

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-475-09

泡沫铜复合 PNIPAM 相变热二极管的传热特性与结构优化

王国卿 张兆利 张楠

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 在传统蒸发相变热二极管中, 相变速率低和传热速率慢已成为制约其性能提升的关键因素。为有效解决这些问题, 提出一种基于泡沫铜复合 PNIPAM 水凝胶的相变热二极管, 利用泡沫铜的高导热特性与孔隙结构增强了 PNIPAM 水凝胶传热传质能力, 结合空气层的反向隔热作用, 强化了热二极管的热整流特性。研究了泡沫铜引入对 PNIPAM 水凝胶传热传质的强化机理, 同时探究了泡沫铜孔径和厚度对热二极管传热特性的影响。结果表明, 泡沫铜的引入使 PNIPAM 的等效导热系数显著提升约 9.8 倍, 等效比热容下降 29.8%。在泡沫铜的作用下, 二极管的热整流性能得到显著提升, 其正负向最大温差达 37.5℃, 瞬时热整流比最高可达 25。在 30 次循环测试后, 该热二极管仍保持着较好稳定性, 可长期用于电子器件的被动式热管理。为热二极管性能提升提供了理论支持与设计参考, 展示了泡沫金属在热二极管性能提升中的良好潜力。

【关键词】 PNIPAM 水凝胶; 相变热二极管; 泡沫铜; 热管理; 热整流

中图分类号 TB34 文献标志码 A

Heat Transfer Characteristics and Structural Optimization of Copper Foam/PNIPAM Composite Phase-Change Thermal Diodes

Wang Guoqing Zhang Zhao Li Zhang Nan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In conventional evaporative phase-change thermal diodes, the low phase-change rate and limited heat transfer capacity have become major factors restricting further performance enhancement. To address these limitations, a phase-change thermal diode based on a copper foam/PNIPAM hydrogel composite is proposed in this study. By virtue of the high thermal conductivity and porous architecture of copper foam, the heat and mass transfer performance of the PNIPAM hydrogel is effectively enhanced. Combined with the reverse thermal insulation effect of the air layer, the thermal rectification behavior of the diode is further strengthened. The enhancement mechanism induced by copper foam on the heat and mass transfer characteristics of the PNIPAM hydrogel was investigated, and the effects of copper foam pore size and thickness on the heat transfer characteristics of the thermal diode were systematically examined. The results indicate that the incorporation of copper foam increases the equivalent thermal conductivity of PNIPAM by approximately 9.8 times, while reducing its equivalent specific heat capacity by 29.8%. As a result, the thermal rectification performance of the diode is significantly improved, with a maximum temperature difference of 37.5℃ between the forward and reverse directions and a maximum instantaneous thermal rectification ratio of 25. After 30 operating cycles, the thermal diode still exhibits good stability, indicating its potential for long-term passive thermal

作者简介: 王国卿 (2000.08-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: wgq@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 张兆利 (1987.06-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zzlyzhang@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2026-03-26

management of electronic devices. This study provides theoretical support and design guidance for the performance enhancement of thermal diodes, and demonstrates the considerable potential of metal foams for improving thermal diode performance.

【Keywords】 PNIPAM hydrogel; Phase change thermal diode; Copper foam; Thermal management; Thermal rectification

0 引言

随着电子器件功率密度持续攀升、集成度不断提高,局部热点与温度波动已成为影响系统可靠性与寿命的重要因素^[1-3]。在消费电子、功率电子、能源装备以及航空航天等应用中,热量需要在有限空间内按需导出。设备在工作阶段需快速散热,待机阶段则需降低热泄漏维持能效^[4]。因此,具有方向选择性传热的无源热控器件近年来受到广泛关注^[5,6]。作为典型代表,热二极管是一类典型的非对称传热器件,其在正、反两个方向上热阻大小不同,可实现热量的定向运输。因此热二极管能够在不同传热方向上表现出不同的传热能力,为电子器件的定向热管理提供了一种有效途径。

相较于固体或单纯流体型热二极管,相变热二极管借助相变潜热参与传热过程,通常能够获得更强的方向性传热差异,已成为近年来的重要研究方向。相关研究通过液滴聚结跳跃、电场辅助液滴操控以及固-液相变耦合等方式实现了不同程度的热整流增强^[7-9]。然而,这类器件仍普遍存在对外场依赖较强、结构实现复杂、重力或安装姿态敏感以及整流效果有限等问题,限制了其规模化发展。如何在无需额外驱动条件下实现结构简单、传热高效且稳定可控的相变热二极管,仍是值得进一步研究的关键问题。

针对上述难题,利用智能材料自身相变特性实现传热过程的自主调控,已成为突破当前技术瓶颈的重要方向。温敏水凝胶聚(N-异丙基丙烯酰胺)水凝胶(PNIPAM)具有接近室温的低临界相变温度(LCST),当温度超过LCST后,聚合物网络由亲水溶胀态转变为疏水塌缩态并释放水分,当温度低于LCST时,聚合物网络重新溶胀吸水,表现

