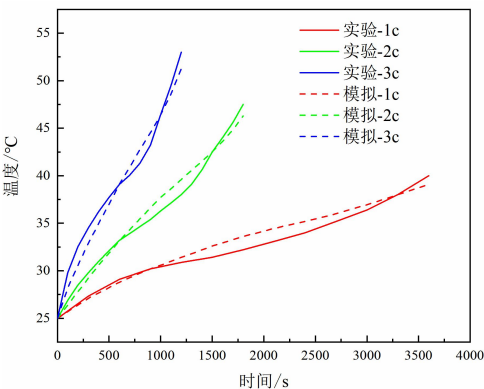


图 7 实验与仿真对比曲线

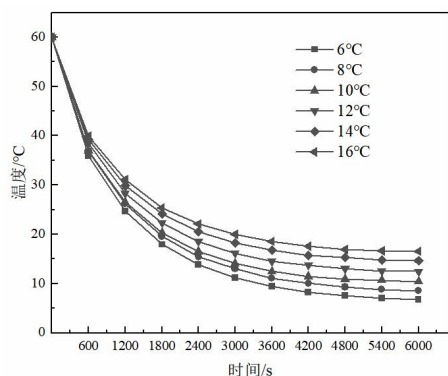
Fig.7 Experiment and simulation comparison curve

3 数值模拟结果及分析

无人机在中继充电过程中, 需要经历冷却阶段和充电阶段。在冷却阶段, 降落停放在充电仓上的无人机刚执行完飞行任务, 电池温度过高, 需先冷却降温至适宜温度区间, 再进行充电, 此阶段主要体现为电池散热降温, 属于无内热源散热。在充电阶段, 电池在产生热的同时伴随着电池散热, 属于有内热源散热。散热特性主要由电池整体平均温度和电池表面温度来反映, 其中, 电池整体平均温度变化可以用来表征电池的散热速率, 电池表面温度通常会影响电池与热管阵列之间的传热强度。

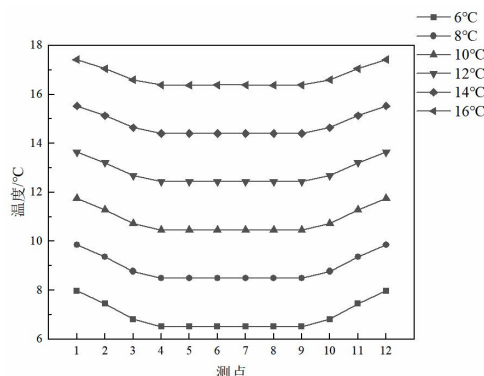
3.1 放热端温度对电池散热特性的影响规律

电池整体平均温度随时间变化的曲线如图 8 (a) 所示。从图中可以看出, 随着冷凝端温度增加, 电池整体平均温度随之增加, 但是电池整体平均温度的变化规律一致, 也即是随时间的增加而减



(a) 整体均温变化曲线

低, 在 0-600s 时间内, 电池温度急速降低, 随后, 电池温度变化逐渐变慢, 3600s 后, 电池的温度保持基本恒定。不同冷凝端温度在 600s 时, 电池的整体平均温度都处于 40°C 左右, 1800s 时, 仅有冷凝端温度为 16°C 时的锂电池温度大于 25°C。

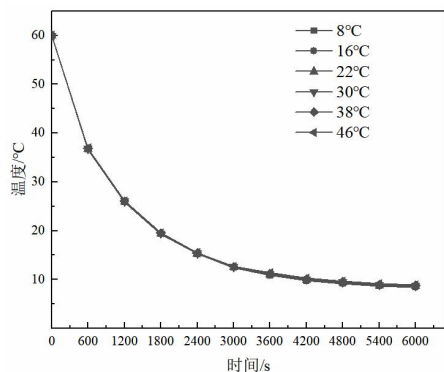


(b) 表面温度变化曲线

图 8 电池散热特性随放热端温度变化曲线

Fig.8 Battery heat dissipation characteristics curve by different exothermic end temperature

