

特色专题

辐射制冷能否成为“双碳”目标的关键节能技术？

刘翔宇^{1,2,3}, 李鹏里^{1,2,3}, 黄兴溢^{1,2,3,4*}

摘要 全球气候变暖导致极端高温天气频发,建筑与设备制冷能耗持续上升,制冷用电已成为电网负荷增长的重要驱动因素之一。在“双碳”目标背景下,发展低能耗、绿色降温技术成为关键挑战。辐射制冷作为一种基于地-宇宙红外辐射交换的被动冷却技术,因其无额外能耗、零碳排放的优势而备受关注。综述相关研究后提出3个核心观点:首先,尽管辐射制冷在建筑节能、光伏降温和电力设备散热等领域具有潜在应用价值,但其实际工程效益可能被高估;其次,从实验室研究到产业化应用,主要障碍不仅涉及材料性能优化,还包括规模化制备工艺、长期耐候性及经济成本等现实问题;最后,缺乏统一的性能测试标准和认证体系,导致研究结果可比性不足,阻碍了产业和政策层面的推广应用。基于典型案例与实测数据,分析了辐射制冷在不同气候条件下及应用场景中的适用性与局限性,并探讨了关于光学性能测试、实际降温效果等相关争议。未来,辐射制冷的发展需突破单一材料优化的局限,推动跨学科协作:一方面需开发低成本、可规模化生产的新材料体系,另一方面应完善标准规范、政策激励和市场机制。唯有通过多维度协同创新,才能避免实验室成果与实际应用脱节,切实发挥辐射制冷在节能减排和可持续发展中的作用。

关键词 辐射制冷;设备散热;建筑节能;可持续性

近年来,全球气候变暖加剧,极端高温天气多发频发,人类社会对制冷的需求显著增长。相关统计显示,全球建筑空调能耗约占年度总用电量的10%。以中国为例,2025年入夏以来,华东地区的江苏、安徽、山东、河南、湖北等地电网负荷创历史新高。其中,江苏电网首次超过1.5亿kW,其最高负荷较春季均值增长近4000万kW,空调制冷用电贡献约90%的

增量负荷^[1]。华东、华中地区持续高温已接近或突破中国历史极值,预计将推动全国电力负荷持续攀升。现阶段,碳排放屡创新高,加剧气候变化并形成恶性循环(图1(a))。若不采取有效措施,预计2050年空间冷却能源需求将增长2倍以上,增速远超其他终端用能领域(图1(b))^[2]。为此,国家发展改革委员会、住房和城乡建设部于2024年联合印发《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》,明确以碳达峰碳中和目标为导向,全面提升建筑能效与低碳水平^[3]。此外,电网负荷激增与极端高温天气导致户外电力设施过热问题日益凸显,严重威胁用电安全。在全球气候治理关键节点,开发高效且低能耗的新型冷却技术是满足不

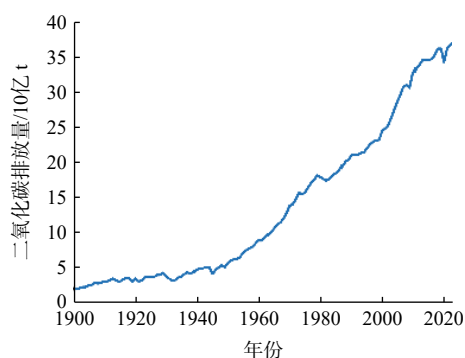
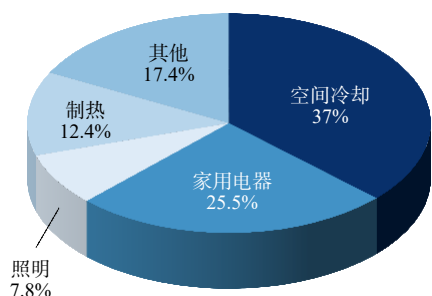
1. 上海交通大学高分子科学与工程系,上海 200240
2. 上海市电气绝缘与热老化重点实验室,上海 200240
3. 聚烯烃催化技术与高性能材料全国重点实验室,上海 200240
4. 上海交通大学电气工程学院,上海 200240

收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2025-10-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(52425303); 国家自然科学基金创新研究群体项目(52421006)

作者简介: 刘翔宇, 博士研究生, 研究方向为被动散热材料, 电子信箱: liuxiangyu@sjtu.edu.cn; 黄兴溢(通信作者), 教授, 研究方向为先进电工材料, 电子信箱: xyhuang@sjtu.edu.cn

引用格式: 刘翔宇, 李鹏里, 黄兴溢. 辐射制冷能否成为“双碳”目标的关键节能技术? [J]. 科技导报, 2026, 44(8): 34-45; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.09.00012

(a) 1900—2023 年CO₂排放量变化趋势

(b) 预计到 2050 年全球建筑电力需求增长比例

图1 CO₂ 排放变化趋势和建筑冷却能耗增长预测

断增长的冷却需求,推动《巴黎协定》提出的 1.5℃ 全球温升控制目标和“3060”目标的关键举措。

在这一背景下,辐射制冷被视为潜力突出的新兴技术^[4-5]。它能够依托材料的光学特性,将热量以红外辐射的形式直接散向低温外层空间,实现零能耗的被动冷却。与传统空调相比,其不依赖电力输入,也不产生温室气体排放。如图2所示,Web of Science 数据库中“辐射制冷”主题的论文发表量及被引频次均呈快速增长趋势,且该技术已被公认为最具潜力的被动冷却方案之一。然而,该技术的工程化前景仍面临关键质疑。本文将围绕以下 3 个核心问题展开讨论:一是辐射制冷在建筑与设备散热中展现出的降温能力如何;二是从实验室材料走向工程应用,最大阻碍

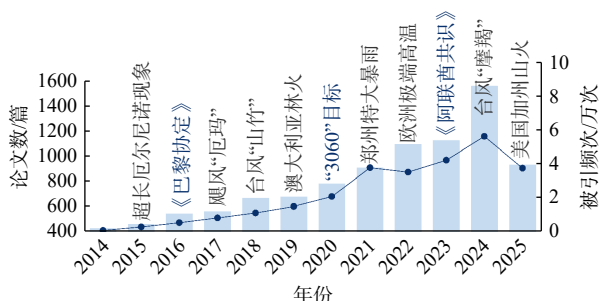


图2 “辐射制冷”主题论文发表量及被引频次变化趋势

不仅在于材料性能本身,还涉及规模化工艺、长期耐候性与成本可控性;三是性能评价方法与测试标准缺失,导致结果可比性差,阻碍技术迭代。通过对典型案例、实际数据和争议观点的梳理,尝试为辐射制冷的发展路径提供跨学科的视角与理性判断。

