

综述

引用格式: *J. Inorg. Mater.*, XXXX, XX(XX): XXXX

DOI: 10.15541/jim20250411

动态辐射热管理技术：从原理、材料到协同优化设计

马稚童¹, 李众少¹, 曹 逊^{1,2}

(1. 中国科学院 上海硅酸盐研究所, 功能晶体与器件全国重点实验室, 上海 201899; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

摘要: 在快速发展的社会背景下, 能源消耗问题日益凸显。其中, 热能作为能源利用的主要形式, 约占全球总能耗的 51%。因此, 开发低能耗甚至零能耗的高效热管理技术已成为亟需解决的关键课题。作为一种新兴策略, 动态辐射热管理(Dynamic Radiative Thermal Management, DRTM)技术凭借其调控材料光谱辐射特性的独特优势, 能够随外界环境变化实现实时精准的温度控制, 从而提升能源利用效率并改善热舒适性。鉴于现有综述分类难以全面反映 DRTM 技术发展的多样性, 本文系统梳理了 DRTM 的基本原理, 并提出了一个全新视角, 将相关研究划分为外部驱动型调控、材料自适应调控以及代表未来发展趋势的材料-结构协同优化设计三类。在此基础上, 本文系统阐述了三类技术的工作原理、研究进展以及代表性材料, 重点比较了其在太阳光吸收率、中远红外发射率调制以及工作模式切换能力等关键性能指标, 进一步讨论了在不同触发信号下协同优化设计在调制能力和工作范围等方面展现出的巨大潜力, 从而为未来不同应用场景下的技术路线选择提供系统性参考。从更宏观的角度看, DRTM 有望成为连接人居环境、能源系统与智能材料协同演化的关键技术路径。

关键词: 动态辐射热管理; 热管理; 发射率调控; 热辐射; 综述

中图分类号: TQ174

文献标志码: A

文章编号:

Dynamic Radiative Thermal Management Technologies: From Principles and Materials to Synergistic Optimization Design

MA Zhitong¹, LI Zhongshao¹, CAO Xun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Functional Crystals and Devices, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China; 2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Global energy consumption continues to rise, presenting a critical challenge. Thermal energy, as the primary form of energy use, accounts for approximately 51% of global final energy consumption. Consequently, developing high-efficiency thermal management technologies with low or even zero energy input has become an urgent challenge. As an emerging strategy, dynamic radiative thermal management (DRTM) exploits tunable spectral radiative properties of materials to achieve precise temperature control in response to environmental changes, thereby enhancing energy efficiency and thermal comfort. This review summarizes the fundamental principles of DRTM. Recognizing the limitations of existing classification schemes in encompassing the diversity of DRTM developments, this review proposes a novel framework that categorizes related studies into three categories: externally stimulated control, material intrinsic adaptive control and materials-structures synergistic optimization, the latter representing a key future development trend. On this basis, we discuss in detail the working mechanisms, recent research progress and representative material systems associated with each group. Particular emphasis is placed on comparing their performance in terms of solar absorptance,

收稿日期: 2025-10-21; 收到修改稿日期: 2026-02-03; 网上出版日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0718900); 国家自然科学基金(62175248, 62575296, U24A206); 上海市科学技术基金(23ZR1481900, 25ZR1401373)

National Key Research and Development Program of China (2021YFA0718900); National Natural Science Foundation of China (62175248, 62575296, U24A2061); Shanghai Science and Technology Funds (23ZR1481900, 25ZR1401373)

作者简介: 马稚童(2002-), 女, 硕士研究生. E-mail: mazhitong24@mails.ucas.ac.cn

MA Zhitong (2002-), female, Master candidate. E-mail: mazhitong24@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 曹 逊, 研究员. E-mail: cxun@mail.sic.ac.cn

CAO Xun, professor. E-mail: cxun@mail.sic.ac.cn

mid-to-far infrared bands emissivity modulation, and the ability to switch between different operating modes. The potential of synergistic optimization under various triggering stimuli is further analyzed with respect to modulation capability and accessible operating range, providing guidance for selecting suitable technological routes in different application scenarios. From a broader perspective, DRTM is expected to serve as a key technological pathway for the integrated development of the built environment, energy systems and intelligent materials.

Key words: dynamic radiative thermal management; thermal management; emissivity modulation; thermal radiation; review

全球范围内对制冷和供暖的能源需求持续增长, 气候变化和人口增长进一步加剧了这一趋势, 使得寻找可持续的方案替代传统的暖通空调(HVAC)系统变得至关重要^[1]。传统 HVAC 系统依赖能源供给, 会导致过度的化石燃料消耗与温室气体排放^[2-3]。相比之下, 辐射热管理具有零能耗和环保优势。然而, 静态辐射热管理存在功率固定的问题, 难以适应复杂多变的环境变化与昼夜变化^[4-6]。因此, 动态辐射热管理 (Dynamic Radiative Thermal Management, DRTM) 的理念一经提出便受到了广泛关注。其核心在于动态调控辐射制冷模式与太阳能加热模式, 以适应环境波动和用户需求。该机理依托于地球与宇宙之间的巨大温差: 一方面, 通过“大气透明窗口”将约 3 K 的低温外太空作为红外辐射的理想散热通道; 另一方面, 将能量主要集中在可见光(0.38~0.78 μm)与近红外(0.78~2.5 μm)波段, 约 5800 K 的太阳作为高强度加热的主要来源。如图 1 所示, 大气窗口包含 3~5 μm 和 8~13 μm 两个波段, 鉴于地球表面和大气的平均温度约 288 K, 根据维恩位移定律, 热辐射峰值位于 10 μm 。因此, 研究人员主要聚焦于 8~13 μm 大气窗口, 并且该窗口受大气分子吸收影响小, 是一个宽且稳定的大气透明窗口。相比之下, 3~5 μm 大气窗口两侧紧邻 H_2O 和 CO_2 的强吸收带, 导致其透射率受大气湿度和成分影响大, 稳定性差^[7], 在 DRTM 中的应用受到显著限制。所以,

理想的 DRTM 系统包含两种工作模式: 冷却模式(蓝色), 具备高红外发射率(ϵ)和低太阳能吸收率(α); 而加热模式(红色), 具备高太阳能吸收率和低红外发射率^[8]。简而言之, DRTM 通过动态调节光谱特性, 来满足在不同条件下的冷却与加热需求。

近年来, 随着材料科学与结构设计的不断发展, 研究人员已探索出多种相关材料与结构。然而, 现有综述多基于单一或固定的分类标准, 例如按工作模式(主动/被动)、材料类型或物理机制进行划分, 难以全面反映 DRTM 技术的多样性和未来发展趋势。本文提出以“材料与结构协同优化设计”为主线的新分类视角, 系统综述该领域的最新进展。如图 2 所示, 本文首先深入探讨 DRTM 基本物理原理, 并根据能量输入需求将现有技术分为三大类。第一类为外部驱动型调控, 依赖电致变色、机械切换或润湿性变化等外部刺激来调节材料的热辐射性能, 控制精准但需额外供能^[9]; 第二类为材料自适应调控, 利用材料自身的固有特性(如热敏性), 在温度变化时自动调节热辐射, 具备较高的能效和快速响应能力^[10]; 第三类为协同优化设计, 通过将先进材料与精巧的结构设计相结合, 实现协同增效^[11-12]。接着, 系统阐述这三类技术的具体工作原理、研究现状以及关键的先进材料与结构设计。最后, 对 DRTM 领域面临的挑战以及未来的发展方向进行展望。

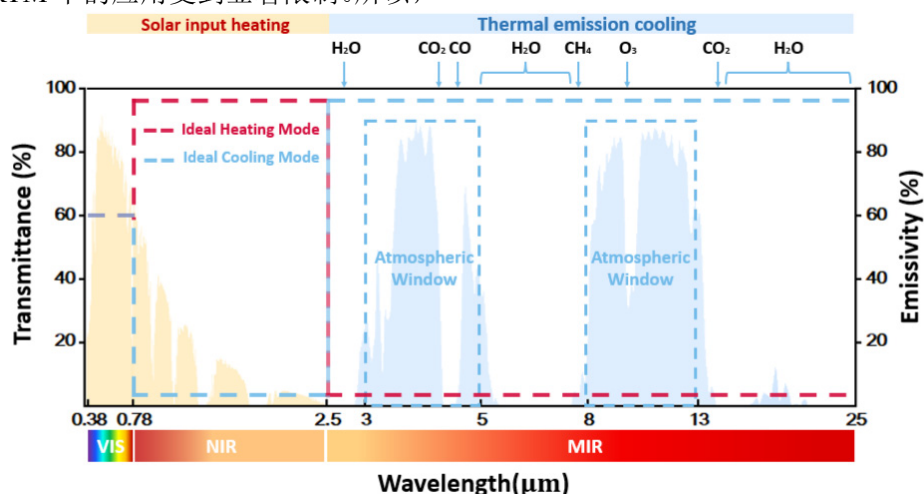
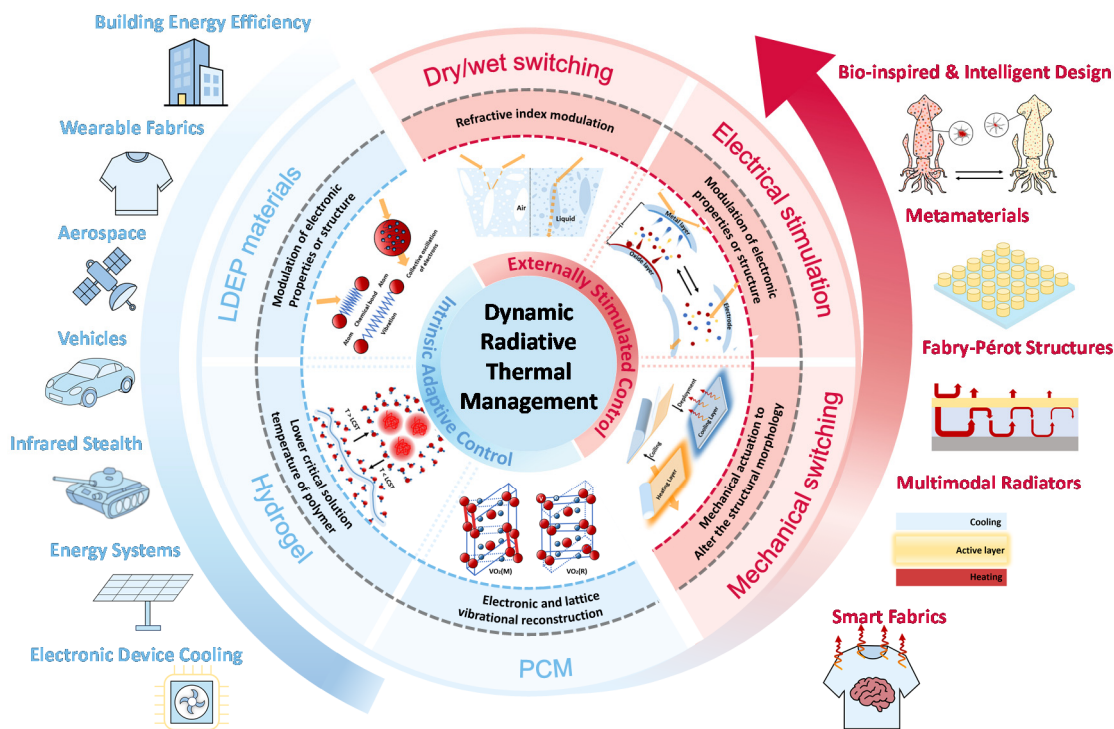


图 1 动态辐射热管理的理想光谱和原理示意图

Fig. 1 Ideal spectrum and schematic for dynamic radiative thermal management.