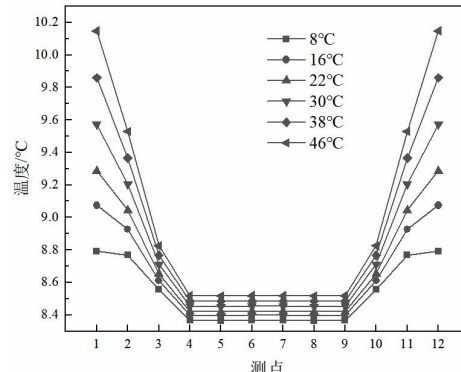
从图 8 (b) 可以发现, 随着冷凝端温度由 6°C 增加到 16°C, 测点的温度随之增大。在不同冷凝端温度下, 测点 1 至测点 12 (结合图 2), 温度都呈现先降低, 然后恒定, 再增加的变化趋势, 测点 1-4 与测点 9-12 对称, 测点 1-4 区间, 温度随测点依次降低, 测点 9-12 区间, 温度随测点依次升高, 测点 4-9 区间, 温度基本恒定, 说明电池下沿温度高, 越往上部温度逐渐升高, 在电池顶面的温度保持基本不变。



(a) 整体均温变化曲线

3.2 环境空气温度对电池散热特性的影响规律

如图 9 (a) 所示, 电池的整体均温基本不受环境空气温度的影响, 随着时间的增加, 电池整体平均温度随之降低, 在 600s 时, 温度降低到 40°C 左右, 1200s 时, 电池整体平均温度处于 25°C 附近。从图 9 (b) 可以发现, 电池表面温度随冷凝端温度增加而增加, 电池侧面的温度梯度较大, 顶面的温度保持基本恒定。



(b) 表面温度变化曲线

图 9 电池散热特性随不同环境温度变化曲线

Fig.9 Battery heat dissipation characteristics curve by different ambient temperatures

3.3 环境空气湿度对电池散热特性的影响规律

如图 10 所示。环境空气湿度对电池散热特性的影响微弱, 基本上可以忽略不计, 究其原因,

电池仓的热量主要由微热管阵列以辐射的形式吸收, 而其显热的驱动力为温差, 与温度的相关性更为显著。

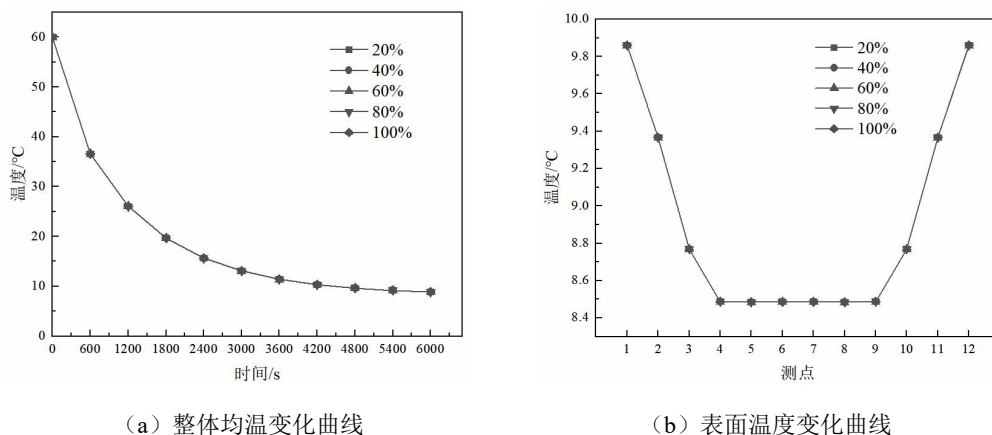


图 10 电池散热特性随环境空气湿度变化曲线

Fig.10 Battery heat dissipation characteristics curve by different ambient air humidity

3.4 空气域厚度对电池散热特性的影响规律

如图 11(a) 所示。在不同的空气域厚度下, 电池温度随时间降低, 降温速率由急变缓, 且空气域厚度越小下降速率越快, 0.2mm 空气域在 1200s 后温度初步平稳, 1mm 空气域至少需 3600s 后温