出可逆的相变特性^[10,11]。基于此特性,PNIPAM水凝胶被广泛用于蒸发冷却、被动热管理以及传热调控等领域^[1,10,12]。对于相变热二极管,蒸发冷凝相变过程可产生较好的热整流效果^[13],PNIPAM相变的释水特性又可为蒸发冷凝传热提供潜在工质。然而,PNIPAM本体的导热能力较弱,相变过程中聚合物网络收缩还会导致内部孔道连通性下降,从而限制热量传入和水分迁移,制约器件的传热响应速度与热整流性能^[14,15]。

泡沫金属因其贯通孔道与较高的导热系数,在复合材料的传热性能提升与结构稳定中得到了广泛应用^[16-20],将其与PNIPAM复合不仅可以有效提升热二极管的传热与传质性能,还可实现无需外部驱动条件下的传热强化^[21]。目前关于泡沫金属复合PNIPAM的研究在相变热二极管领域的应用较少,特别是对复合结构强化定向传热的内在机理、关键结构参数的调控规律的研究还存在诸多不足。

基于此,本文将泡沫铜与PNIPAM水凝胶复合构建了一种新型热二极管,并对其传热性能强化的机制进行了分析。通过实验测试系统研究了泡沫铜孔径、厚度等结构参数对热二极管传热特性的影响,也通过循环实验评估了器件可逆响应能力及稳定性。研究结果将为相变二极管的结构优化与性能提升提供新的理论依据与应用参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

本研究所用实验材料包括PNIPAM水凝胶与泡沫铜,其中PNIPAM水凝胶的制备原材料如表1所示。

表1 PNIPAM水凝胶制备所需实验材料

Table 1 Experimental materials required for the preparation of PNIPAM hydrogels

材料	缩写	规格	生产厂家
N-异丙基丙烯酰胺	NIPAM	98%, 包含稳定剂 MEHQ	阿拉丁生化科技有限公司
N,N-亚甲基双丙烯酰胺	MBA	99%	阿拉丁生化科技有限公司
过硫酸铵	APS	电泳级, ≥98%	阿拉丁生化科技有限公司
N,N,N,N-四甲基乙二胺	TEMED	99%	阿拉丁生化科技有限公司
去离子水	H ₂ O	GB/T6682-2008	成都市科隆化学品有限公司

选用开孔泡沫铜作为金属骨架, 实验前期对直接购置的泡沫铜孔隙率进行验证。以 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 8\text{mm}$ 均质泡沫铜进行测试, 通过与相同密度铜的体积比值来确定泡沫铜孔隙率, 结果表明实验所使用的泡沫铜孔隙率为 96.48%。

1.2 泡沫铜复合 PNIPAM 相变热二极管的制备

泡沫铜/PNIPAM 复合材料的制备: 首先配制 PNIPAM 前驱液: 将 5.25g PNIPAM 单体溶解于 100mL 去离子水中, 依次加入交联剂 0.05g MBA、促进剂 210 μ L TEMED, 搅拌均匀获得透明反应前驱液。随后, 将泡沫铜浸入前驱液中, 轻微振动使得前驱液充分浸润其孔隙结构, 缓慢加入引发剂 0.1575g APS, 搅拌至完全溶解后, 转移至真空干燥箱中, 在真空度为 -0.1MPa, 温度为 0℃ 的条件下抽真空 30min, 以排除孔隙内滞留空气, 使水凝胶溶液均匀填充泡沫铜。随后在相同低温真空条件下缓慢聚合 12h。取出后去除表面凝胶, 即得泡沫铜/PNIPAM 复合材料。

热二极管封装: 封装结构由金属导热层(铝片, 尺寸: $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 1\text{mm}$)与绝热支撑层(PMMA, 尺寸: $50\text{mm} \times 18\text{mm} \times 1\text{mm}$)组成。首先, 采用防水玻璃胶将铝板与 PMMA 黏合成封装腔体(底部为铝片, 四周为 PMMA); 随后, 将复合材料置于腔体内部, 使其与底部金属导热层完全紧密贴合, 调整复合材料层厚度并预留设计空气层厚度后, 用导热金属片对腔体顶部进行封装, 即得泡沫铜/PNIPAM 相变热二极管。

1.3 复合材料热物性测试与计算方法

复合材料的热物性与泡沫铜和 PNIPAM 水凝胶本身性能相关, 因此在计算复合材料热物性之前需要测量 PNIPAM 水凝胶本身热物性。

导热系数测试: 使用导热仪(TC3100, 西安夏溪电子科技有限公司, 中国)对 PNIPAM 水凝胶相变前后导热系数变化进行测试, 将样品制备成 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1\text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的薄片, 测试电压为 2V, 样品在不同温度下测试 5 次, 取平均值。

比热容测试: 采用差示扫描量热仪(DSC, TAQ20, TA 仪器, 美国)蓝宝石比较法对 PNIPAM 水凝胶的比热容进行测定。

由于实验设备限制, 无法直接测量多孔介质复合材料的热物性参数, 因此本研究中泡沫铜复合 PNIPAM 水凝胶的等效导热系数可由公式(1)进

行计算^[22]:

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon k_f + (1 - \varepsilon) \eta_k k_s \quad (1)$$

式中: k_{eff} 为复合材料的平均有效导热系数; k_f 与 k_s 分别为孔隙填充材料的有效导热系数与铜的有效导热系数; ε 为泡沫铜的孔隙率; η_k 表示泡沫形态系数。

比热容计算: 泡沫铜复合 PNIPAM 水凝胶的等效热容采用多孔介质局部热平衡假设进行计算^[23]:

$$c_{p,\text{eff}} = \frac{(\rho c_p)_{\text{eff}}}{\rho_{\text{eff}}} = \frac{(1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} + \varepsilon \rho_f c_{p,f}}{\varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_s} \quad (2)$$

式中: ρ_{eff} 为复合材料的等效密度; ρ_f 与 ρ_s 分别为 PNIPAM 的密度与泡沫铜的密度。

1.4 相变热二极管的性能测试方法与评价指标

1.4.1 实验测试方法与评价指标

测试方法: 本文选用恒温加热测试, 在相变热二极管一侧施加恒定的热源温度, 并通过布置在另一侧的热电偶实时记录温度随时间的变化曲线, 以此得到器件在不同加热方向下的温升情况与温度响应速率。实验测试平台如图 1 所示。



图 1 实验测试平台

Fig.1 The experimental test platform

评价指标: 使用 ΔT 表示两种工作模式下热二极管的逐时温差, 其中 ΔT 可以用公式(3)计算:

$$\Delta T = T_F - T_R \quad (3)$$

式中: ΔT_F 为正向工作模式下热二极管冷端温度与热源温度的差异; ΔT_R 为负向工作模式下热二极管冷端温度与热源温度的差异, 具体计算公式由公式(4)决定:

$$\Delta T_{F \text{ or } R} = T_S - T_{F \text{ or } R} \quad (4)$$

式中: T_F 为正向工作模式下冷端温度; T_R 为负向工作模式下冷端温度; T_S 为加热边界温度。

采用正向与负向工作模式下冷端温度变化与热源温度的差值之比来表征相变热二极管是否具有热整流效应, 通常使用热整流比 (Thermal rectification ratio, TRR) 来表示相变热二极管的热整流性能, 其计算公式如公式 (5) 所示:

$$TRR = \frac{\Delta T_R}{\Delta T_F} \quad (5)$$

式中: 当 $TRR \neq 1$ 时, 表明存在传热速率的差异, 热二极管具有不对称的热整流性能; 当 $TRR > 1$ 时, 说明热二极管正向升温速度快于负向升温速度; 当 $TRR = 1$ 时, 热整流现象消失, 整个器件表现为对称的传热过程。

1.4.2 泡沫铜/PNIPAM 复合材料的传热传质性能测试

为探究泡沫铜对 PNIPAM 水凝胶传热传质性能的强化作用, 本文将纯 PNIPAM 水凝胶与泡沫铜/PNIPAM 复合材料进行对比实验。两种样品采用相同厚度和体积, 在恒温加热平台 (50℃) 进行加热, 测试过程中, 每 2min 记录一次样品质量变化; 同样选用两组相同的样品, 在其表面布置热电偶以记录其温度变化过程。通过对比纯 PNIPAM 与泡沫铜/PNIPAM 在相同加热条件下的累计蒸发质量、上表面温度变化规律, 研究泡沫铜多孔骨架对 PNIPAM 水凝胶传热传质性能的强化作用。

1.4.3 泡沫铜孔径对热二极管传热性能影响的测试

泡沫铜孔径大小与孔密度有关, 孔密度 (PPI) 越大, 孔径越小, 整体比表面积增大但渗透性降低。为研究孔径大小对传热性能的影响, 购置了四种不同 PPI 的泡沫铜, 其对应孔径大小如表 2 所示。测试时, 采用恒温加热平台分别在正向与反向工作模式下对样品进行加热, 热源温度设置为 70℃, 加热时间 60min。通过布置在冷端中心的热电偶实时记录温度随时间的变化, 计算逐时温差以及热整流比, 分析孔径对升温速率、稳态温度及热整流性能的影响规律。

表 2 泡沫铜不同孔密度对应的孔径大小

Table 2 Pore size corresponding to different pore densities in copper foam

孔密度 PPI	对应孔径 d_p /mm
20	1.28
40	0.64
60	0.42
80	0.32

1.4.4 泡沫铜厚度对热二极管传热性能影响的测试

为研究泡沫铜厚度对热二极管传热性能的影响, 选取 $\delta = 6/8/10$ mm 三种厚度的泡沫铜作为复合骨架, 孔密度统一为 40PPI, 以保证除厚度外其他结构参数一致。实验测试方法与 1.4.3 节一致, 通过对比不同厚度样品在相同边界条件下的温度响应曲线、升温速率、稳态温度及热整流比, 分析泡沫铜厚度对热二极管热整流性能的影响规律。