图 2 动态辐射热管理分类、应用和未来发展^[9-12]Fig. 2 Classification, applications, and future trends of DRTM^[9-12]

Two primary categories are illustrated: externally stimulated and intrinsically adaptive control. Synergistic optimization of materials and structures represents an emerging frontier, and DRTM holds vast potential for diverse applications. (Adapted from references).

1 外部驱动型调控

依赖外部能量输入的调控策略, 是实现 DRTM 最直接且应用最广泛的途径。这类技术的核心在于通过外界施加机械、光学、电场或磁场等刺激, 诱导材料发生可逆的物理或化学变化, 从而实时精准调节其辐射性能。这类外部调控技术的最大优势在于其快速响应能力和高精度的调控能力, 能够满足复杂环境下对温度的精细控制需求。

1.1 干/湿切换机制

干湿切换机制是一种最简单的切换方法, 其核心机制在于液体浸润多孔材料后引起折射率变化。干燥状态下, 多孔聚合物骨架与空气孔隙的折射率差异较大, 导致强散射和高反射率(R); 当液体填充孔隙后, 折射率差异减小, 散射降低, 进而提高透射率(τ)并实现“冰室-温室”转变^[13]。

Mandal 等^[13]提出了可逆润湿调控光学透射率的多孔聚合物涂层(PPCs)。在太阳波段, 其透射率变化最大可达 74%; 在红外波段, 液体吸收特性使 PPCs 由高透射转变为高吸收/高发射状态。如图 3(a)所示, Guo 等^[14]将干湿切换应用于多孔聚乙烯。干燥状态下, 薄膜具备 92% 的太阳反射率和 86% 的透

射率, 可实现辐射冷却; 而液体浸润后, 折射率匹配效应使反射率降至 32%, 同时酒精分子对太阳和热辐射的吸收增强, 从而实现加热效果。

1.2 电刺激

电刺激因响应快、精度高和易集成等特性在 DRTM 中展现出显著优势, 其核心机制在于通过电压改变材料的电子特性或结构, 调控其光学特性, 实现开关式/连续调节。相关器件多依赖可逆电沉积或电致变色机制, 通过调控太阳光和红外波段的反射率与发射率, 实现持续可控的加热或冷却, 为智能热管理系统提供灵活而高效的解决方案。

石墨烯凭借其独特的电子结构和可调的载流子浓度, 在红外辐射调控方面表现突出。通过施加外部电压改变其费米能级, 可动态调控等离子体共振的频率与强度。利用这一特性, 石墨烯实现了太赫兹和中红外波段连续调谐^[15]。如图 3(b)所示, Long 等^[16]将石墨烯与碳化硅超表面结合, 通过固态电解质电门调控其化学势, 利用等离子体共振和等效电路机制, 由拉曼光谱(G 峰位移增加和 $2D$ 峰半峰全宽减小)证实石墨烯具有动态调节红外吸收峰的能力。随后, Ding 等^[17]发现, 通过对 120 层石墨烯器件施加电场调控, 可实现 50% 的红外发射率动态

调制。

可逆金属电沉积(REM)具有宽光谱调制、高深度和快速响应的优势。通过电压驱动金属离子在透明导电基底上的可逆沉积/溶解, 可实现红外波段透明态与高反射态的切换^[18]。Rao 等^[19]设计了超宽带透明导电电极, 利用石墨烯与金微网格协同作用, 实现了紫外至中红外波段的高透光率与低面电阻, 并使器件在加热模式($\alpha = 60\%$, $\varepsilon = 20\%$)与冷却模式($\alpha = 33\%$, $\varepsilon = 94\%$)之间的智能切换。Li 等^[20]制备了基于铂(Pt)/银(Ag)的 REM 器件, 在中波红外和长波红外分别实现 77%和 71%的发射率调节, 并结合粗糙基底和 Cr_2O_3 介质实现了可见光伪装。为了突破传统刚性器件在曲面建筑中的应用限制, Zhao 等^[9]利用柔性 PET-ITO 基底上的沉积与溶解, 实现了冷却 ($R = 89.1\%$, $\tau = 0.02\%$)和加热 ($R = 15.7\%$, $\tau = 72.9\%$)模式的快速切换, 如图 3(c)所示。

纳米晶器件依靠电致变色特性, 通过离子/电子的可逆嵌入/脱出实现氧化还原反应, 能够快速调控太阳光和红外响应。Ding 等^[21]将 WO_3 纳米晶体与多层薄膜结构结合, 利用 Li^+ 引发局域表面等离子共振和电子能带变化, 实现了高达 76%的红外波段动态发射率调控(图 3(d))。Feng 等^[22]开发了基于纤维素纳米晶体与 PEDOT:PSS 复合的新型电致变色智能窗, 通过电压调控其氧化还原状态, 可在 5 s 内切换冬夏模式: 冬季呈深蓝色(高透射, $\varepsilon = 20\%$), 提升室温至 25~30 °C; 夏季呈透明虹彩态($R = 91\%$, $\varepsilon = 94\%$), 可降温约 6 °C。

综合来看, 在需要快速且精准调控的 DRTM 场景中, 电刺激调控通常可作为优选方案。上述三类电刺激材料体系在适用场景上各具特点: 石墨烯体系可在多个波段实现吸收率的连续调谐, 具有高精度、超快频率调控的独特优势, 但其性能往往依赖复杂的多层堆叠和超表面结构, 在大面积制备方面仍面临挑战; 以 REM 为核心的器件具备宽光谱和高调制深度的优势, 是构建高效热管理系统的理想选择, 但其响应速度相对受限, 难以适应短时频繁切换的应用场景; 纳米晶器件则在易集成性和可见

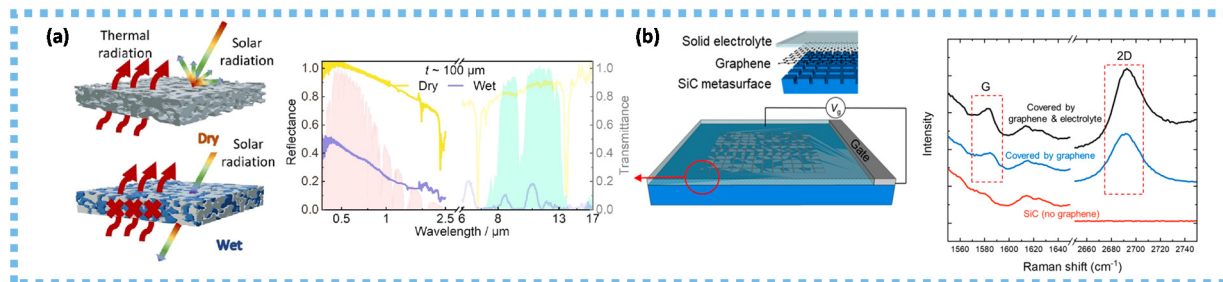
光与红外辐射的协同调控方面具有突出优势。这三种机制各有所长, 共同为智能热管理系统提供了灵活且高效的解决方案。

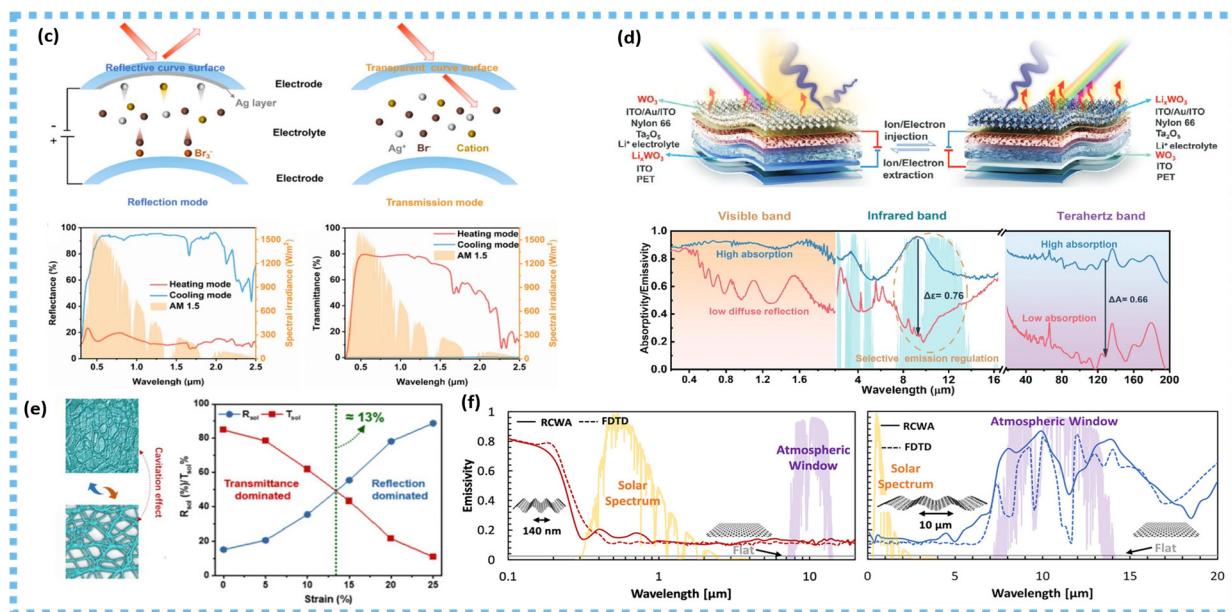
1.3 机械切换

机械切换具有高效、低能耗和易实现的优点, 其核心在于利用机械力诱导结构的几何变形、微观形貌重组或结构变化, 从而改变光学与辐射特性。早在 2000 年, Garrison Darrin 等^[23]就提出了可变发射率技术, 通过单层百叶窗、多层滑动与折叠门结构调节红外遮蔽, 获得 2%~88%的发射率。随后研究发现, 可以通过机械驱动改变折纸结构腔体效应, 使其消失或出现, 从而实现吸收率和发射率的大范围精确调控^[24-25]。Mulford 等^[26]利用铝箔折纸结构证实了上述发现: 在折叠形成 V 型槽腔体后, 辐射多次反射使反射率低至 0.01, 接近黑体水平。