度初步平稳。以 1200s 时间点为例, 0.2mm 空气域降温 50℃, 对比 1mm 空气域降温 31℃, 降温速率提高了 61.3%, 以相同电池温度 25℃ 下做对比, 0.2mm 空气域在 391s 后温度降至 25℃, 与 1mm 空气域温度降至 25℃ 需 1807s 对比, 快了 78.4%。

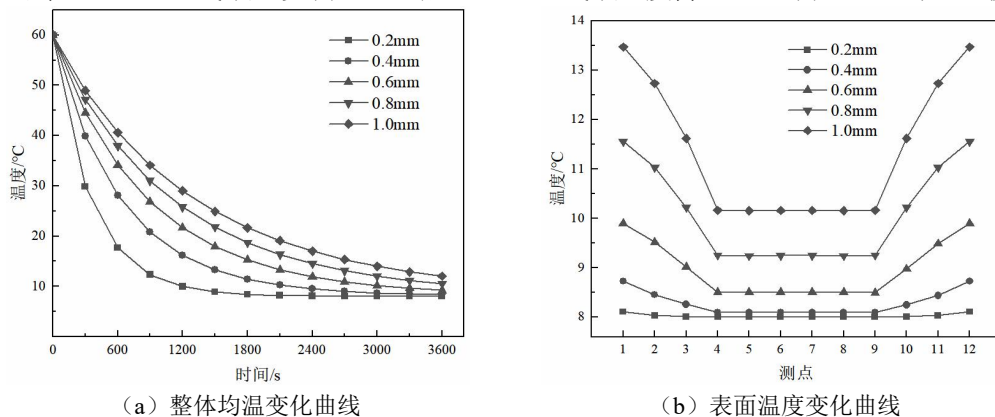


图 11 电池散热特性随不同空气域厚度变化曲线

Fig.11 Battery heat dissipation characteristics curve by different air domain thickness

从图 11(b) 可以发现, 随着空气域厚度由 0.2mm 增加到 1mm, 电池表面温度也随之增大, 测点 1-4 区域, 温度逐渐降低, 测点 4-9 区域, 温度基本稳定, 测点 9-12 区域, 温度逐渐升高, 总体呈现出电池由下而上的温度逐渐降低, 在顶部温度稳定。

3.5 充电倍率对电池散热特性的影响规律

无人机进行中继充电前, 需要经过冷却阶段, 将电池降温到 20-45℃ 范围, 本文以冷凝端温度为 8℃、环境温度为 38℃、空气湿度为 60%、空气域厚度为 1mm 作为初始条件, 冷却 1200s 后进行充电, 探究 1c、2c 和 3c 充电倍率下无人机充电仓中

锂电池的热特性规律。

图 12(a) 显示了不同充电倍率下电池的散热特性。0-1200s 为冷却阶段, 电池温度降至 33℃ 时开始充电, 从变化曲线发现, 分别以 1c 和 2c 充电倍率进行充电时, 电池温度随充电时间的延长而逐渐降低, 1c 的降低幅度大于 2c, 3c 充电倍率时, 电池温度会随充电时间的增加而小幅升高。1c 充电 3600s 电池温度降至 17℃; 2c 充电 1800s 电池温度降至 29℃; 3c 充电 1200s 电池温度升至 37℃。2c、3c 充电倍率下电池始终处于适宜温度区间 20-45℃ 内, 且温度变化最大为 4℃, 温度波动平缓。