1.4.5 循环稳定性测试

为评估相变热二极管的循环稳定性, 本文对相变热二极管进行了循环稳定性测试, 选取同批次的热二极管器件在一周内进行了共 30 次循环实验, 每次测试时确保热二极管完全复原。在相同加热时间与热源边界条件下分别记录正、负向冷端中心温度响应, 以每次循环峰值温度作为输出指标, 同时记录正、反向冷端峰值温度之差, 评估器件方向性传热差异的稳定性。

1.5 实验误差来源与不确定度评估

实验系统的不确定度主要来源于热源边界与测量链路: 包括恒温水浴温度 ($\pm 1\%$)、可调流量泵流量 ($\pm 1\%$)、K 型热电偶测温 ($\pm 1\%$) 以及数据采集系统 ($\pm 1\%$)。对于由多个独立变量共同决定的性能参数, 本文采用均方根合成的方法对不确定度进行计算^[24]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (6)$$

式中: $u(x_i)$ 为各独立变量 x_i 的标准不确定度; $\partial f / \partial x_i$ 为相应灵敏度系数, 反映该变量对输出量的影响程度。

基于上述方法计算得到: 温差测量与热整流比 (TRR) 测量的总体不确定度分别控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 与 $\pm 2\%$ 以内。实验观测到的热整流效应显著大于测量不确定度范围, 说明器件的方向性传热差异是由其本征非对称传热特性决定, 而非实验误差。

2 结果与讨论

2.1 泡沫铜/PNIPAM 复合层的热物性

泡沫铜/PNIPAM 复合层的传热特性取决于 PNIPAM 水凝胶的相变行为及其与多孔骨架的协同作用。热物性测试表明, 纯 PNIPAM 水凝胶的比热容在 $3.75 \sim 4.0 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 之间, 略低于水的比热容

4.2kJ/(kg·℃), 这由其内部含水量较高决定, 其导热系数在相变前接近纯水, 约 0.6W/(m·K), 相变后因脱水下降至 0.329W/(m·K)。当 PNIPAM 填充于泡沫铜骨架中时, 泡沫铜的高导热网络为热量快速传递提供路径, 而 PNIPAM 的相变吸放水行为则主导潜热传输, 二者共同决定了复合材料的热物性。

根据多孔介质复合材料导热系数与比热容计算公式计算得到泡沫铜/PNIPAM 水凝胶复合材料导热系数大小为 5.71W/(m·K) 与比热容大小 2950J/(kg·℃), 与文献一致^[14,26,27], 泡沫铜的引入使得 PNIPAM 水凝胶相变前导热系数提高了 9.8 倍, 等效比热容下降了 29.8%。

表 3 纯 PNIPAM 与泡沫铜/PNIPAM 材料热物性对比

Table 3 Comparison of thermophysical properties between pure PNIPAM and copper foam/PNIPAM materials

材料	导热系数 /[W/(m·K)]	比热容 /[J/(kg·℃)]
纯 PNIPAM 水凝胶	相变前: 0.527	相变前: 3750
	相变后: 0.329	相变后: 4000
泡沫铜/PNIPAM	5.71	2950

2.2 泡沫铜对 PNIPAM 水凝胶的传热传质强化作用

泡沫铜的引入显著强化了 PNIPAM 的传热传质效率, 实验结果如图 2 所示, 在相同厚度与 PNIPAM 体积、相同底部恒温 (50℃) 加热条件下, 对纯 PNIPAM 与泡沫铜/PNIPAM 进行对比。结果表明二者均因超过 LCST 发生蒸发而出现质量下降, 泡沫

铜/PNIPAM 最大, 纯 PNIPAM 最小。同时加热 20min 后, 纯 PNIPAM 上表面温度为 31.2℃, 泡沫铜/PNIPAM 达到 38.6℃。原因在于多孔骨架提供贯通孔道与低热阻导热路径, 改善传质与供热。

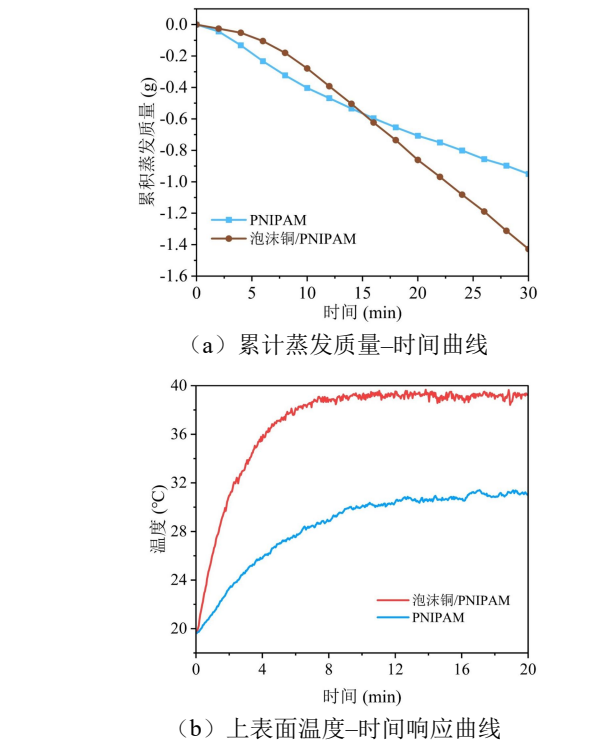


图 2 泡沫铜强化 PNIPAM 水凝胶的传热传质性能:

Fig.2 Heat and mass transfer enhancement of PNIPAM hydrogel by copper foam

2.3 相变热二极管的工作原理与等效热阻网络分析

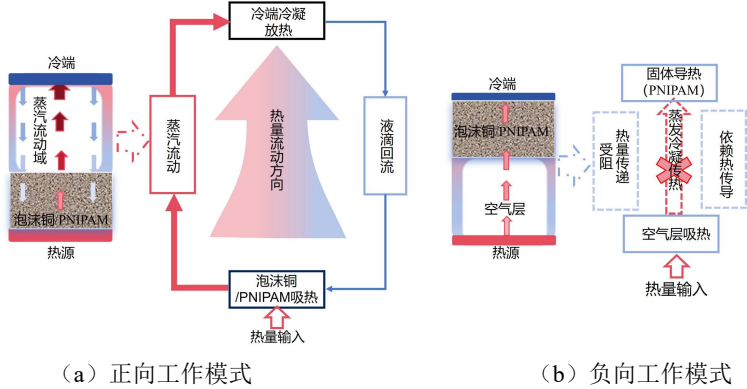


图 3 泡沫铜复合 PNIPAM 相变热二极管的工作原理

Fig.3 Working principle of the copper foam composite PNIPAM phase change thermal diode

本研究中相变热二极管采用层次化叠层构型, 如图 3 所示, 从下到上依次为金属导热层、泡沫铜/PNIPAM 复合层、空气层和金属导热层。金属导热层用于均匀热源边界以降低界面热阻; 泡沫铜

/PNIPAM 复合层则利用工质相变实现潜热的高效传递; 空气层在正向模式充当蒸汽流动域, 负向模式作为隔热层。在工作机制上, 该器件表现出显著的热整流效应: 正向模式下 (热端加热), 温度超

过 PNIPAM 的 LCST 后水凝胶收缩释水, 空气层作为蒸汽的输运通道, 形成高效的蒸发冷凝循环, 水蒸气向冷端金属层迁移并冷凝释放潜热, 从而获得高热传递效率; 反向模式下 (热端位于另一侧), 空气层被置于热源与水凝胶之间, 凭借其低导热系数及受限空间内对流的抑制作用, 成为高热阻隔层, 蒸发冷凝传热被抑制, 热量仅依靠空气与复合材料的本征导热缓慢传递, 传热性能较差, 从而实现对逆向热流的有效阻断。

为进一步揭示器件传热能力差异的形成机制, 本文基于器件工作原理建立了沿厚度方向的一维等效热阻网络模型, 如图 4 所示。在此模型中, 可将器件简化为由导热热阻、相变热阻以及等效热容构成的瞬态热阻网络。在分析中作如下假设: 器件主要沿厚度方向传热, 侧壁及外部绝热层对横向散热具有明显抑制作用; 材料热物性参数在单一温度区间内取常数; 金属导热层与各功能层接触紧密, 界面接触热阻在一阶近似下忽略; 反向模式下相变支路关闭, 正向模式下, 复合层相变后, 相变支路被激活。

在加热初期, 器件内尚未形成明显蒸发冷凝循环, 此时热量主要通过下部铝板、复合层、空气层以及上部铝板沿厚度方向传递, 器件处于导热主导阶段。对于任意导热层 i , 其热阻可写为:

$$R_i = \frac{L_i}{k_i A} \quad (7)$$

式中: L_i 、 k_i 和 A 分别为该层厚度、导热系数和有效传热面积。因此, 导热阶段总热阻可近似表示为:

$$R_0 = R_{CUPNI} + R_{air} + 2R_{Al} \quad (8)$$

式中: R_{CUPNI} 为复合层等效热阻; R_{air} 为空气层热阻; R_{Al} 为金属导热层热阻。

当复合层局部温度升高至 LCST 时, 水凝胶释放自由水, 器件由单纯导热阶段转入相变传热阶段。对应地, 其附加相变热阻可概括为:

$$R_{pc} = R_{rel} + R_{ev} + R_v + R_{cd} \quad (9)$$

式中: R_{rel} 为复合层内部液体迁移阻力; R_{ev} 为蒸发界面热阻; R_v 为蒸汽在受限空间内输运阻力; R_{cd} 为冷凝界面热阻。由于泡沫铜孔隙结构提高了水凝胶内部水分子迁移能力, 因此 R_{rel} 的作用在复合层中明显减弱。

因此, 正向模式下的有效总热阻可以表示为:

$$R_F = 2R_{Al} + R_{CUPNI} + \frac{1}{\frac{1}{R_{air}} + \frac{1}{R_{pc}}} \quad (10)$$

