

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.05.014

星载有源组件复合相变材料相变控温性能研究

余凌波, 范铁军

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:为研究添加纳米粒子的复合相变材料应用与星载有源设备相变控温时的控温性能, 采用了数值仿真的方式, 使用 ANSYS 软件比较分析了硬脂醇改性石墨烯/正十八烷石蜡复合相变材料与纯正十八烷石蜡相变材料的相变控温性能。结果表明, 在短时间控温时复合相变材料具有一定优势, 同时在有源组件非工作时间散热时, 复合相变材料可以在更短时间内将工作时间吸收的热量全部散去, 恢复初始状态速度比纯正十八烷石蜡快 14.1%, 因此添加硬脂醇改性石墨烯纳米粒子的复合相变材料可以作为提升相变控温装置整体性能的一种有效辅助手段; 同时针对与其他主要导热能力提升手段相结合后的控温性能进行了对比分析, 复合相变材料可以起到提高控温装置性能的作用, 可以与其他方式进行有效的结合。

关键词:相变控温; 复合相变材料; 数值方法; 有限元; 微重力

中图分类号: V443

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)05-0094-06

Research on phase change temperature control performance of composite phase change materials for spaceborne active components

YU Lingbo, FAN Tiejun

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to study the application of composite phase change materials with nano particles and the temperature control performance of spaceborne active equipment in phase change control, uses the numerical simulation method to compare the temperature control performance of stearyl alcohol modified Graphene/n-octadecane paraffin composite phase change materials with that of pure n-octadecane paraffin phase change materials. The results show that the composite phase change material has certain advantages when temperature is controlled for a short time. At the same time, when the active components dissipate heat during non working hours, the composite phase change material can dissipate all the heat absorbed during working hours in a shorter time, and the speed of restoring the initial state is 14.1% faster than that of pure Octadecane paraffin. Therefore, the composite phase change material with stearyl alcohol modified Graphene nanoparticles can be an effective auxiliary means to improve the overall performance of the phase change temperature control device; at the same time, a comparative analysis was conducted on the temperature control performance after combining with other main methods to improve thermal conductivity. Composite phase change materials can play a role in improving the performance of temperature control devices and can be effectively combined with other methods.

Key words: phase change temperature control; composite phase change materials; numerical methods; finite element; microgravity

收稿日期: 2023-06-13; 修回日期: 2023-07-07

引用格式: 余凌波, 范铁军. 星载有源组件复合相变材料相变控温性能研究[J]. 空间电子技术, 2023, 20(5): 94-99. YU L B, FAN T J. Research on phase change temperature control performance of composite phase change materials for spaceborne active components[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(5): 94-99.

0 引言

近年来,随着航天技术和社会需求的不断发展,星载有源设备的功率在不断变大,特别是星载大功率相控阵天线 T/R 组件,具有单轨工作时间短、工作期间发热功率高的特点^[1]。不同于地面设备散热,星载大功率设备的散热面临更多的问题,如空间微重力环境、轨道热辐射、真空环境、散热装置尺寸、重量限制严格等,在地面常用的风冷、水冷等散热方式往往无法使用。散热问题无法有效解决而引起电子设备失效率高达 55%^[2]。

相变储能技术是一种利用了物质在发生物态变化时需要吸收或释放大热量、相变时温度保持不变或在小范围变化的特点来实现温度控制的技术,是一种简单、安全、可靠性高的被动控温方式,可以为被控电子产品提供温度梯度小的热环境。自提出以来就备受学者关注,被广泛应用于航空航天领域^[3-8]。可应用于相变储能的材料(phase change materials, PCM)一般分为无机水合盐、有机材料、低熔点金属等。低熔点液态金属具有热导率高、体积潜热大的特点,是近些年新兴一类相变控温材料,大量学者对其进行了研究^[9-11],张旭东等^[12]通过数值仿真对比了液态金属镓与传统相变控温材料正十八烷石蜡的控温性能。无机水合盐、有机材料等是应用最广泛的相变储能材料,但其极低的热导率却限制了其控温性能,因此提高其导热能力是国内外学者关注的重点。Merlin 等^[13]简述了提升相变蓄热性能的各种方法,并采用实验和数值模拟的方法对提升后相变换热器的总传热系数进行对比研究。何峻杰等^[14]针对大功率相控阵天线 T/R 组件的工作状况,提出了一种相变储能平板热管的热控设计方案,实验证明,采用相变储能平板热管的热控设计,可以将热源的热量进行均匀扩散,降低热流密度,从而表现出更好的温度均匀性,再通过相变储能的方式吸收热量,可以保证天线产品持续工作 90 分钟时的结点温度控制在 70℃。采用泡沫铜^[15-16]、泡沫铝^[17]、泡沫碳^[18-19]等也可以非常有效的提高相变材料导热效率。张立等^[20]通过设计试验和有限元仿真,研究了导热增强材料的用量对相变储热能力的影响,并分析对比了在深空控温时泡沫碳、泡沫铜、膨胀石墨增强相变材料的性能差异。大量研究表明,在 PCM 中添加各类纳米颗粒可以有效的提高其导热能力^[21-29]。石墨烯及

