

功能序构气凝胶在光热电转换中的应用

唐桂华^{1,2*}, 孙春磊¹, 代淇好¹, 杜慕³

(1. 西安交通大学 国家储能技术产教融合创新平台(中心), 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 3. 山东大学 高等技术研究院, 山东 济南 250061)

摘要:信息技术与新能源领域的突破性进展,对材料内部的能量调控提出了更严苛的要求。传统材料设计常陷入光、热、电输运参数间的固有制衡,亟须建立从底层解耦并重构材料功能的新范式。本文系统地综述了以纳米多孔气凝胶为载体,通过功能序构设计理念,利用不同维度结构基元的跨尺度组装,实现对多种能量载流子输运的精准调控的研究进展。基于此理论框架,聚焦于光热电转换的前沿应用,重点评述了气凝胶在光热转换、光电转换、热电直接转换及光热电协同转换中的研究进展与性能优化途径。展望了人工智能驱动的逆向设计和多载流子协同调控等未来研究方向,为按需设计下一代高性能光热电转换材料提供新视角。

关键词:气凝胶;功能序构;能量输运;光热电转换

中图分类号:TB39 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2026)02-048-16

Applications of functionally architected aerogels in photo-thermo-electric conversion

TANG Guihua^{1,2*}, SUN Chunlei¹, DAI Qihao¹, DU Mu³

(1. National Innovation Platform(Center) for Industry-Education Integration of Energy Storage Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Institute for Advanced Technology, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Recent advances in information technology and new energy systems have introduced increasingly stringent requirements for regulating energy transport within materials. Conventional material-design paradigms are limited by inherent trade-offs among optical, thermal, and electrical transport properties, creating an urgent need for a new paradigm to fundamentally decouple and reconstruct material functionalities. Recent progress on nanoporous aerogels as an enabling platform was systematically summarized, emphasizing how hierarchical structural design and cross-scale assembly of building units allow precise control of diverse energy-carrier transport. Based on this theoretical framework, advanced applications in photo thermal electrical energy conversion were highlighted, with particular emphasis on research progress and performance optimization pathways of aerogels for photothermal, photoelectric, thermoelectric, and integrated photo thermal electric systems. Finally, future research directions including AI-driven inverse design and synergistic regulation of multiple energy carriers were outlooked, providing new perspectives for the on-demand development of next-generation high-performance photo-thermal-electrical conversion materials.

Keywords: aerogel; functional architecting; energy transport; photo-thermo-electric conversion

下一代光热电(photo thermo electric, PTE)转换系统迫切要求材料从单一功能体演进为能协同调控多种物理场的高级部件。然而,这些需要集成的功能在物理属性上往往相互对立,如光学透明与热阻隔^[1]、高导热与电绝缘^[2]等,限制了材料性能的进一步提升。其根源在于材料内部声子(热)、光子(光)与电子(电)等在微纳尺度传热学与物理学中被称为能量载流子的微观粒子^[3],

其输运行为存在强耦合效应^[4]。传统的“结构-功能”设计范式通常依赖于材料本征属性的优化,但在处理多物理场参数间的固有制衡时往往顾此失彼。因此,突破这一瓶颈的关键在于发展一种普适性的材料设计策略,从微观尺度上解耦并重构这些相互矛盾的能量输运通道。

为解决这一难题,功能序构设计理念应运而生。与传统范式不同,功能序构的核心思想在于

收稿日期:2025-11-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2022YFC2204302);国家自然科学基金资助项目(52130604)

*第一作者:唐桂华(1974—),男,湖南衡南人,教授,博士,博士生导师,E-mail:ghtag@mail.xjtu.edu.cn

引用格式:唐桂华,孙春磊,代淇好,等.功能序构气凝胶在光热电转换中的应用[J].国防科技大学学报,2026,48(2):48-63.

Citation:TANG G H, SUN C L, DAI Q H, et al. Applications of functionally architected aerogels in photo-thermo-electric conversion[J].

Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 48-63.

解耦与重构。它不再局限于单一尺度的结构调整,而是从底层逻辑出发,在微观基元尺度上,通过物理空间的离散化设计,将能量载流子的输运通道进行解耦,阻断其有害的相互干扰,随后利用跨尺度组装技术,在宏观层面将这些独立的通道进行重构,从而在宏观材料中实现多功能协同共存。

在实现这一理念的物质平台选择上,纳米多孔气凝胶展现了不可替代的优势^[5]。虽然金属有机框架(metal organic frameworks, MOFs)或共价有机框架(covalent organic frameworks, COFs)等晶态多孔材料在微孔尺度具有极高的有序性,但往往受限于刚性晶体骨架,难以构建长程连续的电子/声子输运网络,且缺乏宏观柔性 with 跨尺度集成的能力。而气凝胶凭借其高度可设计的连续固气两相网络,提供了理想的解决方案。其核心优势在于组分与结构的双重可设计性,其骨架涵盖无机、有机及碳基等丰富体系,且可通过复合工艺锚定功能组分^[6]。同时,其微观孔隙与宏观物理形态均可跨尺度调控。这种多维度的可调性使气凝胶成为一个完美的基体,研究者可对声子、光子、电子等能量载流子的输运路径进行按需设计。通过这种底层序构设计,可有效打破传统材料中的性能制衡。例如,作者团队构筑了兼具高透明与强隔热^[7]以及高导电与强隔热^[2]的矛盾统一体,体现了功能序构理念的有效性。

基于上述背景与理念,本文将系统评述以气凝胶为核心平台,通过功能序构设计赋能新型光热电转换材料的最新研究进展。通过构建功能序构的理论框架,解析从结构基元演变、物理调控机制到跨尺度制造路径的完整链条。并遵循能量转换的物理逻辑,深入探讨气凝胶在光热、光电、热电转换及光热电协同系统中的序构策略与构效关系。针对当前领域面临的关键挑战,展望多能量载流子协同调控及人工智能驱动的逆向设计等前沿方向,为研发新一代高性能能量调控材料提供设计思路。

1 功能序构设计原则

功能序构是一种旨在从底层逻辑出发、实现材料功能按需设计的系统性方法。本节旨在构建该方法的理论框架,把气凝胶拆解为一系列可供设计的结构基元,深入剖析这些基元与能量载流子输运之间的构效关系,并系统阐述实现功能序构的先进制造路径。

1.1 结构基元与设计参数

气凝胶丰富的材料体系可解构为多样化的结构基元库,这些基元的几何维度与化学组分直接决定了材料的本征物理属性与功能序构的潜力。依据基元的空间几何特征,气凝胶的构建单元可从经典的零维(0D)纳米颗粒,演进至赋予材料柔性的一维(1D)纳米纤维,以及近年来在光热电输运方面展现出巨大潜力的二维(2D)纳米片层。此外,多维基元的协同杂化与跨尺度组装进一步拓展了材料的设计维度,为实现气凝胶的高性能化与多功能集成提供了广阔的空间。

1.1.1 0D 基元

0D 纳米颗粒是构筑气凝胶最基础的结构单元。这些准球形基元通过化学键或物理作用力相互连接形成三维贯通的多孔网络(如图1所示),赋予材料超低密度和高孔隙率等共性特征。

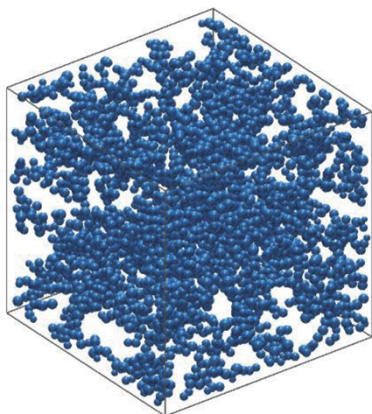


图1 0D 基元构成的三维贯通多孔网络

Fig. 1 Three-dimensional interconnected porous network composed of 0D primitives

二氧化硅(SiO_2)气凝胶是0D基元功能序构的经典范例。其核心优势在于由0D颗粒网络带来的优异隔热性能,热导率可达 $0.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 量级^[8]。这种卓越性能源于其独特的微观结构,纳米颗粒网络构筑的丰富界面可强烈散射声子以抑制固态热导。同时,纳米孔隙通过克努森效应极大削弱了气态热导。因此, SiO_2 气凝胶的功能设计长期聚焦于通过调控合成工艺以准确控制颗粒尺寸和孔径分布,实现热运输的最小化,使其在航空航天、建筑节能及高能物理^[9]等领域获得广泛应用。

氧化铝(Al_2O_3)气凝胶代表向耐高温功能化演进的设计方向。其化学组分带来了优异的热稳定性,远超 SiO_2 气凝胶^[10]。更重要的是,其功能序构的核心在于通过热处理进行晶相结构调控,

从而将耐温极限提升至 1 200 °C 以上^[11],使其在飞行器热防护和高温催化等极端环境中成为关键候选材料。

氧化钛 (TiO₂) 气凝胶由半导体性的纳米颗粒构成^[12],核心优势在于其光电响应特性。锐钛矿相的 TiO₂ 骨架能吸收紫外光产生电子-空穴对,展现出优异的光催化活性^[13]。其功能序构设计侧重于通过晶相控制和能带工程提升光生电荷的分离效率,使其在高效环境修复和太阳能光电转换中展现出广阔的应用前景。

1.1.2 1D 基元

与 0D 颗粒构筑的刚性骨架不同,由高长径比的 1D 基元通过物理缠结或化学交联构筑的三维网络(如图 2 所示),能够在承受形变时通过纤维的滑移、弯曲和网络重构以耗散能量,从而避免脆性断裂。

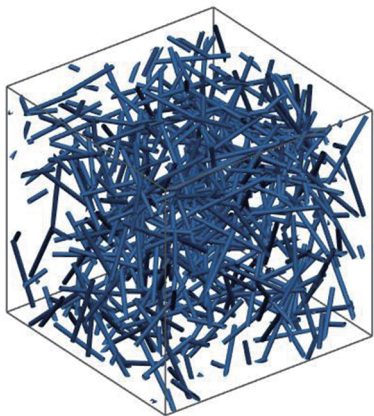


图 2 1D 基元构成的三维网络

Fig. 2 Three-dimensional network composed of 1D primitives

利用可再生物质是构筑 1D 基元气凝胶的可持续路径。其中,以纤维素纳米纤维 (cellulose nanofibers, CNFs) 为代表的体系最为瞩目^[14]。这些从木材、棉花等提取的 1D 高长径比纳米纤维,通过氢键自组装构筑了兼具超轻与柔韧的三维网络。其功能序构设计的核心是通过调控网络结构参数,如纤维尺寸、空间取向及交联程度等^[15],以满足其在柔性隔热、吸附及输运等领域的应用需求。