负向模式下, 空气层位于热源与复合层之间, 其较大热阻延缓了复合层升温, 且蒸发冷凝相变传热受限, 因此总热阻近似退化为:

$$R_R = R_{CUPNI} + R_{air} + 2R_{Al} \quad (11)$$

综上, 在考虑复合层热惯性后, 两种模式下的特征响应时间可分别表示为:

$$\tau_{F/R} = R_{F/R} C_{eff} \quad (12)$$

式中: C_{eff} 为复合层等效热容。由于泡沫铜引入使得 $R_{CF,eff}$ 和 C_{eff} 同时减小, 复合层在正向模式下更容易快速升温并进入相变阶段, 从而表现出更快的传热效率; 而反向模式下, 空气层首先限制热量向复合层传递, 相变支路难以及时建立, 因此整体响应显著滞后。

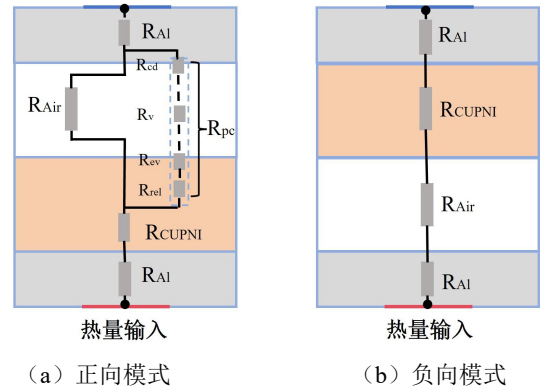


图 4 热阻网络模型

Fig.4 Thermal resistance network model

2.4 泡沫铜孔径对热二极管传热性能的影响

图 5 展示了不同孔径泡沫铜 (20、40、60、80PPI) 在正反向工作模式下的冷端温度响应、温差变化及热整流比。正向模式下, 四种孔径样品的冷端温度均随加热时间快速上升, 分别达到 68.2、67.5、66.8、65.3℃, 其中 20PPI 样品升温速率最快; 反向模式下, 各样品升温均明显滞后, 且孔径差异对反向传热影响较小。20PPI 样品的峰值温差达 37.5℃, 瞬时热整流比峰值达 25, 显著优于 80PPI 样品。这是由于大孔径泡沫铜具有更高的渗透率, 降低了蒸汽输运阻力, 使蒸发冷凝循环更为高效。孔径影响主要集中在正向瞬态阶段, 不同孔径会改变正向升温速率, 孔径越大, 正向升温速度越快; 反向曲线整体较缓。

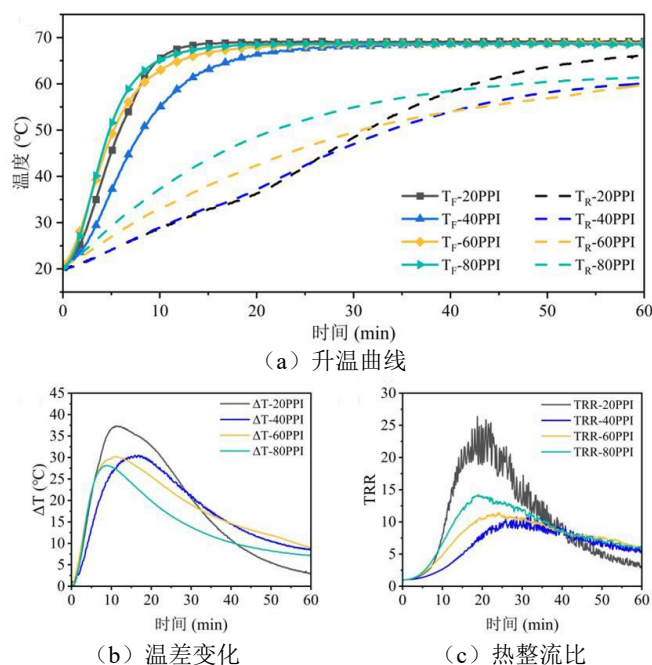


图 5 泡沫铜不同孔径对相变热二极管传热特性的影响

Fig.5 Effect of different foamed copper pore sizes on the heat transfer characteristics of phase change thermal diodes

2.5 泡沫铜厚度对热二极管传热性能的影响

图 6 给出了不同厚度泡沫铜在正反向模式下的温度响应、温差变化及热整流比。正向模式下, 三种厚度样品的稳态温度分别为 67.6、61.2、54.9°C, 升温速率依次为 4.76、4.12、3.49°C/min, 表明厚度增加显著削弱正向传热能力。反向模式下, 厚度越大升

温越慢, 10mm 样品反向稳态温度仅 28.6°C, 反向抑热效果随厚度增加而增强。对应地, ΔT 与 TRR 均呈先增大达峰、后衰减趋稳的趋势, 且厚度增大使峰值时间后移, 中后期保持较高整流水平。这是因为厚度增加延长了传热路径、增大了传质阻力, 正向传热减弱; 同时串联热阻增大, 反向抑热增强。