氧化石墨烯的理论热导率高达 $5300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[30],是一种很有前景的导热增强纳米颗粒,蔡迪^[31]等通过实验测试了不同质量分数改性石墨烯与正十八烷的复合相变材料热物性,当质量分数达到 4% 时,复合相变材料的热导率相对于纯正十八烷高出了 131.9%。

大量学者都对使用纳米颗粒提升相变材料的导热能力进行了研究,分析了导热增强的机理,但目前主要的研究方向都集中在材料热导率的提升上,结合具体应用场景的控温储能效果研究较少。本文结合了星载有源设备相变控温的工作环境特点,如微重力等,通过数值仿真的方法对石墨烯/正十八烷石蜡相变复合材料控温性能进行了研究,对比了在星载有源设备相变控温应用时相变复合材料与纯正十八烷石蜡的性能差异,验证了相变复合材料与其他导热能力提升手段结合后的控温效果。

1 数学模型

1.1 物理模型

本文以长方体薄板相变控温热沉为研究对象,其结构如图 1 所示,尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$,底板和侧边框均为 1 mm 厚铝板,盖板为 4 mm 厚铝板,中间为 15 个铝制圆柱形支柱,用以保证结构不易变形。

热源为某星载有源组件,其为尺寸 $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,质量为 0.1 kg,忽略其内部具体结构,将其整体等效为比热容 60 kJ/kg 、热导率 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的实体。

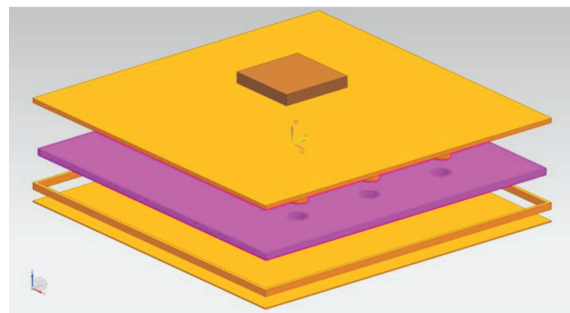


图 1 热源-热沉结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of heat source heat sink structure

在星载环境应用时,热沉散热只能通过辐射向外太空散热,故将边界条件假设为 -269°C 辐射背景,底板外侧表面热辐射发射率 $\varepsilon = 0.8$,其他表面绝热,考虑材料热辐射吸收率将来自地球及太阳的

轨道辐射等效为施加在底板外侧表面 205.7 W/m^2 的热通量, 为便于观察图像规律初始温度设为 10°C 。

本文分别比较在加热相同时间内正十八烷石

蜡和添加 4% 质量分数改性石墨烯的石墨烯/C18 石蜡相变复合材料的控温性能和散热能力。相变材料热物性参数如表 1。

表 1 相变材料物性参数^[31]

Tab. 1 Physical properties parameters of phase change materials

相变材料	相变温度范围/ $^\circ\text{C}$	相变潜热/(kJ/kg)	密度/(kg/m^3)	比热容/($\text{J/g} \cdot \text{K}$)	热导率/($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
C18 石蜡	24.6 – 34.9	232.0	777	1.658	0.177
石墨烯/C18	23.2 – 33.8	220.3	755	1.950	0.409