相比宏观几何结构, 通过机械力诱导材料微观形貌重组或结构变化, 可以直接影响材料本身固有的光学特性。Nie 等^[27]利用多孔碳纳米管(CNT)海绵与可拉伸硅胶基底构建发射体, 当 CNTs 薄膜承受机械应变时, 其光谱会发生变化。除此以外, 电纺微纳米纤维基质因为具有与太阳波长直径分布相当的纤维网格, 受到了 Pyun 等^[28]的关注, 开发出通过机械压力切换的电纺聚二甲基硅氧烷(PDMS)微纳米纤维基质, 在不透明/透明状态下太阳反射调节率达到 80%。Luo 等^[29]开发了一种堆叠结构, 利用拉伸诱导空化效应, 实现了 86%高透过态和 88%高反射态之间的可逆切换, 并具有 73%的太阳调节能力(图 3(e))。

石墨烯因其独特的光学与力学性能, 成为实现动态调控的理想候选材料。2019 年, Krishna 等^[30]首次报道了褶皱石墨烯可以通过改变其褶皱周期和幅度来调控宽谱发射率。如图 3(f)所示, 当褶皱周期为 10 μm 时, 调控范围可扩展至紫外和中红外双波段, 其发射率调制幅度($\Delta\varepsilon$)分别可达 80%和 60%。随后, 该团队^[31]进一步优化结构, 在 9.9 μm 处实现了高发射率, 净冷却功率达到 77 W/m^2 , 降温 7 K。



图3 外部驱动型调控^[9, 14, 16, 21, 29-30]Fig. 3 Externally stimulated control^[9, 14, 16, 21, 29-30]

(a) Schematic of a structured PE film and its reflectance and transmittance spectra in both dry and wet states^[14]; (b) A schematic of a tunable graphene-SiC metasurface and the Raman spectra of graphene in different states^[16]; (c) The working principle of a reversible metal electrodeposition device^[9]; (d) The working principle and actual multispectral modulation performance of a flexible device^[21]; (e) A schematic of a mechanosensitive stacking structure and its transmittance and reflectance spectra under different strains^[29]; (f) The selective emission spectra of crumpled graphene with different crumpling pitches^[30].

2 材料自适应调控

基于材料内在特性的 DRTM, 是指利用材料本身固有的物理或化学特性, 无需外部能量输入, 就能根据环境变化(如温度、光照或湿度)自动调节其辐射性能。这类自适应材料不依赖外部能量场进行调控, 最大的优势在于零能耗和优异的长期稳定性, 大大降低了性能衰减。通过合理利用材料的相变、分子取向重构或光学散射变化等内在机制, 该类技术正逐渐成为可持续热管理技术的重要发展方向。

2.1 相变材料

相变材料(PCMs)可在特定温度下发生可逆的晶相、结构、形态的转变或伴随相分离、晶体取向变化^[32-33], 基于此, PCMs 的光学与热学性质可发生显著变化, 从而为 DRTM 提供了独特方案^[34]。根据相变机理的不同, 本文主要将其分为三类: 金属-绝缘体相变材料、非晶-晶态相变材料以及固-液相变材料。

二氧化钒(VO_2)作为一种典型的金属-绝缘体相变材料, 其相变温度接近于室温(68°C), 是最具应用前景的相变材料之一。如图 4(a)所示, 低温状态的 VO_2 处于绝缘相, 呈现单斜结构, 表现出高可见光透过率与低近红外吸收率; 高温状态的 VO_2 转变

为高温金属相, 呈现四方结构, 在保持可见光透过的同时具有高发射率^[35]。由于单层 VO_2 薄膜难以满足复杂应用需求, 研究人员多采用复合或多层结构来增强其功能。Liang 等^[36]设计的 $\text{Ag}/\text{Ge}/\text{VO}_2$ 多层薄膜可在中红外波段实现 68%调制(图 4(b)); Ao 等^[37]设计的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{VO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 结构则兼具太阳能加热($\alpha > 80\%$)和辐射冷却($\varepsilon = 75\%$)功能。 VO_2 在建筑节能应用中也展现了独特潜力, 实现了太阳辐射与长波红外的双重调控, 并进一步优化人体的热舒适度^[38-40]。此外, VO_2 纳米颗粒复合物可利用等离子体共振与绝缘态透明性实现更精准的调控。Yan 等^[41]通过在 VO_2 中掺杂钨/锆元素, 实现了额外的电子注入, 削弱了绝缘相中 $\text{V}^{4+}-\text{V}^{4+}$ 键的稳定性, 成功降低了材料的相变温度。随后, 将改性 VO_2 嵌入聚乙烯复合薄膜, 与底部的银薄膜组成光子超薄膜结构, 该结构在 20°C 左右实现了 72%的吸收率调制。

硫属化物相变材料(如 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GST)可在非晶-晶态间进行可逆切换(图 4(c))^[42], 涉及原子键合和局部结构的根本性重构, 从而显著改变材料的电阻率、折射率和消光系数^[43-44]。其显著优势在于相变过程的非易失性, 即状态一旦转变就无需能量维持。尽管 GST 材料的发现最早可追溯到 20 世纪, 但直到 2016 年才首次引入发射率调控^[45]。Kim 等^[46]通过激光的能量和空间分布实现发射率从

26%(全非晶)到 80%(多晶层)的连续可编程调控。Kang 等^[47]将金属反射层与 GST 薄膜相结合, 实现了柔性化应用, 并利用晶态 GST 的高折射率特性增强共振吸收, 实现了 30%的局部动态发射率调控。如图 4(d)所示, 该团队^[48]进一步开发了一种新型平面腔结构, 利用紫外激光的触发实现发射率从 15%(低结晶)到 77%(高结晶)的连续调控。为提升 GST 材料在复杂场景下的性能, 研究者引入了逆向设计方法, 从目标光谱特性出发, 利用拓扑优化和遗传算法等计算手段反推出最优的结构与层数, 使其在多波段红外隐身、多功能集成以及波长选择性调控等领域展现出巨大潜力^[49-50]。

在固-液相变材料领域, 石蜡型 PCM 主要通过相变过程中的潜热储存与释放来实现热管理^[51]。Yu 等^[52]提出了一种 CNTs@PDMS/PCM 双模式薄膜: 在冷却模式下, 利用 PDMS 进行辐射散热, 同时依靠 PCM 吸收多余热量; 在加热模式下, 薄膜吸收太阳能并由 PCM 储热释放, 从而有效抑制夜间过冷。作为该领域的另一种典型应用, 热致变色微胶囊 (TCM) 通常由聚合物外壳包裹内部的染料、显色剂和溶剂体系构成^[53]。当温度超过临界值时, TCM 内部组分发生可逆相变并改变体系分子构象, 引起可见光吸收光谱转变和颜色变化, 从而调节太阳光反射率^[54]。Yin 等^[55]将 TCM 与荧光染料结合, 在维持色彩的同时显示出显著的节能潜力。如图 4(e)所示, Hu 等^[56]利用 TCM 与 SiO₂ 气凝胶的协同作用, 使材料在 22~28 °C 由彩色态转变为白色态, 太阳反射调制率和红外发射率分别为 30%和 92.2%。

2.2 水凝胶

水凝胶自 1894 年被首次提出后, 广泛应用于不同领域, 其核心机制源于聚合物的溶液临界温度 (LCST)^[57]。如图 4(f)所示^[10], 当温度低于 LCST 时, 聚合物链和水分子之间会形成大量氢键, 呈现出高透明的亲水状态; 相反, 当温度高于 LCST 时, 氢键断裂导致聚合物链聚集发生可逆转变, 呈现不透明状态^[58-59]。这种透明-不透明的可逆转变能有效调控可见光和近红外的透过与吸收, 为 DRTM 提供了独特的优化途径。

在应用探索中, 研究人员通过不同的材料设计

拓展了水凝胶的功能。如图 4(g)所示, Zhang 等^[60]通过引入热敏性 *N*-异丙基丙烯酰胺(PNIPAm)水凝胶层和 VO₂-PMMA 层, 设计出可同时调控太阳辐射和长波红外辐射的多层智能窗结构。Zhao 等^[61]基于 PNIPAm 水凝胶开发了智能窗户和建筑围护结构, 实现了太阳光透射率在 0~78%范围的可控切换, 并保持 90%的高红外发射率。Huang 等^[62]则结合温敏和光热响应机制开发了双层水凝胶系统, 实现加热模式($\alpha = 80\%$, $\varepsilon = 38\%$)和冷却模式($R = 83\%$, $\varepsilon = 90\%$)的切换。基于水凝胶的微纤维结构, 研究人员实现了柔性电子器件的有效热管理方面, 能够应对复杂环境下的温度波动, 保障传感器在宽温度范围内稳定运行^[63]。

2.3 低维电子-等离激元材料

低维电子-等离激元材料因其独特的量子尺寸效应和巨大的比表面积, 为精细调控电子能带结构和表面自由载流子密度提供了理想平台。通过精确设计其尺寸和形貌, 可以调谐等离激元共振条件及载流子吸收行为, 在中远红外波段选择性地调控对电磁波的吸收、发射和散射, 从而对热辐射实现精准调节。

CNTs 作为经典的低能隙一维材料, 凭借其独特的准一维电子结构和离域 π 电子体系, 在太阳能吸收方面展现出优异性能。Zhao 等^[64]设计了一种基于超纯单壁碳纳米管(SWCNTs)水分散体的双模式热管理装置。该装置可通过流体切换实现模式转换: 在加热模式下, 太阳吸收率高达 90%; 而在冷却模式下, 通过去离子水、高反射膜和二氧化硅三者结合, 可实现高效辐射散热。