通过高分子化学合成则可以制备出具有特定分子结构和功能的 1D 聚合物基元,以满足更严苛的应用需求。芳纶纳米纤维 (aramid nanofibers, ANFs) 气凝胶是柔性耐高温隔热材料的代表。其 1D 基元的化学组分赋予了材料卓越的热稳定性和本征阻燃性^[16],使其适用于消防防

护等极端环境。而聚酰亚胺 (polyimide, PI) 气凝胶则将功能序构的可设计性推向了分子级。通过对单体的组分设计,可以准确调控其力学、介电及耐热性能^[17]。这种分子级设计不仅满足了航空航天领域对轻质高效隔热的需求,更使其凭借卓越的绝缘与热稳定性,成为柔性电子封装及未来光热电系统中理想的功能基板材料。

1.1.3 2D 基元

2D 纳米片层的引入,极大拓展了气凝胶在电、热输运方面的性能边界,并展现出前所未有的多功能集成潜力。这类气凝胶通常由石墨烯、MXene 等 2D 纳米片层通过氢键、 $\pi-\pi$ 堆积或共价作用自组装构筑而成。由 2D 基元构成的三维网络如图 3 所示。其功能序构设计的核心是利用 2D 基元的高比表面积和各向异性,构建贯穿的三维逾渗网络,从而为电子和声子创建高效的长程输运通道。

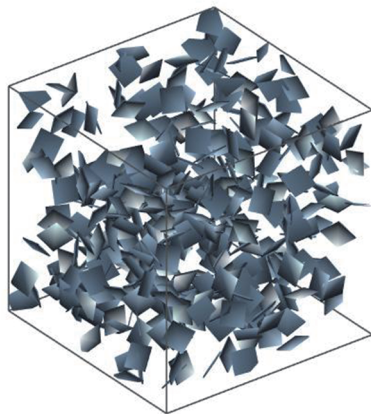


图 3 2D 基元构成的三维网络

Fig. 3 Three-dimensional network composed of 2D primitives

石墨烯气凝胶 (graphene aerogel, GA) 开启了气凝胶高导电功能化的新篇章。以石墨烯或氧化石墨烯 (graphene oxide, GO) 为 2D 基元构筑的导电网络,赋予了材料卓越的电导率。通过对片层质量、网络密度及结构取向度等参数的精细调控,GA 凭借其优异的导电性和高比表面积,在超级电容器和传感器等领域展现出显著优势。同时,其轻质宽频的电磁屏蔽性能使其成为雷达隐身的关键候选材料^[18]。

作为新兴的 2D 材料, MXene 气凝胶进一步丰富了 2D 基元的功能设计维度。与石墨烯相比, MXene 的优势体现在其化学组分的高度可调性、丰富的表面官能团以及金属级的导电性。这些特性使其在电磁屏蔽领域展现出超越石墨烯的独特潜力,尤其是其主导的吸收损耗机制可有效

减少电磁波反射,被认为是比反射型屏蔽材料更理想的下一代隐身材料^[19]。

1.1.4 多维杂化基元

超越单一维度的局限,多维基元的协同杂化是实现气凝胶功能集成的关键策略。其序构设计的核心是利用不同维度基元的功能互补,通过调控组分分布、界面作用与网络结构,定向优化能量载流子的输运行为。例如,0D 珍珠项链状纳米颗粒与 1D 纳米纤维的复合,是协同提升力学与功能特性的经典范例^[20]。在此体系中,柔性的 1D 纤维网络作为宏观骨架,有效克服了纯 0D 气凝胶的固有脆性;而 0D 颗粒则沿纤维填充孔隙,在引入光催化或遮光等特定功能的同时,进一步增加声子散射界面,从而强化隔热性能^[21]。

类似地,1D 纳米纤维与 2D 纳米片的复合可利用纤维韧性弥补片层脆性,同时 2D 片层能在纤维网络中构筑高效的导电/导热通路。例如,在银纳米线网络中引入石墨烯片层,可制备出兼具优异柔韧性与高效电磁屏蔽的双导电骨架气凝胶^[22]。更进一步,复杂的 0D/1D/2D 多级杂化展示了跨尺度功能集成的潜力。例如,将低导热的 SiO₂ 颗粒(红外调制)与高导电的 MXene 片层(电磁响应)通过氢键定向锚定于 1D 芳纶纤维表面,可协同构建整体互连网络,实现优异的吸波性能^[23]。这些研究证实,多维杂化策略具备按需设计面向极端环境与多功能集成气凝胶的强大能力。

1.2 物理性能的解耦与调控

识别结构基元的核心目的,是建构构效关系以明确这些基元如何从物理上决定能量载流子的输运特性。

1.2.1 声子输运调控

气凝胶的总热导率由固态、气态及辐射热导共同决定,功能序构的核心在于对上述机制进行独立的解耦与调控。声子散射机理如图 4 所示,抑制固态热导的关键在于最大化声子散射中心密度。通常采用 0D 纳米颗粒作为基元,利用其随机堆积形成的曲折传输路径及大量晶界/相界(固-气/固-固界面),强烈散射声子,从而获得极低的热导率^[24]。反之,增强定向热输运则需构筑低散射的高效声子通道。通过选用高本征热导率的 1D 纤维或 2D 片层基元,并使其在特定方向形成高度取向的连续逾渗网络,可引导声子快速、定向传输,满足面内高导热等特定散热需求^[25]。

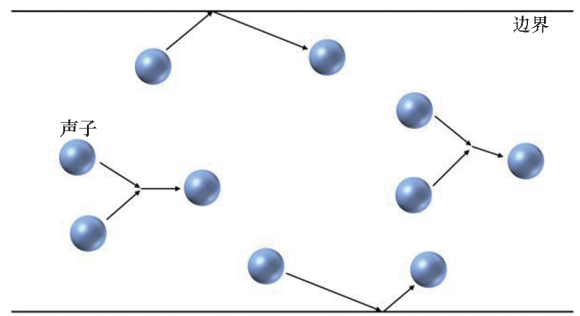


图 4 气凝胶中抑制固态热导的声子散射机理示意图
Fig. 4 Schematic of the phonon-scattering mechanism that suppresses solid-state thermal conductivity in aerogels

1.2.2 气体分子输运调控

气态热导的调控主要依赖于对纳米孔隙结构的优化设计。当气凝胶孔径小于气体分子平均自由程时,克努森效应主导传热过程^[26]。此时,气体分子与孔壁的碰撞概率远大于分子间碰撞,从而显著削弱气相传热,这是气凝胶实现低于自由空间空气热导率的核心机制。此外,气固耦合热导虽在常压下贡献有限,但在中低真空或微纳米尺度受限空间内不可忽略^[27]。理解并调控气体分子与骨架界面的能量交换行为,对于实现极限隔热性能的预测与优化至关重要。

1.2.3 辐射光子输运调控

辐射光子输运调控的核心在于通过化学组分与拓扑构型的序构设计,准确调控光子的吸收、透射与散射行为,可实现光谱的选择性响应。

光吸收是实现光热与光电转化的基础。基元的化学属性决定了本征吸收特性。无机半导体气凝胶依赖能带结构吸收高能光子,有机气凝胶源于分子链电子跃迁,而碳基与二维材料气凝胶则具备优异的宽谱吸收能力^[28]。此外,引入金属纳米颗粒利用其局域表面等离子共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)效应^[29](如图 5 所示),是实现特定波段高效、可调谐吸收的普适性策略,广泛应用于光热转换领域。

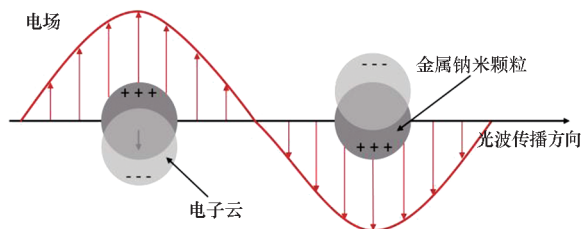


图 5 LSPR 机理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the LSPR mechanism

光透射与散射主要受控于结构特征尺寸与光

波长的匹配关系。当结构尺寸远小于波长时,瑞利散射^[30]主导,赋予均匀 SiO₂ 或纤维素气凝胶优异的透明性。当尺寸与波长相当时,强烈的米氏散射^[31]被利用于光谱调控,或在强吸收体系中通过增加光程进一步提升总吸收效率。

在高温隔热应用中,气凝胶骨架对红外辐射的半透明性会导致显著的辐射热导^[32]。主要应对策略包括引入强红外散射遮光剂以延长光子路径,或掺杂红外吸收剂将辐射能转化为热能并耗散。这些设计可在不牺牲常温隔热的前提下,大幅提升材料在高温集热或热电转换环境下的隔热性能。

1.2.4 电子输运调控

对电子输运的调控核心在于导电通路的构筑或阻断。实现电绝缘性的首要策略是选择宽带隙的化学组分作为结构基元,其宽带隙特性使得材料在本征上缺乏可自由移动的电荷载流子,如典型的无机气凝胶和多数有机气凝胶。而实现导电性,则需构筑贯穿的导电网络,其行为遵循经典的逾渗理论^[33]。由于 0D 颗粒的逾渗阈值过高,与气凝胶的高孔隙率特性相矛盾,因此凭借极高长径比优势的 1D 和 2D 导电基元成为构筑导电气凝胶的首选^[34]。通过对绝缘性基元的选择和导电逾渗网络的构筑,功能序构使得气凝胶的电导率可以实现跨越十几个数量级的大范围调控。

综上所述,实现高性能光热电转换的关键在于建立从宏观性能需求到微观结构序构的逆向映射逻辑。设计过程需依据应用场景确定多种能量载流子的理想输运特性,进而基于解耦原则选择如高导电二维层或低导热零维颗粒等特定结构基元以分别承载不同的输运任务。在此基础上,通过定向序构在特定方向上构建连续的逾渗网络或各向异性孔道,以最大化目标载流子的迁移率,同时利用多级孔隙界面阻断寄生热流。这种从单纯依赖本征物性向利用几何拓扑增强性能的转变,构成了气凝胶突破传统材料性能极限的核心方法论。

1.3 先进制造与工程化路径

实现功能序构的核心挑战在于如何将理论计算获得的理想拓扑结构高保真地转化为实体材料。这要求制造工艺必须突破传统方法的随机性,建立从宏观性能需求反推工艺参数的逆向工程逻辑,在不同尺度上精准复刻理想的拓扑构型。其工程化路径包括在原子/分子尺度上进行化学组分工程、在纳米/微米尺度上调控网络形态的微观结构工程,以及在宏观尺度上构筑有序体系的

