

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413459

基于柔性相变储能材料的超低温巡检 机器人热管理技术研究*

王贵山¹, 阳 灿¹, 尉成果¹, 王 韩², 王伟东²

(1. 中国空气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所 绵阳 621000;

2. 哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001)

摘要:超低温巡检机器人能够在人不可达的环境中遂行各类工作任务,太空和深海等极端超低温环境能给大部分常规电子元件和机械部件的正常运行造成不可逆损伤,因此节能高效的热管理技术对超低温巡检机器人意义重大,也是目前该领域面临的难点技术之一。相变储能具有高储能密度和近似恒温的热管理能力等独特优势,在热管理方面具有重要的研究价值,但在-163℃超低温下相变储能材料的储能机理不明晰,相变材料类型、空间分布等对储能的影响机制尚不明确。研究从超低温相变材料的储能机理出发,研究了超低温环境下(-163℃)不同相变储能材料的温度变化情况,定量分析了不同相变材料的相变过程和储能效果,并通过实验验证分析结果的准确性,进而优选了相变储能材料。在此基础上对相变储能材料不同尺度和空间分布下的储能效果开展了仿真研究,对相变储能材料空间分布进行了分析和优化。最后基于研究的相变储能热管理技术设计了超低温巡检机器人并开展低温巡检实验,结果表明巡检机器人能够在-163℃超低温下开展长时间巡检工作,验证了基于相变储能热管理技术的可行性,为具备高效热管理能力的超低温巡检机器人设计提供了一条有效的技术途径。

关键词:超低温;巡检机器人;相变储能;热管理技术;柔性材料

中图分类号: TH69 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4015

Research on thermal management technology for ultra-low temperature inspection robot based on flexible phase change energy storage materials

Wang Guishan¹, Yang Can¹, Yu Chengguo¹, Wang Han², Wang Weidong²

(1. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Institute of Robotics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Cryogenic inspection robots can perform various tasks in environments that are inaccessible to humans. Extreme cryogenic conditions, such as space and deep sea, can cause irreversible damage to most conventional electronic components and mechanical parts. Therefore, energy-efficient thermal management technology is of great significance for cryogenic inspection robots and remains one of the technical challenges in this field. Phase change materials offer unique advantages, including high energy storage density and near-isothermal thermal management capabilities, making them highly valuable for thermal regulation. However, the energy storage mechanisms of phase change materials at ultra-low temperatures (-163℃) remain unclear, and the influence of phase change materials and spatial distribution on energy storage performance is not well understood. This study starts from the energy storage mechanism of cryogenic phase change materials. The temperature variations of different phase change materials under -163℃ conditions were examined, and the phase transition processes and energy storage efficiencies were quantitatively analyzed. Experimental validation confirmed the accuracy of the analytical results, leading to the optimal selection of phase change materials. Furthermore, simulation studies were conducted to evaluate the energy storage performance of phase change materials at different scales and spatial distributions, followed by an analysis and optimization of their spatial arrangement. Finally, based on the studied phase change energy storage thermal management technology, a cryogenic inspection robot was designed and low-temperature inspection experiments were conducted. The

收稿日期: 2024-11-07 Received Date: 2024-11-07

* 基金项目: 四川省自然科学基金(2023NSFSC0980)项目资助

results show that the inspection robot can carry out long-term inspection work at an ultra-low temperature of -163°C , verifying the feasibility of phase change energy storage thermal management technology. This work provides an effective technical approach for designing cryogenic inspection robots with efficient thermal management capabilities.

Keywords: cryogenic; inspection robots; phase change energy storage; thermal management technology; flexible materials

0 引言

随着人工智能和电子技术的发展,巡检机器人智能化和集成化程度不断提高,使其逐渐具备了代替人类执行危险任务的能力^[1-2]。太空和深海领域是国家战略和大国竞争的重点方向,未来智能巡检机器人在深海探测和封闭管道等极端环境的任务需求将会不断增加,但这些任务所涉及的极端超低温 -160°C 、补能困难和外力不可达性,给巡检机器人的续航能力带来巨大考验^[3-5]。有效的热管理技术能够保证超低温巡检机器人的执行器和电子元件正常工作,且在有限能量下将更多能量用于执行巡检机器人的工作任务^[6-7]。常规低温(-40°C)下的热管理技术广泛存在于日常机械电子设备,如手机、电脑以及新能源汽车等,低温环境最直接的影响是额外的能量用于维持机内温度,这不可避免导致机电设备续航时间缩短或者出现断电自保护现象^[8]。现有普通低温下的热管理技术包含风泵、液泵和相变技术三大主要手段,极端超低温下的热管理技术仍不成熟,其中相变储能技术在极端超低温热管理的可实现性、能耗性能和抗温度冲击性能上均有独特的优势,因此研究基于相变储能材料的热管理技术对于极端超低温巡检机器人的设计具有重要意义和实用价值。

相变储能材料具有高相变潜热和较高的热能存储密度,在发生相变的过程中可通过吸收或释放热量来保持自身恒定温度,因此被广泛应用于各种机电系统的热管理^[9-11]。在相变材料的计算模拟方面,Zukowski等^[12]采用三次样条函数插值法确定相变材料温度计算的每一时间步骤的有效比热,使用完全隐式控制体积有限差分法求解带边界和初始条件的三维瞬态热分析方程,相变材料的凝固/融化的理论建模与实际物理结果的趋势具有一致性。Bondareva等^[13]对带有内热源的封闭方腔内相变材料的自然对流进行了模拟,采用有限差分法对相应初始条件和边界条件的偏微分方程进行了求解,分析了温差对于流体流动和换热的影响。Li等^[14]对相变材料填料胶囊中的强迫对流、自然对流以及过冷现象进行了分析,研究了胶囊尺寸、孔隙率和容器尺寸等对其热管理性能的影响。朱方龙^[15]对带相变材料层的热防护服进行了数值模拟与实验研究,得出不同热流环境下热防护服应选用不同的相变材料且相变材料层不应与外界环境直接接触;在相变材料的热管理评估方面,Acar等^[16]对

