电子器件动态热管理软硬件实施方法

李帮俊, 王晨曦, 仵斯, 潘权稳, 李廷贤, 王如竹*

上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240

*E-mail: rzwang@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-11; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-09-23

国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号: 51521004)资助

摘要 电子器件的热问题已经成为制约其高集成度下性能持续发展的瓶颈. 软硬件结合实现高效且可靠的动态热管理是突破热限制的关键路径, 然而其中涉及的软件算法设计和散热硬件优化仍然面临诸多挑战. 本文针对电子器件动态热管理中温度感知困难、散热负荷波动、冷却能耗高等难点, 设计了基于矩阵分解的热传感器布置优化及在线温度场重构算法, 提出了利用大尺寸石墨纳米片的高热导率($\sim 35 \text{ W (m K)}^{-1}$)复合相变材料构建方法, 验证了基于固体吸附剂解吸热利用的高焓值(等效 1950 J/g)相变散热策略, 研究了基于吸附式制冷的数据中心余热回收节能冷却系统. 这些方法聚焦电子器件热管理的发展趋势和关键需求, 从算法到硬件, 从单个器件到系统集群的各个角度, 提出软硬兼施的解决实施方案, 从而为未来电子器件热管理提供新的思路.

关键词 电子器件, 动态热管理, 温度场重构, 相变材料, 吸附解吸, 吸附制冷

1 引言

电子器件尤其是处理器芯片等高性能器件已经成为驱动全球自动化、智能化发展的基础设施, 并在工业生产和生活消费中扮演至关重要的角色. 在广泛的需求驱动下, 电子器件的核心发展方向仍然是高度集成化, 主要体现在单位面积的单元器件数量和单个器件内功能模块数量的显著增加. 集成度提高则必然伴随着设备内部的热流密度迅速升高, 这使得散热问题成为制约电子技术发展的瓶颈^[1]. 针对这一问题, 学术界和工业界已经在温度检测技术开发^[2]、新材料设计^[3,4]、传热传质强化^[5]等领域进行了大量理论和实验研究. 这些研究的目的是提升电子器件稳态散热能力

的极限. 然而由于电子器件的集成化、高性能及其运行任务的复杂性, 实际散热负荷往往表现出显著的动态特性, 为动态热管理带来诸多新的挑战^[6]. 在成本和结构等限制下, 一方面器件内部的热点(温度最高点, 温控的核心对象)温度值和位置难以实时监测, 另一方面峰值散热负荷导致器件过热可能性的增加. 因此相应的热感知技术和高热流密度冷却技术革新对于电子器件的高效动态热管理十分重要.

对于电子器件的温度感知, 目前主要方法是通过布置有限数量的热传感器. 器件的设计者试图直接根据热源结构布置传感器以实现热点精确测量, 然而除非布置大量传感器覆盖全部发热区域, 否则这种方法在动态运行的多热源器件(如多核处理器)中难以奏

引用格式: 李帮俊, 王晨曦, 仵斯, 等. 电子器件动态热管理软硬件实施方法. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1298–1315

Li B J, Wang C X, Wu S, et al. The implementation of software and hardware for dynamic thermal management of electronic devices (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1298–1315, doi: 10.1360/SST-2020-0083

效^[7]。因此, 根据数量有限的局部传感器的测量信息重构全场的温度分布成为重要手段。这种算法与硬件相结合的温度感知手段逐渐成为电子器件动态热管理中必备的温度感知策略, 但是仍面临诸多挑战。具体来说, 主要包括如何设计传感器最优布置的准则, 如何确定最小传感器数量且达到要求的重构精度和稳定性。针对以上挑战我们设计了基于本征正交分解(POD)模型降维和矩阵QR分解传感器优化布置的在线温度场重构算法。该方法能够实现高效的芯片全局温度监测和热点追踪。

针对电子器件散热负荷动态变化尤其是短时高负荷引起的热冲击问题, 利用相变材料(PCM)在特定温度下的相变过程可存储大量热量的特性, 可以实现对设备温度的被动控制, 延长设备温度上升至允许上限所需要的时间^[8]。有机类相变材料具有相变温度可调、较高的相变焓值、相变体积小、过冷度低、化学性能稳定等优点。然而, 以石蜡为代表的有机相变材料通常导热系数很低($\sim 0.2 \text{ W (m K)}^{-1}$), 导致实际应用中难以达到理想的热响应速度。低导热系数和泄漏问题是固-液有机相变材料用于热管理领域所面临的两个长期存在的瓶颈^[9]。为了解决这些问题, 往往通过引入高导热材料如碳纳米管、石墨烯纳米片等作为导热强化剂合成复合相变材料。然而, 已有的研究大多采用碳材料作为分散剂加入相变材料的方法, 这种情况下, 即使碳材料含量很高, 形成渗流网络, 复合材料的热导率依然小于 5 W (m K)^{-1} ^[10,11], 远低于预期水平。本团队^[12]通过对材料内部传热微观机理的分析, 发现分散的微纳尺度碳材料在宏观的复合材料内部与相变材料基体形成大量界面, 无法形成连通的传热通道。在此基础上提出利用膨胀石墨构建大尺寸石墨纳米片合成高导热复合相变材料的新思路。相变材料与膨胀石墨均匀复合后通过压力诱导成型获得块状复合相变材料, 制备过程中维持了膨胀石墨的大尺寸长链结构, 这些长链石墨纳米片在复合相变材料内部充当大尺寸热传导链从而实现有效的导热增强。测试发现, 我们提出的复合相变材料导热强化水平比现有复合材料高出2~6倍, 并且具有优越的热性能、理化性能以及定型封装性能, 进一步提高了PCM在电子器件热管理中的应用价值。

相变材料除了导热性能, 其储热密度即相变焓同样是影响其对电子器件温控性能的关键指标。相同的体积或质量下, 更高的储热密度可以带来更持久的控

温作用。然而, 不同于PCM导热强化的诸多研究进展, 已有研究中PCM的相变焓(通常为 $100\sim 300 \text{ J/g}$)突破仍然十分有限。为此, 寻找能够替代PCMs、具备更高储热能力的技术, 是提升基于相变的被动热管理措施应用效果的关键路径。本课题组提出了一种基于环境水蒸气吸附-解吸的热管理策略, 为电子产品的热管理提供了全新的解决方案^[13]。该策略在电子设备表面涂覆一层固体吸附剂材料, 当设备处于高载荷工作时, 其表面温度迅速上升, 吸附剂在温升驱动下发生水分的解吸带走大量的热量, 从而有效抑制温度快速上升。同时, 当设备处于低载荷工作时, 吸附剂能够自发地从周围环境中捕获水蒸气, 实现水分的再次补充。我们以金属有机骨架(MOFs)为例进行的涂层温控实验表明, 在测试条件下该方法能够获得等效 1950 J/g 的相变焓, 远大于传统相变材料的相变潜热。该研究有望进一步推动被动相变技术在电子器件热管理方面的应用。

电子器件热管理不仅给散热系统的冷却能力提出诸多挑战, 同时也让冷却系统的能效问题成为焦点。随着集成了海量电子器件的数据中心的快速发展, 其单位空间的冷却功率要求迅速增长, 传统数据中心单机柜发热功率一般在 5 kW 以下, 现在部分刀片式服务器的机柜发热功率高达 20 kW 以上。冷却强度要求的提升必然导致冷却系统能耗增长, 其冷却系统巨大的电力消耗问题也得到越来越多的重视^[14]。2018年数据中心的能耗约为 198 TW h , 约占全球总电耗的1%, 其中制冷设备数据中心总能耗为 $30\%\sim 50\%$ ^[15]。由于数据中心内电子器件运行时温度较高, 冷却系统中的冷媒与器件热交换后温度仍可达 60°C ^[16]。如果将这部分冷媒携带的余热回收利用而不是直接排向周围环境, 不仅可以提高制冷系统的能效, 还能减少环境侧的换热设备体积。吸附式制冷系统是一种基于吸附及其逆反应的热驱动制冷技术, 可以由低温热源驱动。因此, 本课题组基于开发的硅胶-水吸附式制冷机组, 讨论了利用吸附式制冷技术实现数据中心余热回收的可能性和收益, 同时也讨论了该技术进一步推广所面临的挑战与发展方向。