二维 MXene 纳米片因其独特的二维结构和可调控的表面特性, 在辐射热管理领域展现出巨大潜力。如图 4(h)所示, Li 等^[65]通过熔融共混工艺将 MXene 纳米片均匀分散于聚丙烯中, 利用其高比表面积带来的强光散射和聚丙烯的分子振动特性, 开发出具有 93.2%太阳吸收与 84.2%发射率的材料。此外, 如图 4(i)所示, Jia 等^[66]提出了一种基于铝掺杂氧化锌纳米晶(AZO)的红外发射率调制器, 依赖紫外光激发自由载流子来增强 LSPR 效应, 在两个大气窗口分别实现 72%和 61%的动态调控。

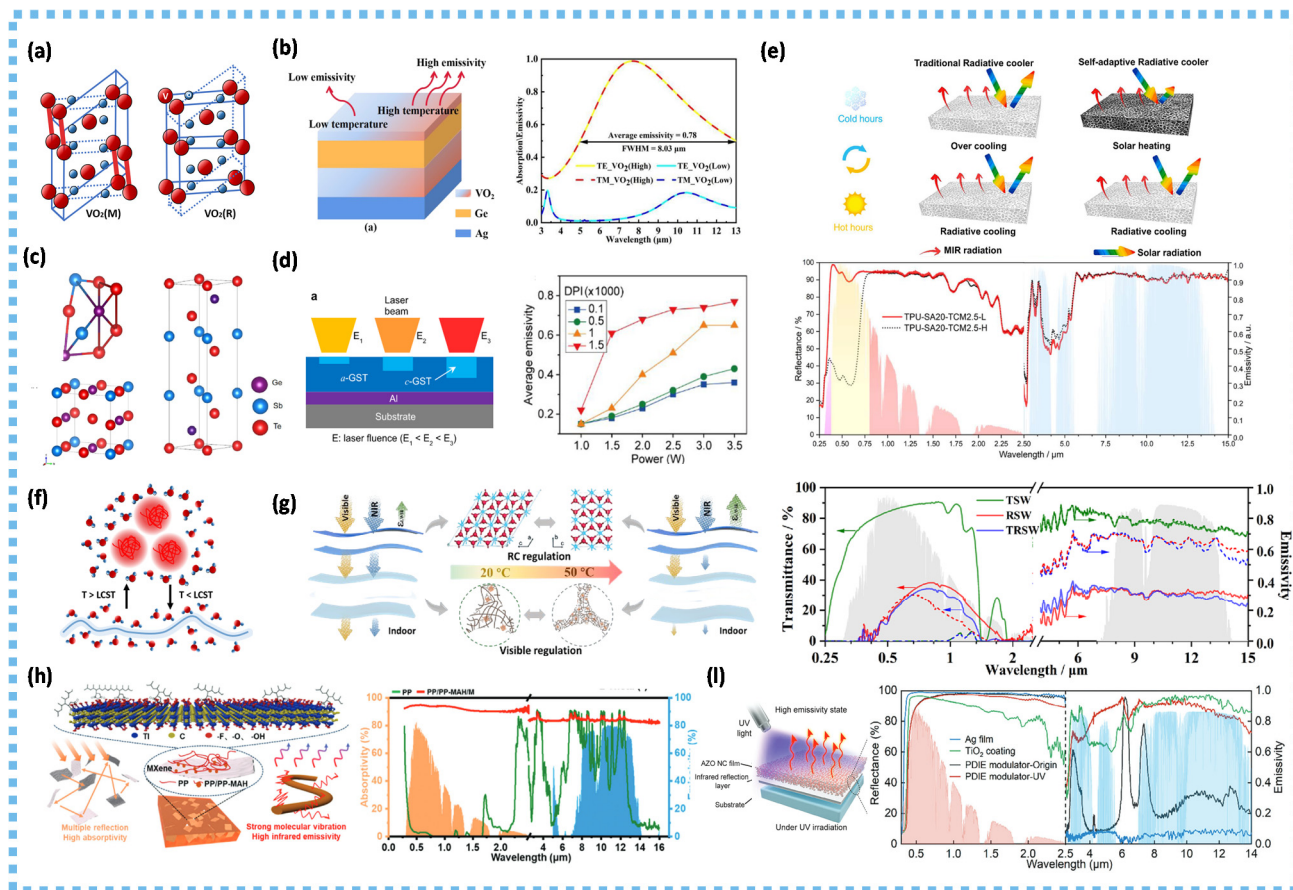


图4 材料自适应调控^[10, 35-36, 42, 48, 56, 60, 65-66]

Fig. 4 Intrinsically adaptive control ^[10, 35-36, 42, 48, 56, 60, 65-66]

(a) Crystal structures of VO₂ in its metallic and insulating phases, with vanadium atoms shown as red spheres and oxygen atoms as blue spheres^[35]; (b) The structure of an Ag/Ge/VO₂ multilayer film and its absorption spectra at high and low temperatures^[36]; (c) The amorphous, metastable, and stable crystalline structures of GST^[42]; (d) Laser-induced dynamic emissivity control and the structure's emissivity spectra^[48]; (e) A color and temperature-adaptive film's emissivity and reflectance spectra^[56]; (f) A schematic of the reversible solid-liquid phase transition (LCST) of a hydrogel in water^[10]; (g) The mechanism of integrated thermochromic and radiative cooling technologies before and after the phase transition^[60]; (h) A schematic and spectrum of MXene-modified PP nanocomposites^[65]; (i) The working principle and emissivity modulation mechanism of a photo-induced dynamic modulator^[66].

3 协同优化设计

与前述外部驱动型调控和材料自适应调控不同,材料-结构协同优化设计并非一种全新的驱动机制,而是一种系统级的器件设计视角,同时也是 DRTM 领域从“调控”迈向“智能”的关键转折。它突破了仅依赖材料固有特性或外部刺激的传统思路,将材料参数(如折射率、相变温度、载流子浓度)与结构参数(如腔长、周期、填充因子和多尺度织构)视为联合优化变量,通过深度整合与系统优化实现“1+1>2”的协同增效效果。这一设计理念不仅能够放大和定制材料的动态响应特性,还可以设计单一组分难以实现的新功能,从而突破性能瓶颈。因此,本文将那些性能高度依赖光子结构、超表面、Fabry-Pérot(F-P)腔体结构或多尺度织构等结构自由度,及与材料响应协同设计的器件归入“材料-结构协同优化设计”

一类,以突出其跨越前两类的集成策略和未来发展方向的关键地位。在这一意义上,协同优化设计不仅是一条具体技术路径,而且是辐射热管理发展的必然趋势。

3.1 智能织物

织物与人体最直接接触,其动态热管理性能的优劣,对提升可穿戴舒适度至关重要^[67-68]。通过结构设计,研究人员开发了多种智能织物,能够根据环境变化或使用需求,实时进行热辐射调控。

热响应调控织物依赖于材料的热膨胀或收缩特性,实现对辐射的自适应调控。Boutghatin 等^[69]提出了一种光子晶体结构织物,利用温度敏感聚合物在接近体温(34 °C)时发生热膨胀,自主改变二维气孔阵列的几何结构,实现对中红外波段透射率的动态调节,从而达到在低温下保暖、在高温下增强散热的目的。类似地, Abebe 等^[70]利用温度驱动的聚合物调节金属单丝间距,实现了高达 90%的红外透

射率调节。接着, 该团队^[71]进一步拓展了双模式光子纺织品的研究: 利用形状记忆聚合物膜中金属微球的分布实现反射率高达 55% 的调制, 还通过结合金属与介电纤维的非对称纱线设计, 实现了 72% 的发射率调控。

电响应调控织物则通过电致变色机制实现主动且精确的热调节。Fan 等^[72]提出了一种基于电致变色纤维的可扩展动态热调节纺织品, 兼具视觉变色与热辐射调控功能, 通过施加电压可实现 CNTs 35% 发射率的调制(图 5(a))。

Janus 织物作为智能织物的代表方案, 在人体热管理与建筑节能展现出显著应用潜力^[73-75]。Janus 织物通常采用双面设计, 一面用于太阳能吸收加热, 另一面用于高反射与辐射冷却。例如: Wang 等^[76]利用碳化锆与 T 形 ZnO 微晶须构建的 Janus 织物, 实现了 2~3 °C 的加热与 5~7 °C 的冷却, 较普通聚酯织物提升了 20% 的热管理效率。如图 5(b)所示, Mo 等^[77]则通过在皮革两侧分别涂覆多壁 CNTs 和醋酸纤维素, 实现日间平均降温 10 °C 的被动降温与最高 135 °C 的光热/焦耳加热。

三明治结构通过整合多种功能, 进一步推动了集成优化设计的发展。Du 等^[78]通过多层材料堆叠, 将光热、电热和辐射保温功能有机整合, 实现了多波段的协同调控。Yuan 等^[79]设计的复合结构织物, 在加热模式下吸收率达 99.3%, 在冷却模式下反射率达 98.4%。

此外, 为了探索基于人体生理反馈的自适应织物。Li 等^[80]开发的银纳米线(AgNWs)涂层的智能织物, 可以根据皮肤湿度自主调节织物发射率: 在干燥状态下, 呈现 39% 的低发射率, 并能有效保温; 在出汗状态下, 形成 83% 的高发射率水膜, 并可结合蒸发冷却实现高效散热。

3.2 多模态辐射器

传统材料通常只能在单一方向(冷却或加热)进行温度调节, 而实际环境中温度波动频繁、需求多样。多模态系统能够根据环境变化, 动态切换冷却、加热或保温模式, 为全年、全天候的热管理提供高效、节能和智能的解决方案。

三明治结构是实现复合多功能热管理的常见策略。Tao 等^[81]成功集成了辐射冷却、太阳能加热与相变储能三种功能, 并通过机械切换实现冷热模式交替。在室外测试中, 该系统实现了 25 °C 的温差调控。在此基础上, Bai 等^[82]进行了拓展, 结合辐射冷却层、相变补偿层和辐射加热层, 使夏季和冬季的

夜间平均温度分别提高了 2.1 °C 和 1 °C。Yang 等^[83]通过旋转百叶窗结构的叶片角度, 实现了低于环境温度 4 °C 的辐射冷却、高于环境温度 2 °C 的透射状态以及 5 °C 的主动加热效果。

与宏观几何结构的切换相比, Janus 薄膜核在多模态调控方面的核心在于非对称界面的设计。如图 5(c)所示, Ding 等^[84]设计了一种 Janus 结构: 一侧设计 BaSO₄/BC 多孔网络, 实现了 95.6% 的太阳反射率和 95.2% 的红外发射率, 从而达到辐射冷却的目的; 另一侧通过 MXene 实现光热/电热协同加热。