比了不同终端用途的热管理方案,对相变材料等新兴热管理系统进行了评估,在现有技术基础上通过算法优化了热管理策略,实现了混合动力汽车、工业流水线和机器人应用的能效和放能效分别达到60%和50%。Wang等^[17]对机器人小型液冷板双向并联循环和串联循环两种阵列类型的热管理方式进行了实验评估,研究得出双向并联循环的热管理方式要优于串联循环;在相变材料的热管理应用方面,Lee等^[18]对焊接机器人的热管理进行了分析,提出将电子元器件隔离防护的热防护方式。蔡永成等^[19]通过整合相变材料与热电制冷技术的复合散热系统,以应对防护型机器人控制装置中核心元件的过热问题。借助Ansys-Icepak热力学模拟软件,对控制装置及其外部机壳的整体散热性能进行了数值分析,证实了该散热方案的实用性及散热构造的稳定性。栾伟玲等^[20]通过融合纳米改性相变材料的被动散热特性,结合系统空间布局优化和热源分布特征,深入研究了纳米材料对散热介质热传导性能的作用机制。Gao等^[21]针对高温环境中救援机器人电机驱动装置的热管理需求,构建了一套复合型热防护解决方案。该方案通过集成热隔离层与相变蓄能系统,充分利用相变材料的潜热特性,实现了对关键电子元件的有效温度调控。上述研究对相变材料在常规低温和高温下的计算模拟、储能评估和应用等方面开展了探索研究,表明了相变材料在热管理技术领域具有独特的优势和潜能。但是超低温(-160°C)下相变材料的储能性能和热管理技术目前还鲜有研究报道,亟需在相变材料的储能机理基础上开展热管理技术的实验研究。

研究从基于相变储能热管理技术的超低温巡检机器人的设计需求出发,针对超低温下相变材料储能机理不明晰、不同相变材料的空间分布和尺寸分布对储能的影响机制不明确等问题,首先从相变能量密度和相变物理过程出发分析超低温下相变材料的储能机理,在此基础上建立ANSYS仿真模型对不同相变材料、不同尺度和不同相变温度下的储能性能开展定量分析,评估优选了超低温甲酸相变材料及其空间分布对储能性能的影响,最后结合超低温巡检机器人平台对相变储能的热管理能力进行实验研究,结果表明低温巡检机器人的各系统能够在 -163°C 超低温下均能安全工作,验证了基于超低温相变储能热管理技术的可行性和有效性,为超低温下巡检机器人的热管理设计提供了有效的技术途径。

1 相变材料低温储能机理与性能分析

1.1 相变材料超低温储能机理

热能储存一般情况下可分为化学反应储能、显热储能和潜热储能 3 种形式。其中,相变储能则是利用物质的相变过程储存能量,且在储放热过程温度基本不发生变化,如图 1(a) 所示;化学反应储能是利用金属氢化物或氨化物的可逆化学反应进行能量转化,虽然具有储能密度高和清洁无污染等优点,但化学反应储能技术难度高且不易控制,与实际应用尚有一定距离;显热储能是利用物质的热容来进行热能贮存且本身形态不发生变化,这种储热方式具有运行简单和成本低等优点,但储能密度、装置体积以及放热变温特性限制了其应用范围,其能量温度变化关系如图 1(b) 所示。因此,相变材料在低温储能和保温热管理技术领域有着独特的优势,也是目前开发研究和应用较多的储能材料,具有重要的研究意义和实用价值。

以冰-水的相变储能过程为例,单位质量的冰熔化成水将吸收 335 J/g 的潜热。当水进一步加热时,每升高 1℃ 大约只吸收 4 J/g 的潜热,冰-水相变储存热量是其显热存储能量的 80 多倍,定量说明了相变储能具有较高的储能密度。如图 1(c) 所示,在超低温环境下,相变材料与低温环境接触产生换热效应而吸收能量,吸收能量的过程可用牛顿冷却公式进行定量描述,如式(1) 所示。

$$q = h \times (t_f - t_w)$$

(1)

其中, q 为单位面积的固体表面与流体之间在单位时间内交换的热量,称作热流密度,单位为 W/m^2 , t_f 和 t_w 分别为固体表面和环境的温度,单位为 K。

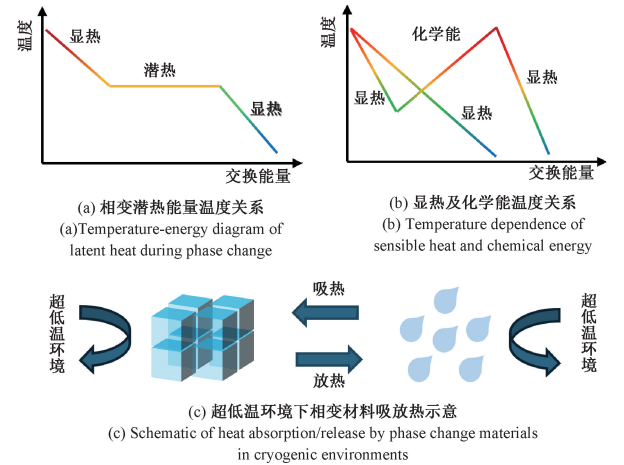


图 1 相变材料吸能放热示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy absorption and release by phase change materials

由此可见在极端超低温环境温度 t_w 下,单位时间的换热能量较大、换热较快,定量说明超低温下的长时间热管理具有较大难度。相变材料能够在极端环境下利用材料本身的相变吸收能量,在同等换热速度下比非相变材料温度变化更慢,在超低温下的热管理中具有重要的应用潜力。但在超低温环境下,不同相变材料的相变温度、储能性能对于热管理的效能具有重要的影响机制,这需要在理论仿真和性能试验的基础上开展进一步的优选。

1.2 不同相变材料储能特性分析

不同相变材料在超低温储能时的微观结构变化和宏观性能表现上均有较大的差距,极低温变化时引起的微观结构变化是相变材料主要的储能机理,即单位质量的相变材料从液相到固相的成核和凝固过程中释放热量。凝固过程的第 1 步是在液相中形成固相的结晶核心,然后通过这些核心不断长大完成液相向固相的转变,因此形核是凝固过程研究的关键问题之一。经典成核-结晶模型认为相变材料在溶液中的结晶是一个复杂的动力学过程,成核过程及其储能性能与材料的密度、比热容、导热系数等参数具有密切联系。

利用 APDL(ANSYS parametric design language) 命令流建立相变材料的仿真模型,通过 APDL 命令和函数,可以实现创建几何体、定义材料属性、设置加载条件、应用约束等功能,从而实现复杂仿真任务的准确建模和高效求解。具体地,设置环境温度为 -160°C ,创建大小为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 90\text{ mm}$,厚度均匀且为 0.5 mm 的长方体状铝合金盒:在该盒底部建模一层厚 5 mm 的相变材料,其余部分设为空气,如图 2 所示。

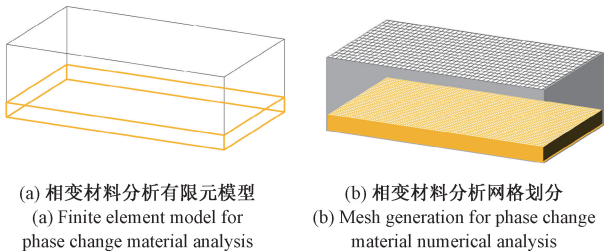


图 2 相变材料建模与保温性能仿真

Fig. 2 Modling of phase change materials and the simulation of temperature properties

针对超低温环境下不同相变材料的储能性能,分析相变材料密度、比热、导热系数、相变温度等参数,分别对甲酸、正葵醇、脂肪醇(十四醇)和十一烷四种材料建立仿真模型并设定材料参数,如表 1 所示。