1 辐射制冷基本原理

地表常温物体的辐射峰值位于 8~13 μm 大气透明窗口波段,该波段辐射可穿透大气层直达温度约 3 K 的宇宙空间。根据斯特藩-玻尔兹曼定律计算,由于大气向下热辐射的存在,地表物体在环境温度下的辐射冷却功率上限约为 150 W·m⁻²^[4]。然而,地表日间太阳辐射(0.25~2.5 μm 波段)功率可达 1000 W·m⁻²。这种能量失衡导致无外部能量输入时,大多数物体因吸收太阳辐射而难以维持低于环境温度的稳态。近年来,通过光谱调控技术研发的新型辐射制冷材料实现了太阳光谱波段的高反射与大气透明窗口波段的高发射率,成功产生净辐射制冷功率,实现了亚环境温度冷却^[4]。简而言之,在大气透明窗口波段具有高发射率,而在阳光辐射波段具有高反射率是辐射制冷材料实现制冷效果的基本要求。图3展示了地表物体的热辐射传输过程。



图3 地表物体热辐射过程示意

2 辐射制冷在建筑与设备应用中展现出的降温能力

基于光谱调控技术,研究人员已开发出多种可在太阳辐照下实现亚环境温度冷却的辐射制冷材料。图4统计了近 10 年发表于《Science》和《Nature》的

辐射制冷研究论文的主题,显示出该领域的蓬勃发展^[2,6-18]。本文主要介绍目前辐射制冷材料通用的设计策略,包括:有序结构、随机多孔结构、复合体系和混

合式被动散热材料。通过分析各类材料的设计原理与性能特征,梳理技术发展路径,评估各类材料的制冷效果。



图4 近10年发表于《Science》和《Nature》的辐射制冷研究论文的主题

2.1 有序结构

除材料固有光学特性外,微纳结构设计可进一步调控光与物质的相互作用,实现宽光谱范围内的精确光学调控。通过优化结构的几何参数(如形状、尺寸及周期),可独立调节材料在不同波段的反射、透射及发射特性,从而同时实现高太阳反射率与高红外发射率。例如,斯坦福大学范汕涸团队于2014年通过多层干涉结构实现了日间辐射制冷^[6]。该团队采用电子束蒸发沉积技术,在镀有200 nm银层的硅片上交替沉积7层特定厚度的二氧化铪(HfO₂)和二氧化硅(SiO₂)。该设计中,多层干涉结构与底部银层的高反射率共同作用,使材料在太阳光谱范围内的反射率提升至97%。同时,由于声子-极化激元共振效应,

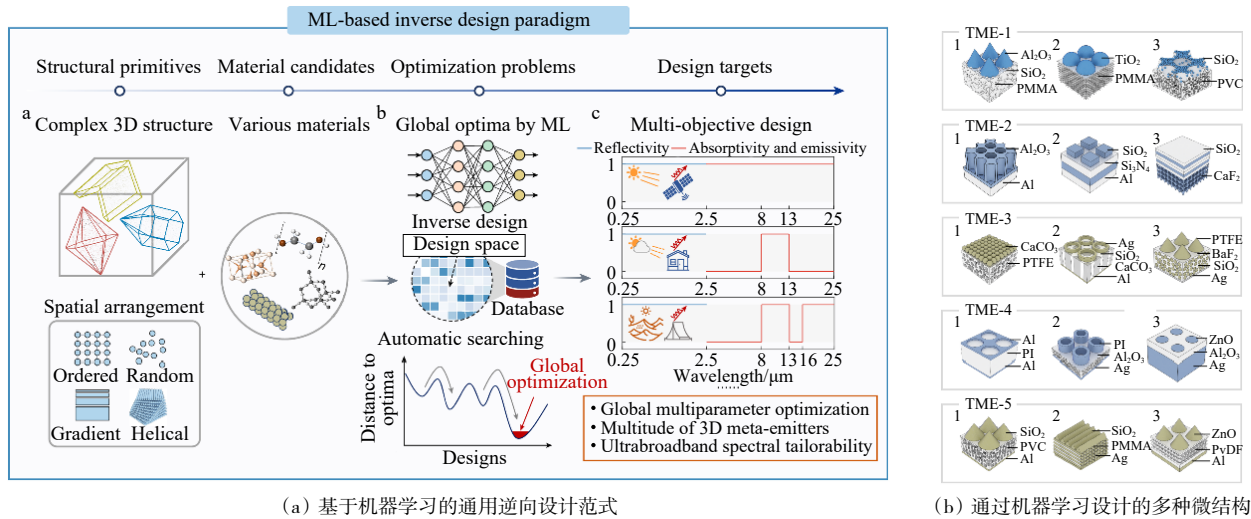
SiO₂和HfO₂在8~13 μm波长范围内表现出高发射率。户外实验表明,该多层结构冷却器可在强太阳辐照下维持低于环境温度4℃~5℃的稳态温度。

除光谱调控外,高度有序结构还可实现热辐射的角度选择性。考虑到建筑物、车辆及纺织品等实际应用场景,多数外表面为垂直方向,难以通过红外热发射实现有效冷却,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所李炜团队提出了一种分层设计选择性热发射器,其角度不对称特性实现了垂直表面的亚环境日间辐射制冷^[16]。团队设计的锯齿光栅由水平与倾斜表面构成:倾斜表面覆盖双层银夹着一层氮化硅(SiN),水平表面则覆盖单层银并叠加SiN。其中,银层在可见光-近红外波段提供高反射率,以满足太阳

反射率要求。同时,由于对地面热辐射波段的高反射率,倾斜表面最外层的银层可抑制向地面的热辐射。水平面的 SiN 层则因声子-极化激元共振具有高发射率。通过调节锯齿光栅的纵横比,可调控热发射的角度范围,从而实现光谱选择性与角度不对称的发射特性。实验表明,该发射器在垂直使用时仍能维持低于环境温度的稳态温度,且较传统宽角度辐射冷却器及商用白色涂料分别降低 4.3 和 8.9℃。

人工智能与机器学习的发展为有序结构辐射制冷材料的设计提供了高效工具,有望成为该领域的未来研究方向。上海交通大学周涵团队提出了一种基

于机器学习的优化范式,利用稀疏数据实现多参数协同设计,可生成超宽带或选择性热发射器(图 5(a)^[18])。该框架的核心包括:(1) 构建涵盖三维结构基元及其空间排列的数据库;(2) 筛选具有合适带隙、折射率及化学/热稳定性的材料;(3) 通过几何与材料组合实现灵活的光谱定制(图 5(b)^[18])。验证实验表明,机器学习指导制备的发射器光谱特性与设计目标高度吻合。该研究为三维纳米光子材料的全局优化提供了通用设计方法,通过扩展几何自由度与材料数据库推动了高性能辐射制冷材料的开发。