结合星载应用场景对模型及材料做出如下合理简化和假设:

1) 根据前文研究^[31], 改性石墨烯添加量在 4% (质量分数) 以下时, 复合相变材料可以长期稳定保持均匀, 因此 C18 石蜡和石墨烯/C18 石蜡相变材料均可视为各项同性, 且连续均匀材料, 固相和液相的热物性为常数;

2) 相变材料采用前文所制备的材料^[31], 本文只研究其使用时的热性能, 因此忽略整个过程中的所有材料的热应变及固液相变的体积变化;

3) 热沉、热源等结构接触紧密, 不考虑其接触热阻;

4) 星载设备的工作环境为微重力环境, 材料液化后不会发生自然对流, 因此忽略液相自然对流对热传导的影响。

1.2 数值模型

本研究的数值模型采用显热容法^[32], 将相变等效为区域中的一个非线性导热问题, 数学描述如式 (1)、式 (2) 所列:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (1)$$

$$k = \begin{cases} k_s & T < T_{start} \\ k_s + \frac{k_l - k_s}{\delta T} (T - k_s) & T_{start} \leq T \leq T_{end} \\ k_l & T > T_{end} \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ 为相变材料密度, C_p 为相变材料的比热容, k 为相变材料导热系数 (k_s 为固相导热系数, k_l 为液相导热系数), L 为相变潜热, f_s 为固相率的无因次量 ($f_s = 0$ 表示处于液相, $f_s = 1$ 表示处于固相, $0 < f_s < 1$ 表示处于相变区域, 固相率的大小与吸收的热量呈反比), T 为材料所处温度, T_{start} 为相变起始温度,

T_{end} 为相变结束温度, δT 为相变温度范围^[33]。

相变材料的相变潜热可用如下方法等效为比热容^[20], 如式 (3) 所列:

$$C_p = \begin{cases} C_{sp} & T < T_{start} \\ C_e = C_{sp} + \frac{L}{\delta T} & T_{start} \leq T \leq T_{end} \\ C_{lp} & T > T_{end} \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, C_{sp} 为相变材料的固相比热容, C_e 为相变过程等效比热容, C_{lp} 为相变材料的液相比热容。

1.3 求解方法

基于显热容法, 这里选用 ANSYS 的瞬态热模块求解器, 自定义热源材料和非线性相变材料, 开启时间积分。

为保证仿真结果的可靠性, 需先进行网格无关性验证, 这里采用六面体网格, 调整 ANSYS 瞬态热模块的网格分辨率来改变网格的疏密, 划分网格数分别为 15 509、24 119、66 532, 对比仿真结果, 如图 2 所示, 计算结果基本一致, 由于模型较为简单, 因此 15 509 网格数量即可满足计算要求, 同时也可提高仿真效率。

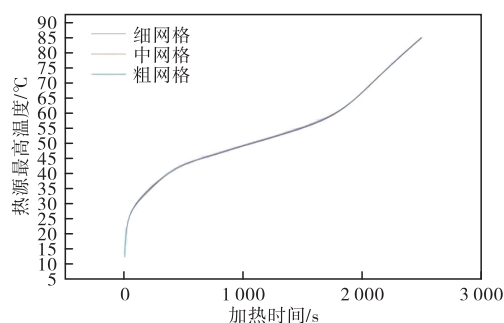


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

由于所研究问题为非线性瞬态热问题,为使结果收敛,时间步长应在保证计算效率的前提下尽量小,经过多次试算,加热过程时间步长取 1 s,散热过程取 0.5 s。

2 结果与讨论

2.1 加热过程

图 3 为加热过程中热源最高温度随时间变化曲线。温度在达到相变范围前热量以显热的形式被控温装置吸收,热源温度上升迅速,在温度进入相变范围后,工质开始相变,以潜热的形式吸收热源热量,达到控温效果,热源温度上升速度呈明显减缓趋势,随着相变过程的进行,热量向周围传递,固-液两相糊状区域向外推移,使较远区域工质逐渐开始参与相变,使得热源温度在一段时间内上升速度缓慢,在相变过程进行到大多数工质完成相变后,热源温度逐渐开始加速上升并在全部工质完成相变后保持固定的上升速度,此时热量再次全部显热形式被相变热沉吸收。