上述模型仿真分析了在 -160°C 的极端低温环境下,30 min 内相变材料及铝合金盒内部空气的温度变化情况,其伴随变化曲线如图 3 所示。

表 1 不同相变材料物理参数

Table 1 Physical properties of different PCMs

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热 系数	相变温 度/ $^{\circ}\text{C}$	相变潜 热/ J
甲酸	1 227.0	1.17	2.270	8.00	277
正癸醇	829.7	2.43	0.165	8.00	210
十四醇	820.0	2.53	0.169	37.00	117
十一烷	740.2	1.94	0.146	-25.54	404

相变材料在极端超低温下的温度场分布如图 4(a) 所示,可以看出相变材料温度明显高于周围空气温度,说明在极端超低温环境下相变材料能够有效缓解电控箱内部温度的降低,有效实现了相变储能的效果。进一步地,对比 4 种相变材料在极端超低温环境下的温度变化曲线如图 4(b) 所示。由此可见 4 种选定的相变材料中,甲酸的温度下降最为缓慢保温效果最好,正癸醇次之,十一烷再次之,十四醇保温效果最差。具体地,前 3 种材料由于相变温度较低,当温度下降到相变温度左右开始

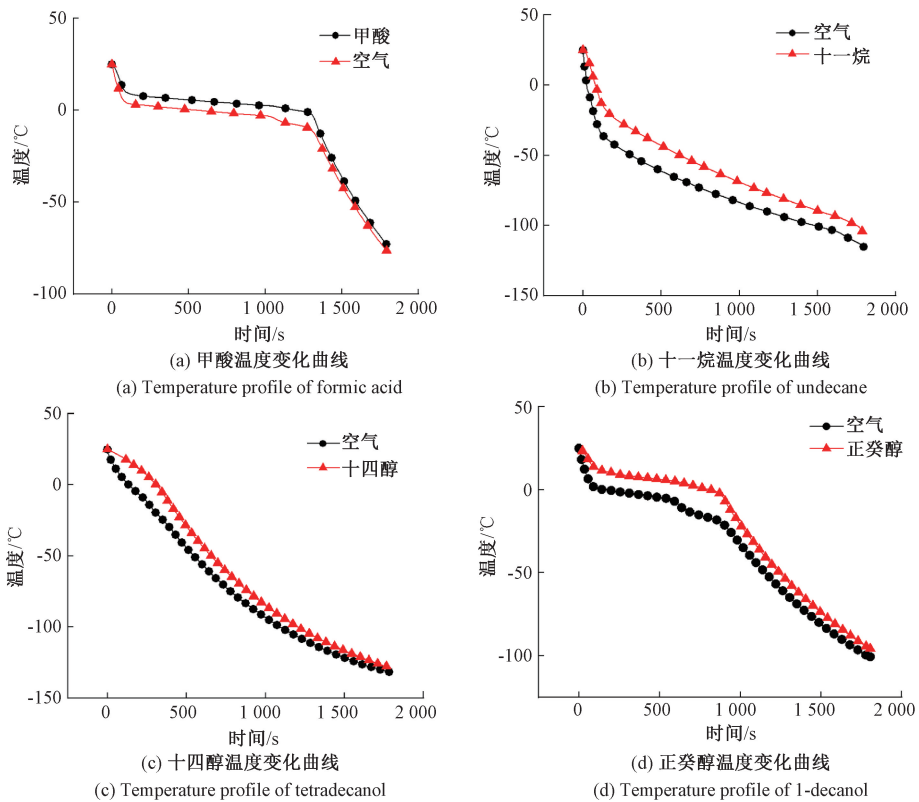


图 3 不同相变材料温度变化仿真曲线

Fig. 3 Temperature changes of different phase change materials

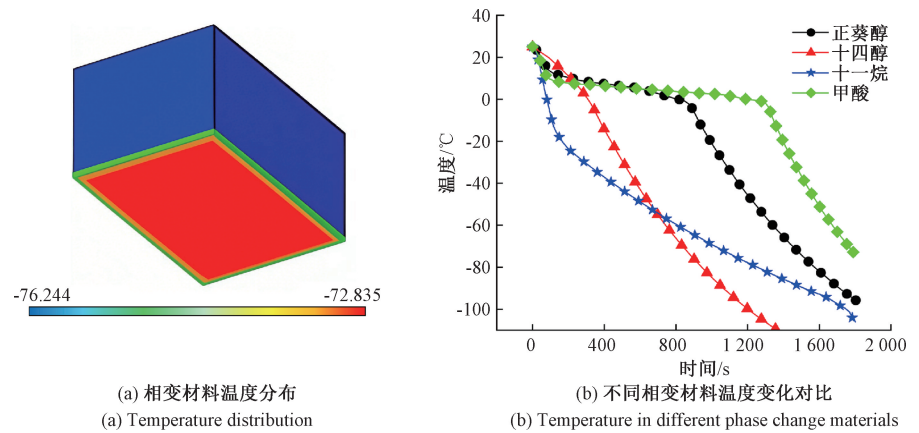


图 4 不同相变材料温度分布与变化趋势对比

Fig. 4 Comparison of the temperature changes of different phase change materials

相变,这一段时间材料及上方空气温度曲线下降平缓,甲酸及正癸醇在此过程中的温度曲线近似平直。而十四醇,相变温度较高,为37℃。其在常温下已为固态,因此其温度一直下降而无相变过程。

另一方面,电控箱中相变材料的厚度尺寸也是影响相变储能性能的重要参数。相变材料厚度越大

储能效果越好,但同时空间和重量等占用较大而不利影响,厚度越小效果反之。因此,有必要在仿真模型的基础上定量分析厚度对保温性能的影响,为开展相变材料的空间布局性能优化奠定数据基础,同一种相变材料在不同厚度下的保温性能对比如图5(a)所示。

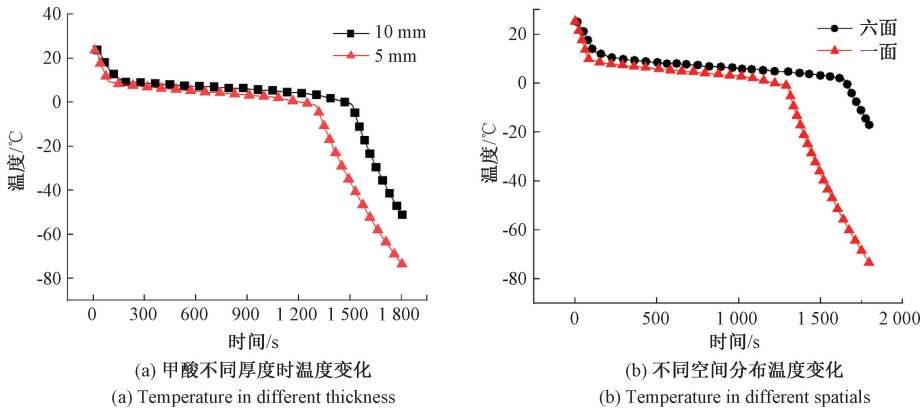


图5 不同相变材料厚度及空间分布温度变化

Fig. 5 Temperature changes of different thickness and spatial distribution of phase change materials