(a) 基于机器学习的通用逆向设计范式

(b) 通过机器学习设计的多种微结构

图5 机器学习辅助辐射制冷材料设计与开发

2.2 随机多孔结构

有序结构具有优异的辐射制冷性能,但其制备成本高、易被腐蚀,且难以形成与基底结合力强的涂层,应用受到很大限制。相比之下,随机多孔结构不具备有序性,其高阳光反射率的原理是:孔径匹配时,孔隙对阳光产生米氏散射效果,厚度较高且孔隙率较高时,随机多孔结构可有效阻挡阳光透过。

由于随机多孔结构不具有波段或角度选择性的发射特性,其红外发射光谱取决于基体材料。例如,哥伦比亚大学杨远团队采用相反转法制备分层多孔聚合物^[10]。首先将聚偏氟乙烯与六氟丙烯(poly(vinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene, P(VdF-HFP))物溶于丙酮(溶剂),并与水(非溶剂)混合形成前体溶液。干燥过程中,丙酮快速挥发导致 P(VdF-HFP)发生相分离,最终形成随机多孔薄膜或涂层(图 6(a)^[10])。

该结构通过孔隙反向散射阳光,同时 P(VdF-HFP)在大气透明窗口内高效辐射热量,因此厚度约 300 μm 的涂层实现了 96% 的太阳光反射率和 97% 的红外发射率。在强太阳辐照下,该涂层可实现约 6℃ 的亚环境温度降。此外,该方法兼容刷涂、浸涂、喷涂等工艺,适用于多种基底,并具备优异的耐候性。

香港城市大学曹之胤团队受白金龟甲虫(*Cyphochilus*)鳞片结构启发,采用烧结工艺制备多孔氧化铝辐射制冷陶瓷(图 6(b)^[13])。氧化铝具有较高折射率及宽带隙,在太阳波段吸收率低,并能与孔隙产生强散射效应。同时,Al—O 化学键的振动模式使其在大气透明窗口内形成高消光峰。该陶瓷在太阳波段的反射率达 99.6%,红外发射率为 96.5%。户外测试中,其平均降温为 4.3℃,中午冷却功率超过 130 W·m⁻²,接近辐射制冷理论极限。值得注意的是,高孔隙率有助

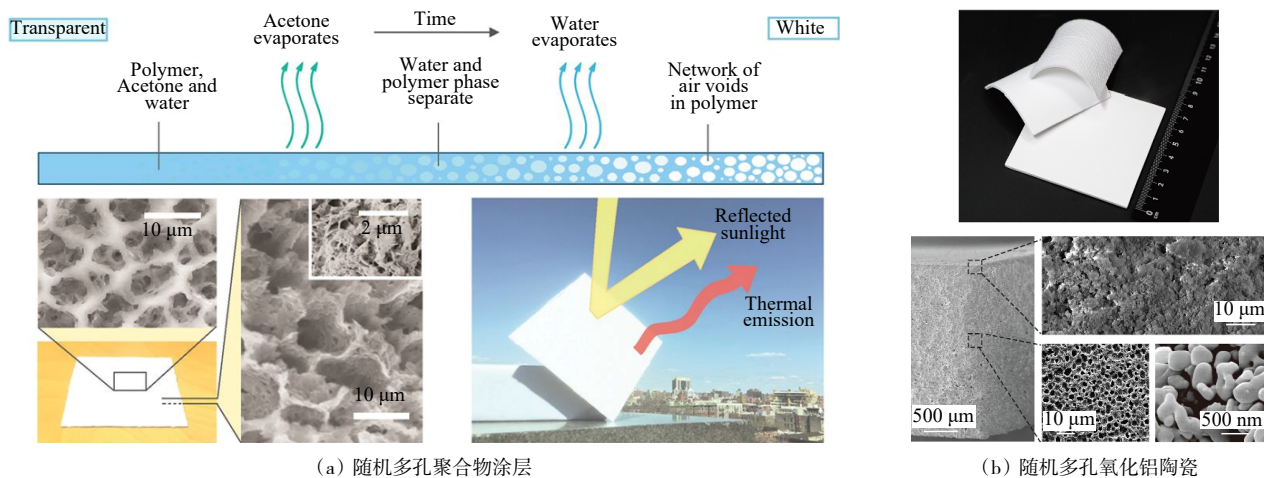


图6 随机多孔结构辐射制冷材料

于提高材料的隔热性,使其实现更低的温度,但限制了对高温物体(例如电子和电力设备)的辐射散热功率。因此,这类材料更适用于建筑、仓储等领域^[19]。

2.3 复合材料体系

通过在基体中引入尺寸与形态适宜的无机介电颗粒,可构建具有随机结构的复合材料。该类材料凭借丰富的介电颗粒-聚合物界面,能够对太阳光产生显著的米氏散射效应。

基体材料与介电颗粒本身的光学及热学特性将共同决定复合材料的综合性能。科罗拉多大学博尔德分校尹晓波团队采用微米级 SiO_2 球体随机分散于聚甲基戊烯(poly(methylpentene), TPX)基体的方法,成功制备出具有辐射制冷功能的复合材料(图7(a)^[9])。该材料制备工艺简便且可扩展,当微球填充量为6%时,50 μm 厚度的复合薄膜可实现约93%的红外发射率。鉴于 SiO_2 与 TPX 折射率相近,复合材料本身的太阳光反射率较低,需借助200 nm厚的银涂层辅助才能达到约96%的阳光反射率。

实现复合材料辐射制冷性能的关键在于无机介电颗粒的选择。为实现高太阳光反射率,应优先选择具有高折射率与宽带隙特性的颗粒(图7(a))。上海交通大学李鹏里等研究表明,将六方氮化硼(hexagonal boron nitride, h-BN)随机分散于硅橡胶聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)基体中时,h-BN 凭借其高折射率与独特的二维结构,可产生更强的后向散射效应,使复合材料实现98%的太阳光反射率(图7(b)^[19])。此外,h-BN 的高热导率使复合材料热导率显著提升,明显优于PDMS基体及填充碳酸钙、