本文将从以上几个角度详细阐述电子器件动态热管理方面提出的新方法及其实施成效。这些方法有望进一步启发更多相关变革性技术, 为电子器件热管理领域注入新的活力。

2 热传感器布置优化及在线温度场重构

电子器件尤其是芯片仅通过温度传感器直接检测无法满足有效温度监控的要求: 一方面, 受到空间和功能的限制, 布置的传感器数量有限, 无法获得全局温度信息; 另一方面, 器件工作过程中热量集中区域不断变化, 导致热点的位置和数量不断变化, 而传感器则是固定的, 因此高效热点监测难以实现. 针对这一问题, Memik等人^[17]提出基于均匀布置的传感器进行插值的方法来估计热点温度. 此后有学者先后提出基于空间距离构建温度关系的重构方法, 包括反距离加权^[18]、径向基函数插值^[19], 基于克里金插值的传感器布置^[20]. 基于距离的温度场插值重构方法往往适用于热点温度检测, 但是全局估计精度较差, 尤其是在传感器数量较少的情况下. 此外, Reda等人^[21]通过启发式搜索技术优化传感器布置并结合线性加权方法来估计间接测量点温度, 从而实现提高温度监测分辨率的目的. 有学者基于框架理论和贪心多项式算法重构温度矩阵^[22,23].

我们针对电子器件在线温度场重建问题, 提出POD模型降阶的方法, 针对传感器测点选择问题提出基于QR分解的贪心选择策略.

2.1 问题描述与算法框架

对于一个目标温度场 $x \in \mathbf{R}^m$ (如芯片某时刻温度分布), 我们要依据温度场中 p 个离散位置的温度测量值 $y \in \mathbf{R}^p$ 估计出 x , 则温度重构的本质是一个插值过程, 可以简单表示为

$$x = \Phi y, \quad (1)$$

其中, $\Phi \in \mathbf{R}^{m \times p}$ 表示关联测量值和重构温度场的算法模型(系数). 由于 $p < m$ 时该问题是不适定的, 有无穷多个解. 因此我们需要基于训练数据发现器件内温度分布本征特性, 进而构建稳定的算法模型. 显然模型的构建方式和传感器位置选择都会影响重构算法的复杂度和精度.

图1所示框架描述了电子器件温度传感器布置优化及重构基本流程和关键部分. 在电子器件(如SoC芯片)的设计阶段, 首先通过热仿真或热测试手段得到器件的典型温度响应作为训练数据. 然后利用训练数据提取器件热重构区域的温度分布特征, 构建器件的温度响应模型. 最后, 基于该模型和精度目标来优化传感器的数量和位置选择. 离线部分完成后将算法和模

图1 (网络版彩图)数据驱动的温度传感器优化布置和温度场重构算法框架

Figure 1 (Color online) Data driven algorithm framework for optimal sensor placement and temperature field reconstruction.

型系数植入器件, 在线阶段算法程序实时收集传感器温度测量值, 基于模型和最小二乘原则重构温度场.

2.2 特征提取与模型降阶

假设我们有 n 个时刻的离散温度场数据矩阵 $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 作为训练数据, 其中 m 表示空间离散后的温度点个数. $\mathbf{X}$ 作为一个高维状态空间通常可以由基变换简单表示, 即

$$\mathbf{X} = \Psi \alpha = [\psi_1 \ \dots \ \psi_m] \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, 模型 Ψ 是包含了 m 个正交基向量的矩阵, 这样任意时刻的温度场都可以用这组基矩阵 Ψ 和对应的线性组合(系数 α)表示. 该正交投影过程称为本征正交分解(POD)或主成分分析(PCA)^[24], 被广泛用于图像和物理场的特征提取. 在数学上通常利用奇异值分解(SVD)的方法求解该投影过程, 得到相应的模型 Ψ :

$$\mathbf{X} = \Psi \Sigma \mathbf{V}^T, \quad (3)$$

对于一个高维温度场, 将其投影到正交基 Ψ 上后, 往往表现出低秩特性, 即 Ψ 的前 r ($r < m$)个基向量(POD模)包含了模型的绝大部分信息(可以利用基向量对应的特征值大小和所占比例衡量), 因此可以对模型降阶而几乎不损失对 $\mathbf{X}$ 恢复的精度:

$$\mathbf{X} = \Psi \Sigma \mathbf{V}^T \approx \Psi_r \Sigma_r \mathbf{V}_r^T = \Psi_r \alpha_r, \quad (4)$$

其中, Ψ_r 由 Ψ 的前 r 个列向量(特征向量)组成. 实际上, 根据Eckart-Young理论^[25], 对于给定的秩数 r , $\Psi_r \Sigma_r \mathbf{V}_r^T$ 是原数据矩阵 $\mathbf{X}$ 的最佳最小二乘近似. 训练数据正交分解降维后, 模型 Ψ_r 包含了SoC芯片温度场的核心特征, 其中的POD模的线性组合可以表示任一时刻

刻的温度分布, 因此只要知道了组合系数 α_p 就相当于知道温度场 $\mathbf{X}$.

2.3 传感器优化布置算法

我们希望根据一定数量的温度传感器测量 y 值重构出全场温度分布 x , 显然传感器位置的选择会直接影响重构结果的精度和稳定性. 由于传感器的测量值本身也是温度场的一部分, 同时结合方程(4)得

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} = \mathbf{C}\Psi_p\alpha_p \quad (5)$$

其中, 采样矩阵 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{p \times m}$ 的每一行与传感器对应位置的值为1, 其他元素均为0, $\mathbf{C}$ 与矩阵相乘表示取出该矩阵相应的行向量组成新的矩阵. 由根据最小二乘原则和式(5)得

$$\alpha_p = (\mathbf{C}\Psi_p)^\dagger \mathbf{Y}, \quad (6)$$

其中, $(\mathbf{C}\Psi_p)^\dagger$ 表示广义逆. 由于不同的传感器位置组合对应不同的 $\mathbf{C}$, 进而产生不同的重构结果. 根据矩阵理论, 这里最优传感器位置选择问题相当于最大子矩阵提取. 根据矩阵特性, 最优的传感器位置等效于矩阵 $\mathbf{C}\Psi_p$ 的条件数最小, 同时也等效于矩阵的行列式最大^[26], 我们以此作为传感器位置优化的指标. 假设我们要从 m 个可能的位置中选出 p 个传感器的位置组合, 总共会有 $\binom{m}{p}$ 种可能, 如果通过穷举计算所有可能的组合的行列式去找到最优解, 其计算复杂度难以接受. 因此, 相关研究常以局部最优化算法, 如启发式策略以及贪心算法实现相应最优指标下的传感器优化选择.

基于Householder变换的QR分解算法作为一种类似贪心过程的行列式最大化方法^[27], 可以在多项式时间复杂度内实现重构近似最优:

$$\Psi_p^T \mathbf{B} = \mathbf{Q}\mathbf{R}, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{Q}$ 是酉矩阵, $\mathbf{R}$ 是上三角矩阵, 列置换矩阵 $\mathbf{B}$ 中存储了相应的列置换编号. $\mathbf{Q}\mathbf{R}$ 列旋转通过选择二范数最大的列作为主轴, 然后让其他列减去该列正交投影到主轴列上的部分, 形成新的矩阵, 然后选择新的主轴. 实际上该QR分解过程可以利用matlab等数学工具轻松实现. 需要强调的是, QR分解是选择矩阵的列, 而我们的传感器选择是选择正交基的行, 因此需要对矩阵进行转置, 最终得到使得矩阵 $\mathbf{C}\Psi_p$ 的行列式最大对应的采样矩阵:

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}_p^T, \quad (8)$$

其中, $\mathbf{C}$ 由矩阵 $\mathbf{B}^T$ 的前 p 列组成.