根据仿真图中电控箱里的温度变化曲线对比可知,在外界条件不变的情况下,增加相变材料的厚度确实可有效提高其保温性能,但是改善效果有限,且保温材料的厚度过大将会压缩内部组件安装空间,还需要在相变材料空间分布研究中进一步开展优化。当前仿真仅模拟了电控箱底层铺设相变材料,在此基础上,将四周铺满等厚度相变材料与仅底层铺设相变材料的电控箱保温性能对比,如图5(b)所示。结果表明,在30 min 低温环境下,底部平铺一层甲酸的低温试验箱内部空气温度下降至-76℃,而四周包裹一层甲酸的低温试验箱,其内部空气温度仅下降到-17℃,保温效果远远高于前者。

通过对不同相变材料储能特性的建模与仿真分析,模拟不同相变材料在-160℃极端低温下,定量分析出30 min 内不同相变材料电控箱的温度变化,在甲酸、正癸醇、十一烷以及十四醇这4种相变材料中,甲酸的温度下降最为缓慢保温效果最好,因此选取甲酸作为超低温

巡检机器人的相变储能材料。

2 结构化相变储能材料空间分布优化研究

2.1 电控箱相变储能结构性能优化

甲酸作为性能优异的相变储能材料,具备应用于超低温巡检机器人电控箱保温的潜力。在电控箱的空间分布上,相变材料需要搭配隔热层、物理隔离层等才能最大效能发挥储能优势。超低温巡检机器人从外往内分别是金属外壳、隔热材料、相变材料以及内部空气和器件,其中隔热材料选用广州埃力生公司生产的DRT02系列的气凝胶毡,该系列气凝胶毡是一种柔性、高效保温保冷毡。同样地,利用ANSYS中的APDL建立结构化相变储能电控箱的模型,如图6所示。建立仿真模型后,按照如表2设置结构化相变储能电控箱材料和空间尺寸参数,利用APDL命令流分别对不同厚度的相变材料层-气凝

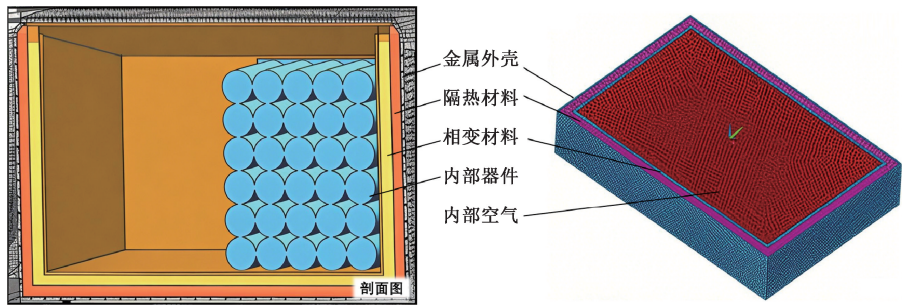


图6 结构化相变储能电控箱空间分布与有限元模型

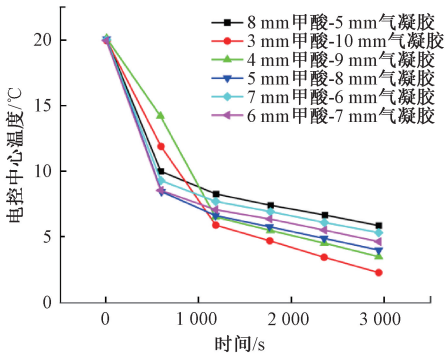
Fig. 6 Spatial distribution and finite element model of power control box with phase change materials

表 2 结构化相变材料电控箱空间分布尺寸参数

Table 2 Size parameters of the strutral power control box (mm)

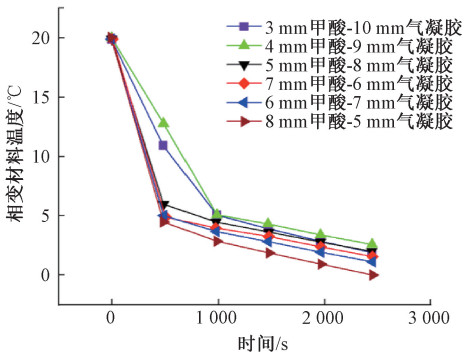
尺寸 模型	碳纤维 外壳	铝合金 内箱	气凝胶 保温层	甲酸相变 材料层
长	348	316	随厚变化	随厚变化
宽	230	200	随厚变化	随厚变化
高	146	125	随厚变化	随厚变化
厚	2	1.5	10~5	3~8

胶毡组合,在保证电控箱内部空间恒定情况下,相变材料和气凝胶层厚度之和固定为 13 mm,因此设置 3~10 mm、4~9 mm、5~8 mm、6~7 mm、7~6 mm、8~5 mm 的相变材料-气凝胶毡厚度组合开展分析研究。



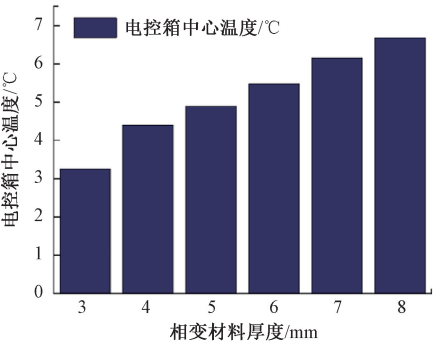
(a) 电控中心温度变化对比

(a) Temperature in the electronic control center



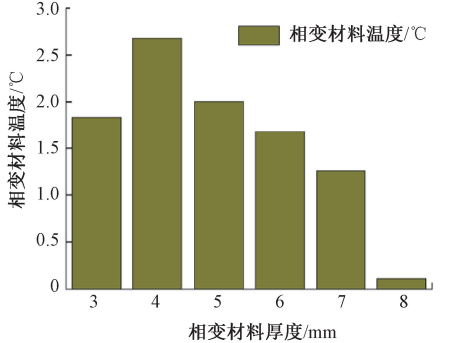
(b) 相变材料温度变化对比

(b) Temperatures of different phase change materials



(c) 电控中心温度随相变材料厚度变化

(c) Temperature variations in electronic control center with phase change material thickness



(d) 相变材料温度随厚度变化

(d) Temperature variations of phase change materials with thickness

图 7 不同空间分布下电控箱保温性能仿真对比

Fig. 7 The temperature of power control box under different spatial distribution of phase change materials

