



论 文

5 专题名称 先进材料和结构热-力耦合行为与智能设计

柔性辐射制冷材料设计与应用进展

赵卓^{①③}, 张健^{②③}, 侯爱军^③, 梁大鑫^①, 张刚^{②③*}

① 东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

② 北京理工大学材料学院, 北京 100081

③ 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 嘉兴 314019

*联系人, E-mail: zhanggang@bitjx.edu.cn

收稿日期: 2025-**-**; 接受日期: 2025-**-**

摘要 辐射制冷是指将热量通过大气窗口(光波长范围 8-13 μm) 将地球物体表面的热量辐射到遥远的外太空, 实现自身温度降低的过程。近年来, 辐射制冷材料领域呈现出多样化的发展, 主要包括: 微纳超结构光学薄膜、涂层材料、织物材料、生物质基柔性材料。为了适应不同场景应用的实际需要, 辐射制冷材料的研究已经从刚性材料逐渐向柔性材料演变。本文综述了不同结构的辐射制冷材料的光学性质和力学稳定性之间的平衡, 总结当前研究热点, 为未来的辐射制冷领域的发展提出展望。

关键词 辐射制冷, 红外辐射, 柔性

PACS: 44.40.+a, 78.20.-e, 62.20.-x

1 引言

当前全球 20% 的电力用于建筑物制冷^[1], 被动式冷却技术作为一种新兴的制冷方法, 为缓解全球变暖提供了新的技术途径。辐射制冷是通过大气窗口将地球物体表面的热量辐射到遥远的外太空, 实现自身温度降低^[2-4]。理想的辐射冷却材料需要在太阳光谱范围 (0.25-2.5 μm) 具有高反射率, 在大气窗口波段 (8-13 μm) 实现高发射率^[5, 6]。为了适应不同的应用场景, 对材料本身从刚性到柔性的拓展提出了挑战

[7-13]。

初期的辐射制冷材料只局限于夜间的应用, 夜间辐射冷却材料主要基于聚合物和无机氧化物等材料^[14-16], 由于其在白天冷却效果不佳, 无法满足全天候应用。随着对全天候辐射冷却技术需求的提升, 柔性辐射制冷材料逐渐成为研究的重点。柔性材料不仅能够适应多种形态和不同的外界环境, 还可以在规则表面形状上保持其辐射冷却性能, 这使其在极端环境下具有巨大的应用潜力。因此, 如何平衡材料的力学稳定性与热辐射效率, 成为现阶段面临的主要挑战。本文总结了柔性辐射制冷材料在不同场景应用的力学性质, 分析了辐射制冷材料的创新性结构设计, 探

引用格式: 赵卓, 张健, 侯爱军, 梁大鑫, 张刚. 柔性辐射制冷材料设计与应用进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, **, *****

Zhao Z, Zhang J, Hou A J, Liang D X, Zhang G. Progress in design and application of flexible radiative cooling materials (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, **, *****; doi: 10.***SSPMA2025-*****

讨了其在实际应用中的耐候性和稳定性。在总结当前研究热点的基础上, 针对辐射制冷技术在材料性能、结构优化和应用拓展方面的挑战, 提出了相关的研究展望。

2 微纳超结构辐射冷却材料

近几年, 光子晶体等微纳超结构凭借其可设计的结构灵活性不仅提高了光谱调控能力, 还具有可大面积生产、可拓展的优势。为了设计柔性的光学超材料, Zhai 等人^[17]提出了具有成本优势和可拓展的柔性混合超材料。如图 1 (a) 所示, 通过卷对卷工艺制造, 将介电微球 SiO_2 随机嵌入到聚合物 (聚甲基戊烯) 基质材料中, 实现在“大气窗口”范围 93% 的发射率。聚合物基底材料具有重量轻且易于层压在曲面的优点, 这使得超材料薄膜具备卓越的机械性能和化学耐受性, 为户外长时间稳定使用提供了新的技术思路。进一步地, 为了应对环境友好和大规模生产的问题, 人们设计了具有视觉美学的彩色辐射冷却建筑装饰光学薄膜, Zhu 等人^[18]设计了在乙基纤维素 (EC) 层顶部自组装纤维素纳米晶 (CNC) 的具有结构色的彩色光子膜, 由于 CNC 具有胆甾型纳米结构, 呈现对波长的选择性反射, 其光学响应在整个可见光范围内可以实现调控。该光子膜呈现 97% 的高太阳反射率, 在白天实现 -4°C 左右的亚环境冷却效果。此外, 为了进一步提高材料在极端恶劣的条件下保持高的太阳光谱反射率, Zhao 等人^[19]开发了一种微孔光子玻璃涂层, 基于多种介电氧化物 (例如: P_2O_5 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等) 的低熔点磷酸盐玻璃颗粒形成基本的涂层框架, 具有高热力学、化学稳定性以及优异的光谱特性, 如图 1 (b) 和 1 (c) 所示 (即 $>96\%$ 的太阳光谱的反射率和 $8\text{--}13\ \mu\text{m}$ 波段 $\sim 95\%$ 的高发射率)。这类材料在高湿度的环境中保持长期出色的辐射冷却效果, 适用于建筑物在各种环境的实际应用。