宏观结构工程。

化学组分工程是分子与纳米尺度功能序构最基础的调控手段。经典的溶胶-凝胶法本身就是一种强大的组分与结构设计工具,通过准确控制前驱体、催化剂等化学参数,可实现对骨架化学属性和微观形貌的构筑。这种原子级的序构设计能够直接干预能量载流子的晶格散射行为,从而在维持低热导率的同时优化骨架的导电或光热转化能力。复合技术则是赋予基体额外功能的关键,可通过原位复合或后处理复合引入功能组分^[35]。此外,通过表面功能化修饰可对气凝胶的界面化学进行设计,以提升其疏水性与环境稳定性^[36]。

微观结构工程则通过非溶胶-凝胶过程构建特殊孔隙结构,其核心任务是根据光子或气体分子的平均自由程,构筑匹配的孔壁拓扑结构。相分离法^[37]通过操纵聚合物链在溶剂中的热力学不稳定性,控制富相与贫相的演化速率,从而诱导形成特定的双连续多孔网络;而模板法^[38]则充当物理标尺,将设计好的微米级散射中心直接引入气凝胶内部。这些由非平衡态过程确定的微观序构,是实现光谱选择性吸收与阻隔气态热传导的物理基础。

宏观结构工程聚焦于对结构基元的空间有序排列,是实现定向输运等高级功能的关键。定向冷冻^[39]铸造利用严格控制的温度梯度场与固化前沿速度,产生定向排斥力迫使纳米基元组装成高度有序的蜂窝状或层状通道,这种宏观序构能有效构筑电子/流体的低曲折度高速公路。而直写式 3D 打印^[40]则通过对墨水流变学的精准编程,赋予气凝胶自由构筑结构的能力,从而在物理空间上实现热、电、光输运路径的构建与解耦。

2 光热转换

光热转换技术旨在将辐射能高效转化为热能,是实现太阳能高效利用的重要途径。

2.1 宽谱光子捕获

宽谱光子捕获是高效利用太阳能的基础,其核心目标在于协同满足材料对太阳光谱近乎完美的吸收率要求,以及在光照升温后,最大限度抑制通过热传导、对流和辐射造成的能量损失。

实现高效宽谱吸收的首要策略在于气凝胶基元的功能化改性或多组分复合,即构建吸光-隔热一体化骨架。通过引入缺陷或能带工程可直接增强基元吸光能力,例如, Xiang 等^[41]通过氢蚀刻在 MoO₃ 中引入富氧空位使带隙收窄,光热转换效率提升至 92.6%。表面修饰与原位聚合也是

常用手段,Pawar 和 Kim^[42]通过在纤维素表面原位聚合强吸光的聚吡咯 (polypyrrole, PPy),将复合气凝胶的能量转换效率从 47.83% 提升至 91.53%。此外,多组分协同是目前的策略,即复合碳基材料或等离激元金属颗粒。Guo 等^[43]通过湿度诱导静电纺丝工艺利用石墨烯赋予了 PI 气凝胶快速升温能力。作者团队通过优化 SiO₂ 气凝胶中复合的银纳米颗粒 AgNPs (等离激元吸收)与氧化铟锡 (indium tin oxide, ITO) 颗粒 (红外遮光),实现 87.65% 的太阳能吸收效率^[29]。

在优选吸光组分的基础上,通过对气凝胶微观结构的序构设计,可进一步调控光子与声子的运输通路,以适应不同的能量利用需求。针对固态升温 and 热电应用,结构设计的核心在于将光子锁定于内部并减少向环境的热耗散。Zhu 等^[44]通过双向冷冻构筑了各向异性的多层细菌纤维素 (bacterial cellulose, BC)/聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA)/MXene 气凝胶,Liu 等^[45]利用交替自组制备了仿生竹荪结构的还原氧化石墨烯 (reduced graphene oxide, rGO)/MXene 气凝胶膜。这些层级有序结构不仅优化了光陷阱效应,更赋予了材料快速的光热响应 (<30 s) 和优异电磁干扰屏蔽性能,使其在可穿戴防寒及热电发电热端构筑中展现出巨大潜力。

与追求整体升温的体相加热不同,界面光热蒸发 (interfacial solar vapor generation, ISVG) 代表另一种序构策略,其核心是将光热效应局域化于气-液界面,通过对光捕获、热管理及水运输的协同优化驱动高效水相变。在光捕获环节,构建宽光谱高吸光表面是前提。Wang 等^[46]在 SiO₂ 气凝胶中原位生长 PPy,获得 2.17 kg/(m²·h) 的高蒸发率,太阳能驱动的水蒸发机理如图 6 所示。

在确保吸光的同时,高效的热量管理与顺畅的水分运输也是维持 ISVG 持续进行的关键。气凝胶固有的超低热导率能够有效抑制热量向体相水体中耗散,Hu 等^[47]制备的 CuS@CNF/PVA 气凝胶热导率低至 0.033 W/(m·K),确保了热量局域化。宏观结构设计亦能显著提升热效率,Zhu 等^[48]考虑传统的染料废水处理存在适用性有限、二次污染、残留等问题,设计了一种三维花状蒸发器,通过减少与体相水接触,将能量转换效率提升至 80.96%。另外,定向冷冻技术被用于构筑垂直、低曲折度的水通道以实现高效毛细泵水^[49]。Wang 等^[50]制备的超亲水分级多孔羟丙基纤维素 (hydroxypropyl cellulose, HPC)-

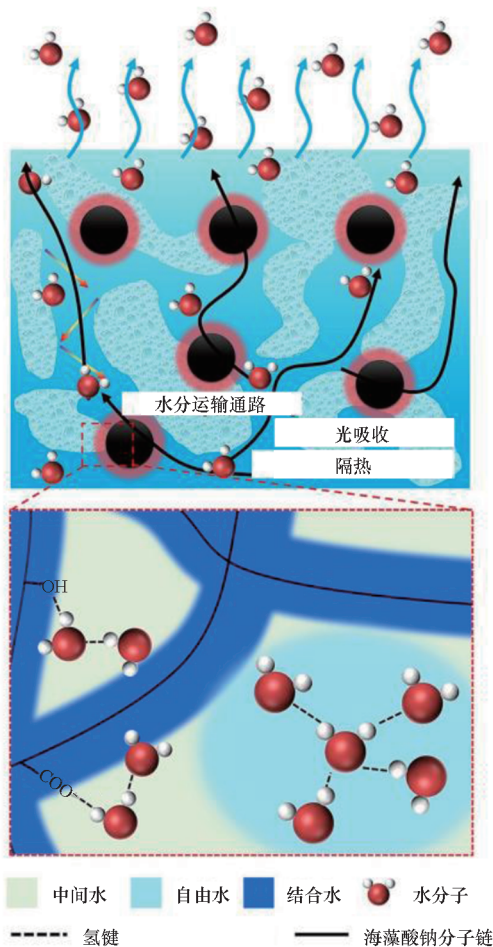


图 6 太阳能驱动的水蒸发机理图^[46]

Fig. 6 Schematic of the solar-driven water evaporation mechanism^[46]

PVA/GA,即使在高盐环境中也能保持快速补水且无盐分积累。

通过对上述环节的协同优化,基于气凝胶的 ISVG 蒸发器展现出优异的性能,在 1 个太阳辐照度下,蒸发速率普遍超过 2.5 kg/(m²·h)^[51],甚至可达 3.8 kg/(m²·h)^[52]。除了追求高蒸发率,现代 ISVG 研究更聚焦于解决实际应用挑战,如利用废弃物降低成本、实现耐盐与盐回收,以及对重金属、染料、挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 甚至全氟和多氟烷基物质 (per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS) 等多污染物的协同净化,推动该技术走向实际应用。

2.2 选择性光热吸收与高温集热

选择性光热吸收技术侧重于按需调控光子,其核心是在特定应用场景下,选择性地透过有益波段并高效吸收或反射冗余波段^[53-54]。

传统多孔硅材料中的大散射域会降低其光学透明度。为了克服此瓶颈,An 等^[55]通过控制水解和同时进行硅化修饰,使均相纳米颗粒聚集的

尺寸小于可见光波长从而获得高可见光透过率。太阳能接收器配合透明氧化硅气凝胶,在 1 个太阳辐照度时,温度可在 12 min 内达到 122 °C。通过选择性光谱透过气凝胶作为温室腔体与黑体吸收器结合,Zhao 等^[56]实现了在 1 kW/m² 环境中,超过 265 °C 的光热温度,验证了其在高温集热领域的应用前景。

将选择性光热材料应用于建筑节能窗户,则面临更复杂的要求^[57]。理想的材料不仅需要保持高可见光透射率,还需要有效阻挡紫外线和近红外辐射,这对材料设计构成重大挑战^[58]。功能性粒子的协同复合是解决这一难题的有效途径。例如,Yang 等^[59]提出一种基于 LSPR 效应的等离子 SiO₂ 气凝胶窗。通过将 ITO 纳米球和银纳米圆柱共掺杂至 SiO₂ 气凝胶中,获得 0.8 的可见光透射率与 0.91 的光热比。建筑模拟表明,与传统玻璃相比,该窗户每年可实现 20% ~ 40% 的节能。

2.3 光热辐射调控与红外隐身

选择性光谱调控原理可由太阳光谱延伸至中远红外波段,为红外隐身提供理论基础^[60-61]。红外隐身的核心在于通过调控目标表面温度或发射率以匹配背景辐射(原理如图 7 所示)。气凝胶凭借超低热导率及可设计的电磁响应特性,成为构筑高性能隐身材料的理想平台。目前,其设计策略正从基础热管理向多谱段兼容及自适应智能隐身演进。

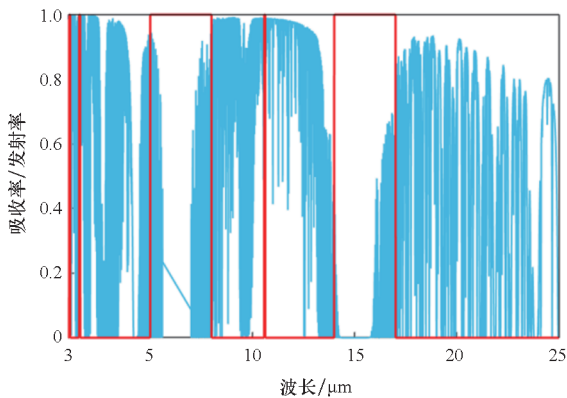


图 7 红外隐身光谱图

Fig. 7 Infrared stealth spectrum diagram

基础热管理隐身主要依赖隔热与抑制发射率两条路径。前者利用气凝胶阻断热量传递。例如,Xia 等^[62]开发的复合气凝胶在 1 100 °C 下可实现超 1 000 °C 的隔热温差。后者通过表面改性降低热辐射,如 Xu 等^[63]通过气凝胶表面复合铝箔或 MXene 将红外发射率降至 0.24。