2.4 算法验证与结果

我们以一个实际SoC芯片作为研究对象, 验证传感器优化和温度场重构算法在电子器件温度感知中的作用. 图2(a)所示为包含三个动态热源的芯片平面布局, 由于芯片厚度较薄, 水平方向温度梯度远大于厚度方向温度梯度, 因此传感器布置和温度场重构只考虑水平方向, 但是需要强调的是本文所提出的算法不仅限于二维空间. 用FLOTHERM热仿真软件完成变功耗下的瞬态温度场数值模拟得到温度响应结果. 将平面均匀划分为 20×20 的空间离散网格, 每个网格中心作为温度节点(共400个)提取温度数据, 时间步长10 ms, 共30000步(热图). 为了不失一般性, 随机提取其中70%(21000张热图)作为训练数据用于模型提取和传感器位置选择优化, 剩余30%(9000张热图)作为测试数据验证重构精度. 算法目标为从400个节点位置中选择出若干节点作为传感器位置, 重构全部二维温度场的温度值. 以均方差(MSE)作为全局重构精度的评价指标:

$$\text{MSE} = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m |x_{j,i} - \tilde{x}_{j,i}|^2, \quad (9)$$

图2 (网络版彩图)热源布局和传感器布置结果. (a) 芯片热源布局; (b)~(d) 不同数量的传感器布置结果

Figure 2 (Color online) Floorplan of the heat sources and sensors. (a) Heat source layout of the researched chip; (b)~(d) sensor arrangement results of different quantity.

其中, $x_{j,i}$ 表示对应时刻和位置的实际温度值(仿真结果), $\hat{x}_{j,i}$ 表示对应的重构温度值. 此外, 如前文所述, 热点温度是电子器件热管理的核心关切点, 因此对热点温度的估计精度也很重要. 本文以热点温度绝对偏差的最大值作为评价指标:

$$\text{MEH} = \max_j |x_{j,h} - \hat{x}_{j,h}|, \quad (10)$$

其中, 下标 h 表示实际热点所在位置.

图2(b)~(d)分别展示了文本算法求解出的5个、10个以及15个传感器的优化布置结果. 由图可知, 基于重构目标的传感器布置与传统的基于经验和直觉的传感器布置有明显差别, 通常我们认为传感器应该布置在尽可能接近热源的位置, 而数据驱动的优化布置算法会将传感器布置在远离热源的位置.

芯片温度场重构偏差的均方差随传感器数量的变

化如图3(a)所示, 由图可知随着传感器数量增加, 温度场的重构偏差呈指数下降. 图3(b)所示为热点估计偏差的最大值随传感器数量增加的变化, 由图可知当传感器数量大于5个时, 偏差小于 1°C , 当传感器数量大于10个时, 偏差小于 0.1°C , 这一数量级已经小于实际芯片中传感器测量误差范围. 以上结果充分说明基于传感器优化布置和重构算法能够在仅布置少量传感器的情况下实现全局温度响应的精确估计和热点温度变化有效追踪, 进而为动态热管理提供可靠的依据. 为了更直观体现本文算法的重构效果, 图3(c)对比了传感器分别为5个、10个及15个的情况下偏差最大的实际温度场和重构温度场.

2.5 小结

以上研究说明通过合理的温度传感器优化布置,

图3 (网络版彩图)目标温度场重构结果. (a) 均方差随传感器数量变化; (b) 最大热点偏差随传感器数量变化; (c) 重构精度对比示例

Figure 3 (Color online) Reconstruction results of target temperature field. (a) The change of MSE with the number of sensors; (b) the deviation of the MEH varies with the number of sensors; (c) examples of reconstruction accuracy comparison.

同时结合有效的温度重构算法,能够在显著减少传感器数量的情况下实现对电子器件目标区域温度响应的精确估计.该方法突破了基于硬件的温度感知能力,能够在不增加(甚至降低)硬件成本的情况下提高电子器件动态热管理的效率和稳定性,也进一步体现了电子器件热管理中软件算法的应用潜力.

由于电器件的动态热管理控制是以检测温度作为核心的,因此温度感知能力直接决定了温控策略的实际效果.以智能手机为例,在没有温度重构算法的辅助下如果对于核心发热器件(如SoC)的热点温度估计偏高,则必然导致高温误报,进而提前降低性能使手机卡顿;如果对热点温度估计偏低则使手机器件和表面超温,严重影响用户热体验甚至对用户产生热损伤.而精确的热点温度估计能够使手机性能最大化的同时,有效避免对设备和用户的热损伤.此外,由于温度重构算法增加了温度检测区域和精度,可以推动温度预测和环境温度感知等算法的设计和实现,进一步提高电子器件在时间和空间上的温度感知能力,为更加智能化的动态热管理奠定基础.

3 基于大尺寸石墨纳米片的高导热复合相变材料

相变储热材料具有较大的相变潜热(100~300 J/g),因而可以作为电子器件散热的热稳定材料,有效降低高峰时段的温度峰值.然而,PCM的导热性能差限制了其对温度波动的热响应速度,往往成为实际应用的瓶颈.

近年来,PCM研究的重点集中于将一维和/或二维的高导热碳材料首先通过一定方式组装或组合成三维石墨骨架,然后在一定条件下再吸附熔化的相变材料获得复合相变材料,这些三维石墨骨架充当支撑材料,在复合相变材料内部形成连通的热传导网络.因此,高性能三维骨架的预制成为高导热复合相变材料合成的关键.目前,已经报道了多种石墨骨架,主要有各向同性和各向异性的石墨泡沫或石墨气凝胶.这些石墨骨架往往以自上而下法获得的石墨纳米片或多层石墨烯为基础材料,合成方法主要有还原诱导组装法^[28]、溶液诱导组装法^[29]、冰模板组装法^[30]、有序氧化石墨烯原位凝固法^[31]、压力诱导组装法^[32]、真空辅助组装法^[33]等.基于这些三维石墨骨架制备的复合相变

材料的导热系数有一定的改善,然而,获得导热系数超过10 W/mK的复合相变材料依然具有挑战性.另外,这些三维石墨骨架的对合成条件要求苛刻,有时涉及高温(2800°C)处理,并且基础材料成本较高,难以大规模应用.

作为一种自上而下法从天然石墨片获得石墨烯纳米片的中间产物,膨胀石墨通常具有多孔性、高导热性以及长链结构的特征,是由大量石墨纳米片通过范德瓦尔斯作用力连接而成的大尺寸蠕虫状颗粒.如果在制备复合相变材料过程中尽可能不破坏这些范德瓦尔斯力的作用,则可以在最终制备的复合相变材料内部形成大尺寸热传导通路.

3.1 复合相变材料的制备与形貌表征

如图4所示为高导热复合相变材料设计示意图.首先将天然石墨片按一定方式打开,获得大尺寸范德瓦尔斯力连接的石墨纳米片;将有机相变材料颗粒均匀分散在石墨纳米片上,一定温度下加热相变材料颗粒使其熔化,所用相变材料为疏水类有机物.由于石墨片和相变材料均为疏水性材料,可以相互浸润,相变材料受热熔化并凝固后将在石墨片层上形成涂层;将大量带有相变材料涂层的石墨纳米片组装在定制的模具中进行机械压缩,获得尺寸、密度可控的复合相变材料块体.由于机械压力的作用,复合材料内部的石墨纳米片由杂乱状态变为水平阵列,原始的石墨纳米片变为大尺寸阵列的石墨薄片,石墨薄片之间存在相变材料薄层.事实上,从紧凑的天然石墨片获得如图4(b)所示长链结构的石墨纳米片仍然存在技术难题,然而,从天然石墨片通过插层以及热处理获得的膨胀石墨恰好符合这个过程的特征,因此可用膨胀石墨代替长链结构的石墨纳米片.