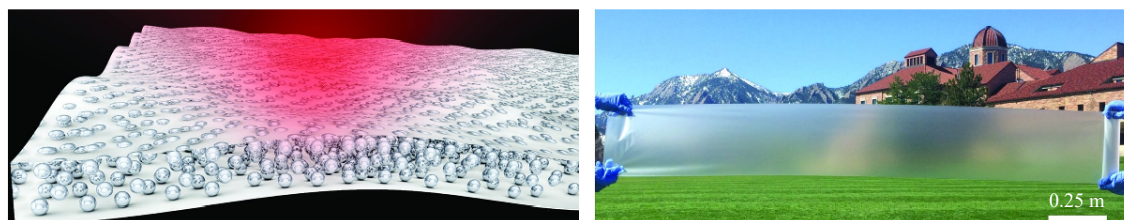
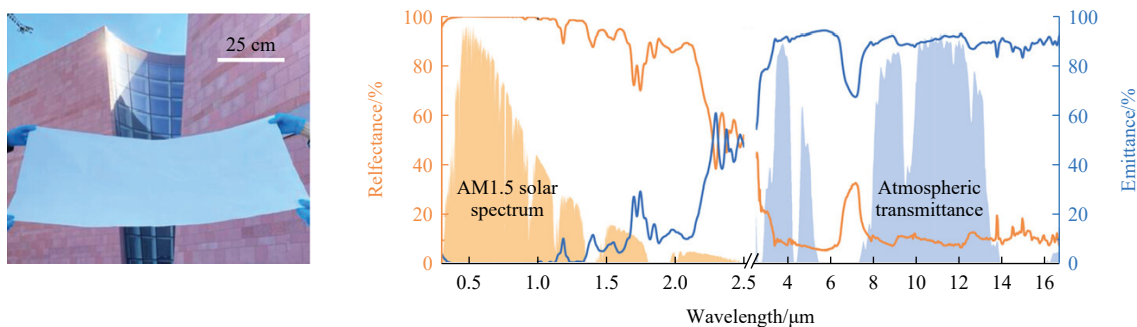
硫酸钡等无机颗粒的复合材料,更适用于高于环境温度的辐射散热场景。

除聚合物外,部分无机材料也可作为复合材料的基体。马里兰大学胡良兵团队采用低熔点磷酸盐玻璃颗粒(多种介电氧化物的共晶混合物)作为冷却涂层基体,并以 Al_2O_3 颗粒作为散射体(图7(c)^[2])。在烧结过程中,低熔点玻璃黏度降低,促使颗粒快速融合并包覆 Al_2O_3 颗粒。当涂层厚度增至约550 μm 时,其太阳反射率可达96.1%,同时展现出优于传统聚合物复合材料的环境稳定性。

2.4 混合式被动散热材料

尽管辐射冷却技术能够反射大部分太阳辐射,但在环境温度下的低热辐射效率限制了其在热管理中的应用效果,尤其是在极端高温、高湿度、设备自身发热等工况下。相比之下,吸附式蒸发冷却技术利用水的高蒸发焓(约2400 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),在可持续热管理领域展现出显著优势。其工作原理可概括为:(1)材料在环境条件下达到吸附平衡时保持较高含水量,当温度升高时,吸附平衡被破坏,水分脱附与蒸发过程吸收大量热量,实现材料降温;(2)当温度降低或环境湿度增加时,材料可重新吸附环境中的水分,为下一轮冷却循环做准备^[20-22]。

混合被动冷却技术通过协同辐射冷却与蒸发冷却效应,实现了高效的零能耗散热,既能有效抑制太阳辐射加热,又可利用蒸发与热辐射双重机制强化散热。上海交通大学刘翔宇等采用静电纺丝技术将金属有机框架 MOF-801(Zr)与聚偏氟乙烯复合,制备出具有混合散热功能的织物(图8(a)^[23])。MOF-801(Zr)

(a) 均匀分散微米级 SiO_2 球体的聚合物复合材料

(b) 均匀分散 h-BN 的聚合物复合材料及其光谱特性

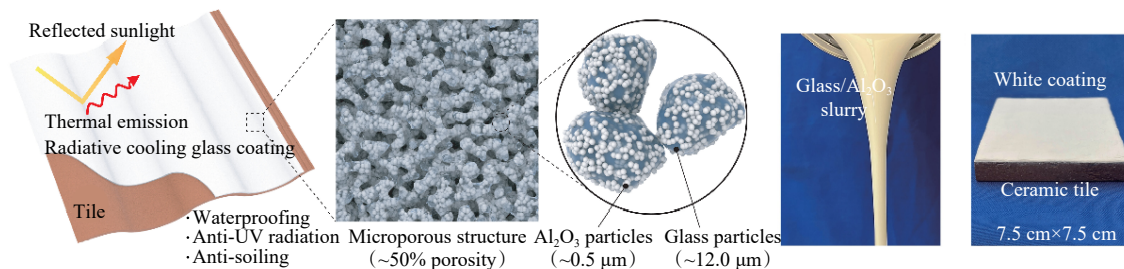
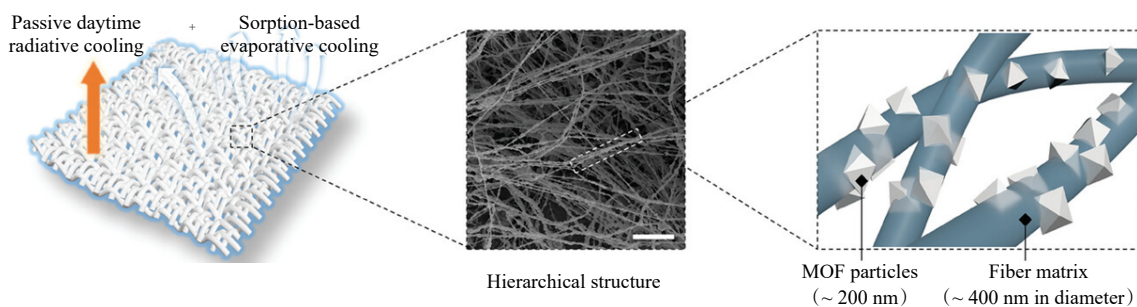
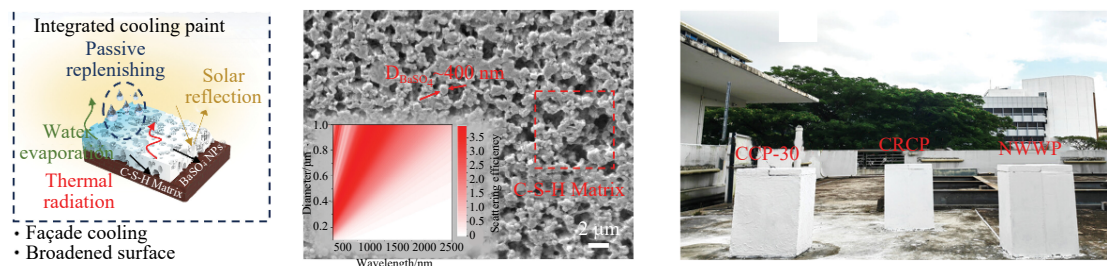
(c) 低熔点玻璃- Al_2O_3 无机辐射制冷涂料