随着侦察技术的多谱段化,红外隐身材料需兼顾雷达、太赫兹等其他波段的协同隐身。研究者通过将磁性/介电损耗组分或导电网络引入隔热气凝胶基体,成功构筑了多种兼容隐身材料。例如,Yin 等^[64]利用冷冻干燥结合静电纺丝技术制备的 ZrO₂/碳纤维(carbon fiber, CF)/rGO 气凝胶实现 -62.99 dB 的最小反射损失和超 1 000 °C 的隔热温差。Peng 等^[65]将气凝胶兼容范围拓展至太赫兹频段,实现了雷达-太赫兹-红外三波段宽谱隐身。

自适应与智能隐身代表了光热调控的前沿,旨在使材料能根据环境或指令动态改变红外特征。Li 等^[66]利用 VO₂ 在 68 °C 附近的可逆相变,通过真空过滤和冷冻干燥制备的 VO₂/ANF/PVA 复合气凝胶,其红外发射率随温度从 0.92 (高温伪装)智能降低至 0.6 (低温隐藏)。此外,通过集成焦耳加热功能还可实现主动式红外伪装。Sui 等^[67]设计的中空纤维织物,则通过调控织物与电磁波电场的角度,实现电磁屏蔽效能的主动调节,并兼具焦耳加热与红外隐身功能,为智能可穿戴设备提供了新思路。上述研究证实,气凝胶的功能序构设计可有效调控光热辐射,是发展下一代智能隐身系统的重要途径。

3 光电转换

对光子与电子输运的协同调控,是实现光电能量转换、光电探测以及智能光学器件的核心。其物理基础在于,材料在光照下高效地产生并分离电子-空穴对,并为这些光生载流子提供低阻的传输路径以形成有效光电流,同时最大限度地抑制其在输运过程中的复合损耗。

3.1 气凝胶作为功能层

气凝胶在光伏器件中核心的应用在于直接优化光生载流子的动力学行为。其三维互联的纳米多孔网络,为电子传输和电解质渗透提供高效通道,而巨大的比表面积则通过调控界面,有效抑制不利的电荷复合。在钙钛矿太阳能电池中,Pinheiro 等^[68]将 TiO₂ 气凝胶作为电子传输层,使入射光子-电流转换效率翻倍。Xie 等^[69]通过引入 Co-Ni 合金@碳气凝胶填充界面缺陷,将光电转换效率提升至 12.71%。在染料敏化太阳能电池(dye-sensitized solar cell, DSSC)领域,气凝胶同样扮演着关键角色。Gu 等^[70]利用 TiO₂ 气凝胶作为阻挡层,使电子寿命延长 10 倍以上。Hamann 等^[71]利用气凝胶作为模板或光阳极,可

有效减少电荷复合,促进电子注入。此外,通过常压干燥和溶剂热辅助结晶工艺对气凝胶光阳极进行化学改性,如 F/W 共掺杂^[72],也能显著增强光子吸收与电荷传输,从而提升 DSSC 的性能。

除了直接参与电荷传输,气凝胶还被用于提升器件的综合性能与长期服役能力。在结构稳定性方面,Serpa 等^[73]证明,TiO₂ 气凝胶多孔层能够作为互锁层,显著提升钙钛矿太阳能电池在热循环下的结构和性能稳定性。在光学管理方面,Kocak 等^[74]利用低折射率的 SiO₂ 气凝胶薄膜作为背反射器(如图 8 所示),有效减少光学损失,增强硅基太阳能电池对光子的捕获能力。在热学管理方面,Qian 等^[75]采用交联聚合、热诱导相分离与常压干燥相结合的方法制备相变复合气凝胶,通过被动温控,显著减缓光伏组件因过热导致的效率衰减,提升了实际工况下的发电效率与耐久性。

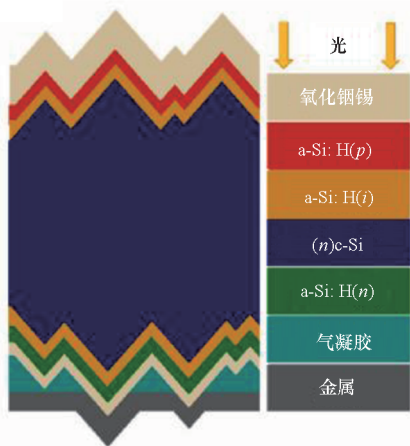


图 8 SiO₂ 气凝胶薄膜用于太阳能电池^[74]

Fig. 8 SiO₂ aerogel films for solar cell^[74]

3.2 气凝胶基多功能光电系统

借助气凝胶平台高效的光生载流子分离与传输特性,光电催化成为其重要的拓展应用方向。通过将半导体光催化剂与高导电性的石墨烯或碳气凝胶骨架复合,可以构建高效的三维光电极。气凝胶的导电网络可作为电子高速公路,快速抽离并传输光催化剂产生的光生电子,从而有效抑制其与空穴的复合,大幅提升量子效率。这一策略在有机污染物降解方面已展现出很好的效果。Qi 等^[76]通过静电纺丝和冷冻干燥成型然后热解制备 TiO₂ 空心球碳纳米纤维气凝胶,通过氮掺杂与氧空位协同促进电荷分离,对苯胺的降解率可达 96%。Xue 等^[77]构筑的 TiO₂/BiOI/碳气凝胶 p-n 异质结,有效降低了光生电子-空穴复合率,对苯酚的降解率达到 90.4%。Yang 和

Zhao^[78]设计的 Agar/碳量子点(carbon dots, CDs)/石墨氮化碳(graphitic carbon nitride, g-C₃N₄)气凝胶,45 min 内即可完全降解阿莫西林。除了有机污染物,这类复合材料在处理无机污染物和实现碳中和方面也潜力巨大。Li 等^[79]通过水热法制备的碳化物衍生碳(carbide derived carbon, CDC)/TiO₂ 复合气凝胶,利用其转换发光与导电特性,实现了对 Cr(VI) 和罗丹明 B 100% 的降解率。

性能的提升在光电流响应上得到了直接的量化体现。Li 等^[80]制备的 Bi₂MoO₆/三维石墨烯气凝胶(three-dimensional graphene aerogel, 3DrGO) 复合材料,其光电流达到纯 Bi₂MoO₆ 的 16 倍。Du 等^[81]通过溶剂热法制备的 CdS_{0.25}Se_{0.75}/3DrGO 复合气凝胶体系也展现出优异的光电流和光电转换效率。这种高效的光电转换特性还被巧妙地应用于高灵敏度的传感领域。Zhang 等^[82]通过溶胶-凝胶法在常压干燥设计的分子印迹 TiO₂/碳气凝胶电极,构建了一种高灵敏度的光电化学传感器。该传感器利用光照下 TiO₂ 产生的光生载流子,显著增强了目标物在电极表面的电化学反应信号,从而实现低至 0.008 μmol/L 的检测限,展现了其从环境修复到环境监测的广阔应用前景。

将光电转换与能量存储或传感功能集成,是构筑自供能智能器件的关键。在光驱动电池方面,Xue 等^[83]通过 3D 打印制备的 rGO/TiO₂/碳纳米管(carbon nanotubes, CNTs)气凝胶光阴极,能够在光照下显著降低 Li-O₂ 电池的充电电压,实现光能辅助的电化学储能。在光电探测与传感方面,Si 等^[84]制备的 FAPbBr₃/聚偏氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)复合气凝胶,在作为压电纳米发电机的同时,还可作为高响应度的光电探测器。Yang 等^[85]通过冷冻干燥制备的柔性硅纳米线气凝胶膜更展现出复杂的、多时间尺度的光电响应行为,揭示了其在智能光电器件中的应用潜力。

气凝胶的独特结构和性能,使其在构筑具有新型工作机制的光电器件方面展现出巨大潜力。Luo 等^[86]将掺杂石墨烯气凝胶作为阴极,构筑了新型的光子增强热电子发射太阳能电池。这类器件的机理与传统光伏不同,它利用光激发产生高能热电子并直接发射,气凝胶骨架在此过程中承担关键的电子发射和收集功能。此外,Zhao 等^[87]的工作表明,钙钛矿/rGO 复合气凝胶可作为一种高效的光电功能化电磁波吸收体,其优异

性能源于 rGO 的传导损失与钙钛矿极化损失的协同作用。这些前沿探索充分证明,气凝胶的角色已从优化现有光电器件的平台,演进为构建新一代光电功能材料的核心基体。

4 热电直接转换

热能与电能直接相互转换技术为废热回收、分布式发电和自供能传感提供了固态能量解决方案^[88-89]。高性能热电转换的关键在于最大化无量纲热电优值 ZT ,这要求材料在一个体系内同时具备高电导率(σ)、高塞贝克系数(S)和极低的热导率。然而,根据维德曼-弗朗茨定律,传统导体中电导率与热导率的强正相关性,构成了提升 ZT 的根本物理瓶颈。

4.1 热电性能的序构调控

提升功率因子($S^2\sigma$)是优化热电性能的首要任务,其核心在于构筑高效的电子通路。功能序构通过对导电基元拓扑构型的精巧设计,能够在保持多孔低密度的前提下实现高电导率。Zhou 等^[90]通过将碳纳米管与 MXene 纳米片协同组装,构筑了高效的三维导电通路。化学掺杂则是另一条提升 σ 与 S 的有效路径。Yang 等^[91]通过 N 掺杂,使褶皱石墨烯气凝胶的 S 较传统石墨烯提升了 42%, $S^2\sigma$ 表现优异。Okada 等^[92]通过碘蒸气掺杂聚 3-己基噻吩(P3HT)/聚苯乙烯(polystyrene, PS)复合气凝胶,借助能量过滤效应, S 超过 10 mV/K。此外,通过 3D 打印或定向冷冻等先进制造技术,可以有效构筑有序或各向异性的导电网络,进一步优化电学输运性能。

在构筑导电网络的同时,最大化地散射声子以降低热导率,是打破维德曼-弗朗茨定律,实现高 ZT 的关键。气凝胶的纳米多孔结构本身就是优异的声子散射体,能够将固态热导率抑制在极低的水平。例如,Gnanaseelan 等^[93]通过快速冷冻法制备的纤维素/CNT 气凝胶和 He 等^[94]通过一步冻干工艺制备的废棉基气凝胶,其热导率均低于 0.04 W/(m·K)。更精巧的策略是将气凝胶作为一种超低热导的声子玻璃基体,与电子晶体般的高性能热电材料进行复合。Lan 等^[95]将硅酸盐气凝胶作为填料引入 Bi_2Te_3 基热电材料中,显著降低了其晶格热导率,从而使 p 型材料的 ZT 在 550 K 时达到了 1.69。同样,Zhao 等^[96]采用电子印刷技术通过 CNT 与硅酸盐气凝胶共掺杂 Bi_2Te_3 ,也实现了 ZT 的显著提升。