以疏水性有机物石蜡(paraffin wax, PW)作为相变材料,采用上述材料设计方法制备复合相变材料.对复合相变材料制备过程中各阶段材料的微观形貌进行表征,如图5所示.首先,以可膨胀石墨粉(粒度为50目)为原材料,干燥后倒入不锈钢容器中,在700°C下加热15 min,即得到蠕虫状膨胀石墨(worm-like expanded graphite, WEG).可膨胀石墨粉即为插层石墨,外观为直径约400 μm 、厚度约50 μm 的圆盘状,包含大量紧凑有序的石墨纳米片(图5(a)).热膨胀过程石墨粉在其法线方向体积拓展100倍以上形成蠕虫状膨胀石墨(图

图 4 (网络版彩图)高导热复合相变材料设计示意图. (a) 原始的石墨片; (b) 范德瓦尔斯作用力连接的链状大尺寸石墨纳米片; (c) 带PCM颗粒的链状石墨纳米片; (d) 带PCM涂层的链状石墨纳米片; (e) 组装得到的复合相变材料块体; (f) 大尺寸阵列石墨纳米片与PCM薄层

Figure 4 (Color online) Schematic illustration of designing the highly thermally conductive phase change composites. (a) The raw graphite flake; (b) van der Waals bonded chain-like large-size graphite nanosheet; (c) chain graphite nanosheet with PCM particles; (d) graphite nanosheet with PCM coating; (e) the assembled composite block; (f) the large-size aligned graphite nanosheet and thin PCM layer.

图 5 (网络版彩图)复合相变材料制备过程中不同阶段材料的微观和宏观形貌. (a) 插层石墨片; (b) 蠕虫状膨胀石墨; (c) 带相变材料涂层的膨胀石墨; (d) 复合相变材料制备过程中不同阶段材料的宏观形貌; (e) 不同厚度的圆盘状复合相变材料; (f) 复合相变材料块体的截面形貌; (g) 去除相变材料后的石墨纳米片骨架

Figure 5 (Color online) The micro- and macrostructures of the composites at different stages during the preparation. (a) Graphite intercalation compounds; (b) worm-like expanded graphite; (c) expanded graphite with PCM coating; (d) macro-morphology of composites at different stages; (e) composite discs in different thicknesses; (f) the cross-section of composite block; (g) the aligned and interconnected graphite nano wafer network after the PCM is removed.

5(b)), 由大量松散无序的石墨纳米片构成. 蠕虫状膨胀石墨上形成相变材料涂层后, 膨胀石墨的外观不发生变化, 而其内部石墨纳米片上形成了相变材料涂层(图 5(c)). 图 5(d)所示为不同阶段材料的宏观形貌照片, 从左到右依次为可膨胀石墨粉、蠕虫状膨胀石墨、带相变材料颗粒的膨胀石墨、带相变材料涂层的膨胀石墨, 以及压缩后得到复合相变材料薄片. 图 5(e)为压缩后得到的具有不同厚度的圆盘状复合材料块体. 图 5(f)所示为复合相变材料块体内部石墨纳米片与相变材料形成分层结构. 进一步高温处理去除相变材料可以得到石墨纳米片骨架, 其中石墨纳米片厚度在 80~400 nm 变化(图 5(g)).

3.2 复合相变材料的热性能测试

采用差示扫描量热仪(DSC8000, 美国Perkin-

Elmer公司)测试样品的比热容、相变温度及相变潜热. 图 6(a)所示为纯石蜡和复合相变材料在降温过程中的 DSC 曲线. 可以看出, 石蜡的熔点约为 44°C. 与纯石蜡相比, 复合相变材料在冷却凝固过程中的凝固起始温度升高, 过冷度降低了 1~2°C, 并且膨胀石墨的引入并不影响相变材料本身的相变焓. 图 6(b)所示为比较纯相变材料块体和复合相变材料块体在受热熔化过程中的质量变化以及宏观形态图片, 可以看出纯石蜡块体和膨胀石墨含量 5 wt% 的复合相变材料块体在高于相变温度时均有液体出现, 而膨胀石墨含量高于 5 wt% 的复合相变材料块体依然保持外观形态不变且无液体泄漏. 重复加热冷却循环测试发现, 复合相变材料块体在经历 100 次以上熔化-凝固循环后, 其热传导及定型封装性能几乎没有发生明显衰减, 展示出优异

图 6 (网络版彩图)复合相变材料的热性能. (a) 纯石蜡及其复合相变材料的DSC曲线; (b) 复合相变材料的封装性能测试; (c) 基于不同处理方式制备的复合相变材料热导率比较; (d) 复合相变材料的热效能和导热系数与已有报道的比较

Figure 6 (Color online) Thermal properties of phase change composites. (a) DSC curves of pure paraffin wax and composites; (b) the encapsulation measurement of the composites; (c) the comparison of thermal conductivities of composites prepared by different methods; (d) the comparison of thermal conductivities and thermal effusivity of composites with different reports.

的循环稳定性。

采用激光导热仪(LFA467)中的面内模块测试复合材料垂直于压缩方向的热扩散率, 再根据复合材料块体的密度和DSC测得的比热容计算其导热系数。测试并比较了基于两种膨胀石墨制备的复合材料块体的导热系数, 一种膨胀石墨为原始的大尺寸蠕虫状膨胀石墨, 另一种为500 W功率下超声处理蠕虫状膨胀石墨15 min得到小尺寸的石墨纳米片堆栈。从图6(c)可以发现, 随着石墨含量的增加, 两种复合材料的面内导热系数逐渐升高。然而, 在相同的石墨含量下, 基于大尺寸蠕虫状膨胀石墨制备的复合材料具有更高的面内热导率, 并且与根据平行导热模型计算得到的复合材料热导率比较吻合, 这意味着复合材料中膨胀石墨形成连通的热传导通路, 进而达到最大化的导热强化; 而采用超声剥离的膨胀石墨制备的复合相变材料的热导率则与Laminated模型结果吻合。另外, 其他采用膨胀石墨作为导热强化剂制备的复合相变材料块体的导热系数与基于超声处理的膨胀石墨制备的复合材料块体热导率接近, 这说明其他研究在复合材料合成过程中由于采用了剧烈搅拌、超声处理等操作, 膨胀石墨的结构受到破坏, 因此导热强化受到限制^[34~37]。在膨胀石墨含量为40 wt%时, 复合相变材料的热导系数高达 35 W (m K)^{-1} 。

对于相变材料与导热强化添加剂复合制备的复合相变材料, 复合材料的热导率升高的同时, 其整体的相变潜热也相应减小, 因此在导热强化和相变潜热减小之间存在着平衡。这里采用热效能 e 对复合相变材料的综合性能进行评价:

$$e = \sqrt{K\rho\Delta H}, \quad (11)$$

式中, K 为复合材料的导热系数, ρ 为复合材料的密度, ΔH 为复合材料的相变潜热。热效能可以表征材料与周围环境的换热能力。如图6(d)所示, 横坐标为复合相变材料的热导系数, 纵坐标为热效能, 可以看出我们的复合相变材料同时具有较高的导热系数和热效能, 这两个指标比现有报道的数据高出2~6倍^[38~43]。

3.3 电池热管理实验

在高导热复合相变材料的基础上, 开发了用于18650动力电池的控温器件。两个相同的商用18650锂离子电池单体, 其中一个用复合相变材料包裹, 另一个暴露在环境中, 如图7所示。

电池与复合材料块体的结合方式考虑到传热方向与复合相变材料内片层方向协调一致, 可以最大限度地利用复合相变材料面内热导率高的特征。复合材料块体的膨胀石墨含量为20 wt%, 压块密度为 950 kg/m^3 。通过

图7 (网络版彩图)石蜡基复合相变材料的电池控温性能。(a) 用于实验的两节电池照片;(b) 第一次放电过程中两节电池的温度变化的红外图像;(c) 多次充放电循环过程中电池表面温度发展曲线

Figure 7 (Color online) Battery temperature control performance of paraffin wax-based composites. (a) Photos of two batteries used in the experiment; (b) infrared images of two battery monomers during the first discharging stage; (c) the temperature evolutions of two battery monomers during several charging/discharging cycles.

改变充/放电电流来控制工作倍率, 用红外摄像机记录两个电池单体在不同工作倍率下的温度变化, 环境温度维持在 30°C . 两个电池单体首先在 1.15 C 充电, 然后在 2.3 C 下放电. 实验结果表明, 在放电过程中, 直接暴露环境中的电池单体温度迅速升高至 62°C , 而包裹有复合相变材料的电池单体升温较慢, 放电结束时, 最高温度为 48°C , 可见具有较好的控温效果. 进一步对包裹有相变材料块体的电池进行更高倍率的连续充放电测试, 发现电池温度始终低于 55°C , 这说明复合相变材料块体的高导热以及高相变焓值可以迅速传导及大量吸收电池高倍率工作时产生的废热, 如此不仅有助于降低电池工作温度, 而且有助于维持电池工作温度的均匀性.