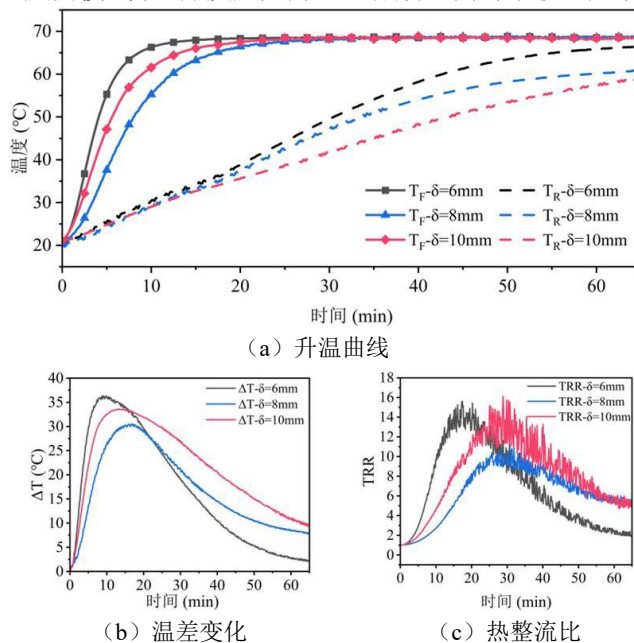


图 6 不同泡沫铜厚度对相变热二极管传热特性的影响

Fig.6 Effect of different copper foam thicknesses on the heat transfer characteristics of phase change thermal diodes

2.6 泡沫铜复合 PNIPAM 相变热二极管的循环稳定性

在 30 次循环测试中, 相变热二极管两种模式的升温与降温曲线在各循环间形态几乎一致。实验结果如图 7 所示, 每次加热过程中, 正向模式升温速度始终快于负向模式且具有更高的峰值温度, 其

中正向平均峰值温度为 46.2°C , 负向平均峰值温度为 30.8°C , 实验表明相变热二极管的传热方向性差异稳定存在, 并且峰值温差统计表明温差集中且无随循环次数增加而明显下降的趋势, 说明器件未出现明显性能衰减。

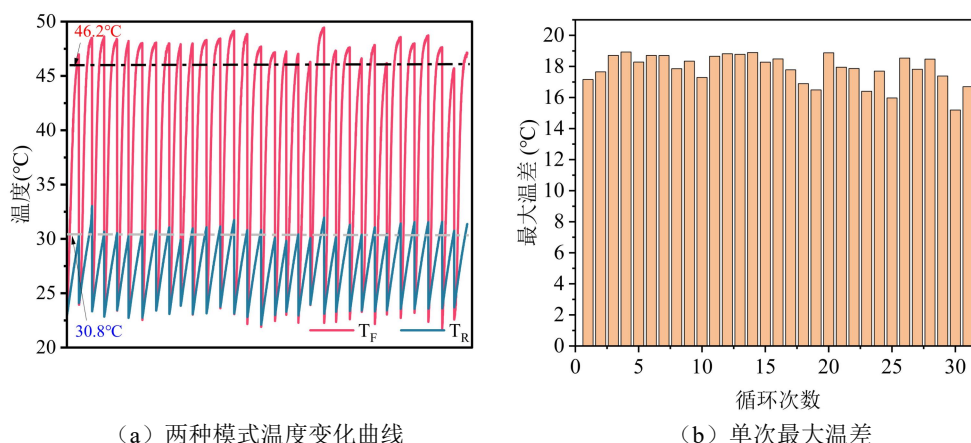


图 7 相变热二极管循环实验
Fig.7 Cyclic experiment of phase-change thermal diode

3 结论

本文构建了一种由金属导热层、泡沫铜/PNIPAM 复合相变层和空气层组成的非对称相变热二极管, 系统研究了泡沫铜引入后对 PNIPAM 传热传质性能的强化作用, 对比了其与纯 PNIPAM 的传热与传质的性能差异并建立了热阻网络模型。重点研究了泡沫铜孔径和厚度对器件传热特性与热整流性能的影响, 并对热二极管进行了循环测试。主要结论如下:

(1) 泡沫铜的引入显著改善了 PNIPAM 水凝胶的热物性与相变传热能力。复合后材料等效导热系数提高至 $5.71\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 约为纯 PNIPAM 的 9.8 倍, 等效比热容下降 29.8%, 从而有效强化了材料的蒸发与传热过程。

(2) 泡沫铜孔径和厚度对热二极管传热特性具有显著影响。其中, 孔径增大有利于提升器件正向瞬态传热能力, 而厚度增加会削弱正向传热、增强反向抑热作用, 合理调控泡沫铜结构参数可优化器件热整流性能。