4.2 多功能集成与器件应用

通过对电子和声子输运的协同调控,气凝胶

基热电材料及其器件的性能取得了显著突破。在高温应用方面,Nie 等^[2]采用冷冻干燥法制备的石墨气凝胶,在 923 K 时获得了 0.036 的峰值 ZT 。在室温柔性器件方面,Yin 等^[97]通过结合电化学聚合、液氮淬火和冷冻干燥制备的聚苯胺(polyaniline, PANI)/单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotubes, SWCNT)复合气凝胶,其室温 ZT 估算可达 0.95,展现了巨大的应用潜力。将这些高性能材料器件化是实现应用的关键。如图 9 所示,Li 等^[98]将 25 个聚 3,4-乙撑二氧噻吩(PEDOT):聚苯乙烯磺酸盐(polystyrene sulfonate, PSS)/SWCNT 复合热电气凝胶单元串联组成热电器件,在 300 K 温差下实现了 400 μW 的最大输出功率,可用于高温废热收集。Zhao 等^[99]则以各向异性 CNT/PEDOT 气凝胶构建了垂直温差发电机,能够高效收集低品位热,在 1 kW/m² 光照下即可输出 6.18 mV 电压,展现了其在物联网节点供能方面的潜力。

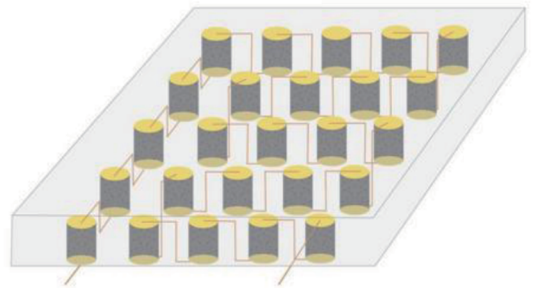


图 9 由 25 个气凝胶串联组成的热电器件^[98]

Fig. 9 Thermoelectric generator consisting of 25 aerogels in series^[98]

凭借其轻质、柔性和多孔结构,热电气凝胶在自供能传感和可穿戴设备领域展现出独特的优势。其多孔结构赋予了材料对外界刺激的灵敏响应能力,而热电效应则能将环境温差转化为电能,为传感器提供持续的电源。Zhang 等^[100]通过构筑 p-n 结或各向异性结构,实现无串扰的多参数传感,是智能消防服、健康监测等领域的理想候选材料。

在实现高效热电转换的基础上,研究者进一步致力于将热电功能与其他关键物理特性进行深度耦合,以拓展其在复杂场景下的应用边界。一个重要的方向是多能量形式的协同转换与收集。例如,Long 等^[101]通过诱导原位生长制备的 Bi_2Te_3 /碳气凝胶,巧妙实现了电磁吸收-热电转换的耦合,将被吸收的 2.45 GHz 微波能量直接转化为 9.87 μW 的电能,开辟了环境电磁能量回收的路径。另一个关键方向是与能量管理模块的集

成。为了应对动态的能量需求,能量存储单元被直接集成到气凝胶平台中。Yao 等^[102]通过三步法将 PANI 与酚醛气凝胶复合,在实现隔热与热电功能的同时,材料比电容达 420 F/g,构筑了隔热-发电-储能一体化的超级电容器。此外,相变材料(phase change materials, PCM)也被引入热电系统。Yu 和 Song^[103]的 rGO/石墨烯纳米片(graphene nanoplatelet, GNP)气凝胶基 PCM 体系,其加热与冷却时的热电能量收集效率分别达到 62.26% 和 39.96%,可直接驱动发光二极管(light emitting diode, LED)。通过功能序构还可以实现与安全防护功能的耦合。Wang 等^[104]通过引入阻燃热塑性聚氨酯,在实现高效电磁屏蔽和隔热的同时,使材料的峰值热释放率降低了 69.8%,显著提升了其在电子设备和建筑领域的安全性。这些前沿探索,推动气凝胶基热电材料从单一功能的能量转换体向能够执行复杂任务、适应多变环境的智能系统不断演进。

5 光热电协同转换

光热电协同转换是突破传统单结光伏理论效率极限、实现太阳能全光谱梯级利用的前沿技术路径。其能量转换路径在于,通过光热效应将无法被光伏利用的亚带隙光子转化为热能,继而利用热电效应将该热能转化为电能。然而,PTE 系统的高效协同受到光热与热电模块对热流管理需求固有冲突的制约。因此,通过功能序构在单一

体系内解耦并调控相互冲突的热流通道,已成为设计高性能 PTE 一体化材料与系统的核心挑战。

5.1 高效热流管理

PTE 系统的协同效应体现在对光生热流的精准管理上。功能序构通过设计不同的热传导路径,旨在最大化热电器件(thermoelectric generator, TEG)两端的有效温差。

一种关键策略是构筑高导热通路以增强热量运输。通过引入高导热的石墨烯等基元并构筑各向异性结构,可以将被光热层捕获的热量快速、低损耗地传导至热电器件的热端。例如,Shu 等^[105]制备的垂直取向石墨烯/CNFs 气凝胶/石蜡复合材料,其热导率高达 $15.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,在 $5 \text{ kW}/\text{m}^2$ 光照下,PTE 系统的输出电压达到 823.2 mV。同样,Wu 等^[106]通过浸泡膨胀、定向、冷冻干燥和碳化工艺以纤维素为碳源制备的 3D 定向碳气凝胶,在复合石墨烯后热导率达到 $1.17 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,其 PTE 系统的最大输出功率为 1.80 mW。

另一种策略是利用极致隔热以防止热量散失。通过引入低导热的隔热模块,可以有效抑制热电器件热端向环境的对流和辐射热损失,从而提升其温度。Kim C 和 Kim K^[107]将太阳能透过率高达 96.5% 的高透明气凝胶作为隔热窗口,搭配 CuO 纳米片吸收体(如图 10 所示),在有风环境下可将热电器件的输出功率提升 54% 以上。快速传导和有效隔热这两条路径共同构成了 PTE 系统中热流管理的核心协同策略。

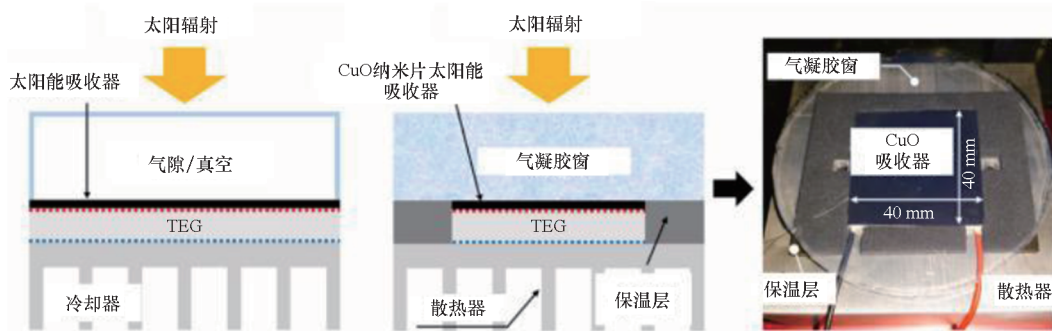


图 10 传统透明封装与气凝胶覆盖的太阳能热电系统示意图^[107]

Fig. 10 Schematic of traditional transparent-enclosed and aerogel-covered solar thermoelectric generator systems^[107]

5.2 时域能量管理

太阳能的间歇性是制约 PTE 系统实际应用的关键。为解决这一挑战,功能序构引入 PCM 作为热量缓冲与存储单元,当前研究的主流范式是构筑光热气凝胶/PCM/TEG 的三明治结构。其中气凝胶骨架作为光热转换层与 PCM 的封装载体,利用其纳米多孔结构产生的毛细作用力有效防止 PCM 泄漏。围绕这一核心范式,研究者通过对不

同气凝胶基体和 PCM 的选择与优化,构筑了多种高性能储能型 PTE 系统。例如,Gao 等^[108]通过聚磷酸铵诱导 MXene 气凝胶封装聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG),制备的复合材料光热转换效率达 90.2%,储热焓值为 $172.9 \text{ J}/\text{g}$,整个 PTE 系统在 $5000 \text{ W}/\text{m}^2$ 光照下,输出功率为 $40.86 \text{ W}/\text{m}^2$ 。同样以 MXene 为核心光热材料,Gao 等^[109]将其与木棉纤维复合,并封装 PEG-植

酸作为 PCM, 获得了 97.1% 的更高光热转换效率, 其 PTE 系统在 $5\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 光照下可输出 587 mV 的电压和 78.7 mA 的电流。

碳基气凝胶也是构筑此类系统的常用平台。Song 等^[110]通过异质组装结合同步碳化以钴纳米催化碳化的木棉纤维制备碳微管气凝胶, 其复合 PCM 的潜热达 $202.8\ \text{J}/\text{g}$, 整个系统的光热电转换效率达 0.51%, 且在 2 000 次热循环后性能依然稳定。He 等^[111]通过水热还原和热退火过程制备银纳米颗粒/石墨烯复合气凝胶负载石蜡的太阳能-热转换效率 92.62%、电-热转换效率为 95.19%, 太阳能-热-电转换输出电压为 200.5 mV, 实现高效光热电多模式转换与储能。Yan 等^[112]采用真空辅助浸渍结合冷冻干燥技术将 CNF/羧基化多壁碳纳米管(carboxylated multi-walled carbon nanotubes, CMWCNTs)垂直气凝胶嵌入环氧树脂(epoxy resin, EP)制备 EP/CCA₈₀ 复合材料, 实现了 200 ~ 2 500 nm 宽光谱吸收, $1.0\ \text{kW}/\text{m}^2$ 下光热转换效率为 54.35%、稳定温度为 93.2 °C, 耦合 TEG 后温差为 25.3 °C、输出电压为 160.29 mV, 可驱动小风扇 193 min, 实现高效光热电转换。聚合物基气凝胶则为系统提供了更灵活的设计空间。Han 等^[113]采用化学聚合和物理渗透法以强吸光的 PPy 气凝胶封装 PEG, 获得光热转换效率达 86%、熔化焓为 $142.4\ \text{J}/\text{g}$ 的稳定复合材料, 在 $2\ 500\ \text{W}/\text{m}^2$ 光照下, PTE 系统可输出 318 mV 的电压。