3.4 小结

我们提出了通过构建大尺寸取向的石墨纳米片合成高导热复合相变材料的新思路. 针对常用的疏水类有机物石蜡, 以蠕虫状膨胀石墨为导热强化基质提出了制备高导热复合相变材料的新方法. 所制备复合相变材料内部形成三维取向的石墨纳米片网络, 当膨胀石墨添加含量低于 $40\text{ wt\%}$ 时, 复合相变材料热导率可高达 35 W (m K)^{-1} , 与纯有机相变材料相比提高了一百多倍, 比现有研究结果高出 $2\sim 6$ 倍. 同时, 复合相变材料中的三维石墨骨架可对液态的相变材料进行有效封装, 实现定型的效果. 在此基础上, 开发了电池控温器件, 实验结果表明高导热复合相变材料可实现对高倍率工作下的动力电池的有效控温.

4 基于吸附剂材料的电子设备热管理

在自然界中, 哺乳动物通过汗液的蒸发实现对自身温度的调节, 其中利用了水在液-气相变过程中高达 2400 J/g 的潜热. 受此启发, 人们提出了仿生发汗冷却用于航天器热防护和冷却等^[44]场景的方法. 而在小型电子设备中, 应用该技术的关键在于为流动的液态水提供合适的储存介质. 为此, Zhang等人^[45]使用了聚丙烯酸钠水凝胶作为储存介质, 用于锂离子电池的热管理. Pu等人^[46]则利用温度敏感性水凝胶, 实现可穿戴设备的发汗冷却. 然而, 此类方法的应用瓶颈在于, 凝胶内的水分一旦完全蒸发, 将依赖于主动的补充. 额外的输水管路以及主动补水过程, 使得该方法的应用场

景十分受限. 对此, 我们提出了一种基于吸附剂的热管理方法, 以空气中的水蒸气作为水源, 通过吸附剂对水蒸气的自发吸附实现水分补给, 进而用于电子设备的冷却过程, 尤其是具有周期性散热负荷的场景.

4.1 工作原理

图8(a)给出了吸附剂涂层循环实现电子设备热管理的示意图. 该循环由吸附剂的吸附过程和解吸过程组成. 在给定的环境工况下, 当吸附剂与周围空气达到热质平衡时, 其内部含水量(g/g)可以通过吸附剂的等压吸附曲线确定, 如图8(b)所示. 图中曲线的横坐标为 P/P_0 , 其中 P 为环境水蒸气分压(Pa), P_0 为吸附剂温度对应的饱和水蒸气分压(Pa). 当吸附剂温度上升时, 对应 P_0 增加, 吸附剂与环境之间的平衡点随之偏移, 其平衡状态的含水量低于当前含水量, 因此吸附剂会发生温度驱动下的解吸过程, 直至与环境再次实现平衡.

解吸过程中吸收的热量与解吸水量成正比, 可以进一步表示为

图8 (网络版彩图)基于吸附剂的热管理措施. (a) 吸附-解吸循环原理示意图; (b) 两种典型吸附材料的吸附曲线

Figure 8 (Color online) Thermal management strategy based on sorbents. (a) Schematic diagram of the adsorption-desorption cycle; (b) sorption curves of two sorbent materials.

$$Q_{\text{dc}} = m_{\text{d}} h_{\text{dc}} (W_{\text{d}}^{\text{i}} - W_{\text{d}}^{\text{ii}}) = m_{\text{d}} h_{\text{dc}} \Delta W_{\text{d}}, \quad (12)$$

式中, m_{d} 为吸附剂干重(g), h_{dc} 为解吸焓, W_{d}^{i} 和 W_{d}^{ii} 分别为解吸前后吸附剂的平衡吸附量, ΔW_{d} 为对应的循环吸水量. 对于物理吸附剂而言, 其解吸焓一般接近液态水的蒸发焓. 因此从上式可以看到, 对于一定质量的吸附剂, ΔW_{d} 是反映其热管理能力的主要参数.

4.2 吸附剂选取

吸附剂材料的循环吸水量是选取过程中的首要准则. 对于较为稳定的工作环境与设备温度区间, 选取具有S形吸附曲线特征的材料, 能够在较窄的温度变化范围内获得尽可能大的 ΔW_{d} , 如图8(b)所示. 阶跃变化的吸水量使得吸附剂涂层对于电子设备的温升很敏感, 并加速解吸过程的发生. 此外, 吸附剂材料还需考虑: (1) 高水热稳定性; (2) 无毒无腐蚀性; (3) 优秀的热物理属性, 如高热导率. 传统的物理吸附剂包括硅胶、沸石、活性炭等. 然而, 硅胶、活性炭的主要吸附发生在高湿区域, 沸石对于水的亲和力过强使得解吸困难, 因此这些吸附剂不适用于这里提出的热管理应用.

近年来, 金属有机骨架材料(MOFs)作为一类新型多孔材料, 被广泛应用于气体分离、催化、储氢等领域. MOFs凭借其高孔隙率和大比表面积的特征, 表现出较强的吸附性能. 2005年, 法国Férey研究小组报道了一种具有介孔结构的新型MOF材料, 即MIL-101(Cr)^[47]. 图9给出了MIL-101(Cr)在298 K下的等温吸附

图9 (网络版彩图)MIL-101(Cr)等温吸附曲线(298 K)

Figure 9 (Color online) Water sorption isotherms of MIL-101(Cr) at 298 K.

曲线. 从图中可以看到, 该材料在典型环境条件下 (25°C, RH60%), 其平衡吸附量高达1.05 g/g. 当湿度范围由RH55%降至RH40%时, 其吸附量陡降至0.1 g/g左右, 可获得0.95 g/g的循环吸附量. 此外, MIL-101(Cr)具有良好的水热稳定性、吸附动力学, 因此我们首先以MIL-101(Cr)作为吸附剂, 通过实验验证上述热管理措施的应用效果.

4.3 实验方法

4.3.1 MIL-101(Cr)粉体制备方法

制备过程中使用到的试剂九水硝酸铬、对苯二甲酸均采购自国药化学试剂有限公司, 纯度为分析纯. 合成路径参考文献^[48]中的无氢氟酸水热合成法, 并使用二甲基乙二胺及乙醇作为溶剂对粗产物进行提纯分离. 最终得到的提纯产物在80°C真空烘干.

4.3.2 涂层制备方法

为了保证吸附剂与热源之间的紧密结合, 选取了基于无机黏结剂的涂层制备方法. 金属基底为铝片 (40 mm×40 mm×0.5 mm), 铝片首先浸泡于1 mol/L浓度的氢氧化钠溶液中5 min, 取出后使用乙醇及去离子水交替冲洗, 烘干备用. 1 g MIL-101(Cr)粉末分散于8 mL乙醇与2 mL水的混合溶液中, 超声振荡20 min, 加入0.37 g硅溶胶(30 wt%)作为黏结剂. 磁力搅拌混合液, 直至混合液呈现出适宜的黏度. 通过刮涂的方式将浆液涂覆于铝片表面. 涂覆样片在50°C下烘干2 h, 120°C高温固化1 h. 为了探究吸附剂用量对控温效果的影响, 共制备了三组不同涂覆量的样片, 其涂层质量分别为0.124, 0.193, 0.288 g, 对应的涂层厚度分别为198, 323, 516 μm.

4.3.3 实验装置

借助搭建的模拟加热装置, 可以定量研究涂覆样片的吸附-解吸过程及对应的温度变化. 装置示意如图10所示, 聚酰亚胺加热片作为热源模拟电子设备的发热过程. 采用热电偶记录加热过程中的温度变化. 为了减小加热片自身的温度不均匀性, 在加热片底部先布置一层薄铝片, 热电偶黏附于铝片背面. 最底部使用低热导率的多孔泡沫做绝热处理. 加热片与铝片接触面之间涂抹导热硅脂以减小内部接触热阻. 使用高精度电子天平记录加热过程中的质量变化. 对照基准

图 10 (网络版彩图)实验装置示意图

Figure 10 (Color online) Schematic illustration of the test rig.