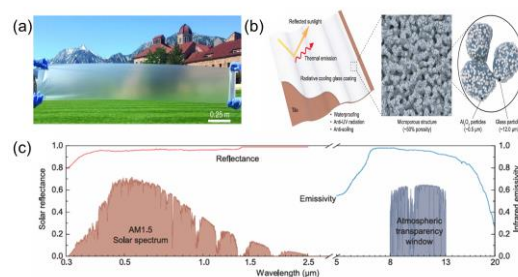


图 1 (a) 柔性超材料薄膜; (b) 微孔光子玻璃涂层; (c) 涂层的光谱性质, 转自文献[17, 19], 经 AAAS 许可转载

Figure 1 (a) Flexible metamaterial film; (b) Microporous photonic glass coating; (c) Spectral properties of the coating. From Ref. [17, 19]. Reprinted with permission from AAAS.

3 辐射制冷涂层材料

早期辐射制冷多采用纳米颗粒涂层^[20–22], 为了降低建筑能耗, 研究者开发了适用于大规模市场化应用的辐射制冷涂层材料, 此类材料不仅具备优异的光学性能, 还具有良好的延展性, 以确保长期稳定。2018 年, Huang 等人^[23]设计了涂覆在瓷砖上的纳米多孔 $\text{MgHPO}_4 \cdot 1.2\text{H}_2\text{O}$ 颗粒, 制备原料来源广泛且成本低廉, 为辐射制冷材料的大规模应用提供了新思路。此种纳米颗粒涂层在太阳光谱中具有 92.2% 的反射率, 大气窗口具有 94.0% 的发射率。为了制备更均匀的辐射制冷涂料, Daniel 等人^[24]提出了浓度为 60%、宽粒径分布的 CaCO_3 -丙烯酸涂料, 在太阳光谱显示高达 95.5% 的反射率以及大气窗口波段 94% 的发射率, 具有与商业涂料制造工艺相兼容的优点。Tong 等人^[25]证明了 BaSO_4 -丙烯酸涂料具有 95.7% 的太阳高反射率和大气窗口波段 96% 的发射率。2014 年, Hu 等人^[26]通过溶胶-凝胶法制备了 SiO_2 空心球, 然后将其与二氧化钛 (TiO_2) 混合并涂覆在铝箔上。此种辐射制冷涂料中的空心球实现了优越的光谱 (太阳光反射率为 97%, 中红外发射率最大为 95%), 以及良好的隔热性能。为了设计基材适应性的涂层, Cheng 等人^[27]利用仿生的理念进行结构优化, 实现太阳波段和“大气窗口”波段的高效光学性能。Yu 等人^[28]提出自适应控温辐射制冷涂层, 实现“冬暖夏凉”的自适应调节能力。未来, 辐射制冷涂层材料将朝着智能化、多功能化和环境适应性方向发展, 以满足不同应用场景