图 7 辐射制冷复合材料



(a) 混合式被动散热织物及其光谱特性



(b) 混合式被动散热涂料及其光谱特性

图 8 混合式被动散热材料

不仅能够吸附大气水分并通过脱附过程实现蒸发冷却,还具有较低的太阳辐射吸收率。通过溶剂热法调控,MOF-801(Zr)的粒径被优化至约 200 nm,显著增强了复合材料对太阳光的散射能力,使其太阳光反射率达到 98%。得益于辐射冷却与蒸发冷却的协同作用,该材料在强辐照和高温条件下可实现约 11℃ 的亚环境降温效果,并在有热源的情况下,比传统辐射冷却材料额外降低热源温度 25℃ 以上。

此外,部分研究通过将辐射冷却材料与水凝胶结合,也实现了类似的降温效果^[24-26]。然而,这些材料多局限于薄膜、织物或块体形式,难以适应复杂表面的涂覆需求。针对这一局限,新加坡南洋理工大学李红团队开发了一种基于水泥-无机介电颗粒-吸湿盐体系的混合散热涂料(图 8(b)^[17])。该体系以水泥为基体,通过水化反应固定硫酸钡颗粒和氯化锂,形成稳定的涂层材料。该涂料的太阳反射率为 88%~92% (取决于润湿状态),大气透明窗口发射率达 95%。在新加坡热带地区的冷却性能评估中,水泥涂料表现出高达 140 W·m⁻² 的冷却功率,比传统辐射制冷材料高出 3~10 倍。

本章主要讨论了各类辐射制冷材料的设计原理与性能特征。有序微纳结构、随机多孔介质及复合体系经光学优化后,可于环境温度下实现约 100 W·m⁻² 的零能耗制冷功率,且无碳排放。若耦合蒸发冷却机制,混合被动材料在仍保持零能耗特性下,可进一步提升制冷强度。这表明应用此类材料可显著降低建筑与设备温度。

3 从实验室走向工程应用

辐射制冷材料的研究已经从单纯关注实验室降温性能,逐渐转向针对具体场景的工程化验证。相比材料本体性能,工程应用更强调成本可控、耐候性、系统兼容性以及实际节能效益。本章面向建筑节能、能源装备散热、可穿戴领域等关键场景,讨论辐射制冷材料的优势、局限和当前行业痛点,并进一步拓展至生态保护与农业增产等新兴应用领域,以展示辐射制冷在工程化转化中的多样化前景(图 9)。

3.1 建筑节能

传统建筑降温多依赖压缩机制冷,不仅能耗高,

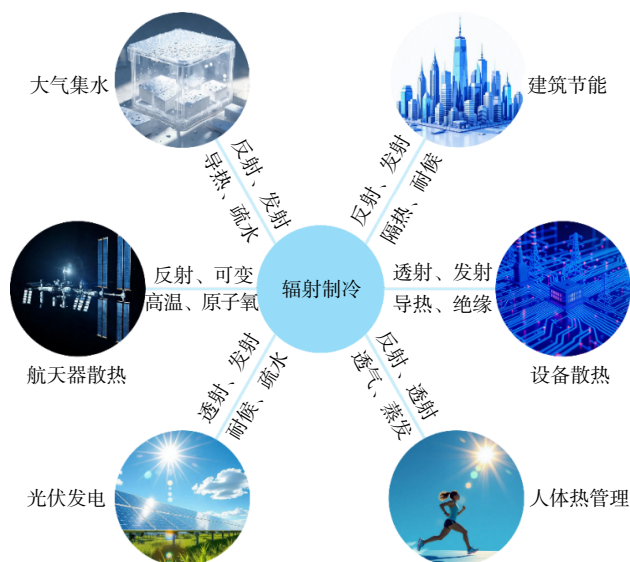


图 9 辐射制冷材料的应用领域

还会进一步加剧气候变化和城市热岛效应。将辐射制冷材料应用于建筑外表面,可有效反射太阳辐射并增强热辐射散热,从而降低室内温度,减少空调制冷能耗。例如,香港城市大学曹之胤团队开发的多孔陶瓷材料应用于建筑屋顶时,可使屋顶表面温度较商用瓦屋顶降低近 5℃,进而使室内温度最高下降 2.5℃^[13]。进一步实验表明,在空调设定温度为 25℃ 时,采用冷却陶瓷的样板房可节省 26.8% 的能耗。基于典型 4 层中型公寓的全尺寸建筑能耗模拟显示,若将冷却陶瓷作为建筑围护结构材料,在热带地区可显著降低供暖、通风和空调(heating, ventilation and air conditioning, HVAC)系统能耗,年节能率超过 10%(约 25 GJ 或 7000 kWh)。

尽管现有辐射制冷材料已在建筑节能领域展现出良好的前景,但工程化应用也面临诸多挑战。除光谱性能外,辐射制冷材料在建筑应用中的长期耐候性极其重要,这是因为户外暴露环境中的紫外线辐照、灰尘沉积及降水等因素可能影响其光谱性能及结构稳定性,导致制冷效能衰减。因此,尽管建筑节能仍是最具规模化潜力的应用场景,但其工程化收益与环境条件强相关,当前宣传中存在一定“理想化”的成分。

3.2 设备散热

输变电设备、储能系统、电气柜等广泛存在局部过热问题,导致绝缘老化、能效下降甚至故障停运。传统散热方式多依赖风冷、液冷或散热器,但在户外

高温工况下效果受限且能耗高。辐射制冷材料可直接使用在设备外壳,有效降低自发热设备的工作温度,避免因高温导致的性能下降或安全隐患。例如,上海交通大学刘翔宇等开发的混合散热材料应用于油浸式变压器表面时,可使油温降低 15℃ 以上^[23]。此类应用要求材料兼具高太阳反射率、高红外发射率及高导热性,以确保内部热量高效散发。传统隔热型辐射制冷材料可能阻碍热扩散,反而削弱降温效果。此外,针对电子及电力设备,高绝缘性也是材料实用化的关键性能指标^[27-28]。

目前,适用于电力设备的辐射制冷体系较少,其原因可能包括:(1)用于电力设备的材料普遍需要长时间可行性验证,确保其性能符合设备运行需求,将未经验证的材料使用在带电设备上极易引发安全事故;(2)辐射制冷材料与电力设备表面的结合性研究较少,对各种复杂表面(例如涂有各种底漆,表面带锈、有污秽等情况)未得到系统性验证。