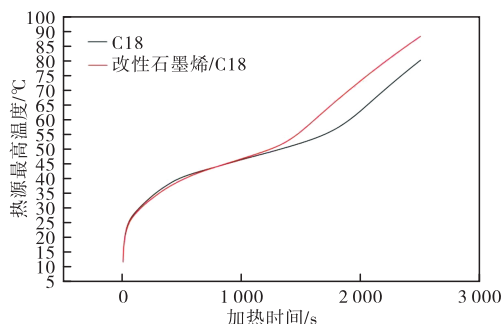


图 3 改性石墨烯/C18 和纯 C18 加热过程热源最高温度

Fig.3 The highest temperature of the heat source during the heating process of modified graphene/C18 and pure C18

可以看出在短时间加热的情况下,由于改性石墨烯/C18 石蜡复合相变材料的热导率高于 C18 石蜡,因此可以将热量快速传递至更大的范围,使更多的工质参与相变吸热过程,使用复合相变材料控温时的热源温度低于 C18 石蜡,最低处约低 1 ℃。对于长时间加热,由于加入改性石墨烯后相变工质潜热会有所下降,复合相变材料会比 C18,更快完成全部工质相变吸热过程,后段时间复合相变材料控温的热源温度会明显高于 C18。

2.2 散热过程

对于一些周期性工作的星载有源设备,在其非

工作时间,储热装置的散热能力也是热设计中的重要内容。图 4 是加热 10 分钟后开始进行散热的热源最高温度。根据图线可以看出,在散热过程中由于整个装置显热热容较小,热源温度会呈骤降趋势,达到工质相变范围后开始放缓。

由于相变复合材料的导热系数高于 C18 石蜡,因此会比先达到大多数材料开始凝固,并且在凝固过程中保持整体温度高于 C18 石蜡,由于加热时间相同,两种工质吸收的总热量相同,而辐射散热速度与温度的 4 次方成正比,因此温度越高相变控温装置向空间环境辐射热量越多,同时复合相变材料的热导率高,可以更快的将远离辐射面一侧工质的热量传递至辐射面,以复合材料为工质时,装置会在更短的时间内将吸收的热量辐射向太空,并完成全部工质冷却凝固过程,恢复初始状态,完成全部相变时间比纯 C18 石蜡短 14.1%。

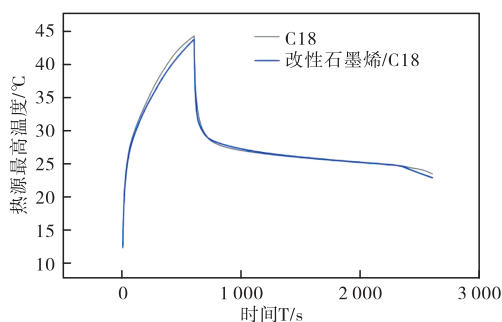


图 4 改性石墨烯/C18 和纯 C18 散热过程热源最高温度

Fig.4 The highest temperature of the heat source during the heat dissipation process of modified graphene/C18 and pure C18

3 应用前景分析

改性石墨烯/C18 石蜡相变复合材料相较于纯 C18 石蜡在短时间控温方面有一定提升,且材料的密度没有太大改变,在面向一些需要使用相变热沉进行短时间控温的星载有源设备,如星载 T/R 组件,可以作为一种辅助方案,且不会使控温装置体积、质量变大。下面对一种针对星载大功率 T/R 组件设计的新型相变储能-平板热管方案^[14],辅助以石墨烯/C18 石蜡复合相变材料之后的效果进行仿真,物理模型采用上文中相同的模型,将 4 mm 厚铝制盖板换为 4 mm 厚铝制平板热管,其加热过程热源最高温度如图 5 所示,散热过程热源最高温度如图 6 所示。