综合考虑巡检机器人电控箱保温性能、重量、工作时长和封装难易程度,优化选取电控箱中相变材料的厚度为 6 mm,隔热材料气凝胶毡厚度设计为 7 mm,通过仿真模型分析在-162℃下电控箱温度云图和保温曲线如图 8 所示,相变储能实现了 67 min 的保温效果。

设定电控箱内部初始温度为 20℃,模拟-160℃低温环境下 40 min 内电控箱中心空气的温度变化和相变材料温度变化情况,并得到其温度变化曲线如图 7 (a) 和 (b) 所示。由此可知不同厚度的相变材料-气凝胶毡组合下,气凝胶毡在温度下降初期可以有效减缓内部温度下降。当温度下降到相变材料的相变温度时,随着相变材料厚度的增加,电控箱中心最终温降越小,保温性能越好,如图 7 (c) 所示。另一方面,根据克服力做功公式 (式(2)),相同空间约束下相变材料厚度越厚,超低温巡检机器人的整体质量 m 越大。

$$q = m \times g \times h + f \times s \tag{2}$$

其中, g 代表重力加速度, h 为攀爬高度差, f 代表摩擦力, $f=\mu\times m\times g$ 与质量正相关, μ 为摩擦系数, s 为位移距离,在给定电池容量下克服重力和摩擦力做功越多,相应的工作时长缩短,如图 7 (d) 所示。

2.2 电机箱相变储能结构性能优化研究

电机箱和电控箱在功能上都需要保证巡检机器人在极低温环境下能够保持温度恒定,但是电机箱内部包含机械结构件和电子件的结合,尤其齿轮啮合、润滑等性能易在极端低温环境下形成不可逆损坏,因此电机箱的保

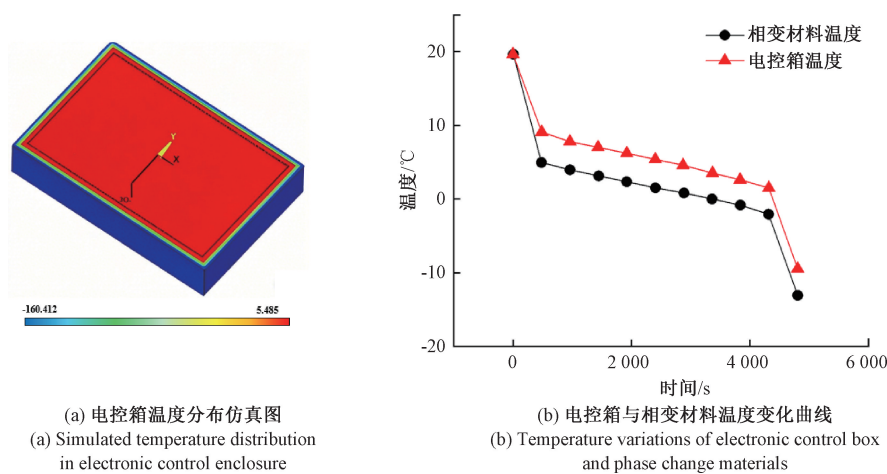


图 8 相变材料 6 mm-隔热材料 7 mm 空间分布下电控箱保温性能分析

Fig. 8 The heat preservation properties of power control box under phase change materials (6 mm) and heat insulation materials(7 mm)

温需求和性能要求也更加严苛。如图 9(a) 所示为巡检机器人电机箱的剖面结构示意图,1 为相变材料,2 为气凝胶毡,最外层 3 是由双层碳纤维制成的真空杜瓦。

类似于电控箱的分析方法,甲酸相变材料和气凝胶

毡层的总厚度由于安装空间限制为 12 mm 厚,选取 2~10 mm、3~9 mm、4~8 mm、5~7 mm、6~6 mm、7~5 mm 的相变材料层与气凝胶毡厚度组合,用空气域替代电机并设置其初始温度为 20℃,模拟 -160℃ 低温环境下

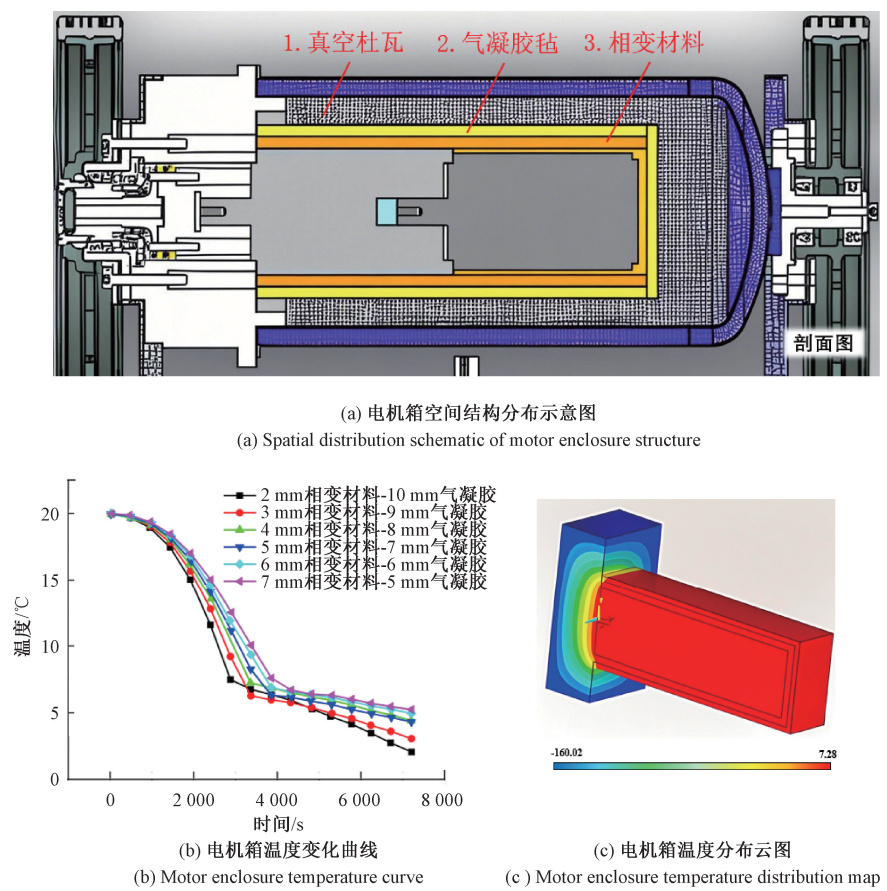


图 9 电机箱相变储能结构与性能分析

Fig. 9 The structures and heat preservation properties of the motor box with phase change materials

80 min 内电机温度变化情况,并得到其温度变化曲线如图 9(b)所示。随着相变材料厚度的增加保温性能越好得到改善。当相变材料厚度由 2 mm 至 6 mm 变化时,80 min 内电控箱内部中心温度分别下降了 17.8℃、16.8℃、15.5℃、15.6℃、14.9℃。而当选择 7 mm 厚相变材料,5 mm 厚气凝胶毡时,保温性能最佳,其温度仅下降了 14.7℃。