除此以外, 还可以通过机械应变重构材料的微观结构, 实现辐射特性的可逆调控。如图 5(d)所示, Fang 等^[85]在表面纹理化弹性体上施加双轴应变, 实现了发射($\Delta\epsilon=58\%$)、反射($R=60\%$)和透射($\tau=52\%$)三种模式的切换。该方法覆盖了不同发射率物体的需求, 并在 5 °C 范围内实现热伪装。Ye 等^[86]利用记忆合金的可逆相变与潜热储存耦合, 在冷却与加热模式间实现自适应切换。Xuan 等^[87]提出了一种复合太阳能光伏/光热-辐射冷却(PV/T-RC)系统, 将 PV/T 模块与 RC 模块分别部署在屋顶的向阳面与背阴面。在冷却模式下, RC 模块运行使系统温度低于环境 2.4 °C; 在加热模式下, PV/T 模块使室内温度提升 2.7 °C, 在建筑节能中展现出巨大潜力。

3.3 F-P 腔体结构

F-P 腔体是一种重要的 DRTM 策略^[88], 由两层平行反射镜和中间介质层构成。通过调控腔体参数, 该结构可以在特定波长实现多光束干涉, 从而精确地增强或抑制该波段的吸收或发射。F-P 腔体的核心优势在于动态可调性, 可通过改变腔体长度或折射率, 灵活调节谐振波长与响应幅度, 在加热与冷却模式间实现快速切换。

将 F-P 腔体与 VO₂ 相变特性结合时, 无需外部能源即可在宽光谱或特定波段实现热辐射调控。Taylor 等^[89]将 F-P 腔体与 VO₂ 结合, 低温时实现了 85% 的反射率, 高温时共振增强实现了 60% 的高发射率。随后, Hu 等^[90]将该策略拓展至智能窗户, 设计了 BaF₂/VO₂/BaF₂/Ag/BaF₂ 多层结构(图 5(e))。在 10 μm 处实现发射率由 12.3% 至 98.7% 的切换, 并保持高透光性。除了 VO₂, 温敏半导体同样可与 F-P 腔体耦合。Li 等^[11]基于氢掺杂氧化铟构建智能窗户, 在 29.3 °C 下实现近红外 10.9% 与发射率 26% 的调节, 并保持 31.5% 的透光率(图 5(f))。此外, F-P 腔体还可与机械结构协同优化实现主动切换。Nan 等^[91]设计了对称/非对称的 F-P 腔体结构, 通过翻转实现冷

却($R = 92.1\%$, $\varepsilon = 96\%$)与加热($\alpha = 61.6\%$, $\varepsilon = 8.2\%$), 并保持高纯度结构色, 实现高效光热转换。

3.4 超材料

传统材料的宏观性能往往固定不变, 而超材料(Metamaterials)通过亚波长尺度的结构设计, 可以实现自然界中不具备的宏观物理性质^[92-93]。在 DRTM 领域, 研究人员将超材料的精妙结构与智能材料的响应特性深度整合, 对电磁波实现了精确调控, 从而突破了传统材料的性能瓶颈。

如图 5(g)所示, Long 等^[94]将 VO_2 相变材料与亚微米铝盘阵列超结构结合, 通过构建“等效电感-电容振荡回路”模型, 揭示了磁性极化激元(MP)的热开关特性。低温下, 该器件在 $7\text{ }\mu\text{m}$ 处表现近乎完美的吸收峰; 而高温下 VO_2 处于金属态, MP 难以激发, 吸收率骤降至 12% 。同样地, Parveen 等^[95]设计了 $\text{VO}_2/\text{Fe}/\text{SiO}_2$ 三层超材料, 利用 VO_2 相变调控介电常数, 在 $3\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 大气窗口的宽带吸收率从 30% (高温态)到 98% (低温态)之间的可逆切换。进一步地, Li 等^[96]通过将 W- VO_2 纳米颗粒嵌入聚乙烯纳米光栅, 结合银光栅层的光捕获效应与 PDMS 红外发射层的分子振动特性, 实现了高达 93% 和 90% 的冬季吸收率和夏季红外发射率, 显著提升了建筑热管理的自适应性(图 5(h))。除了相变策略, 外部电信号同样可以赋予超材料更高的灵活性与可控性。Wang 等^[97]提出了一种基于石墨烯-金属复合结构的动态可调谐辐射超表面, 通过调节石墨烯费米能级改变金属天线阵列的等离子体共振, 可实现大气窗口内发射率 $25\%\sim 65\%$ 的调节。

3.5 仿生与智能优化设计策略

前述智能织物、多模态辐射器、F-P 腔体结构与超材料等具体器件形式, 已经充分展示了材料-结构协同优化在提升 DRTM 性能方面的巨大潜力。为进一步加快设计进展并提升对复杂自然环境的适应性, 本节聚焦仿生结构与智能优化两类高级设计策略, 探讨如何为复杂 DRTM 系统的按需设计提供更系统的方法论支撑。

仿生学为开发先进的热管理解决方案提供了关键的理论支持。自然界生物在优胜劣汰的生存法则下, 具有惊人的热适应能力^[98]。这些生物不仅能被动适应环境, 还能主动调节自身温度。研究人员将仿生学中的多尺度、多功能设计原则引入材料体系, 实现了更精准的环境响应, 从而显著提升 DRTM 的能效与舒适性^[99]。

受变色龙皮肤的色素细胞调控机制启发。Yan

等^[100]开发了一种多仿生纳米复合材料, 通过核心层金属化织物(PET/Cu/Ni/Cu)与表层 PDMS/BN/有机温变材料的协同作用提升 DRTM 性能。当温度低于 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 材料呈现深色以增强太阳吸收(47.66%), 而在 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时通过有机温变材料的相变转为高反射(80.92%)状态, 同时保持稳定的高红外发射率($>91\%$)。随着研究的深入, 头足类动物的仿生策略成为新的研究热点^[12, 101]。Guo 等^[102]模仿鱿鱼皮肤的动态色素调节机制, 通过机械拉伸实现了 72% 太阳反射率与 30% 发射率的可逆调制。如图 5(i)所示, Zhao 等^[103]设计了 MXene-SEBS/ TiO_2 复合薄膜, 模拟鱿鱼白色体和虹彩细胞, 在 200% 应变下实现 $38\%\sim 66\%$ 太阳反射率与 $68\%\sim 89\%$ 红外发射率的切换。基于此, Zhao 等^[104]进一步提出了一种仿生分层皱纹结构(图 5(j)), 通过机械拉伸引发“双等离子体共振”效应, 在 150% 应变下实现红外反射率 $16\%\sim 60\%$ 的动态调控, 温差高达 $5.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

近年来, 人工智能(AI)与机器学习(ML)开始赋能辐射热管理及相关仿生结构设计, 展现出突破传统经验试错瓶颈的潜力^[105]。目前的工作主要集中于加速复杂辐射结构的正向预测与逆向按需设计, 并在特定气候或工作需求数据下优化动态热辐射调控策略^[106]。然而, 就 DRTM 器件而言, 该方向整体仍处于概念验证与基于有限样本数据集的小规模探索阶段, 未形成成熟的系统化设计框架。现有研究多停留在数值仿真或实验室小尺度制备, 距大面积工程化制造仍存在明显差距^[107-108]。因此, 本文仅将其作为一种值得关注的辅助设计工具和潜在发展方向, 在展望部分进行简要讨论。

为了宏观且量化地评估协同设计方法的优越性, 本文首先从外部激发和内部调控的角度对 DRTM 进行归纳, 然后总结上述五大协同设计对性能的优化。为了更加直观地评估和量化“协同优化设计”的优越性, 有必要按照触发信号(即电、热、机械)进行划分。通过在每种激发方式下, 将依赖单一材料固有特性的传统模式, 与材料-结构协同优化模式进行横向对比。表 1^[11, 71, 77, 84-85, 90, 94, 96, 103-104]直观地展示了协同优化的调制能力、调谐范围和优势等, 为未来技术路线的选择提供一个清晰的决策依据。需要说明的是, 表中器件性能数据均直接引用自原始文献, 各工作在环境温度、太阳辐照度、风速及湿度等测试条件上存在的差异, 本文未对其进行归一化处理, 因此相关比较主要用于反映性能量级与调控潜力, 而非在统一测试标准下的严格横向排序。

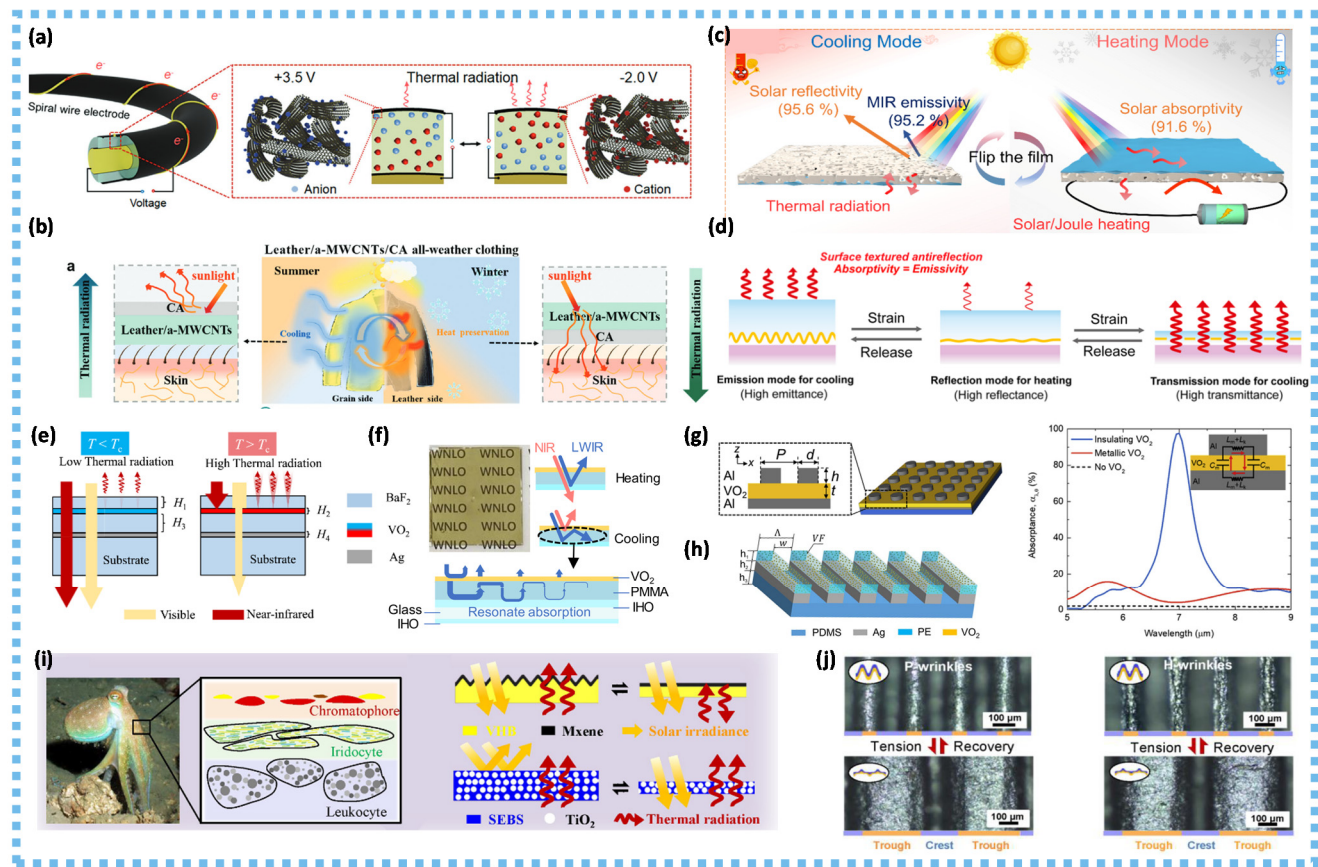


图 5 材料和结构协同优化设计^[11, 71, 77, 84-85, 90, 94, 96, 103-104]