实验中, 上侧铝片表面不覆盖任何材料, 仅将其上表面涂黑, 使得表面发射率与涂覆样片尽可能接近. 在使用 PCM 材料的实验中, 片状 PCM 材料直接贴附在上侧铝片表面.

4.4 实验结果与讨论

4.4.1 MIL-101(Cr)涂层控温效果

在典型的环境条件下(25°C, RH60%), 对三种不同涂覆质量的样片进行了实验研究. 加热片的加热功率设定为1.5 W, 对应的热流密度为937.5 W/m². 如图11(a)所示, 对照组实验中加热片温度在电源接通后迅速上升, 直至最终稳定在66°C左右. 而涂覆样片的温度经历初始短暂的快速变化, 升温速率显著减缓. 与对照组相比, 涂覆样片在温度上升至35°C后, 升温速率持续低于对照组, 两者之间的温差不断增大, 表明吸附剂涂层实现了有效的控温作用. 从图11(a)中可以看

到, 吸附剂涂层在解吸过程中存在一个稳定阶段, 涂层的质量随时间线性变化, 该稳定阶段使得涂覆样片的温度维持在54°C左右, 呈现出明显的平台期. 最终, 当解吸过程接近尾声, 解吸速率放缓, 样片温度也相应逐渐上升, 达到最终的稳态温度. 样片温度上升至稳定值所需要的时间随着涂覆质量的增加而延长.

将解吸过程对应的散热功率定义为解吸速率与解吸焓的乘积:

$$Q_{\text{cooling}} = \dot{m} h_{\text{de}}, \quad (13)$$

式中, $\dot{m}$ 为涂层解吸速率(g/s), h_{de} 为吸附剂的解吸焓(J/g). 对图11(a)中的质量变化曲线进行拟合, 可以得到涂层在稳定阶段的解吸速率约为0.21 mg/s. MIL-101(Cr)的解吸焓近似为水的蒸发潜热, 即2400 J/g^[49]. 因此, 涂层对应的散热功率可达0.5 W, 占热源加热功率(1.5 W)的33%, 从而实现了散热能力的大幅强化.

4.4.2 周期热载荷下的自发回复

与以往使用液态水蒸发进行电子产品冷却的技术不同, 固体吸附剂材料能够通过吸附过程, 自发从环境中捕获水分, 从而实现散热能力的再生. 为了进一步研究吸附剂涂层在周期加热载荷下的散热效果, 对加热片电源间断打开或关闭, 1.5 W加热20 min, 随后关闭电源60 min, 重复四个循环. 在此过程中, 记录下0.124 g涂覆质量样片的温度变化. 从图11(b)中可以看到, 一旦电源关闭, 加热片温度会迅速下降至略高于环境温度, 随后以一个缓慢的速率继续下降. 后续的缓慢下降是由于吸附剂涂层持续的吸附放热. 最终, 加热片

图 11 (网络版彩图)MIL-101(Cr)涂层控温效果. (a) 1.5 W加热功率下温度及质量变化曲线; (b) 循环加热条件下吸附剂涂层的自发回复

Figure 11 (Color online) Thermal management performance of the MIL-101(Cr) coating. (a) Temperature and mass evolution curves of samples at a heating power of 1.5 W; (b) spontaneous recovery of the sorbent coating under periodic heating.

温度与环境完全平衡, 表明此时的涂层已经吸附饱和, 完全恢复了其控温能力. 在随后的升温过程中, 温度曲线与上一循环基本一致, 证明了涂层控温效果的自发恢复能力. 大多数智能设备往往具有间歇的功耗特征, 因此吸附剂涂层能够在设备处于低功耗状态时, 从环境空气中补充水分, 继而在设备高功耗状态下发挥控温作用, 最终对设备温度实现“削峰填谷”的控制效果.

4.4.3 与PCMs的对比

我们进一步对比了吸附剂涂层与商业PCM控温材料的控温能力. 将0.385 g的片状PCM贴附在铝片表面作为对照组, 所用PCM的相变焓约为150 J/g. 如图12(a)所示, 在1 W加热功率下, 样片温度迅速上升. 当温度上升至40°C以上时, PCM开始发生固-液相变, 使得PCM样片的升温速率明显降低. 但由于PCM的储热能力有限, 因此在加热5 min后, PCM样片温度再次迅速上升. 与之相比, 尽管吸附剂涂层的质量更小, 但作用时长显著长于PCM, 具有更加有效的控温作用.

为了能够横向定量比较吸附剂涂层与PCM的控温效果, 定义参数等效焓值为

$$h_{eq} = \frac{Q_1}{m_{coating}}, \quad (14)$$

式中, Q_1 为材料的潜热储存量(J), $m_{coating}$ 为材料的总质量(g). 对于PCM, 其等效焓值即为相变焓. 对于吸附剂涂层而言, 等效焓值可以依据涂层的循环吸水量进一步推算. 等效焓值本质上反映了材料的储热能力, 等效焓值越高, 材料在升温过程中所能实现的控温越显

著. 制备的MIL-101(Cr)涂层的平均循环吸水量为0.81 g/g, 因此对应的等效焓值为1950 J/g. 图12(b)中对比了MIL-101(Cr)涂层与文献中常见PCM的等效焓值, 从图中可以看到, MIL-101(Cr)涂层的等效焓值远远高于常规PCM材料. 因此, MIL-101(Cr)涂层能够实现更为有效的电子设备热管理.

4.4.4 实际应用展示

我们进一步展示了吸附剂涂层在实际电子产品上的应用效果. 采用ODROID开发板作为实验对象, 该设备运行Android操作系统, 芯片运行产生的热量由一块翅片散热器传导至环境中(图13). 作为对比, 在相同规格的翅片表面均匀涂覆了0.743 g的MIL-101(Cr). 实验过程中, 借助测试软件(安兔兔)驱使设备处于高功耗工作状态运行15 min, 使用热电偶记录该过程中芯片表面的温度. 在基准测试中, 芯片表面的温度在15 min的测试周期内上升至62°C. 而将原始散热器替换为涂覆有吸附剂材料的散热器, 芯片表面温度的上升速率明显下降, 在15 min测试结束时的最高温度为55°C, 与基准测试相比, 吸附剂涂层实现了7°C降温效果. 与此同时, 从红外图像中可以看到, 在吸附剂涂层作用下, 不仅散热器温度有所降低, 周围电路板及元器件的温度同样得到了有效控制. 上述实验结果表明, 基于吸附剂涂层的热管理策略, 可以在不改变原器件设计和宏观散热结构的情况下, 大幅改善器件的散热效果.

4.5 小结

以上研究证明所提出的基于吸附剂材料吸附-解

图 12 (网络版彩图)吸附剂涂层与PCM的控温效果对比. (a) 温度变化曲线对比; (b) 等效焓值对比

Figure 12 (Color online) Comparison of the thermal management performance between the sorbent coating and PCM. (a) Comparison of temperature evolution curves; (b) comparison of effective enthalpies.

图 13 (网络版彩图)开发板演示实验

Figure 13 (Color online) Real-world experiment of the development board.

吸循环的被动热管理措施, 为电子设备强化散热提供了新的解决方案. 吸附剂材料在设备升温过程中发生水分解吸, 并吸收大量热量, 抑制设备的升温; 同时, 当设备处于低功耗待机状态时, 吸附剂能够从环境中自发地吸附水蒸气, 实现工作能力的再生. 本文首先给出了吸附剂材料的选取方法, 在此基础上选取了 MIL-101(Cr) 作为典型材料, 以涂层的形式将吸附剂材料与电子设备结合, 实验验证了该热管理方案的可行性. 实验结果表明, 由于 MIL-101(Cr) 拥有高达 1950 J/g 的储热能力, 远高于传统 PCM 的相变焓, 因此能够显著延长控温效果. 该方法能够拓展至各类吸附剂材料, 以及应用于更加广泛的应用场景, 如锂电池快充、5G 通讯基站、光伏发电等具有间歇散热需求的场合.