这些储能型 PTE 系统显著提升了综合性能与实用性, 保证了高效的即时能量转换。如前述工作所示, 多数系统在光照下可产生数百 mV 的电压和数十 W/m^2 的输出功率。此外, PCM 赋予了系统持续的能量输出能力。Niu 和 Yuan^[114]的研究显示, 其 PTE 系统在光驱动下输出电压为 80 mV, 而在无光、仅靠 PCM 存储的热能驱动下, 仍能稳定输出 55 mV 的电压。Wang 等^[115]的系统同样能够将存储的热能用于持续驱动电子风扇旋转 5 min, 充分证明了该策略在实现全天候、长寿命能量供应方面的巨大潜力。

5.3 多功能耦合

在实现高效能量转换的基础上, 研究者进一步致力于将 PTE 系统与其他重要功能进行深度耦合, 以拓展其在复杂场景下的应用边界。一个重要的方向是与安全防护功能的集成。考虑到 PTE 系统常用于建筑集成或可穿戴设备, 其安全性至关重要。例如, Jiang 等^[116]以海泡石-明胶-石墨烯构筑了 PTE 系统, 利用海泡石纳米棒

的本征属性, 赋予了整个系统优异的阻燃性能。这种一体化设计, 在保证高能量转换与存储的同时, 极大地提升了系统在实际应用中的可靠性与安全性。另一个前沿方向是实现能量与其他资源的协同产出。Luo 等^[117]将 PTE 系统与太阳能海水淡化技术耦合, 利用 PTE 系统输出的电能, 为淡化过程中的电容去离子等环节供能, 实现了电能-淡水的协同产出, 为解决全球能源和水资源双重危机提供了集成策略。

通过引入新的物理场, 可以实现多物理场调控的 PTE 转换。Shi 等^[118]通过在复合气凝胶中引入磁性 CoFe_2O_4 纳米颗粒, 构筑了能够在交变磁场下进一步提升光热电转换输出的系统。这种磁场增强的 PTE 转换, 为通过外部场主动、动态地调控能量转换效率开辟了新思路。同样值得关注的是 Lin 等^[119]设计的 Janus 结构气凝胶阴极, 通过光热与光电效应的协同, 显著增强了电催化活性。这些前沿探索, 正推动着气凝胶基 PTE 系统从静态的能量转换器件, 向能够主动响应环境、执行复杂任务的智能材料系统不断演进。

6 总结、挑战与展望

6.1 总结

面对能源领域对高效转换与多功能集成的需求, 传统材料因导电与导热等物理属性之间的相互制约而面临性能瓶颈。本文阐述了以功能序构为核心的设计策略, 探讨了纳米多孔气凝胶是实现光热电高效转换的优势平台。这一策略旨在从基元设计出发, 通过对材料内部能量载流子输运通道的跨尺度解耦与调控, 突破现有性能瓶颈。

基于此框架, 本文综述了气凝胶在几大领域的应用进展。在光热转换方面, 通过宽谱吸光基元与多孔结构的协同序构, 实现从高效固态升温到界面流体相变的能量管理, 并延伸至光谱选择性调控。在光电与热电转换方面, 利用导电基元的网络设计, 气凝胶不仅作为光伏器件中的高效传输层, 更在热电材料中实现热电输运参数的协同优化, 显著提升了热电性能。在光热电协同转换方面, 通过构筑储能型与多功能耦合型系统, 实现对太阳能的分级利用与存储。综上所述, 功能序构作为一种系统性的设计方法, 可高效调控材料内部复杂的能量流, 为下一代高性能材料的开发提供理论与实践基础。

6.2 挑战

尽管基于气凝胶的光热电转换材料已取得显

著进展,但要实现从实验室到工程化应用的跨越,仍面临多重挑战。首先是多物理场解耦的极限问题,特别是在热电协同转换系统中,如何在保持气凝胶超低热导率的同时实现高电导率与能量高载流子迁移率,仍是物理上的巨大障碍。其次是界面工程与稳定性问题,气凝胶的高孔隙率虽然有利于光捕获与隔热,但也导致了其与电极或相变材料接触时的界面电阻增大及结构不稳定性。在湿热、光照及热循环等严苛工况下,如何保持微观结构的长期稳定性是决定其使用寿命的关键。此外,规模化制造及成本也是不可忽视的问题,现有的精细制造手段往往成本高昂且难以放大规模,亟须开发低成本、大面积的连续化制造工艺。

6.3 展望

气凝胶基光热电材料的未来发展应聚焦于多能量载流子的协同调控。研究目标应超越单一的能量转换形式,在同一体系内实现多种能量载流子的同步协同调控,例如开发能同时响应太阳光谱与环境废热,并耦合水蒸发发电的全能型气凝胶,以实现能量利用效率的最大化。而且,人工智能驱动的逆向设计应成为研发的重要范式,借助高通量计算与机器学习建立结构与效能的映射关系,从期望的性能指标出发逆向推导最优基元组合与孔隙结构,替代传统的试错式研发以加速材料开发进程。此外,气凝胶需朝着智能化方向演进,通过引入动态化学键或刺激响应分子赋予材料环境适应能力,使其能根据光照、温度或湿度变化主动调节孔径、透光率或导电性,最终演变为具备自适应、自修复的智能物质系统。

参考文献 (References)

- [1] REN J F, HUANG X, SHI J J, et al. Transparent, robust, and machinable hybrid silica aerogel with a "rigid-flexible" combined structure for thermal insulation, oil/water separation, and self-cleaning [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 623: 1101–1110.
- [2] NIE Y N, HU Y, XIN N, et al. Cost-effective graphite aerogel for high-temperature thermoelectrics: synergizing ultra-high electrical conductivity and thermal insulation [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 697: 137926.
- [3] CHEN G. *Nanoscale energy transport and conversion: a parallel treatment of electrons, molecules, phonons, and photons* [M]. New York: Oxford University Press, 2005.
- [4] CHEN G F, CHEN J, JIANG Z L, et al. Non-equilibrium thermal transport study in steady state GaN MISHEMT channel layer based on electron Monte Carlo and phonon BTE [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 201: 109042.
- [5] 马浩然, 崔升, 宋梓豪. 气凝胶建筑保温节能材料的应用研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2025, 44(9): 835–845.
- [6] MA H R, CUI S, SONG Z H. Research progress on the application of aerogel in building insulation and energy-saving material [J]. *Materials China*, 2025, 44(9): 835–845. (in Chinese)
- [7] XIA Y X, QIN H S, TONG W H, et al. Ultra-stiff yet super-elastic graphene aerogels by topological cellular hierarchy [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(7): 2417462.
- [8] SUN C L, TANG G H, YANG R, et al. Investigation of energy-efficient and ultraviolet-resistant multifunctional composite silica aerogel for sustainable lunar base construction [J]. *Acta Astronautica*, 2025, 233: 344–359.
- [9] 邵岩, 崔升, 方显力, 等. SiO₂ 气凝胶的制备及其涂层的隔热应用研究进展 [J]. *化工新型材料*, 2025, 53(5): 243–247.
- [10] SHAO Y, CUI S, FANG X L, et al. Research progress in the preparation of SiO₂ aerogel and its thermal insulation application in coating [J]. *New Chemical Materials*, 2025, 53(5): 243–247. (in Chinese)
- [11] WORDSWORTH R, KERBER L, COCKELL C. Enabling martian habitability with silica aerogel via the solid-state greenhouse effect [J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(10): 898–903.
- [12] 徐琛, 董蕾, 朱伟明, 等. 氧化铝复合气凝胶的制备及其特性研究 [J]. *材料开发与应用*, 2025, 41(2): 78–83.
- [13] XU C, DONG L, ZHU W M, et al. Preparation and properties of alumina-based aerogel composite [J]. *Development and Application of Materials*, 2025, 41(2): 78–83. (in Chinese)
- [14] PENG F, JIANG Y G, FENG J, et al. Foreign element doping and thermal stability of alumina aerogels [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, 105(3): 2288–2299.
- [15] TALEGHANI M S, TABRIZI N S, SANGPOUR P. Enhanced visible-light photocatalytic activity of titanium dioxide doped CNT-C aerogel [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 179: 162–174.
- [16] YUVARAJA G, WEN C T, HUANG S Y, et al. Recent advances on TiO₂ based hybrid aerogels for photocatalytic degradation of dyes: a review [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2025, 179(Part 1): 114649.
- [17] 欧金松, 邵烨华, 曹胜彬, 等. 纤维素纳米纤维的制备、性能及纺织领域应用 [J]. *纺织科学与工程学报*, 2025, 42(1): 130–136.
- [18] OU J S, SHAO Y H, CAO S B, et al. Preparation, properties and applications in textile field of cellulose nanofibers [J]. *Journal of Textile Science & Engineering*, 2025, 42(1): 130–136. (in Chinese)
- [19] POULOSE A, MATHEW A, MAJI P K, et al. Eggshell powder-based eco-friendly cellulose nanofiber aerogels with excellent thermal insulation, superior flame retardancy, and exceptional mechanical durability [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025, 142(48): e57885.
- [20] 杨光, 金钊, 闫静. 芳纶纳米纤维/碳纳米管复合气凝胶传感器的制备及其性能 [J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(5): 1–7.
- [21] YANG G, JIN Z, YAN J. Preparation and performances of aramid nanofiber/carbon nanotube composite aerogel sensor [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2024,