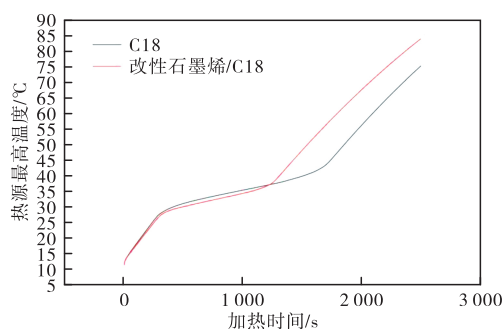


图 5 相变储能-平板热管方案

改性石墨烯/C18 和纯 C18 加热过程热源最高温度

Fig. 5 Phase change energy storage-flat plate heat pipe scheme modified graphene/C18 and pure C18 heating process heat source maximum temperature

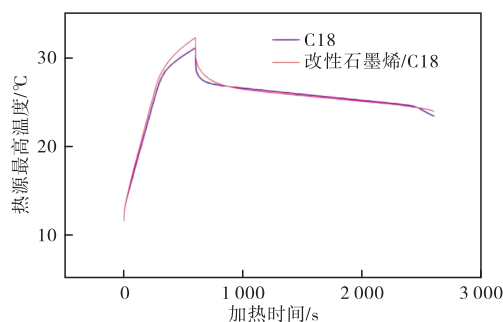


图 6 相变储能-平板热管方案

改性石墨烯/C18 和纯 C18 散热过程热源最高温度

Fig. 6 Phase change energy storage-flat plate heat pipe scheme modified graphene/C18 and pure C18 heat dissipation process heat source maximum temperature

通过仿真结果可以看出,在短时间控温方面,使用相变复合材料后相变储能-平板热管方案比原先使用纯 C18 石蜡时热源的最高温度有所下降,最高下降约 1.16°C ,可以起到辅助控温效果。同时,使用相变复合材料后,散热过程进入相变散热阶段的速度比纯 C18 石蜡更快,可以起到缩短恢复初始状态所用时间的作用。

4 结论

本文采用数值方法对改性石墨烯/C18 石蜡复合相变材料和纯 C18 石蜡的相变控温过程进行了仿真,分析对比了其在不同情况下的控温性能差异,并得到以下结论:

1) 由于石墨烯/C18 石蜡复合相变材料的热导率高于纯 C18 石蜡相变材料,因此在短时间控温方面性能较原先有所提升,且不会使相变热沉体积或质量增大,因此有作为一种改善控温性能的辅助手

段的潜力;

2) 由于石墨烯/C18 石蜡复合相变材料相较于纯 C18 石蜡相变材料相变潜热下降,因此不适合作为需要长时间控温的相变材料;

3) 在散热过程中,由于复合相变材料导热系数比纯 C18 石蜡高,因此可以更快的将吸收的热量传递至辐射面,并辐射至太空,恢复初始状态的时间相对纯 C18 石蜡较短,对一些在轨短时工作,但每次工作热流密度大的星载有源组件控温,如相控阵天线 TR 组件等,具有一定的应用潜力;

4) 对新的控温方案使用石墨烯/C18 石蜡复合相变材料后的控温效果进行了仿真,表明石墨烯/C18 石蜡复合相变材料作为相变工质与新方案结合,可以对控温效果有所改进。

参考文献:

- [1] WANG C S, WANG Y, LIAN P Y, et al. Space phased array antenna developments: A perspective on structural design[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(7): 44-63.
- [2] YE H L T. Review of heat transfer technologies in electronic equipment[J]. Journal of Electronic Packaging, 1995, 117(4): 333-339.
- [3] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术: 原理及其应用: 国家"十五"出版规划重点图书 航天一线专家学术专著#空间飞行器设计专业系列教材[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [4] BIRUR G, NOVAK K. Novel thermal control approaches for mars [M]. USA: NASA, 2006.
- [5] 邵兴国, 向艳超, 谭沧海. 嫦娥一号卫星热控设计中热管的应用及验证[J]. 航天器工程, 2008, 17(1): 63-67.
- [6] 王领华, 刘欣, 王海英, 等. 相变蓄热在飞行器热控中的应用研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(6): 88-92.
- [7] 潘艾刚, 王俊彪, 张贤杰. 相变温控技术在航天热控领域中的应用现状及展望[J]. 材料导报, 2013, 27(23): 113-119.
- [8] 王磊, 营鲁京. 相变材料在航天器上的应用[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(5): 522-528.
- [9] YANG X H, TAN S C, LIU J. Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 899-907.
- [10] 郭文华, 彭浩, 赵建福. 液态金属镓微重力下的融化传热特性[J]. 空间科学学报, 2019, 39(6): 778-786.
- [11] GE H S, LI H Y, MEI S F, et al. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emer-