下对温度调控的精准需求。

4 辐射制冷织物材料

随着人们对热舒适性需求的提升, 基于辐射制冷原理的功能化纺织品成为近年来的研究热点。其通过增强红外辐射效应来有效降低人体热负荷, 尤其适用于高温环境下的防护与作业需求。辐射制冷织物材料需在确保柔软舒适性的同时, 实现优异的抗拉伸性能和形变耐久性, 以满足长时间穿戴及复杂环境适应性的要求。人体皮肤在中红外波段具有约为 98% 的红外辐射率^[29], 因此, 辐射制冷织物材料应具有高中红外透射率, 从而有效促进人体皮肤进行热辐射, 实现“凉爽”的效果。2015 年, 研究者开发了红外波段透明而可见光范围不透明的聚乙炔基 (ITVOF) 辐射冷却织物, 通过调节聚合物纤维的直径和增强表面散射, 实现个人热管理辐射冷却^[30]。为了实现良好的透气性和柔软度, Peng 等人^[31]制备了像棉花般柔软的多孔聚乙烯 (纳米 PE) 微纤维工业织物, 可以将人体皮肤冷却 2.3 °C, 纳米多孔的结构展现出可以实际应用的耐磨性和耐用性。Cai 等人^[32]将纺织品和光子工程相结合, 制备了 ZnO-PE 纳米纤维复合纺织品。如图 2 所示, 结合汗液蒸发效应可以提供额外的冷却能力, ZnO-PE 冷却织物实现在太阳辐照度超过 900 W m⁻² 的晴朗天气下超过 200 W m⁻² 的冷却功率。由此启发采用随机分散的纳米粒子嵌入到织物材料增强材料表面的辐射散射, 如 TiO₂^[33, 34]、SiO₂^[35]、Al₂O₃^[36]、NaH₂PO₂^[37], 实现了一种独特的柔性织物辐射制冷方式。此外, 添加增强力学性能的功能化粒子用来耗散外力已经被证明是提高辐射制冷材料机械性能的有效策略^[38-40]。Li 等人^[38]通过静电纺丝技术将钛酸锶钡纳米棒 (BST) 和热塑性聚氨酯 (TPU) 结合制备了 BST@TPU 膜, 由于钛酸锶钡纳米棒沿着纤维轴的均匀排列, 杨氏模量从 3.96 MPa (TPU 膜) 提高到 9.87 MPa, 在相当于户外 144 天的加速紫外老化测试中依然保持约 92.1% 的反射率。柔性织物材料力学性能的增强不仅有助于提升其耐久性和形变恢复能力, 还能够在复杂应力环境下保持稳定的辐射冷却效应。

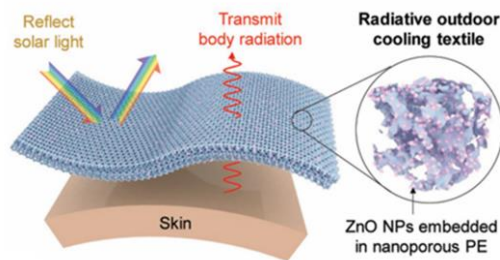


图 2 ZnO 纳米颗粒嵌入的纳米多孔 PE 纺织品, 转自文献 [32], 经 Wiley Materials 许可转载

Figure 2 Nanoporous PE textiles embedded with ZnO nanoparticles. From Ref. [32]. Reprinted with permission from Wiley Materials.

5 生物质基柔性辐射制冷材料

生物质基辐射冷却材料因其可再生性、可生物降解性和环境友好性, 成为推动辐射制冷技术可持续发展的重要方向。此外, 这类材料通常具有较低的热导率和多级孔隙结构, 因而表现出良好的热隔离和优化的光散射能力。聚合物材料 (如聚二甲硅氧烷 (PDMS) 和聚甲基戊烯 (TPX)) 中 C-O、C=O 等化学键的有效振动使其具有良好的红外发射能力^[41-44], 但是仍然存在难降解的问题。纤维素因其纤维结构的低光学损耗及优异的太阳光散射特性, 已被证实为一种可生物降解的高效辐射冷却材料^[45-47]。为了巧妙利用纤维素在红外波段的宽发射率, 研究者采用静电纺丝技术将纤维结构进行无序的重组, 利用大量的微纳米孔结构形成米氏散射, 以增强材料表面的散射效率, 并在实际的户外测试中得到了良好的辐射冷却效果^[48-51]。除此之外, 天然蚕丝一直被认为是皮肤友好的天然材料, 广泛应用在衣物上^[52, 53]。Wu 等人^[53]提出了具有综合耐用性和舒适度的多层蚕丝织物 (MST) (图 3), MST 综合了之前研究的米氏散射中分级的多孔结构赋予蚕丝纳米织物增强的反射能力, 在粘合剂层的帮助下, 具有良好的热机械稳定性。即使在经 1000 次标准化磨损测试和 20 次洗涤循环后, MST 纳米织物仍然保持 99% 和 95% 的原始太阳能反射率, 为推进辐射制冷织物的发展贡献了新的思路。Zhu 等人^[54]开发了温度自适应智能织物, 为人体热舒适温度调控范围扩大约 8.5 °C。生物质基柔性辐射制冷材料将绿色可持续性与低碳环保集成在柔性电子器件、纺织品中, 使其兼具优异的机械柔韧性、透气

舒适性及高效光谱调控能力,为智能热管理和节能应用提供了新思路。

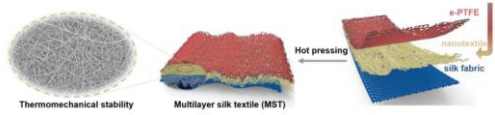


图 3 MST 的制造过程, 转自文献[53], 经 Wiley Materials 许可转载

Figure 3 MST Manufacturing Process. From Ref. [53]. Reprinted with permission from Wiley Materials.