- 43(5): 1–7. (in Chinese)
- [17] LI Y, MA B, ZHANG R B, et al. Mechanically strong, thermal-insulated, and ultralow dielectric polyimide aerogels with adjustable crosslinking methods [J]. *Polymer*, 2022, 253: 125035.
- [18] 付宁宁, 谢绍兴, 周禄军, 等. 电纺碳纳米纤维/石墨烯气凝胶薄膜的可控制备与电磁屏蔽性能研究[J]. *材料导报*, 2023, 37(24): 35–39.
- FU N N, XIE S X, ZHOU L J, et al. Controllable preparation of electrospun carbon fibers/graphene films and their electromagnetic interference shielding [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(24): 35–39. (in Chinese)
- [19] WANG X W, ZHAO C, LI C P, et al. Progress in MXene-based materials for microwave absorption [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 207–225.
- [20] LI J, HU X N, PAN Y, et al. Mechanically robust and thermal insulating silica/aramid nanofiber composite aerogel fibers with dual networks for fire-resistant and flexible triboelectric nanogenerators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2410940.
- [21] SUN J H, ZHANG Y T, WANG Y F, et al. Cryopolymerization-enabled superelastic and thermomechanically robust silica-sheathing nanofibrous aerogels for solar-thermal regulatory cooling [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(31): 2425527.
- [22] GAO Q, QIN J B, GUO B R, et al. High-performance electromagnetic interference shielding epoxy/Ag nanowire/thermal annealed graphene aerogel composite with bicontinuous three-dimensional conductive skeleton [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 151: 106648.
- [23] ZHANG S, WU F S, HU F Y, et al. Cross-dimensional assembly of MXene/SiO₂/KNF composite aerogels for radar and infrared stealth [J]. *Materials Horizons*, 2025, 12(17): 6862–6874.
- [24] TANG G H, BI C, ZHAO Y, et al. Thermal transport in nano-porous insulation of aerogel: factors, models and outlook [J]. *Energy*, 2015, 90(Part 1): 701–721.
- [25] YANG Y H, HE Q, CHEN P, et al. Review: research progress of cellulose-based directional frozen aerogels [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(38): 17297–17325.
- [26] LIU J, BUAHOM P, LU C, et al. Microscopic revelation of the solid-gas coupling and Knudsen effect on the thermal conductivity of silica aerogel with inter-connected pores [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 21034.
- [27] LIANG Y Y, DING Y F, LIU Y C, et al. Modeling microstructure effect on thermal conductivity of aerogel-based vacuum insulation panels [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2020, 41(9/10): 882–895.
- [28] LIU F M, LI G N, LI H, et al. Biomass-derived carbon-based electrocatalysts with broad solar-spectrum absorption for photothermal-enhanced water splitting at high current density [J]. *Carbon*, 2025, 244: 120659.
- [29] WANG T M, SI Q L, HU Y, et al. Silica aerogel composited with both plasmonic nanoparticles and opacifiers for high-efficiency photo-thermal harvest [J]. *Energy*, 2023, 265: 126371.
- [30] YALCIN R A, MCNEIL P E, BHANAWAT A, et al. Dependent scattering and fractal microstructure determine the transparency of aerogel monoliths [J]. *APL Photonics*, 2025, 10(4): 046103.
- [31] MERILLAS B, MARTÍN-DE LEÓN J, VILLAFANE F, et al. Optical properties of polyisocyanurate-polyurethane aerogels: study of the scattering mechanisms [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1522.
- [32] GUO J F, TANG G H, JIANG Y G, et al. Inhibited radiation transmittance and enhanced thermal stability of silica aerogels under very-high temperature [J]. *Ceramics International*, 2021, 47(14): 19824–19834.
- [33] HOSSEINI H, KOKABI M, MOUSAVI S M. BC/rGO conductive nanocomposite aerogel as a strain sensor [J]. *Polymer*, 2018, 137: 82–96.
- [34] CAO X Y, ZHANG J, CHEN S W, et al. 1D/2D nanomaterials synergistic, compressible, and response rapidly 3D graphene aerogel for piezoresistive sensor [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(35): 2003618.
- [35] PAROŃ O. Fotokataliza i materiały kompozytowe TiO₂/SiO₂ w oczyszczaniu środowiska [J]. *Nauki Inżynierskie i Technologie*, 2024, 40: 139–153.
- PAROŃ O. Photocatalysis and TiO₂/SiO₂ composite materials in environmental purification [J]. *Engineering Sciences and Technologies*, 2024, 40: 139–153. (in Polish)
- [36] 龙海依, 田响宇, 张博. 纤维增强 SiO₂ 气凝胶的高热稳定性疏水改性 [J]. *耐火材料*, 2025, 59(5): 432–437, 460.
- LONG H Y, TIAN X Y, ZHANG B. Hydrophobic modification of fiber reinforced SiO₂ aerogels for high thermal stability [J]. *Refractories*, 2025, 59(5): 432–437, 460. (in Chinese)
- [37] WANG Y M, LI H, XIE Y B, et al. Regulating microstructures of aerogels by controlling phase separation mechanism for improving specific surface area and energy harvesting [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 658: 772–782.
- [38] 顾依怡, 王子扬, 孙绍刚, 等. 冰模板法制备纳米纤维素气凝胶及其性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(增刊 2): 226–230.
- GU Y Y, WANG Z Y, SUN S G, et al. Preparation and properties of nanocellulose aerogel by ice template method [J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(Suppl 2): 226–230. (in Chinese)
- [39] SHAIK S, KUMARI JHA V, BAE G, et al. Flow-driven directional freeze-casting of graphene aerogels on tubular components for enhanced thermal energy management [J]. *Energy Conversion and Management*, 2025, 325: 119389.
- [40] TETIK H, WANG Y, SUN X, et al. Additive manufacturing of 3D aerogels and porous scaffolds: a review [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(45): 2103410.
- [41] XIANG P, TANG C M, MA K, et al. Highly efficient and robust oxygen vacancy-rich molybdenum trioxide aerogel evaporator for photothermal conversion and clean water generation [J]. *Desalination*, 2025, 594: 118281.
- [42] PAWAR A A, KIM H. Tunable polypyrrole-coated cellulose aerogel via in situ polymerization for high-performance solar-powered water purification: effects of porosity, photothermal conversion, and long-term stability [J]. *Desalination*, 2026, 617: 119452.
- [43] GUO J K, HOU C Y, ZHANG J, et al. Controllable fabrication and performance characterization of ultralight 3D

- fluffy fibrous aerogels with synergistic thermal insulation and photothermal conversion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 727 (Part 2): 138238.
- [44] ZHU L H, ZOU B Y, BING N C, et al. Bidirectional anisotropic bacterial cellulose/polyvinyl alcohol/MXene aerogel phase change composites for photothermal conversion enhancement [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 271: 112818.
- [45] LIU Y N, LI T, CHEN Y, et al. Biomimetic dictyophora-inspired RGO/MXene aerogel films for synergistically enhanced EMI shielding and photothermal conversion performance [J]. *Carbon*, 2025, 245: 120788.
- [46] WANG J W, BAO X N, YUAN M H, et al. Easy access to robust rigid SiO₂-based photothermal aerogel for enhanced solar interfacial evaporation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 353 (Part B): 128324.
- [47] HU B W, SHU D, ZHOU Y D, et al. Cellulose nanofiber-based aerogel with Janus wettability for superior evaporation performance and synergistic photocatalytic activities [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2025, 368 (Part 2): 124166.
- [48] ZHU J T, WANG Y Y, XU Y J, et al. Cellulose-rich photothermal wood aerogels via partially delignification-reactive black dyeing for interface evaporation of dye wastewater [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 316 (Part 1): 144655.
- [49] QU Y M, LU C L, ZHANG G F, et al. Interfacially synergistic photothermal enhancement for solar evaporation by palygorskite-carbon nanotube/chitosan aerogels [J]. *Desalination*, 2025, 616: 119413.
- [50] WANG D X, ZONG J L, DAI Y F, et al. Super-hydrophilic cellulose-based aerogel with designed hierarchical porous structure for efficient solar-driven interfacial evaporation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 377 (Part 2): 134372.
- [51] LIU X, ZHU Q Z, QIAN Y P, et al. Synergistic effect based on Ag/GO aerogel doped with ZnO in solar energy-driven interfacial evaporation [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 689: 162509.
- [52] KONG Y, YUE Q Y, HAN K, et al. Ammonium polyphosphate-mediated multi-source biomass-derived aerogel for enhanced solar-driven interfacial evaporation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160368.
- [53] ZHAO Y T, YANG F, SONG J L, et al. Bayesian-optimized infrared grating for tailoring thermal emission to boost thermophotovoltaic performance [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(12): 124904.
- [54] YU S L, CHEN Z H, LIAO W T, et al. Enhancing overall performance of thermophotovoltaics via deep reinforcement learning-based optimization [J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 136(2): 023101.
- [55] AN L, LI Z, GUO Z P, et al. Transparent thermal insulation ceramic aerogel materials for solar thermal conversion [J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(20): 4291–4295.
- [56] ZHAO L, BHATIA B, YANG S, et al. Harnessing heat beyond 200 °C from unconcentrated sunlight with nonevacuated transparent aerogels [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(7): 7508–7516.
- [57] YU S L, YU J S, CHEN Z H, et al. Ultrahigh visible-transparency, submicrometer, and polymer-free radiative cooling meta-glass coating for building energy saving [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(8): 3412–3423.
- [58] LI W H, LIN C J, MA W, et al. Transparent selective photothermal coatings for antifogging applications [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(5): 100435.
- [59] YANG H L, HUANG M Q, YANG M Y, et al. Precision solar spectrum filtering in aerogel windows via synergistic ITO-Ag nanoparticle doping for hot-climate energy efficiency [J]. *Gels*, 2025, 11(7): 553.
- [60] XI W, LEE Y J, YU S L, et al. Ultrahigh-efficient material informatics inverse design of thermal metamaterials for visible-infrared-compatible camouflage [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4694.
- [61] YU S L, ZHOU P, XI W, et al. General deep learning framework for emissivity engineering [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 291.
- [62] XIA Y J, YANG Z C, ZHANG Z, et al. Heterogeneous multi-scale ceramic aerogel with infrared/radar compatible stealth capability at high temperatures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 307: 112901.
- [63] XU B, WANG T, ZHAO C Y, et al. Self-cross-linked carbon-nanofiber-based aerogels for infrared stealth under extreme conditions [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8(8): 4151–4158.
- [64] YIN X Q, WANG Y Y, PANG N, et al. Ultralight, highly elastic ZrO₂/carbon fiber reinforced reduced graphene oxide aerogels with radar and infrared stealth capabilities [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 303: 112628.
- [65] PENG H L, CAI B, ZHANG Y, et al. Radar-terahertz-infrared compatible stealth coaxial silver nanowire@ carbon nano-cable aerogel [J]. *Angewandte Chemie*, 2025, 64(10): e202421090.
- [66] LI M Y, FANG C Q, CHENG Y L, et al. Designed VO₂/ANF/PVA aerogel composite material for adaptive infrared stealth and dynamic thermal regulation [J]. *Composites Communications*, 2025, 59: 102589.
- [67] SUI X W, LIAN Q S, HUO Q Q, et al. Hollow-structured elastic aerogel fibers enabling simultaneous EMI shielding, infrared stealth, and thermal management [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 694: 137668.
- [68] PINHEIRO G K, SERPA R B, DE SOUZA L V, et al. Increasing incident photon to current efficiency of perovskite solar cells through TiO₂ aerogel-based nanostructured layers [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 527: 89–94.
- [69] XIE Y H, CHENG J, LIU H C, et al. Co-Ni alloy@ carbon aerogels for improving the efficiency and air stability of perovskite solar cells and its hysteresis mechanism [J]. *Carbon*, 2019, 154: 322–329.
- [70] GU Z Y, GAO X D, LI X M, et al. Nanoporous TiO₂ aerogel blocking layer with enhanced efficiency for dye-sensitized solar cells [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 590: 33–40.
- [71] HAMANN T W, MARTINSON A B F, ELAM J W, et al. Aerogel templated ZnO dye-sensitized solar cells [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(8): 1560–1564.
- [72] LIU J, LIU J X, SHI F, et al. F/W co-doped TiO₂-SiO₂ composite aerogels with improved visible light-driven photocatalytic activity [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2019, 275: 8–15.