5 基于吸附式制冷的数据中心余热回收

数据中心的 PUE (power usage effectiveness = 总设备能耗/IT 设备能耗) 通常为 2~3. 提高数据中心的能效是目前数据中心发展的主方向之一. 一个有效途径是利用 IT 设备产生的部分余热来替代电能驱动制冷设备, 这样既提高能源利用效率, 又减少了制冷设备的电耗. 热驱动的吸附式制冷系统具有低驱动热源温度的优点, 但硅胶-水吸附式制冷系统的驱动温度需要 60°C 以上^[50]. 随着 IT 设备散热技术的发展, 特别是水冷技

术, IT 设备可输出温度较高的余热. IBM 在 2012 年推出的 Aquasar 服务器是全球第一款温水水冷服务器. 其计算主板和内存采用水冷技术, 最高余热热水温度可达 60°C^[16]. 相关企业也推出温水水冷服务器产品, 余热热水温度为 45°C. 水冷服务器中, 也保留着传统的冷板接触散热和风冷散热部件, 如硬盘、网络适配器等, 其冷水需求温度约在 20°C. 故数据中心余热回收是一个低驱动热源温度而高蒸发温度的应用场合, 硅胶-水吸附式制冷系统可满足其应用要求.

5.1 吸附式制冷

吸附式制冷是一种基于吸附及其逆反应的热驱动制冷技术. 吸附式制冷常用的制冷剂为水、氨和甲醇等天然工质, 常用吸附剂为硅胶、沸石、活性炭、类沸石、MOF 等多孔介质. 硅胶-水工质对是吸附式制冷发展最成熟的工质对, 也已实现产业化^[51]. 同时硅胶-水工质对具有驱动热源温度低、安全无毒无腐蚀、成本低廉等优点^[50]. 因此它是用于数据中心余热回收的最佳吸附式制冷工质对.

5.2 余热回收系统

基于吸附式制冷的数据中心余热回收利用系统的示意图如图 14 所示. 数据中心 IT 设备产生的余热, 通过一个热水循环对吸附式制冷机进行加热驱动. 吸附式制冷机产生的冷水可以直接送入计算主板和内存的水冷换热器, 通过一个冷水循环直接对主板冷却或者通过风机盘管产生冷风对 IT 设备的风冷部件进行冷却. 系统同时需要一个冷却塔和冷却水循环对吸附式制冷机进行散热冷却. 其典型运行工况为: 余热热水温度 45~60°C、冷水温度 20°C 和冷却水温度 30°C.

图 14 (网络版彩图)基于吸附式制冷的数据中心余热回收利用系统的示意图

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of a data center waste heat recovery system based on adsorption refrigeration.

表 1 吸附式制冷机在数据中心余热回收工况的实验结果^[52]

Table 1 Experimental results of adsorption chiller under the condition of waste heat recovery in data centers ^[52]

序号	热水进口温度 (°C)	冷却水进口温度 (°C)	冷水出口温度 (°C)	制冷量 (kW)	COP
1	46.1	27.9	21.1	1.28	0.32
2	51.4	29.7	19.5	2.21	0.43
3	60.0	30.6	18.4	3.39	0.46
4	61.5	27.7	20.0	4.01	0.51

基于数据中心典型的余热回收工况，我们搭建了采用回质循环的硅胶-水吸附式制冷机，并进行了实验研究^[52]。表1的实验结果表明，在典型工况条件下，硅胶-水吸附式制冷机可有效运行，满足数据中心IT设备的运行的温度要求。当余热热水温度低于50°C时，制冷量小于2 kW且COP低于0.4。当余热热水温度高于50°C时，制冷量大于2 kW且COP大于0.4。实验结果中，吸附式制冷机的COP最大为0.51。以上研究基本说明一个问题，通过吸附制冷转换，基本上余热量中有近30%~50%可以转化为有效的制冷量。100 kW的余热功率可以获得近40 kW的制冷功率，按照冷水机组效率为4来测算，相当于节约了10 kW的电功率。

5.3 小结

尽管基于吸附式制冷的数据中心余热回收方案相比于传统的方案有着较大的能效优势，但是目前还面临着诸多挑战，例如温水水冷服务器应用非常少，吸附式制冷存在体积大和价格昂贵的问题。因此基于吸附式制冷的数据中心余热回收的未来发展方向如下：

- (1) 效率更高、余热输出温度更高的水冷服务器研发及其推广应用；
- (2) 吸附和传热传质性能更佳、成本低廉和可靠的吸附剂研发；
- (3) 先进吸附式制冷循环的研发；
- (4) 吸附式制冷标准化和模块化先进生产工艺的研发。

6 结论与讨论

本文探讨了电子器件动态热管理技术发展所面临的问题和挑战，总结了本课题组在相关领域的研究进展。我们强调，由于电子器件功能和形态趋于复杂，面临的挑战日益严峻，其热管理研究涉及的学科领域已不仅仅限于传统的材料和传热学科。为了突破热问题对于电子器件性能发展的限制，我们需要引入其他领域的原理和技术来弥补传统方法的不足。同时，要从软件到硬件，从微元器件到大型系统等各个角度全方位地完善热管理体系。

参考文献

1 Tavakkoli F, Ebrahimi S, Wang S, et al. Analysis of critical thermal issues in 3D integrated circuits. *Int J Heat Mass Transfer*, 2016, 97: 337–352

2 Avenas Y, Dupont L, Khatir Z. Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters—A review. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, 27: 3081–3092

3 Shahil K M F, Balandin A A. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials. *Solid State Commun*, 2012, 152: 1331–1340

4 Zhou Y, Liu F, Wang H. Novel organic-inorganic composites with high thermal conductivity for electronic packaging applications: A key issue review. *Polym Compos*, 2017, 38: 803–813

5 Tang H, Tang Y, Wan Z, et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling. *Appl Energy*, 2018, 223: 383–400

6 Skadron K. Hybrid architectural dynamic thermal management. In: *Proceedings of the Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition*. Paris, 2004. 1530-1591/04

7 Ranieri J, Vincenzi A, Chebira A, et al. EigenMaps: Algorithms for optimal thermal maps extraction and sensor placement on multicore