综上所述,电机箱的相变储能结构采用保守方式进行优化,优先保证其保温性能,再考虑重量等不利因素。为此,当相变材料和气凝胶毡的厚度分别为 7 和 5 mm 时保温性能最佳,其温度云图如图 9(c)所示,此时电机箱总重量仅比最轻重量结构组合重 0.15 kg,对巡检机器人的整体续航和运动等影响不大。

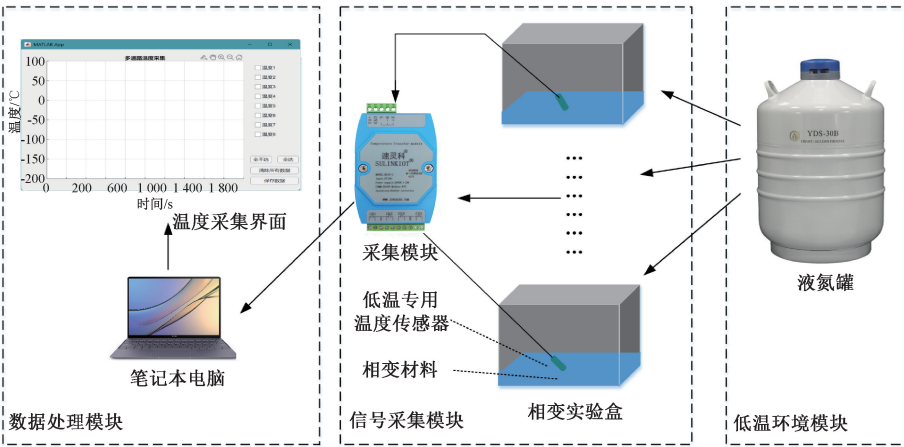


图 10 相变材料性能实验装置组成示意图

Fig. 10 The schematics of the phase change materials set-up

试验过程中,将 4 个装有等量相变材料(甲酸、正癸醇、十一烷以及十四醇)的液氮瓶从室温环境下同时放入液氮罐中,保持 4 个瓶子高度一致,以此保证所处环境温度一致。放入之后迅速盖上液氮罐盖子,以防止冷气流失控制环境温度。不同相变材料温度随着时间的变化曲

3 相变储能热管理技术与低温机器人移动平台验证

3.1 相变储能热管理技术对比验证

1) 相变材料储能性能实验

前述研究对不同相变材料以及空间分布的相变材料的储能性能开展了仿真分析,在此基础上设计了如图 10 所示的实验装置开展技术验证,其中数据采集分为信号采集模块和数据处理模块两部分。信号采集模块获取低温箱中多个低温传感器传出的数据信号,并通过转接线与笔记本电脑相连,最后由上位机解析采集卡发来的温度信号生成动态曲线。

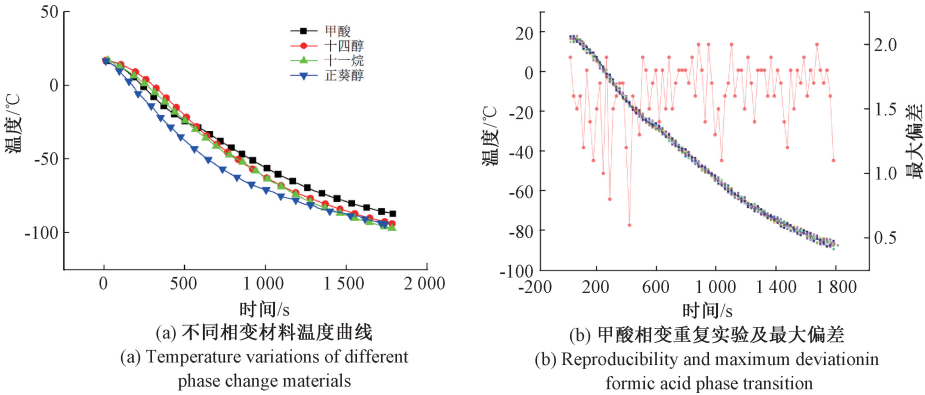


图 11 不同相变材料低温储能特性实验曲线

Fig. 11 The experimental data of the temperature changes of different phase change materials under low temperatures

验条件下进行10次温度循环,并记录甲酸的温度变化。通过对比温度从室温下降至最低温度所需时间,如图11(b)所示,实验曲线证实了甲酸相变材料具有良好的重复性。在耐久性方面,甲酸材料在无光照条件下表现出稳定的化学性质,并已在新能源领域作为储氢材料得到广泛研究^[16],这充分证实了其长期性能的稳定性。

2) 仿真模型验证分析

为验证相变材料仿真模型的准确性,实际采用了2种方式:(1)理论解析验证。将简化工况下的仿真结果与经典热传导理论解析进行比较,相对误差在5%以内;(2)实验对比验证。将模拟结果与不同温度点的实测数据进行对比,发现在 $-150^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 范围内模型预测误差小于10%,但在接近相变点附近($-8^{\circ}\text{C} \sim -3^{\circ}\text{C}$)误差增大至12.5%左右。

3) 模型的适用条件与局限性

实验结果和仿真分析表明,建立的仿真模型具有一定的适用条件和局限性,包括:(1)温度范围——所建模型主要适用于 $-196^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温度范围。在更低温度下(如接近绝对零度),材料的物性参数变化更为剧烈,模型精度可能降低;(2)压力条件——模型假设在标准大气压下运行,若在真空或高压环境中应用,需重新评估热传导和对流边界条件;(3)几何尺寸——当前模型适用于厘米级别的相变材料包装,若扩展到更大或更小尺度,可能需要重新考虑热传导时间尺度和边界效应。

虽然存在上述误差和应用局限性,但是总体上,本研究模型仿真结果能够较好地反映实际温度变化趋势,可以为热管理系统优化设计提供有效指导。

3.2 超低温巡检机器人验证平台

超低温巡检机器人是相变储能热管理技术的重要应用场景,为了验证相变材料的储能特性,设计了如图12所示的机器人平台。移动平台以碳纤维为主体结构整体采用轮式形式,电机减速机设计在碳纤维真空杜瓦保温腔体结构内;电池、电控元件布置在中间的保温箱体内;电机保温箱体和电控保温箱体的剖面结构组成相同,如图12右所示,由内向外设计了加热膜—相变材料—保温材料3层材料。气凝胶毡保温层和相变材料层能够保证巡检机器人在极低温度下防止箱体温度急剧下降,加热膜作为主动加热补充箱体损失的能量,维持箱体温度在可工作范围内。

超低温巡检机器人平台作为封闭的能量系统,在实际应用中其工作在外接电源不可达区域,因此工作的所有能量来自于电控箱内的固定容量电池。根据上述分析研究得出通过引入相变储能技术,可以利用相变材料的潜热有效增加巡检机器人整体能量,使其在电池容量一定时能够更长时间保持温度在可工作范围。为此,将设计的超低温巡检机器人平台放入液氮构建的超低温环