- [73] SERPA R B, PINHEIRO G K, MÜLLER D, et al. TiO₂ aerogel as interlock layer improves thermal stability in perovskite solar cells [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 613: 126067.
- [74] KOCAK D, TSOI K, TURKAY D, et al. Silica aerogel as rear reflector in silicon heterojunction solar cells for improved infrared response[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 258: 112430.
- [75] QIAN Y Q, TAN L, HE W T, et al. Octadecyl acrylate-based self-supporting elastic phase change framework materials for the enhancement of photovoltaic conversion efficiency[J]. *Green Chemistry*, 2024, 26(10): 5940–5953.
- [76] QI L Y, ZHANG H, YANG Y, et al. Coupled electron delocalization and multi-dimensional porosity engineering in TiO₂ hollow spheres-embedded carbon nanofiber aerogels for efficient photocatalytic aniline degradation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 515: 163690.
- [77] XUE J Q, WANG P, CHENG W, et al. Preparation and performance of aerogel-based BiOI/TiO₂ heterojunction photoelectrocatalytic electrodes [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 25(35): 23761–23769.
- [78] YANG X C, ZHAO J T. Aerogel for highly efficient photocatalytic degradation[J]. *Gels*, 2024, 10(2): 100.
- [79] LI M, QIU J H, XU J, et al. Cellulose/TiO₂-based carbonaceous composite film and aerogel for highly efficient photocatalysis under visible light [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(31): 13997–14003.
- [80] LI L, FENG T, LIU K W, et al. Research on 3D graphene aerogel-supported Bi₂MoO₆ composites [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2026, 43: e00286.
- [81] DU B B, LEI Y, WANG Y Q, et al. Fabrication of CdSSe-decorated graphene aerogel with enhanced photoelectric properties[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2024, 6(2): 828–838.
- [82] ZHANG C J, SI S H, YANG Z P. Design of molecularly imprinted TiO₂/carbon aerogel electrode for the photoelectrochemical determination of atrazine [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 211: 206–212.
- [83] XUE Z C, RU Y Y, WANG Z Z, et al. A 3D-printed freestanding graphene aerogel composite photocathode for high-capacity and long-life photo-assisted Li-O₂ batteries[J]. *Nanoscale*, 2023, 15(36): 14877–14885.
- [84] SI S K, PARIAS S, KARAN S K, et al. In situ-grown organolead bromide perovskite-induced electroactive γ -phase in aerogel PVDF films: an efficient photoactive material for piezoelectric energy harvesting and photodetector applications[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(13): 7214–7230.
- [85] YANG J, HE J B, ZOU X B, et al. Multi-time scale photoelectric behavior in facile fabricated transparent and flexible silicon nanowires aerogel membrane [J]. *Nano Research*, 2022, 15(2): 1609–1615.
- [86] LUO S H, LIAO S C, WANG C F, et al. Photon-enhanced thermionic emission solar cells based on boron-doped graphene/carbon nanosphere composite aerogel photocathode material[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(16): 4473–4479.
- [87] ZHAO X Y, SUN X H, WU W, et al. rGO aerogel embedded with organic-inorganic hybrid perovskite for lightweight broadband electromagnetic wave absorption [J]. *Nano Research*, 2024, 17(11): 10196–10207.
- [88] LI S Z, LI Z, XU D Y, et al. Strong concentration gradient effect and weak solvation effect in thermopower enhancement in K₃Fe(CN)₆/K₄Fe(CN)₆ aqueous electrolyte with ethanol addition [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152806.
- [89] HAN Y, ZHANG J, HU R, et al. High-thermopower polarized electrolytes enabled by methylcellulose for low-grade heat harvesting [J]. *Science Advances*, 2022, 8(7): eab5318.
- [90] ZHOU J H, AO S, LU K, et al. Superhydrophobic MXene/CNTs/oxidized sodium alginate/collagen composite aerogel for electromagnetic interference shielding, thermal insulation, and Joule heating [J]. *Diamond and Related Materials*, 2025, 153: 112032.
- [91] YANG Y C, YAN W J, ANAND A, et al. 3D N-doped crumpled graphene aerogels for thermoelectric energy harvesting and highly sensitive piezoresistive sensing [J]. *Carbon*, 2025, 232: 119827.
- [92] OKADA N, SATO K, YOKOO M, et al. Thermoelectric properties of poly(3-hexylthiophene) nanofiber aerogels with a giant seebeck coefficient [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021, 3(1): 455–463.
- [93] GNANASEELAN M, CHEN Y A, LUO J J, et al. Cellulose-carbon nanotube composite aerogels as novel thermoelectric materials [J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 163: 133–140.
- [94] HE X Y, LIU M Y, CAI J X, et al. Waste cotton-derived fiber-based thermoelectric aerogel for wearable and self-powered temperature-compression strain dual-parameter sensing[J]. *Engineering*, 2024, 39: 235–243.
- [95] LAN T W, SU K H, CHANG C C, et al. Enhancing the figure of merit in thermoelectric materials by adding silicate aerogel[J]. *Materials Today Physics*, 2020, 13: 100215.
- [96] ZHAO K, LIU C, SHAO T, et al. Enhanced thermoelectric performance of Bi₂Te₃ by carbon nanotubes and silicate aerogel co-doping toward ocean energy harvesting [J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 23: 100476.
- [97] YIN S X, WU X, WANG R Y, et al. Composite aerogel of electropolymerized polyaniline and SWCNTs with high thermoelectric performance[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(8): 2200094.
- [98] LI H X, DING Z F, ZHOU Q, et al. Harness high-temperature thermal energy via elastic thermoelectric aerogels[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 151.
- [99] ZHAO X, CHEN Z H, ZHUO H, et al. Thermoelectric generator based on anisotropic wood aerogel for low-grade heat energy harvesting [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 120: 150–158.
- [100] ZHANG C, LIU X, HAN S B, et al. High-performance n-type organic thermoelectric aerogels toward flexible energy harvesting and sensing devices[J/OL]. *Advanced Electronic Materials*, 2025: 2400824 (2025–01–07) [2025–11–20]. <https://doi.org/10.1002/aelm.202400824>.
- [101] LONG H, QIAN Y X, GANG S F, et al. High-performance thermoelectric composite of Bi₂Te₃ nanosheets and carbon aerogel for harvesting of environmental electromagnetic energy[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(1): 1819–1831.
- [102] YAO R, YAO Z J, ZHOU J T. Novel interpenetrating 3D network polyaniline/phenolic aerogel with combined thermal

- and electrical performances[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(27): 45953.
- [103] YU C B, SONG Y S. Analysis of thermoelectric energy harvesting with graphene aerogel-supported form-stable phase change materials[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(9): 2192.
- [104] WANG H R, CHEN K X, SHI Y Q, et al. Flame retardant and multifunctional BC/MXene/MSiCnw/FRTPU aerogel composites with superior electromagnetic interference shielding via “Consolidating” method [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145904.
- [105] SHU C, ZHAO H Y, ZHAO S, et al. Highly thermally conductive phase change composites with anisotropic graphene/cellulose nanofiber hybrid aerogels for efficient temperature regulation and solar-thermal-electric energy conversion applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 248: 110367.
- [106] WU G Z, BING N C, LI Y F, et al. Three-dimensional directional cellulose-based carbon aerogels composite phase change materials with enhanced broadband absorption for light-thermal-electric conversion[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 256: 115361.
- [107] KIM C, KIM K. Enhancement of solar thermoelectric power generation by optical and thermal management with highly transparent aerogel window[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 230: 111224.
- [108] GAO H Q, MA H Y, CUI J J, et al. APP induced self-assembly of MXene aerogel composite phase change materials to integrate structural stability, flame retardancy, photo-thermal-electric conversion[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 137: 118606.
- [109] GAO H Q, MA H Y, CUI J J, et al. Natural cellulose-based kapok fiber composite aerogel phase change materials with flame retardancy, fire warning, thermal energy storage and thermoelectric conversion [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 319(Part 4): 145740.
- [110] SONG S K, WANG R Z, LV L D, et al. 3D-architected carbon microtubule aerogel based phase change composite for multi-field-responsive high-efficiency energy conversion[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 305: 112721.
- [111] HE M, LU J T, SHI C L, et al. Multi-stimuli-responsive aerogels composed of Ag nanoparticle-coated graphene nanosheets for energy storage and conversion [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(18): 16503 – 16514.
- [112] YAN J L, SUN Y, JIA T, et al. Vertically aligned cellulose nanofiber/carbon nanotube aerogel-infused epoxy nanocomposites for highly efficient solar-thermal-electric conversion[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 214: 313 – 321.
- [113] HAN S H, XIONG F, QIN M L, et al. Polyethylene glycol/polypyrrole aerogel shape-stabilized phase change material for solar-thermal energy storage and thermoelectric power generation [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 268: 112745.
- [114] NIU Z X, YUAN W Z. Highly efficient thermo-and sunlight-driven energy storage for thermo-electric energy harvesting using sustainable nanocellulose-derived carbon aerogels embedded phase change materials [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(20): 17523 – 17534.
- [115] WANG C M, HUANG Z, WANG T J, et al. Light-thermal-electric energy conversion based on polyethylene glycol infiltrated carboxymethylcellulose sodium-derived carbon aerogel [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 267: 115948.
- [116] JIANG Y N, LIN F K, GUO Z J, et al. Performance study of an environmentally friendly, flame-retardant, and sustainable energy storage composite phase change material based on sepiolite-gelatin-graphene aerogel [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 117: 116207.
- [117] LUO G P, WU Y T, WANG J, et al. Solar-driven gradient aerogel composites for coupled seawater desalination, thermoelectric power generation, and dual-mode camouflage[J/OL]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e23443 (2025 – 11 – 10) [2025 – 11 – 20]. <https://doi.org/10.1002/adfm.202523443>.
- [118] SHI T, LIU H, WANG X D. Unidirectionally structured magnetic phase-change composite based on carbonized polyimide/kevlar nanofiber complex aerogel for boosting solar-thermo-electric energy conversion [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(8): 10180 – 10195.
- [119] LIN Y, YANG F, ZHONG L F, et al. Photoelectric/photothermal synergy activation in floating aerogel cathode breaks neutral triphase reaction barriers for high-efficiency full-spectrum-responsive seawater batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(34): e202508644.