- ging frontier in energy area[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 21: 331-346.
- [12] 张旭东,杨昌鹏,于新刚,等. 面向航天应用的液态金属相变传热性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2021, 51(6): 17-23.
- [13] MERLIN K, DELAUNAY D, SOTO J, et al. Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage systems: Comparative study of different solutions and thermal contact investigation between the exchanger and the PCM[J]. Applied Energy, 2016, 166: 107-116.
- [14] 何峻杰,王耀霆,孟通,等. 大功率 T/R 组件相变温控平板热管的散热特性实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 142-150.
- [15] 迟蓬涛,高红霞,余建祖,等. 翅片-泡沫铜复合结构的导热增强作用[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 854-860.
- [16] 施尚,余建祖,陈梦东,等. 基于泡沫铜/石蜡的锂电池热管理系统性能[J]. 化工学报, 2017, 68(7): 2678-2683.
- [17] WANG Z C, ZHANG Z Q, 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.
- [18] Fedden. A. D. Graphitized carbon foam with phase change material[J]. MS Thesis, Wright-Patterson AFB, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, AFIT/GA/ENY/06 - M02, 2006.
- [19] 白天,余立琼,龚静,等. 泡沫碳/相变材料复合体研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(5): 6-9.
- [20] 张立,王升,赵静. 相变材料深空控温技术研究[J]. 空间电子技术, 2022, 19(1): 34-40.
- [21] 方晓明,张正国,陈中华,等. 有机物/膨胀石墨复合相变储热建筑材料及其制备方法: CN101239798A[P]. 2008-08-13.
- [22] ZHANG Z G, FANG X M. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(3): 303-310.
- [23] YUAN M D, REN Y X, XU C, et al. Characterization and stability study of a form-stable erythritol/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage[J]. Renewable Energy, 2019, 136: 211-222.
- [24] SONG Y L, ZHANG N, JING Y G, et al. Experimental and numerical investigation on dodecane/expanded graphite shape-stabilized phase change material for cold energy storage[J]. Energy, 2019, 189: 116175.
- [25] WU T, XIE N, NIU J Y, et al. Preparation of a low-temperature nanofluid phase change material: MgCl₂-H₂O eutectic salt solution system with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 113: 136-144.
- [26] XIE N, NIU J Y, GAO X N, et al. Fabrication and characterization of electrospun fatty acid form-stable phase change materials in the presence of copper nanoparticles[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(11): 8567-8577.
- [27] CHEN P, GAO X N, WANG Y Q, et al. Metal foam embedded in SEBS/paraffin/HDPE form-stable PCMs for thermal energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 149: 60-65.
- [28] CAO R R, WANG Y Z, CHEN S, et al. Multiresponsive shape-stabilized hexadecyl acrylate-grafted graphene as a phase change material with enhanced thermal and electrical conductivities[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(9): 8982-8991.
- [29] HAN D M, GUENE LOUGOU B, XU Y T, et al. Thermal properties characterization of chloride salts/nanoparticles composite phase change material for high-temperature thermal energy storage[J]. Applied Energy, 2020, 264(Apr. 15): 114674. 1-114674. 9.
- [30] HUANG X Y, IIZUKA T, JIANG P K, et al. Role of interface on the thermal conductivity of highly filled dielectric epoxy/AlN composites[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(25): 13629-13639.
- [31] 蔡迪,李静. 硬脂醇改性的氧化石墨烯/正十八烷复合相变材料的热物性研究[J]. 化工学报, 2020, 71(10): 4826-4835.
- [32] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 1998.
- [33] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

作者简介:余凌波(1992—),陕西西安人,本科,助理工程师。主要研究方向为星载有源设备散热技术。E-mail: 475323146@qq.com

通讯作者:范铁军(1970—),陕西西安人,硕士,研究员。主要从事空间电子产品制造技术研究。E-mail: 473497252@qq.com