- processors. In: Proceedings of the Design Automation Conference. San Francisco, 2012. 2012: 636–641
- 8 Lai Y H, Wu T, Wei L L, et al. Thermal performance of electronic components based on phase change materials (in Chinese). *CIESC J*, 2014, 65: 157–161 [赖艳华, 吴涛, 魏露露, 等. 基于相变材料的电子元件的散热性能实验研究. *化工学报*, 2014, 65: 157–161]
 - 9 Sarı A, Biçer A, Karaipekli A. Synthesis, characterization, thermal properties of a series of stearic acid esters as novel solid-liquid phase change materials. *Material Lett*, 2009, 63: 1213–1216
 - 10 Zhang Y, Wang J, Qiu J, et al. Ag-graphene/PEG composite phase change materials for enhancing solar-thermal energy conversion and storage capacity. *Appl Energy*, 2019, 237: 83–90
 - 11 Shtein M, Nadiv R, Buzaglo M, et al. Thermally conductive graphene-polymer composites: Size, percolation, and synergy effects. *Chem Mater*, 2015, 27: 2100–2106
 - 12 Wu S, Li T, Tong Z, et al. High-performance thermally conductive phase change composites by large-size oriented graphite sheets for scalable thermal energy harvesting. *Adv Mater*, 2019, 31: 1905099
 - 13 Wang C, Hua L, Yan H, et al. A thermal management strategy for electronic devices based on moisture sorption-desorption processes. *Joule*, 2020, 4: 435–447
 - 14 Zhang K, Zhang Y, Liu J, et al. Recent advancements on thermal management and evaluation for data centers. *Appl Thermal Eng*, 2018, 142: 215–231
 - 15 Zhang H, Shao S, Tian C, et al. A review on thermosyphon and its integrated system with vapor compression for free cooling of data centers. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 81: 789–798
 - 16 Zimmermann S, Meijer I, Tiwari M K, et al. Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse. *Energy*, 2012, 43: 237–245
 - 17 Memik S O, Mukherjee R, Ni M, et al. Optimizing thermal sensor allocation for microprocessors. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst*, 2008, 27: 516–527
 - 18 Nowroz A N, Cochran R, Reda S. Thermal monitoring of real processors: Techniques for sensor allocation and full characterization. In: Proceedings of the Design Automation Conference. Anaheim, 2010. 56–61
 - 19 Beneventi F, Bartolini A, Vivet P, et al. Thermal analysis and interpolation techniques for a Logic + WideIO stacked DRAM test chip. *IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst*, 2016, 35: 623–636
 - 20 Gonzalez Cuadrado D, Marconnet A, Paniagua G. Inverse conduction heat transfer and kriging interpolation applied to temperature sensor location in microchips. *J Electron Packaging*, 2018, 140: 010905
 - 21 Reda S, Cochran R, Nowroz A N. Improved thermal tracking for processors using hard and soft sensor allocation techniques. *IEEE Trans Comput*, 2011, 60: 841–851
 - 22 Ranieri J, Vincenzi A, Chebira A, et al. Near-optimal thermal monitoring framework for many-core systems-on-chip. *IEEE Trans Comput*, 2015, 64: 3197–3209
 - 23 Ranieri J, Chebira A, Vetterli M. Near-optimal sensor placement for linear inverse problems. *IEEE Trans Signal Process*, 2014, 62: 1135–1146
 - 24 Liang Y C, Lee H P, Lim S P, et al. Proper orthogonal decomposition and its applications—Part I: Theory. *J Sound Vib*, 2002, 252: 527–544
 - 25 Eckart C, Young G. The approximation of one matrix by another of lower rank. *Psychometrika*, 1936, 1: 211–218
 - 26 Berkooz G, Holmes P, Lumley J L. The proper orthogonal decomposition in the analysis of turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 1993, 25: 539–575
 - 27 Gu M, Eisenstat S C. Efficient algorithms for computing a strong rank-revealing QR factorization. *SIAM J Sci Comput*, 1996, 17: 848–869
 - 28 Zhang L, Li R, Tang B, et al. Solar-thermal conversion and thermal energy storage of graphene foam-based composites. *Nanoscale*, 2016, 8: 14600–14607
 - 29 Ma H, Geng H, Yao B, et al. Highly ordered graphene solid: An efficient platform for capacitive sodium-ion storage with ultrahigh volumetric capacity and superior rate capability. *ACS Nano*, 2019, 13: 9161–9170
 - 30 Zeng X, Yao Y, Gong Z, et al. Ice-templated assembly strategy to construct 3D boron nitride nanosheet networks in polymer composites for thermal conductivity improvement. *Small*, 2015, 11: 6205–6213
 - 31 Li G, Zhang X, Wang J, et al. From anisotropic graphene aerogels to electron- and photo-driven phase change composites. *J Mater Chem A*, 2016, 4: 17042–17049
 - 32 Jung H, Yu S, Bae N S, et al. High through-plane thermal conduction of graphene nanoflake filled polymer composites melt-processed in an L-shape kinked tube. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7: 15256–15262

- 33 Li Q, Guo Y, Li W, et al. Ultrahigh thermal conductivity of assembled aligned multilayer graphene/epoxy composite. *Chem Mater*, 2014, 26: 4459–4465
- 34 Zhang N, Song Y, Du Y, et al. A novel solid-solid phase change material: Pentaglycerine/expanded graphite composite PCMs. *Adv Eng Mater*, 2018, 20: 1800237
- 35 Che J, Wu K, Lin Y, et al. Largely improved thermal conductivity of HDPE/expanded graphite/carbon nanotubes ternary composites via filler network-network synergy. *Compos Part A-Appl Sci Manufact*, 2017, 99: 32–40
- 36 Wang Z, Li X, Zhang G, et al. Thermal management investigation for lithium-ion battery module with different phase change materials. *RSC Adv*, 2017, 7: 42909–42918
- 37 Noh Y J, Kim H S, Ku B C, et al. Thermal conductivity of polymer composites with geometric characteristics of carbon allotropes. *Adv Eng Mater*, 2016, 18: 1127–1132
- 38 Cottrill A L, Liu A T, Kunai Y, et al. Ultra-high thermal effusivity materials for resonant ambient thermal energy harvesting. *Nat Commun*, 2018, 9: 664
- 39 Kholmanov I, Kim J, Ou E, et al. Continuous carbon nanotube-ultrathin graphite hybrid foams for increased thermal conductivity and suppressed subcooling in composite phase change materials. *ACS Nano*, 2015, 9: 11699–11707
- 40 Ji H, Sellan D P, Pettes M T, et al. Enhanced thermal conductivity of phase change materials with ultrathin-graphite foams for thermal energy storage. *Energy Environ Sci*, 2014, 7: 1185–1192
- 41 Chen X, Gao H, Yang M, et al. Highly graphitized 3D network carbon for shape-stabilized composite PCMs with superior thermal energy harvesting. *Nano Energy*, 2018, 49: 86–94
- 42 Wei Y, Li J, Sun F, et al. Leakage-proof phase change composites supported by biomass carbon aerogels from succulents. *Green Chem*, 2018, 20: 1858–1865
- 43 Yang J, Li X, Han S, et al. High-quality graphene aerogels for thermally conductive phase change composites with excellent shape stability. *J Mater Chem A*, 2018, 6: 5880–5886
- 44 Eckert E R G, Cho H H. Transition from transpiration to film cooling. *Int J Heat Mass Transfer*, 1994, 37: 3–8
- 45 Zhang S, Zhao R, Liu J, et al. Investigation on a hydrogel based passive thermal management system for lithium ion batteries. *Energy*, 2014, 68: 854–861
- 46 Pu S, Su J, Li L, et al. Bioinspired sweating with temperature sensitive hydrogel to passively dissipate heat from high-end wearable electronics. *Energy Convers Manage*, 2019, 180: 747–756
- 47 Ferey G. A chromium terephthalate-based solid with unusually large pore volumes and surface area. *Science*, 2005, 309: 2040–2042
- 48 Xu J X, Li T X, Wang R Z. Preparation and characterization of expanded graphite/metal organic frameworks composite sorbent. *CIESC J*, 2018, 69: 492–499
- 49 Canivet J, Fateeva A, Guo Y, et al. Water adsorption in MOFs: Fundamentals and applications. *Chem Soc Rev*, 2014, 43: 5594–5617
- 50 Pan Q W, Wang R Z, Wang L W, et al. Design and experimental study of a silica gel-water adsorption chiller with modular adsorbers. *Int J Refrigeration*, 2016, 67: 336–344
- 51 Wang D, Zhang J, Tian X, et al. Progress in silica gel-water adsorption refrigeration technology. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 30: 85–104
- 52 Peng J J, Ge T S, Pan Q W, et al. Experimental study on silica gel-water adsorption refrigeration system for waste heat recovery in data center (in Chinese). *J Refrig*, 2019, 40: 59–65 [彭佳杰, 葛天舒, 潘权稳, 等. 基于数据中心余热回收的硅胶-水吸附式制冷系统的实验研究. 制冷学报, 2019, 40: 59–65]

The implementation of software and hardware for dynamic thermal management of electronic devices

LI BangJun, WANG ChenXi, WU Si, PAN QuanWen, LI TingXian & WANG RuZhu

Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

As the integration of electronic devices increases, thermal issues have become a key obstacle to performance improvement of them. Combining the hardware and software methods could be a reasonable way to the efficient and robust dynamic thermal management. But the algorithm design and heat dissipation enhancement remains an enormous challenge in these fields. This paper systematically introduces the efforts that our team have put in thermal aware, passive thermal regulation and cooling system energy saving. Specifically, online temperature field reconstruction algorithm, based on matrix decomposition and sampling theory, is designed. Composite phase change materials with high thermal conductivity ($\sim 35 \text{ W (m K)}^{-1}$) is developed. Furthermore, a novel phase change cooling strategy, by utilizing desorption process of water inside sorbents, with high enthalpy (equivalent to 1950 J/g) is proposed. Then the energy-saving cooling system of data center based on adsorption refrigeration is studied. These technologies focus on the core concerns of dynamic thermal management of electronic devices, and provide solutions from different scales. Finally, we discuss the remaining challenges and give an outlook on the future.

electronic devices, dynamic thermal management, thermal reconstruction, PCM, adsorption-desorption, adsorption cooling

doi: [10.1360/SST-2020-0083](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0083)