Fig 5 Material-structure synergistic design^[11, 71, 77, 84-85, 90, 94, 96, 103-104]

(a) Emissivity control principle of electrochromic fabric fibers^[71]; (b) A schematic of the cooling and heating modes of a leather/aMWCNTs/CA all-weather fabric^[77]; (c) A schematic illustrating how mechanical strain reconstructs the material's microstructure to achieve both cooling and heating^[84]; (d) The reversible switching of a film between emission, reflection and transmission modes^[85]; (e) A structural diagram of a full-spectrum smart window that combines a F-P cavity with the phase-change properties of VO₂^[90]; (f) The working principle of a W-VO₂-based F-P cavity^[11]; (g) A material combining VO₂ phase-change material with a submicron aluminum disk array metasurface, along with its absorption spectrum^[94]; (h) A schematic of a bilateral photonic metamaterial^[96]; (i) An optical image of a cuttlefish and a schematic of a composite film inspired by the multi-layer skin of a cephalopod^[103]; (j) Optical microscope images of a bio-inspired hierarchical wrinkled structure before and after mechanical actuation^[104].

表 1 DRTM 的材料、性能和优势总结^[17, 19, 27, 29, 30, 36-37, 55, 64-65, 71, 77-79, 84, 86, 89-90, 94-95, 97, 103]

Table 1 Summary of DRTM materials, performance and advantages^[17, 19, 27, 29, 30, 36-37, 55, 64-65, 71, 77-79, 84, 86, 89-90, 94-95, 97, 103]

Category	Material	Synergistic Optimization Design	Device structure	Ref.	Wave-length/ μm	Performance	Advantage
Electrical stimulation	Graphene	/	Multilayer graphene modulators	[17]	5–8 8–14	$\Delta\varepsilon=13\%$ $\Delta\varepsilon=4\%$	Theoretical modeling of graphene thermal modulators
		/	Electrochromic device	[19]	0.2–20	$\Delta\alpha=27\%$ $\Delta\varepsilon=74\%$	Flexible ultra-wideband transparent electrode
		Smart fabrics	Electrochromic smart fabrics	[71]	4–15	$\Delta\varepsilon=35\%$	Superior thermal regulation with visual color change
		Metamaterials	Graphene-metal hybrid meta surface	[97]	8–14	$\Delta\varepsilon=40\%$	Novel image encoding for IR encryption and anti-counterfeiting
Mechanical stress	CNTS	/	CNTS on stretchable gel	[27]	0.4–25	$\Delta\varepsilon=23\%$	Flexible broadband spectroscopic device
		/	The SH/RC device with SWCNTs media	[64]	0.3–20	$\Delta\alpha=80\%$ $\varepsilon=90\%$	Sustained human thermoregulation

Thermal stimulation	Graphene	Smart fabrics	leather/a-MWCNTs /CA fabric	[77]	0.3–15	α =98% ε =90.2% R =92%	Electromagnetic interference shielding effectiveness
		/	Crumpled graphene	[30]	0.2–0.3 7–19	$\Delta\varepsilon$ =80% $\Delta\varepsilon$ =60%	High modulation contrast
		Smart fabrics	VG/GGEF/PAN	[79]	0.3–20	ε =92% R =98.4%	Facilitates practical large-area application and industrialization potential
	MXene	/	PP/MXene	[65]	0.3–16	α =93.2% ε =84.2%	Coupled with commercial thermoelectric for thermoelectric power generation
		Multimodal radiators	BaSO ₄ BC/MXene	[84]	0.3–15	α =91.6% ε =95.2% R =95.6%	Suitable for use in outdoor environments with variable weather conditions
		Bio-inspired design	MXene-SEBS/TiO ₂	[103]	0.4–14	ΔR =28% $\Delta\varepsilon$ =21%	Novel solar-infrared dual-band thermal regulation design
	Material Stacking	/	PTFE film with PDMS infiltration	[29]	0.3–2.5	τ =86% R =88%	Durability, scalability, and self-cleaning ability
		Smart fabrics	Novel multienergy Janus thermal textile	[78]	0.3–16	R =60% α =98.5%	Pleasant sweat/moisture permeability and multienergy-coupled heating
	VO ₂	/	Ag/Ge/VO ₂	[36]	3–13	$\Delta\varepsilon$ =68%	Simulations show that a simple structure is critical for radiative modulation
		/	Al ₂ O ₃ /VO ₂ /Al ₂ O ₃ /Al	[37]	0.3–25	α >80% ε =75%	It reaches 170 °C above ambient in heating mode and 20 °C below ambient in cooling mode
		F-P	VO ₂ /Si/Al	[89]	0–20	R =85% ε =60%	Provides an innovative solution for spacecraft thermal control
			BaF ₂ /VO ₂ /BaF ₂ /Ag/BaF ₂	[90]	0–2.5 8–13	τ =72.8% ε =83.8%	Simulations proved the application potential and commercial viability of VO ₂ smart windows
		Metamaterials	VO ₂ film/submicron aluminum disks	[94]	4–8	$\alpha_{\max}$ =1	Innovatively utilizing the magnetic polariton resonance modulation mechanism
			VO ₂ /Fe/SiO ₂	[95]	3–5	$\Delta\alpha$ =68%	Promising applications include advanced solar absorption panels
		Phase Change Energy Storage Material	CNTs@PDMS/PCM	[55]	0.3–16	$\Delta\alpha$ =60% ε =96%	Maintaining vivid color while preserving thermal functionality
		Multimodal radiators	Ni-Ti memory alloy /PCM	[86]	0.3–17	R =95% α =92% $\Delta\varepsilon$ =92.5%	Saves 68%–90% of annual energy consumption compared to conventional roofs

*Performance data in the table are derived directly from the original literature. Due to variations in the corresponding testing parameters, specific conditions are not individually listed, and the values are intended solely for qualitative comparison.

4 结论与展望

本文系统梳理了DRTM的物理基础与研究演化路径, 并从外部驱动、自适应材料以及材料-结构协同优化三个层级构建了多维研究总结。与传统单一材料或静态结构的研究不同, 本文揭示了材料本征热光响应与结构微观调控之间的耦合关系, 指出协

同优化设计是实现多尺度能量管理的根本途径, 也是 DRTM 技术由“调控”走向“智能”的关键转折。

现阶段, 外部驱动体系虽然能实现高精度可控响应, 但受制于能耗与集成复杂性, 难以支撑广域、低能耗的长期运行; 自适应体系则通过相变、电荷转移或分子构象重构等机制实现零能耗自反馈调节, 成为“材料智能”的原型。然而, 单一材料体系的

响应阈值与调制深度仍受限, 难以在可见光波段到
中远红外波段的宽光谱域内实现全面覆盖。

为此, 本文提出并论证了“材料-结构协同优化”
的系统设计理念。通过在光谱、空间与能量三个维
度上融合材料的内在可调特性与结构的场调控能力,
可实现动态发射率的跨尺度调谐、光-热-电多模态
耦合以及环境驱动下的自适应多稳态调控。

未来研究将集中于: (1)从局部响应走向系统反
馈。不再仅仅关注单一外场调制, 而是构建具备环
境感知与自适应反馈能力体系; (2)从静态设计到动
态可编程材料的转变。通过整合可逆微结构、相变
界面与可重构光场, 实现多状态记忆与动态切换功
能的融合; (3)从单点性能到系统能效的综合优化。
在材料、结构与环境三者间寻求全局能量最优解,
而非局部参数极值。

需要指出的是, 目前关于 DRTM 器件的性能测
试还是典型气候区的节能评估, 缺乏被广泛接受的
统一评价框架。现有研究在测试/建模边界条件、围
护结构构造以及能耗指标选取(如瞬时功率密度、年
总能耗或供暖/制冷等)方面存在显著差异, 难以在
同一标准下进行严格的横向比较。因此, 构建面向
不同气候区和建筑类型的标准化评估体系, 将是推
动 DRTM 技术走向工程应用的关键环节。在统一边
界条件和建筑假设的前提下, 将温度/时间依赖的反
射率、发射率等动态光谱参数规范地嵌入建筑能耗
模型, 并优先采用单位面积年均 HVAC 能耗削减量
等系统级指标综合衡量环境与经济效益, 才能为不
同技术路线的比较和大规模工程应用提供可靠的量
化依据。

DRTM 技术的发展不仅是材料科学问题, 也是
能源系统工程与智能信息科学交叉的新前沿。通过
融合数据驱动设计、机器学习优化、仿生启发等多
学科手段, 有望构建具备认知决策功能的“智能辐
射系统”, 实现建筑、航天、可穿戴及能源器件的全
时域热管理。综上, DRTM 的终极目标并非“热管
理”, 而是“理解与重构热辐射在复杂能量环境中的
交换逻辑”, 该技术未来将成为推动人类居住环境、
能源系统与智能材料协同演化的关键支撑。

参考文献:

- [1] YANG L, YAN H Y, LAM J C. Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Applied Energy*, 2014, **115**: 164.
[2] CHEUNG C K, FULLER R J, LUTHER M B. Energy-efficient envelope design for high-rise apartments. *Energy and Buildings*, 2005,

37(1): 37.