(3) 在泡沫铜强化与空气层反向隔热的协同作用下, 相变热二极管表现出显著的方向性传热特征, 正负向最大温差可达 37.5°C , 最大瞬时热整流

比可达 25。循环实验结果表明, 器件在重复运行过程中未出现明显性能衰减。

综上, 泡沫铜能够有效提升 PNIPAM 基相变热二极管的传热传质能力, 通过孔径与厚度调控可实现器件热响应与热整流性能的优化。本研究为 PNIPAM 基相变热二极管的结构设计与性能提升提供了实验依据, 也为无外场驱动方向性热管理器件的开发提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Rehman T U, Park C W. Progress in insulated gate bipolar transistor thermal management: From fundamentals to advanced strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025,210(C):115219.
- [2] Sharma M K, Ramos-Alvarado B. Thermal management of 3-D heterogeneously integrated microelectronics: challenges and future research directions[J]. Communications Engineering, 2026,5(1):28.
- [3] Liu X, Li P, Huang X. Passive Cooling Materials for Electronic and Electrical Equipment[J]. Accounts of Materials Research, 2025,6(9):1065-1078.
- [4] Zhang H, Wu Y, Shi T, et al. Thermal rectifiers: Physical

- mechanisms and potential applications in buildings[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025,210:115165.
- [5] 邵常焜,汤勇,陈恭,等.热二极管及其热控功能结构制造的研究现状与发展趋势[J]. *机械工程学报*,2024,60(20):271-288.
- [6] 赖骏颖,徐智毅,牛翔,等.热开关装置及在电卡制冷原型器件中的研究进展[J]. *制冷学报*,2024,45(4):68-84.
- [7] Wong M Y, Tso C Y, Ho T C, et al. A review of state of the art thermal diodes and their potential applications[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021,164:120607.
- [8] Edalatpour M, Mukherjee R, Boreyko J B. Bridging-droplet thermal diodes: Modeling and optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2025,239:126594.
- [9] Traipattanakul B, Tso C Y, Chao C Y H. A phase-change thermal diode using electrostatic-induced coalescing-jumping droplets[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019,135:294-304.
- [10] Song X, Dong X, Liu H, et al. Applications of Stimuli-Responsive Hydrogels in Renewable Energy: A Review[J]. *ChemSusChem*, 2026,19(2):e202501440.
- [11] Chen X-Z, Niu D, Gao H-T, et al. Deswelling Mechanisms of PNIPAM Grafted in Nanochannels: A Molecular Dynamics Simulation Study[J]. *Langmuir*, 2024,40(14):7692-7700.
- [12] Wang F, Song Z, Zhang Y, et al. Research on passive cooling of photovoltaics based on heat dissipation fins combined with hydrogel[J]. *Energy Conversion and Management*, 2026,348:120746.
- [13] Wehmeyer G, Yabuki T, Monachon C, et al. Thermal diodes, regulators, and switches: Physical mechanisms and potential applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2017,4(4):041304.
- [14] Zhang Z, Tan S, Bao Z, et al. Thermal Conductivity of PNIPAm Hydrogels and Heat Management as Smart Windows[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023,308(5):2200566.
- [15] Liu W, Wang Z, Serna J A, et al. Enhancing Temperature Responsiveness of PNIPAM Through 3D-Printed Hierarchical Porosity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024,34(41):2403794.
- [16] 程红侠,林文野,陈永珍,等.复合固体吸湿材料研究及应用进展[J]. *复合材料学报*,2026,43(1):12-29.
- [17] 刘熙远,傅强,邓华.多功能聚合物基辐射制冷材料的发展近况及应用[J]. *高分子通报*,2025,38(4):572-589.
- [18] 田伟,梁晓光,党硕,等.金属泡沫-翅片复合结构强化相变蓄热的实验研究[J]. *西安交通大学学报*,2021,55(11):17-24.
- [19] 张力元,赖焕新.基于场协同原理的泡沫金属热沉换热强化[J/OL]. *华东理工大学学报(自然科学版)*,2026,52.
- [20] 代建龙,李果,曹一通,等.多孔金属泡沫强化石蜡相变蓄热性能[J]. *储能科学与技术*,2024,13(11):3764-3771.
- [21] Li H, Jin A, Chen S, et al. Paraffin-CaCl₂·6H₂O dosage effects on the strength and heat transfer characteristics of cemented tailings backfill[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2024,31(1):60-70.
- [22] HOSSAIN R. Thermal Modeling of Phase Change Material (PCM) with Nanoparticles and Porous Matrix for Melting and Freezing[D]. Guelph: The University of Guelph, 2016.
- [23] MINKOWYCZ W J, HAJI-SHEIKH A, VAFAI K. On departure from local thermal equilibrium in porous media due to a rapidly changing heat source: the Sparrow number[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999,42(18):3373-3385.
- [24] Guide to the expression of uncertainty in measurement - Part 1: Introduction[R]. Sevres: Bureau International des Poids et Mesures, 2023.
- [25] Wang Z, Zhu M, Zhang H, et al. Experimental and simulation study on the heat transfer mechanism and heat storage performance of copper metal foam composite paraffin wax during melting process[J]. *Energy*, 2023,272:127167.
- [26] EL IDI M M, KARKRI M, KRAIEM M. Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/ Metal Foam composite[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021,33:102077.