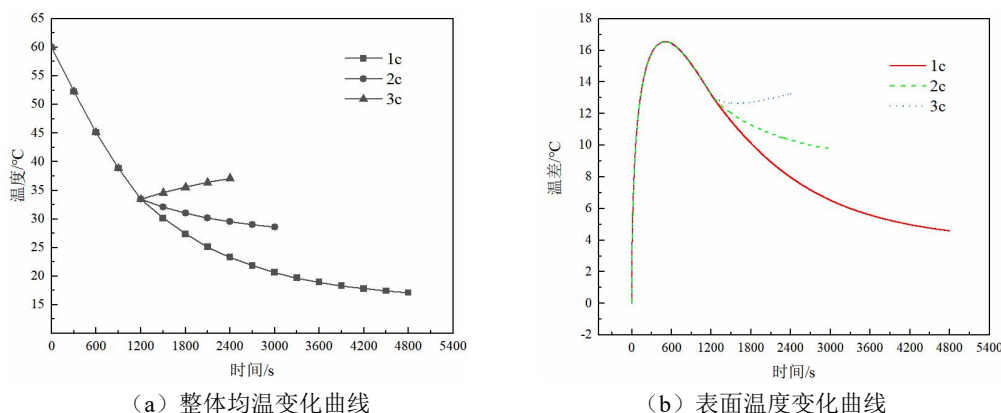


图 12 电池散热特性随充电倍率变化曲线

Fig.12 Battery heat dissipation characteristics curve by different charging rate

从图 12 (b) 可以发现, 0-1200s 为冷却阶段, 电池温差先升高后降低; 在充电阶段, 充电倍率越大, 电池温差相应增加, 1c 和 2c 充电倍率时, 电池温差会随充电时间增加而不同程度的降低, 3c 充电倍率时, 电池温差随充电时间的增加而小幅度升高。1c 充电倍率条件下, 充电 3600s 时电池温差最小, 为 4.58°C, 2c 充电倍率条件下, 充电 1800s 时电池温差最小, 为 9.77°C, 3c 充电倍率条件下, 充电 1200s 时电池温差达到最大, 为 13.25°C。

4 结论

采用 MHPA 复合冷媒直冷, 无人机电池的热量通过 MHPA 导出电池仓, 然后在 MHPA 放热端被冷媒直冷系统的蒸发器吸收, 从而实现无人机电池在充电过程中的热管理过程。通过各影响因素分析, 可以得出以下结论及建议:

(1) 为了提高无人机电池降温效果并减轻结露, 应将微热管阵列与电池之间的空气域厚度适当减小, 建议厚度尺寸为 0.2mm。

(2) 微热管放热端的温度应适中, 温度过低会增加电池温度分布的不均匀性, 并可能产生结露现象, 但是温度过高会降低电池降温效果, 建议温度为 12-16°C。

参考文献:

[1] 黄科薪, 黄金昌, 张燕芳, 等. 我国无人机发展现状及趋势展望[J]. 厦门科技, 2023, (1): 59-62.

[2] LIN J Y, LIU X H, LI S, et al. A review on recent progress, challenges and perspective of battery thermal management system[J]. International Journal of

Heat and Mass Transfer, 2021, 167: 120834.

[3] 武帅, 蔡春伟, 陈轶, 等. 多旋翼无人机无线充电技术研究进展与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 555-565.

[4] 吴晓刚, 崔智昊, 孙一钊, 等. 电动汽车大功率充电过程动力电池充电策略与热管理技术综述[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2218-2234.

[5] 赵金辉, 姜冰, 钱鑫鑫, 等. 基于双置直冷板技术的动力电池热管理系统性能研究[J]. 低温工程, 2023, (6): 50-57.

[6] XU X M, HE R. Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling[J]. Journal of Power Sources, 2013, 240: 33-41.

[7] QIAN Z, LI Y M, RAO Z H. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 126: 622-631.

[8] HÉMERY C V, PRA F, ROBIN J F, et al. Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material[J]. Journal of Power Sources, 2014, 270: 349-358.

[9] YE Y H, SHI Y X, SAW L H, et al. Performance assessment and optimization of a heat pipe thermal management system for fast charging lithiumion battery packs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 92: 893-903.

[10] Xu Y, Wang Z, Ke Z, et al. Experimental and Simulation Research on Heat Pipe Thermal Management System Coupled with Battery Thermo-Electric Mode I. Processes. 2023, 11(4): 1204.

(下转第 412 页)