- [3] SYNNEFA A, SANTAMOURIS M, AKBARI H. Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 2007, **39(11)**: 1167.
[4] ULPIANI G, RANZI G, SHAH K W, *et al.* On the energy modulation of daytime radiative coolers: a review on infrared emissivity dynamic switch against overcooling. *Solar Energy*, 2020, **209**: 278.
[5] GAO Y F, XU J M, YANG S C, *et al.* Cool roofs in China: policy review, building simulations, and proof-of-concept experiments. *Energy Policy*, 2014, **74**: 190.
[6] XU X D, GU J X, ZHAO H P, *et al.* Passive and dynamic phase-change-based radiative cooling in outdoor weather. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14(12)**: 14313.
[7] 程守洙, 江之永. 普通物理学, 第八版. 北京: 高等教育出版社, 2023: 219–225.
[8] QIN B, ZHU H Z, ZHU R X, *et al.* Space-to-ground infrared camouflage with radiative heat dissipation. *Light: Science & Applications*, 2025, **14**: 137.
[9] ZHAO X Y, SHENG M F, TANG H J, *et al.* A flexible electrochromic device for all-season thermal regulation on curved transparent building envelopes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, **16(32)**: 42481.
[10] DE LA ROSA V R, WOISEL P, HOOGENBOOM R. Supramolecular control over thermoresponsive polymers. *Materials Today*, 2016, **19(1)**: 44.
[11] LI S J, YANG E Q, LI Y Y, *et al.* Self-adaptive energy-efficient windows with enhanced synergistic regulation of broadband infrared thermal radiation. *Nano Energy*, 2024, **129**: 110023.
[12] AKINOGLU G E, WU S Y, JI Y X, *et al.* Adaptive radiative thermal management using transparent, flexible Ag nanowire networks. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, **17(2)**: 3238.
[13] MANDAL J, JIA M X, OVERVIG A, *et al.* Porous polymers with switchable optical transmittance for optical and thermal regulation. *Joule*, 2019, **3(12)**: 3088.
[14] GUO N, YU L, SHI C M, *et al.* A facile and effective design for dynamic thermal management based on synchronous solar and thermal radiation regulation. *Nano Letters*, 2024, **24(4)**: 1447.
[15] BRAR V W, SHERROTT M C, JANG M S, *et al.* Electronic modulation of infrared radiation in graphene plasmonic resonators. *Nature Communications*, 2015, **6**: 7032.
[16] LONG L S, YING X Y, YANG Y, *et al.* Tuning the infrared absorption of SiC metasurfaces by electrically gating monolayer graphene with solid polymer electrolyte for dynamic radiative thermal management and sensing applications. *ACS Applied Nano Materials*, 2019, **2(8)**: 4810.
[17] DING P, WANG P, SU J C, *et al.* Multilayer graphene-based radiation modulator for adaptive infrared camouflage with thermal management. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, **55(34)**: 345103.

- [18] WANG J H, LV Y, ZHOU Y P, *et al.* Electrolyte design for reversible metal electrodeposition-based electrochromic energy-saving devices. *APL Energy*, 2024, **2**: 011501.
- [19] RAO Y F, DAI J Y, SUI C X, *et al.* Ultra-wideband transparent conductive electrode for electrochromic synergistic solar and radiative heat management. *ACS Energy Letters*, 2021, **6**(11): 3906.
- [20] LI M Y, LIU D Q, CHENG H F, *et al.* Manipulating metals for adaptive thermal camouflage. *Science Advances*, 2020, **6**(22): eaba3494.
- [21] DING Y L, MEI Z Y, WU X K, *et al.* Integrated multispectral modulator with efficient radiative cooling for innovative thermal camouflage. *Advanced Functional Materials*, 2025, **35**(30): 2500122.
- [22] FENG K, MA Y F, ZHANG L N, *et al.* Electrically controlled smart window for seasonally adaptive thermal management in buildings. *Small*, 2025, **21**(5): e2407033.
- [23] GARRISON DARRIN A, OSIANDER R, CHAMPION J, *et al.* Variable emissivity through MEMS technology. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas, 2000: 264.
- [24] NAJEEB M F A, PRICE J, WARBURTON D, *et al.* The variation of radiative heat loss as a function of actuation angle for an isothermal square twist origami radiator. ASME 2024 Heat Transfer Summer Conference, Anaheim, 2024: HT2024-131111.
- [25] HUISMAN F, SIMSEK E, GALY T, *et al.* Reversible sequin fabrics as variable emittance surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, **183**: 122167.
- [26] MULFORD R B, JONES M R, IVERSON B D. Dynamic control of radiative surface properties with origami-inspired design. *Journal of Heat Transfer*, 2016, **138**(3): 032701.
- [27] NIE X, KRISHNA A, JEONG M, *et al.* Stretchable selective emitters based on carbon nanotube films for adaptive thermal control. The 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas, 2019: 204.
- [28] PYUN K R, JEONG S, YOO M J, *et al.* Tunable Radiative Cooling by Mechanochromic Electrospun Micro-Nanofiber Matrix. *Small*, 2024, **20**(20): 2308572.
- [29] LUO R C, SONG B Q, JIAO H X, *et al.* Mechanosensitive stacking structure with continuous solar controllability for real-time thermal management. *Materials Horizons*, 2025, **12**(7): 2279.
- [30] KRISHNA A, KIM J M, LEEM J, *et al.* Dynamic radiative thermal management by crumpled graphene. The 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Las Vegas, 2019: 797.
- [31] KRISHNA A, KIM J M, LEEM J, *et al.* Ultraviolet to mid-infrared emissivity control by mechanically reconfigurable graphene. *Nano Letters*, 2019, **19**(8): 5086.
- [32] ZHANG Y T, SUN J H, WANG Y F, *et al.* Radiative cooling hierarchically porous fluoropolymer film by ambient humidity-induced phase separation. *Macromolecules*, 2025, **58**(8): 4309.
- [33] YANG G J, SUN P, ZHU T, *et al.* Fabrication, microstructure and optical properties of 〈110〉 textured CVD polycrystalline diamond infrared materials. *Diamond and Related Materials*, 2024, **141**: 110600.
- [34] LIU K, LEE S, YANG S, *et al.* Recent progresses on physics and applications of vanadium dioxide. *Materials Today*, 2018, **21**(8): 875.
- [35] WEGKAMP D, STÄHLER J. Ultrafast dynamics during the photoinduced phase transition in VO₂. *Progress in Surface Science*, 2015, **90**(4): 464.
- [36] LIANG S R, XU F, LI W X, *et al.* Tunable smart mid infrared thermal control emitter based on phase change material VO₂ thin film. *Applied Thermal Engineering*, 2023, **232**: 121074.
- [37] AO X Z, LI B W, ZHAO B, *et al.* Self-adaptive integration of photothermal and radiative cooling for continuous energy harvesting from the Sun and outer space. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(17): e2120557119.
- [38] LONG L S, YE H. Dual-intelligent windows regulating both solar and long-wave radiations dynamically. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, **169**: 145.
- [39] LI X S, LIU M L, ZHANG W S, *et al.* Smart window with dynamic emissivity regulation for continuous indoor cooling. *Applied Surface Science*, 2025, **695**: 162895.
- [40] WU H L, SHANG D, ZHANG H, *et al.* Phase-transition materials derived photonic metamaterials for passively dynamic solar thermal and coldness harvesting. *Heliyon*, 2024, **10**(2): e23986.
- [41] YAN C Q, WANG Z G, QU J H, *et al.* Scalable and dynamically passive thermal regulation over solar wavelengths enabled by phase-transition metamaterials. *Solar Energy*, 2023, **257**: 257.
- [42] TAO W W, WU Y, ZHAO F F, *et al.* Research progress in metamaterials and metasurfaces based on the phase change material Ge₂Sb₂Te₅. *Optics & Laser Technology*, 2024, **177**: 111064.
- [43] BURTSEV A A, ELISEEV N N, MIKHALEVSKY V A, *et al.* Physical properties' temperature dynamics of GeTe, Ge₂Sb₂Te₅ and Ge₂Sb₂Se₄Te₁ phase change materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022, **150**: 106907.
- [44] ARYANA K, KIM H J, ISLAM M R, *et al.* Optical and thermal properties of Ge₂Sb₂Te₅, Sb₂Se₃, and Sb₂S₃ for reconfigurable photonic devices. *Optical Materials Express*, 2023, **13**(11): 3277.
- [45] DU K K, LI Q, LYU Y B, *et al.* Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase-changing material GST. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**(1): e16194.
- [46] KIM Y, KIM C, LEE M. Parallel laser printing of a thermal emission pattern in a phase-change thin film cavity for infrared camouflage and security. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, **16**(3): 2100545.
- [47] KANG D, KIM Y, KIM C, *et al.* Highly flexible infrared emitter with spatially controlled emissivity for optical security. *Advanced Materials Technologies*, 2023, **8**(4): 2200808.
- [48] KANG D, KIM Y, LEE M. Laser dynamic control of the thermal emissivity of a planar cavity structure based on a phase-change material.

ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, **16**(4): 4925.

[49] XU G Q, KANG Q L, ZHANG X Z, *et al.* Inverse-design laser-infrared compatible stealth with thermal management enabled by wavelength-selective thermal emitter. *Applied Thermal Engineering*, 2024, **255**: 124063.

[50] NONG J, LI N, JIANG X P, *et al.* Multifunctional emitter based on inverse design for infrared stealth, thermal imaging and radiative cooling. *Optics Express*, 2024, **32**(3): 3379.

[51] AL-YASIRI Q, SZABÓ M. Paraffin as a phase change material to improve building performance: an overview of applications and thermal conductivity enhancement techniques. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2021, **6**: 38.

[52] YU Z L, WANG F, HE W Q, *et al.* Phase-change material-integrated dual-mode thermal management Janus films with enhanced radiative cooling and solar heating. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, **7**(6): 3555.

[53] ZHOU Y C, DUAN R. Leak-proof reversible thermochromic microcapsule phase change materials with high latent thermal storage for thermal management. *ACS Applied Energy Materials*, 2024, **7**(14): 5944.

[54] LIU B X, RASINES MAZO A, GURR P A, *et al.* Reversible nontoxic thermochromic microcapsules. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(8): 9782.

[55] YIN Y Y, SUN P C, ZENG Y J, *et al.* A colored temperature-adaptive cloak for year-round building energy saving. *Advanced Energy Materials*, 2024, **14**(37): 2402202.