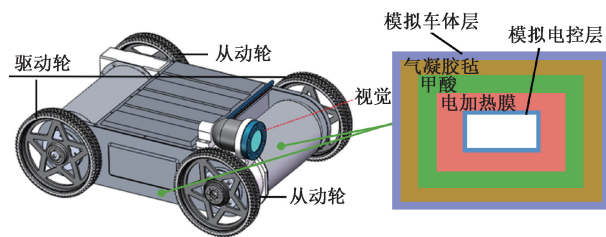


图12 超低温巡检机器人平台结构示意图

Fig. 12 The schematics of the cryogenic robot platform with phase change materials

境,利用传感器记录环境温度和车体内部温度的变化趋势,对比验证相变储能技术在超低温巡检机器人热管理技术上的可行性和有效性,在实验过程中温度曲线的变化如图13所示。

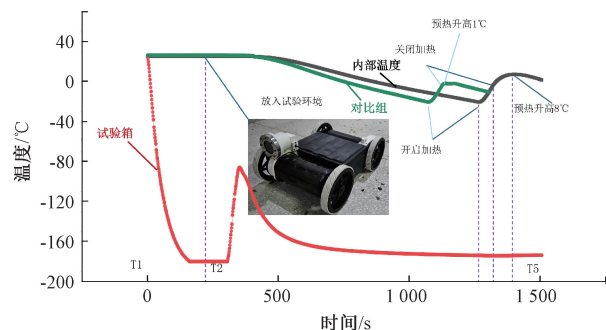


图13 基于相变材料的超低温巡检机器人储能性能研究

Fig. 13 The phase change energy storage of the cryogenic robot

实验过程中,T1时刻向实验环境中注入适量液氮,从图中试验箱曲线可以看出环境温度在146 s内急剧下降到 -174°C ,在T2时刻开启密封盖放入超低温巡检机器人,此时环境温度经历急剧上升后又在135 s内环境温度从 -80°C 下降了 70°C 。对应地,巡检机器人内部温度从T2时刻到T3时刻的990 s内温度仅下降到 -20°C ,比环境温度(-163°C)高出 140°C ,此时打开加热膜主动加热45 s巡检机器人温度快速上升 10°C ,T4时刻由于相变材料吸收的潜热,即使在关闭主动加热时温度依然能上升 18°C 。重复此过程,超低温巡检机器人能够利用更少的电池能量实现更长的保温时间。

作为对比实验,从巡检机器人中取出相变材料并填入气凝胶毡,然后重复上述实验过程。从下降过程可以看出,没有相变材料的巡检机器人前期的缓降过程变短,仅771 s时间温度就下降到了 -20.4°C ;同样地,打开主动加热45 s巡检机器人温度快速上升到 0.6°C ,几乎没有上述实验关闭加热后的升温过程。对比实验充分说明超低温巡检机器人能够利用更少的电池能量实现更长的保温时间,体现了基于相变储能热管理技术的经济性和有效性。

3.3 仿真与实验误差分析

1) 仿真模型误差

(1) 网格划分误差。通过网格独立性验证,当网格数量超过 50 万时,温度场计算结果的相对误差 $<1\%$;(2) 边界条件简化。对流换热系数采用经验公式计算,与实际情况存在一定的偏差;(3) 材料物性参数。相变材料的热物性参数随温度变化,模型中采用分段线性近似,引入了一定的误差。

2) 实验环境误差

研究相变储能材料的仿真与实验误差。(1) 温度测量误差。使用的 K 型热电偶测温精度为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$,数据采集系统的分辨率为 0.1°C ;(2) 环境因素误差。实验室环境温度波动在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 范围内,湿度控制在 $45\% \sim 55\%$;(3) 重复性误差。通过 10 次重复实验,计算得到温度曲线的标准偏差在 $\pm 2.1^{\circ}\text{C}$ 以内。

3.4 成本效益分析

1) 成本构成

相变储能技术在巡检机器人中的主要成本包括相变材料本体、制造工艺和定期维护 3 个方面。相比传统保温材料,本技术在材料成本上具有明显优势,但需要特殊的制造工艺和定期更换维护。

2) 效益优势

该技术带来的效益主要体现在 3 个方面:(1) 显著降低电池能耗并延长工作时间;(2) 提高设备寿命,减少部件老化;(3) 扩展应用场景,特别是在太空深海等超低温环境中的应用价值突出。

3) 投资回报

虽然采用相变储能技术会小幅增加初始投入,但通过节能降耗、延长寿命和减少维护等方面可以创造可观的经济效益,具有较短的投资回收期 and 可观的长期回报率。总体而言,这项技术在超低温巡检机器人应用中展现出良好的经济性和市场前景。

4 结 论

研究从超低温巡检机器人的相变储能热管理技术需求出发,针对超低温下相变材料储能机理不明晰、不同相变材料的空间尺寸分布对储能的影响机制不明确等问题,充分利用理论建模、有限元定量分析、性能模拟实验和巡检机器人平台验证等方式,表明低温巡检机器人的各系统能够在 -163°C 超低温下均能安全工作,验证了基于超低温相变储能热管理技术的可行性和有效性,为超低温下巡检机器人的热管理提供了有效的技术途径。研究内容对基于相变储能的超低温巡检机器人热管理技术的成果和启发主要包括:

1) 相变材料空间分布分析与优化设计方法

从理论模型出发,利用 APDL 有限元计算定量分析了甲酸、正葵醇、脂肪醇(十四醇)和十一烷这 4 种材料的相变过程,分析得出甲酸在极端低温环境下的相变潜热和热管理能力最优。在此基础上,分析了给定空间范围内不同相变层厚度与气凝胶毡保温层厚度的空间分布组合,优化设计了考虑重量成本和保温效果的相变材料空间分布参数,为极端低温环境下的高效热管理技术提供有利的模型和方法支撑。

2) 超低温相变储能材料性能实验方法

利用温度传感器、数据采集卡、上位机和低温液氮箱等装置,搭建了相变材料特性性能实验验证平台,同时采集了甲酸、正葵醇、脂肪醇(十四醇)和十一烷这 4 种材料的低温相变特性和保温特性,验证了理论分析和建模计算的准确性和有效性,为开展相变储能低温巡检机器人平台研究奠定了实验基础。

3) 超低温巡检机器人性能验证

设计了基于轮式平台的超低温巡检机器人平台,综合考虑了电机和电控系统的保温性能,以相变材料层、加热层和气凝胶毡保温层的空间分布方式最大化热管理能力。性能实验中对比了全过程环境温度和机器人内部温度曲线,结果表明超低温巡检机器人能在 -163°C 的环境下保持长时间正常工作能力,且能节省优化电池能量用于遂行低温巡检任务。

但是相变储能技术也存在一些局限性,如相变材料选择范围有限、储能密度受限等。这些问题可通过开发新型复合相变材料、优化空间布局等方式进一步改进。研究同时发现巡检机器人存在特制轮胎低温下抓地力差、传动机构低温下润滑下降、低温密封等问题,说明超低温巡检机器人实用化亟需在研究解决上述问题的基础上不断改进。

参考文献

- [1] 周敬淞,张军,肖毅,等. 基于仿蟹刚柔耦合机构的搜救机器人设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 11-20.
ZHOU J S, ZHANG J, XIAO Y, et al. Design of a search and rescue robot with crab-inspired rigid-flexible coupling mechanisms[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 11-20.
- [2] 黄晓辰,张小俊,孙凌宇,等. 核电站多功能水下打捞机器人系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 552-559.
HUANG X CH, ZHANG X J, SUN L Y, et al. Research on the reactor multi-function robot for object salvaging underwater[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 552-559.