3.3 其他应用

除建筑与设备散热外,辐射制冷材料在其他领域亦展现出重要应用价值,但不同应用场景对材料的光谱特性要求各异。

在人体热管理领域,理想的辐射制冷材料需具备定制化的发射率:在大气透明窗口波段(8~13 μm)呈现高发射率以实现有效辐射冷却,而在其他红外波段则需保持高透射率以维持人体自身的热辐射降温能力^[29]。清华大学张如范团队开发的聚甲醛(polyformaldehyde, POM)纳米纺织品在 2.5~25 μm 宽红外波段内精准匹配人体热管理需求,其室外与室内应用场景下拥有优于传统织物的降温效果^[30]。

光伏电池降温是另一重要应用方向。光伏组件在能量转换过程中,未被利用的光子会转化为热能,导致光伏电池升温,进而影响其性能和寿命。适用于光伏的辐射制冷材料需满足 3 重光谱特性:(1)在 0.4~1.1 μm 光电转换波段保持高透射率;(2)在 1.1~2.5 μm 近红外波段实现高反射率以减少发热;(3)在 8~13 μm 大气透明窗口具备高发射率以强化辐射散热^[31]。此外,材料还需兼具耐候性与疏水性以保护光伏组件。

有效的热管理对于卫星、航天器、望远镜或探测器等太空应用至关重要。在外层空间,航天器和环境之间的热交换主要通过辐射发生。上海交通大学范

同祥团队开发了新型聚酰亚胺分子,显著降低了可见光和紫外线的吸收,同时在红外光谱中保持了优异的热辐射性能^[32]。真空辐射冷却测试表明,该薄膜的热平衡温度比目前航天器中使用的基于 Kapton 的保护膜低约 28℃。太空应用对材料提出严苛要求,需同时应对太阳辐照、原子氧侵蚀及极端温度波动等挑战。

基于吸附的大气集水(sorption-based atmospheric water harvesting, SAWH)技术能够在很宽的相对湿度范围内使用吸附剂材料提取水蒸气,为解决世界上 2/3 人口面临的水资源短缺问题开辟了新途径^[33]。当前使用的 SAWH 系统普遍依赖冷凝器将脱出的水蒸气重新凝结为液态水,这导致高能耗。使用辐射制冷材料作为冷源有助于解决这一问题。上海交通大学李廷贤团队提出利用白天的辐射冷却来降低 SAWH 装置的水冷凝温度,从而增强吸附剂中的水释放和水冷凝^[34]。利用夜间辐射冷却来冷却吸附剂或实现基于露水的直接大气水收集。

近年来,辐射制冷技术开始在生态保护与农业领域展现潜力。例如,南京大学朱嘉团队开发了基于丰富且环保的醋酸纤维素分子的分层设计辐射冷却膜,可在阳光下为各种形式/规模的冰提供有效和被动的保护^[35]。分子键固有振动赋予醋酸纤维素薄膜高中红外发射率,定制的孔隙充当入射太阳辐射的有效散射中心,提高阳光反射率。团队在实地使用该材料,证明了辐射冷却膜可以有效减缓冰川融化。该团队还开发了一种光合作用活性辐射冷却薄膜,可通过辐射制冷降低环境空气温度,减少水分蒸发,并选择性透过具有光合作用活性的阳光,增强干旱植物的光合作用^[36]。

辐射制冷技术从实验室迈向工程应用仍存在多重挑战。目前研究主要集中在材料验证阶段,示范场景与实际需求存在明显脱节。以建筑领域为例,屋面保温隔热层会显著降低辐射制冷的净收益,且缺乏长期实测数据支撑其降温效能。此外,技术路径的冲突进一步制约了该技术的推广。例如,在高辐照地区,光伏系统的发电收益远高于辐射制冷节省的空调能耗,而两者均需占用建筑屋顶空间,导致难以兼容。

材料成本与性能的矛盾仍是辐射制冷规模化应用的核心障碍。高性能多层光子结构依赖电子束蒸发、光刻或高温烧结等工艺,制造成本居高不下;而低

成本的聚合物-介电颗粒复合材料普遍存在阳光反射率不足(<90%)的问题,难以满足辐射制冷的基本要求。此外,辐射制冷的美观性问题也限制了其实际应用。大面积铺设白色高反射涂层易引发视觉与光污染争议;尽管彩色辐射制冷方案处于实验室探索阶段,但其在可见-近红外波段的选择性调控效率较低,难以同时优化色度与制冷性能,短期内无法替代传统白色材料。

4 辐射制冷材料测试标准

辐射制冷材料的性能评价目前主要依赖于实验室或小规模户外测试,缺乏统一的测试标准,导致不同研究的数据可比性较差。一方面,不同研究团队的测试条件存在显著差异,例如太阳辐照强度、风速、湿度及天空辐射背景等环境参数,这些因素会显著影响材料在实际应用中的降温效果。例如,某材料在低湿、少云的理想条件下可达到 5℃ 的亚环境降温,但在城市高湿或多尘环境中,其性能可能大幅下降。另一方面,测量方法的不一致性进一步加剧了数据不可比的问题。部分研究采用直接温降对比,而另一些则通过冷却功率表征性能,甚至使用不同的参考样品,导致研究结果难以横向比较。此外,当前研究中大部分辐射制冷材料未表征附着力、耐腐蚀、耐老化等实用指标,或表征手段未遵循现有国际、国内标准。这种标准缺失不仅导致研究成果呈现碎片化,也在工程化推广中造成困扰,甚至可能引发过度宣传。

当前,一些工作已聚集于辐射制冷测试标准的讨论。上海交通大学鲍华团队概述了评估冷却性能测量的一般考虑因素,包括光学表征和户外热测量,提供了关于正确报告测量设置和结果的指导方针^[37]。其主要方案包括:(1) 对于光学表征,使用经过校准且正确使用和维护的反射率标准板进行光学表征,从制造商处获取反射率标准板的光谱反射率数据,并在研究中报告这些数据;(2) 对于红外区域,测量并报告 2.5~20 μm 的光谱数据;(3) 对于户外热测量,建议在实验中选择中午时段,且天空和风向条件合适,并需报告相应的天气状况。遗憾的是,当前辐射制冷研究仍未遵循统一的标准。为推动辐射制冷技术的规模化应用,亟需建立跨学科、跨机构的标准评价体系,包

括统一的测试场景要求、标准参考材料以及长期稳定性评估等关键要素。

5 结论与展望

本文围绕辐射制冷技术的 3 个核心问题展开讨论:(1) 其在建筑与设备散热中的实际降温能力;(2) 从实验室材料迈向工程应用的转化路径;(3) 性能评价方法与测试标准。现就上述问题总结如下。