[56] HU X, ZHANG Y B, CAI W, *et al.* Colorful and temperature-adaptive radiative coolers for all-season thermal management applications. *Renewable Energy*, 2025, **242**: 122447.

[57] DESHMUKH S, MOONEY D A, MCDERMOTT T, *et al.* Molecular modeling of thermo-responsive hydrogels: observation of lower critical solution temperature. *Soft Matter*, 2009, **5**(7): 1514.

[58] XIN F F, LU Q L, LIU B X, *et al.* Metal-ion-mediated hydrogels with thermo-responsiveness for smart windows. *European Polymer Journal*, 2018, **99**: 65.

[59] ZHOU Y, DONG X X, MI Y Y, *et al.* Hydrogel smart windows. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, **8**(20): 10007.

[60] ZHANG R, LI R Z, XU P, *et al.* Thermochromic smart window utilizing passive radiative cooling for Self-Adaptive thermoregulation. *Chemical Engineering Journal*, 2023, **471**: 144527.

[61] ZHAO B, LU K G, ZHANG W S, *et al.* Thermo-responsive hydrogel-based building envelopes for building energy-saving. *Solar Energy*, 2025, **288**: 113306.

[62] HUANG M C, XUE C H, BAI Z X, *et al.* Bioinspired smart dual-layer hydrogels system with synchronous solar and thermal radiation modulation for energy-saving all-season temperature regulation. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, **101**: 175.

[63] ZHONG S J, LU B H, WANG D C, *et al.* Passive isothermal flexible sensor enabled by smart thermal-regulating aerogels. *Advanced*

Materials, 2025, **37**(8): 2415386.

[64] ZHAO B, HU M K, XUAN Q D, *et al.* Tunable thermal management based on solar heating and radiative cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, **235**: 111457.

[65] LI X X, ZHANG Z P, ZHANG X T, *et al.* A polymer nanocomposite with strong full-spectrum solar absorption and infrared emission for all-day thermal energy management and conversion. *Advanced Science*, 2024, **11**(15): 2308200.

[66] JIA Y, LIU D Q, CHEN D S, *et al.* Realizing sunlight-induced efficiently dynamic infrared emissivity modulation based on aluminum-doped zinc oxide nanocrystals. *Advanced Science*, 2024, **11**(36): 2405962.

[67] CHEN Y, GAO F, ZHAN X L, *et al.* Hierarchical textiles with optical design and fiber nanomanufacturing: breakthrough innovation in personal thermal management. *Chemical Synthesis*, 2025, **5**: 21.

[68] ZHANG X P, WANG F, GUO H Y, *et al.* Advanced cooling textiles: mechanisms, applications, and perspectives. *Advanced Science*, 2024, **11**(10): 2305228.

[69] BOUTGHATIN M, PENNEC Y, ASSAF S, *et al.* Dynamic thermoregulatory photonic crystal fabric for personal thermal management. 2021 IEEE Sensors, Sydney, 2021: 1.

[70] ABEBE M G, ROSOLEN G, KHOUSSAKOUN E, *et al.* Dynamic thermal-regulating textiles with metallic fibers based on a switchable transmittance. *Physical Review Applied*, 2020, **14**(4): 044030.

[71] ABEBE M G, CORTE A D, ROSOLEN G, *et al.* Dual-mode photonic textiles for radiative heat management. *Photonics for Solar Energy Systems IX*, 2022: 27-31.

[72] FAN Q C, FAN H W, HAN H Z, *et al.* Dynamic thermoregulatory textiles woven from scalable-manufactured radiative electrochromic fibers. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(16): 2310858.

[73] SHI M K, SONG Z F, NI J H, *et al.* Dual-mode porous polymeric films with coral-like hierarchical structure for all-day radiative cooling and heating. *ACS Nano*, 2023, **17**(3): 2029.

[74] ZHANG Y L, PIAN S J, WANG Z N, *et al.* Protocol to fabricate colored dual-mode Janus fabric for dynamic thermal management. *STAR Protocols*, 2025, **6**(1): 103683.

[75] XUE T, CHEN X, WANG C X, *et al.* Dual-Mode cellulose acetate@Al₂O₃/MWCNTs Janus fabric with radiative cooling and solar heating for personal thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **500**: 156713.

[76] WANG Y X, SHOU D H, SHANG S M, *et al.* Development of ZrC/T-shaped ZnO whisker coated dual-mode Janus fabric for thermal management. *Solar Energy*, 2022, **233**: 196.

[77] MO C Q, LEI X J, TANG X L, *et al.* Nanoengineering natural leather for dynamic thermal management and electromagnetic interference shielding. *Small*, 2023, **19**(42): e2303368.

[78] DU P B, WANG J, ZHAN X W, *et al.* Asymmetric multienergy-coupled radiative warming textiles for personal thermal-moisture management. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, **15**(34): 41180.

- [79] YUAN H, LIU R J, CHENG S T, *et al.* Scalable fabrication of dual-function fabric for zero-energy thermal environmental management through multiband, synergistic, and asymmetric optical modulations. *Advanced Materials*, 2023, **35**(18): 2209897.
- [80] LI X S, LIU M L, CHEN K, *et al.* Adaptive fabric with emissivity regulation for thermal management of humans. *Nanophotonics*, 2024, **13**(17): 3067.
- [81] TAO S, HAN J T, XU Y, *et al.* Mechanically switchable multifunctional device for regulating passive radiative cooling and solar heating. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, **15**(13): 17123.
- [82] BAI Y F, JIA X H, YANG J, *et al.* Three birds with one stone strategy: a tri-modal radiator based on the cooling-compensation-heating effect. *Nano Energy*, 2024, **127**: 109770.
- [83] YANG Z B, JIA Y, ZHANG J. Hierarchical-morphology metal/polymer heterostructure for scalable multimodal thermal management. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(21): 24755.
- [84] DING Y, WU L D, LU X, *et al.* A sustainable and robust Janus film Inspired by the bird's nest structure for efficient year-round outdoor thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **500**: 156918.
- [85] FANG H M, XIE W R, LI X Q, *et al.* A triple-mode midinfrared modulator for radiative heat management of objects with various emissivity. *Nano Letters*, 2021, **21**(9): 4106.
- [86] YE Q, GUO N, CHEN M J. Reversible solar heating and radiative cooling coupled with latent heat for self-adaptive thermoregulation. *Applied Physics Letters*, 2025, **126**(11): 113903.
- [87] XUAN Q D, YANG N, KAI M F, *et al.* Combined daytime radiative cooling and solar photovoltaic/thermal hybrid system for year-round energy saving in buildings. *Energy*, 2024, **304**: 132178.
- [88] TAYLOR S, YANG Y, WANG L P. Vanadium dioxide based Fabry-Perot emitter for dynamic radiative cooling applications. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, **197**: 76.
- [89] TAYLOR S. Dynamic radiative thermal management and optical force modulation with tunable nanophotonic structures based on thermochromic vanadium dioxide. Tempe: Arizona State University PhD Thesis, 2020.
- [90] HU L C, ZHU H J, LU K, *et al.* Theoretical investigation of VO₂ smart window with large-scale dynamic infrared emittance adjustment for adaptive thermal management. *Solar Energy*, 2024, **277**: 112734.
- [91] NAN H F, GUO Z G, YANG T B, *et al.* Symmetric and asymmetric Fabry-Pérot cavity design for a dual-mode thermal management photonic film with high-purity color. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, **63**(10): 4430.
- [92] ZADPOOR A A. Mechanical meta-materials. *Materials Horizons*, 2016, **3**(5): 371.
- [93] SUN S, TAN W, WEI S H. Emergent micro- and nanomaterials for optical, infrared, and terahertz applications. Boca Raton: CRC Press, 2022: 179–181
- [94] LONG L S, TAYLOR S, YING X Y, *et al.* Thermally-switchable spectrally-selective infrared metamaterial absorber/emitter by tuning magnetic polariton with a phase-change VO₂ layer. *Materials Today Energy*, 2019, **13**: 214.
- [95] PARVEEN A, TYAGI D, LAXMI V, *et al.* Tunable mid-infrared broadband absorption in the atmospheric window of wavelength in 3–5 μm using VO₂ phase transition in a three-layer metamaterial. *Optical Materials*, 2024, **153**: 115590.
- [96] LI B Y, ZENG S C. Bilateral passive thermal management for dynamical temperature regulation. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 2875.
- [97] WANG P, SU J C, DING P, *et al.* Graphene-metal based tunable radiative metasurface for information encryption and anticounterfeiting. *Diamond and Related Materials*, 2023, **131**: 109548.
- [98] ZHANG H W, LY K C S, LIU X H, *et al.* Biologically inspired flexible photonic films for efficient passive radiative cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(26): 14657.
- [99] ARAQUE K, PALACIOS P, MORA D, *et al.* Biomimicry-based strategies for urban heat island mitigation: a numerical case study under tropical climate. *Biomimetics*, 2021, **6**(3): 48.
- [100] YAN J B, HAN M Y, ZHU L B, *et al.* Bionic hierarchical metalized thermally responsive dynamic daytime passive radiative cooling nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 2024, **250**: 110518.
- [101] SUN X R, ALI M, JALALI S, *et al.* The thermal 'Buddha Board'-application of microstructured polyolefin films for variable thermal infrared transparency materials. *Interface Focus*, 2024, **14**(3): 20230073.
- [102] GUO N, SHI C M, SHELDON B W, *et al.* A mechanical-optical coupling design on solar and thermal radiation modulation for thermoregulation. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, **12**(28): 17520.
- [103] ZHAO Y C, FANG F. Cephalopod-inspired Mxene-SEBS/TiO₂ composite film for synergistic solar and infrared radiative heat management. *Surfaces and Interfaces*, 2024, **51**: 104565.
- [104] ZHAO Y C, FANG F. Bio-inspired hierarchical wrinkles for tunable infrared reflectance. *Surfaces and Interfaces*, 2024, **45**: 103832.
- [105] SU W, DING Z P, LUO Y L, *et al.* Machine learning-enabled design of metasurface based near-perfect daytime radiative cooler. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, **260**: 112488.
- [106] DING Z M, LI X, JI Q X, *et al.* Machine-learning-assisted design of a robust biomimetic radiative cooling metamaterial. *ACS Materials Letters*, 2024, **6**(6): 2416.
- [107] JUNG Y, KO S H. Radiative cooling technology with artificial intelligence. *iScience*, 2024, **27**(12): 111325.
- [108] QIAN C, KAMINER I, CHEN H S. A guidance to intelligent metamaterials and metamaterials intelligence. *Nature Communications*, 2025, **16**: 1154.