- [3] 薛锦瑞,周国轩,邓朝辉,等. 光热相变储能复合材料的制备及应用研究进展[J/OL]. 复合材料学报, 1-13[2024-11-06].
XUE J R, ZHOU G X, DENG ZH H, et al. Research progress on the preparation and application of photothermal phase-change energy-storage composite materials [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1-13[2024-11-06].
- [4] 肖博文,付祥南,徐远健,等. 复合相变储能材料在电池热管理系统中的应用进展[J]. 化学与生物工程, 2022, 5: 1-5.
XIAO B W, FU X N, XU Y J, et al. Research progress on the application of composite phase-change energy-storage materials in battery thermal management systems[J]. Chemistry & Bio-engineering, 2022, 5: 1-5.
- [5] 周文政,章学来,顾杰,等. 相变储能材料的研究及应用进展[J]. 应用化工, 2024, 53(10):2508-2511.
ZHOU W ZH, ZHANG X L, GU J, et al. Progress in research and application of phase change energy storage materials [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(10): 2508-2511.
- [6] 李延伟,张洪文,程志峰,等. 隔热材料在高空光学遥感器热控系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(S1): 44-47.
LI Y W, ZHANG H W, CHENG ZH F, et al. Application of insulation material in thermal control system of altitude optical sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(S1): 44-47.
- [7] 乔诗翔,李豪杰,于航,等. 高低温环境对三轴高 g 值加速度传感器灵敏度变化影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 240-248.
QIAO SH X, LI H J, YU H, et al. Research on the influence of high and low temperature environment on the sensitivity change of three-axis high-g accelerometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 240-248.
- [8] 张娟,张磊,程文华,等. 一种高灵敏度声表面波振动传感器的设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 100-111.
ZHANG J, ZHANG L, CHENG W H, et al. Research on the design of a high-sensitivity surface acoustic wave vibration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 100-111.
- [9] 俞钊,梁坤峰. 基于相变储能的动力电池热管理系统性能分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(3): 2828-2838.
YU F, LIANG K F. Performance analysis of power battery thermal management system based on phase change energy storag [J]. Modeling and Simulation, 2023, 12(3): 2828-2838.
- [10] 张琦,刘重阳,宋俊,等. 微胶囊相变储能材料的合成及其应用研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1110-1130.
ZHANG Q, LIU CH Y, SONG J. Progress in synthesis and application of microcapsule phase-change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1110-1130.
- [11] 董润锟,师文钊,刘瑾妹,等. 柔性相变复合材料及其应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(1): 179-190.
DONG J K, SHI W ZH, LIU J SH, et al. Research progress on flexible phase-change composite materials and their applications [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2024, 40(1): 179-190.
- [12] ZUKOWSKI M. Mathematical modeling and numerical simulation of a short term thermal energy storage system using phase change material for heating applications[J]. Energy Conversion & Management, 2007, 48(1): 155-165.
- [13] BONDAREVA N S, SHEREMET M A. Numerical simulation of melting of phase change material in a square cavity with a heat source[J]. Key Engineering Materials, 2016, 685: 104-108.
- [14] LI J, PENG Z AN, ZHANG H, et al. Analysis of heat transfer and fluid flow during the melting process of PCM within tubular thermal energy storage unit [J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2024: 244: 122681.
- [15] 朱方龙. 附加相变材料层的热防护服服装传热数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(4): 635-643.
ZHU F L. Numerical simulation of heat transfer of thermal protective clothing with an additional phase-change material layer[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(4): 635-643.
- [16] ACAR C, DINCER I. Better thermal management options with heat storage systems for various applications: An evaluation[J]. Energy Storage, 2019, 1(1): e47.
- [17] WANG Y J, DUONG X Q, ZADEH P G, et al. Liquid-cooled cold plate for a Li-ion battery thermal management system designed by topology optimization[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37: 2079-2086.
- [18] LEE D. Development of modularized airtight controller for mobile welding robot working in harsh environments[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013,

29(5): 410-417.

- [19] 蔡永成,刘学宇,蔡永军,等.核辐射危害及核辐射屏蔽材料研究现状[J].粉末冶金工业,2023,33(2): 96-102.

CAI Y CH, LIU X Y, CAI Y J, et al. Research status of nuclear radiation hazards and nuclear radiation shielding materials [J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(2):96-102.

- [20] 栾伟玲,韩延龙,张晓霓,等.用于核救灾机器人的电机驱动器安全防护[J].机械工程学报,2017,53(21):9-15.

LUAN W L, HAN Y L, ZHANG X N, et al. Safety protection of motor driver in nuclear rescue robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (21): 9-15.

- [21] GAO L L, CHEN S, ZHENG G F. A review of thermal control technologies for robots [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(5): 737-749.

作者简介



王贵山,2014年于国防科技大学获得学士学位,2016年于国防科技大学获得硕士学位,2021年于国防科技大学获得博士学位,现为中国空气动力研究与发展中心工程师,主要研究方向为风洞结构设计、柔性结构及感知技术研究。

E-mail: wangguishan10@nudt.edu.cn

Wang Guishan received his B.Sc. degree from National University of Defense Technology in 2014, M.Sc. degree from National University of Defense Technology in 2016, and Ph.D.

degree from National University of Defense Technology in 2021. He is currently an engineer at China Aerodynamics Research and Development Center, with his main research focus on wind tunnel structural design, flexible structures and sensing technology research.



E-mail: yuchengguo@cardc.cn

Yu Chengguo received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2009, M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2012, and Ph.D. degree from Rocket Force Engineering University in 2022. He is currently a senior engineer at China Aerodynamics Research and Development Center, with his main research focus on wind tunnel structural design.



尉成果(通信作者),2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2022年于火箭军工程大学获得博士学位,现为中国空气动力研究与发展中心高级工程师,主要研究方向为风洞结构设计。

E-mail: wangweidong@hit.edu.cn

Wang Weidong received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2002, M.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2004, and Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2009. He is currently a researcher at Harbin Institute of Technology, with his main research focus on special robotics theory and technology research.