1) 实际工程效益评估需审慎,降温能力受环境制约显著。当前,辐射制冷材料的设计策略(如有序结构、随机多孔结构、复合体系及混合式被动散热材料)在实验室条件下均展现出显著的降温效果,具有应用潜力。然而,需指出其制冷功率通常较主动冷却系统低 1~2 个数量级,难以独立满足常规热负荷需求,现阶段主要作为主动系统的辅助节能手段。此外,实验室测试结果多在特定环境(如利用聚苯乙烯泡沫、聚乙烯薄膜隔绝对流)下获得。实际应用中,复杂的外部对流与辐射热交换将削弱其降温效果,导致实际降温能力低于实验室测试值。因此,当前辐射制冷技术的实际工程效益可能存在被高估的风险。

2) 实验室研究迈向产业化面临多重障碍。尽管辐射制冷技术在建筑节能、电力设备散热、人体热管理、光伏电池降温等领域展现出应用前景,但相关研究大多仍处于实验室阶段,规模化实际应用案例较少报道。主要障碍包括:首先,现有研究对材料关键实用性能(如耐候性、黏附性、耐污秽性)关注不足;其次,现有示范场景常为优化材料性能而设计,与实际工程需求存在脱节;最后,材料成本与性能之间的矛盾是制约其规模化应用的核心瓶颈,高性能材料的制造成本普遍居高不下。

3) 标准化体系缺位制约市场推广。从产业化发展视角看,建立统一的性能测试标准与认证体系是实现辐射制冷材料市场化应用的关键前提。光伏组件、节能玻璃等领域的经验表明,国家与国际标准的建立是推动技术从实验室迈向大规模应用的关键环节。目前,辐射制冷领域尚缺乏统一的标准化体系,致使产品开发与推广中缺乏客观评价依据,也难以获得市场与投资者的充分认可。

综上所述,评估辐射制冷技术在“双碳”目标下的

定位需权衡其潜力与约束。一方面,该技术在建筑节能、光伏降温和能源设备散热等高能耗场景中具有明确的节能效益,为建筑与能源系统的低碳化提供了新的技术路径。另一方面,其工程化应用仍受制于环境依赖性强、耐候性不足、标准体系缺位以及材料成本尚未稳定等因素,短期内难以完全承担“关键节能技术”的角色。因此,该技术能否成为实现“双碳”目标的关键技术,取决于材料体系升级、产业标准建立以及工程场景适配性的突破。换言之,辐射制冷是一种具有重要发展价值的节能技术储备,但需持续推进其工程化与制度化建设,方能充分释放其在“双碳”目标中的潜力。为促进该技术的持续发展,未来主要研究方向应包括以下4个方面。

1) 开发低成本、环保的制造工艺是实现辐射制冷材料从实验室向规模化转移的关键。首先,需探索简单且经济高效的大面积生产技术,如印刷或喷涂,以替代真空沉积等复杂且昂贵的工艺。其次,采用低温或非热加工技术可克服高温加工的局限性,从而制备高耐用性、长寿命的辐射制冷材料,如玻璃基或陶瓷材料。此外,使用环保可降解材料(如纤维素)可减少废塑料的环境影响,同时通过提高材料利用率、回收率^[35],或采用高冷却性能的低成本材料,进一步降低生产成本并推动可持续发展。

2) 在性能优化方面,辐射制冷材料的光谱特性(太阳反射率和红外发射率)已接近理论极限。为进一步提升冷却效率,可采用气凝胶等隔热材料减少非辐射热交换,并结合蒸发冷却技术(如水凝胶或吸湿盐)以应对非理想环境或自发热场景的挑战^[38]。然而,这些材料的机械性能和耐候性仍需优化以满足实际应用需求。

3) 辐射制冷材料的实际应用需考虑与其他系统(如建筑、太阳能电池等)的集成和兼容性。例如,在建筑屋顶或外墙的应用中,需综合评估附着力、耐候性、防眩光性、颜色、可加工性及成本等因素。此外,户外长期使用会面临紫外线、潮湿、风雨、极端温度及灰尘等环境应力,可能导致性能退化。为提高耐候性并延长寿命,可采用高耐腐蚀材料(如陶瓷),但其高温烧结工艺仍是商业化障碍。表面处理技术(如保护涂层或添加剂)可增强材料的抗污染、抗氧化及耐腐蚀性能,从而提升稳定性并降低维护成本。

4) 开发适用于不同季节和区域的动态可调辐射冷却器。传统静态辐射冷却材料虽能实现稳定的被动冷却,但无法适应动态气候需求。为此,开发具有辐射特性动态调控功能的冷却器成为重要研究方向。这类器件可根据季节变化和地域差异主动调节辐射参数,从而显著提升冷却系统的适应性和能效表现^[39-41]。然而,目前该技术并不成熟,材料性能及成本均难以满足实用需求。

参考文献(References)

- [1] 迎峰度夏全国电力负荷创新高[EB/OL]. [2025-07-08]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202507/content_7030954.htm.
- [2] Zhao X P, Li T Y, Xie H, et al. A solution-processed radiative cooling glass[J]. *Science*, 2023, 382(6671): 684-691.
- [3] 国务院办公厅关于转发国家发展改革委、住房城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》的通知[EB/OL]. [2025-11-21]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6939606.htm.
- [4] Fan S H, Li W. Photonics and thermodynamics concepts in radiative cooling[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(3): 182-190.
- [5] Lin C J, Li K Q, Li M, et al. Pushing radiative cooling technology to real applications[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(23): 2409738.
- [6] Raman A P, Abou A M, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540-544.
- [7] Shi N N, Tsai C C, Camino F, et al. Keeping cool: Enhanced optical reflection and radiative heat dissipation in Saharan silver ants[J]. *Science*, 2015, 349(6245): 298-301.
- [8] Hsu P C, Song A Y, Catrysse P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile[J]. *Science*, 2016, 353(6303): 1019-1023.
- [9] Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, 355(6329): 1062-1066.
- [10] Mandal J, Fu Y K, Overvig A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2018, 362(6412): 315-319.
- [11] Li T, Zhai Y, He S M, et al. A radiative cooling structural material[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 760-763.
- [12] Zeng S N, Pian S J, Su M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.
- [13] Lin K X, Chen S R, Zeng Y J, et al. Hierarchically struc-

- tured passive radiative cooling ceramic with high solar reflectivity[J]. *Science*, 2023, 382(6671): 691–697.
- [14] Ma J W, Zeng F R, Lin X C, et al. A photoluminescent hydrogen-bonded biomass aerogel for sustainable radiative cooling[J]. *Science*, 2024, 385(6704): 68–74.
- [15] Wu R H, Sui C X, Chen T H, et al. Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands[J]. *Science*, 2024, 384(6701): 1203–1212.
- [16] Xie F, Jin W L, Nolen J R, et al. Subambient daytime radiative cooling of vertical surfaces[J]. *Science*, 2024, 386(6723): 788–794.
- [17] Fei J P, Zhang X, Han D, et al. Passive cooling paint enabled by rational design of thermal-optical and mass transfer properties[J]. *Science*, 2025, 388(6751): 1044–1049.
- [18] Xiao C Y, Liu M Q, Yao K, et al. Ultrabroadband and band-selective thermal meta-emitters by machine learning[J]. *Nature*, 2025, 643(8070): 80–88.
- [19] Li P L, Wang A, Fan J J, et al. Thermo-optically designed scalable photonic films with high thermal conductivity for subambient and above-ambient radiative cooling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(5): 2109542.
- [20] Liu X Y, Li P L, Chen J, et al. Hierarchically porous composite fabrics with ultrahigh metal-organic framework loading for zero-energy-consumption heat dissipation[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(19): 1991–2000.
- [21] Wang C X, Hua L J, Yan H Z, et al. A thermal management strategy for electronic devices based on moisture sorption-desorption processes[J]. *Joule*, 2020, 4(2): 435–447.
- [22] Xu J X, Chao J W, Li T X, et al. Near-zero-energy smart battery thermal management enabled by sorption energy harvesting from air[J]. *ACS Central Science*, 2020, 6(9): 1542–1554.
- [23] Liu X Y, Li P L, Liu Y J, et al. Hybrid passive cooling for power equipment enabled by metal-organic framework[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(45): 2409473.
- [24] Li J L, Wang X Y, Liang D, et al. A tandem radiative/evaporative cooler for weather-insensitive and high-performance daytime passive cooling[J]. *Science Advances*, 2022, 8(32): eabq0411.
- [25] Galib R H, Tian Y P, Lei Y, et al. Atmospheric-moisture-induced polyacrylate hydrogels for hybrid passive cooling[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6707.
- [26] Huang K S, Lan H Y, Li S Q, et al. Advanced evaporative cooling materials: From designs to applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2025, 154: 101504.
- [27] Li P L, Liu Y J, Liu X Y, et al. Reversed yolk-shell dielectric scatterers for advanced radiative cooling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(23): 2315658.
- [28] Huang X Y, Li P L. Solar-powered clothes, for the heat and cold[J]. *Science*, 2023, 382(6676): 1247.
- [29] Yang K J, Wu X K, Zhou L, et al. Towards practical applications of radiative cooling[J]. *Nature Reviews Clean Technology*, 2025, 1(4): 235–254.
- [30] Wu X K, Li J L, Xie F, et al. A dual-selective thermal emitter with enhanced subambient radiative cooling performance[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 815.
- [31] Wei J, Chen H, Liu J C, et al. Radiative cooling technologies toward enhanced energy efficiency of solar cells: Materials, systems, and perspectives[J]. *Nano Energy*, 2025, 136: 110680.
- [32] Song X K, Gong H, Li H C, et al. Molecularly and structurally designed polyimide nanofiber radiative cooling films for spacecraft thermal management[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(2): 2413191.
- [33] Shan H, Poredoš P, Chen Z H, et al. Hygroscopic salt-embedded composite materials for sorption-based atmospheric water harvesting[J]. *Nature Reviews Materials*, 2024, 9(10): 699–721.
- [34] Xu J X, Huo X Y, Yan T S, et al. All-in-one hybrid atmospheric water harvesting for all-day water production by natural sunlight and radiative cooling[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(14): 4988–5001.
- [35] Cao N N, Chi H W, Zhu B, et al. Challenges to materials for local glacier conservation[J]. *Nature Water*, 2025, 3(3): 251–255.
- [36] Li J L, Jiang Y, Liu J, et al. A photosynthetically active radiative cooling film[J]. *Nature Sustainability*, 2024, 7(6): 786–795.
- [37] Bu K L, Huang X Y, Li X Y, et al. Consistent assessment of the cooling performance of radiative cooling materials[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(51): 2307191.
- [38] Liu H L, Zhang X X, Liao Y L, et al. Building-envelope-inspired, thermomechanically robust all-fiber ceramic meta-aerogel for temperature-controlled dominant infrared camouflage[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(25): 2313720.
- [39] Wang S C, Jiang T Y, Meng Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1501–1504.
- [40] Zhao X Z, Li J C, Dong K C, et al. Switchable and tunable radiative cooling: Mechanisms, applications, and perspectives[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(28): 18118–18128.
- [41] Shao Z W, Huang A B, Cao C C, et al. Tri-band electrochromic smart window for energy savings in buildings[J]. *Nature Sustainability*, 2024, 7(6): 796–803.

Can radiative cooling become a key energy-saving technology under the "Dual Carbon" strategy?

LIU Xiangyu^{1,2,3}, LI Pengli^{1,2,3}, HUANG Xingyi^{1,2,3,4*}

1. Department of Polymer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Shanghai Key Laboratory of Electrical Insulation and Thermal Aging, Shanghai 200240, China

3. State Key Laboratory of Polyolefins and Catalysis, Shanghai 200240, China

4. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Global warming has led to the frequent occurrence of extreme heat events, causing a continuous rise in cooling energy consumption for buildings and equipment. Consequently, electricity demand for cooling has emerged as a major driver of power grid load growth. In the context of the "Dual Carbon" (carbon peaking and carbon neutrality) strategy, developing low-energy and green cooling technologies has become a crucial challenge. Radiative cooling, a passive cooling technology based on infrared radiation exchange between the Earth and deep space, has garnered significant attention due to its advantages of zero energy consumption and zero carbon emissions. This paper systematically reviews relevant research and proposes three core perspectives: First, although radiative cooling holds potential application value in fields such as building energy conservation, photovoltaic panel cooling, and power equipment thermal management, its actual engineering benefits may be overestimated. Second, transitioning from laboratory research to industrial application faces major obstacles that extend beyond material performance optimization to include practical challenges such as scalable manufacturing processes, long-term weatherability, and economic costs. Third, the lack of standardized performance testing protocols and certification systems results in insufficient comparability among research findings, thereby hindering its widespread promotion and application at both the industrial and policy levels. Based on typical case studies and empirical data, this paper analyzes the applicability and limitations of radiative cooling across various climatic conditions and application scenarios, while also addressing related controversies. The future development of radiative cooling must transcend the limitations of singular material optimization and foster interdisciplinary collaboration: on the one hand, it requires the development of low-cost, scalable new material systems; on the other hand, comprehensive standard specifications, policy incentives, and market mechanisms must be established. Only through multi-dimensional collaborative innovation can the gap between laboratory achievements and practical applications be bridged, enabling radiative cooling to genuinely fulfill its potential in energy conservation, emission reduction, and sustainable development.

Keywords radiative cooling; equipment heat dissipation; building energy conservation; sustainability ●



(编辑 黄文光)