6 结论与展望

综上所述,辐射制冷作为一种新兴的冷却技术,为缓解全球能源问题提供了一个充满希望的策略。作为一种被动式无需额外能量输入的亚环境冷却技术,在可持续低碳未来的道路发展上展现了巨大的突破潜力。本文综述了不同类型的柔性辐射制冷材料在光学性质和耐候稳定性等方面的结构设计。尽管柔性辐射制冷材料已经取得了飞跃的进步,在结构设计、制造工艺及应用领域等方面均展现出巨大的潜力,但仍然面临诸多挑战:

(1) 柔性辐射制冷材料在实际应用中需要具备抗冲击性、耐磨性、耐紫外老化等极端天气的考验。由于雨水、灰尘恶劣天气的影响,材料光学和力学性质的长期稳定性仍然面临着巨大的挑战。如何增强柔性辐射制冷材料的环境耐久性,仍是该领域亟待解决的关键科学问题。

(2) 从经济型的角度来看,柔性辐射材料还应在实践上平衡冬季采暖和夏季制冷之间的需求。如何开发具有可调控辐射特性的智能材料,使其在不同季节或昼夜条件下能够自适应调节辐射冷却能力,是提高材料实用性的关键挑战。

(3) 如何利用大数据与先进计算技术对辐射制冷材料进行优化设计,将成为提升其性能和应用价值的重要方向。未来,结合大数据、密度泛函理论和高通量筛选的多尺度研究方法,将有助于推动新一代高性能、可持续辐射制冷材料的开发,为节能减排和环境可持续发展提供技术支持。

(4) 辐射冷却材料的使用寿命和制备工艺还应进行全生命周期评估 (LCA), LCA 分析能够提供科

学量化的决策依据,促进材料的绿色制造与高效应用。因此,探索可拓展、低成本、绿色环保、耐久稳定、高效的辐射冷却材料,仍然是重要的研究方向。

7 参考文献

- Guo C Y, Pan H D, Xu Q H, et al. Current Status and Future Perspectives of Radiative Sky Cooling (in Chinese). *J Refrig*, 2022, 43(03): 1-14
[郭晨玥, 潘浩丹, 徐琪皓, 等. 天空辐射制冷技术发展现状与展望. *制冷学报*, 2022, 43(03): 1-14]
- Liang J, Wu J W, Guo J, et al. Radiative cooling for passive thermal management towards sustainable carbon neutrality. *Natl Sci Rev*, 2023, 10: nwac208
- Zhou L, Yin X B, Gan Q Q. Best practices for radiative cooling. *Nat Sustain*, 2023, 6: 1030-1032
- Yin X, Yang R, Tan G, et al. Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source. *Science*, 2020, 370: 786-791
- Lee A C L. A study of the continuum absorption within the 8-13 μm atmospheric window. *Q J R Meteorol Soc*, 1973, 99: 490-505
- Family R, Menguc M P. Materials for Radiative Cooling: A Review. *Procedia Environ Sci* 2017, 38: 752-759
- Li X X, Norfoed L K. Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Clim*, 2016, 16: 59-74
- Chen H, Yan Q K, Liu P, et al. Research on construction technology of radi-cool metal roof system (in Chinese). *Build Struct*, 2021, 51(23): 38-41+27
[陈华, 鄢全科, 刘鹏, 等. 辐射制冷金属屋面系统施工技术研究. *建筑结构*, 2021, 51(23): 38-41+27]
- Wang K, Luo G L, Guo X W, et al. Radiative cooling of commercial silicon solar cells using a pyramid-textured PDMS film. *Sol Energy*, 2021, 225: 245-251
- Xia T R, Wang H. High reflective polyethylene glycol terephthalate package layer for passive daytime radiative cooling in photovoltaic cells. *Sol Energy*, 2022, 237: 313-319
- Li J Y, Zhou Y Y, Jiang C C, et al. Recent advances in passive cooling materials for thermal management in flexible electronics. *J Mater Chem C*, 2024, 12: 12179-12206
- Zhang X A, Yu S J, Beibei Xu, et al. Dynamic gating of infrared radiation in a textile. *Science*, 2019, 363: 619-623
- Hu R, Liu Y D, Shin S, et al. Emerging materials and strategies for personal thermal management. *Adv Energy Mater*, 2020, 10: 1903921
- Orel B, Gunde M K, Krainer A. Radiative cooling efficiency of white pigmented paints. *Sol Energy*, 1993, 50: 477-482

- 15 Granqvist C G, Hjortsberg A. Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films. *J Appl Phys*, 1981, 52: 4205-4220
- 16 Meir M G, Rekstad J B, Lovvik O M. A study of a polymer-based radiative cooling system. *Sol Energy*, 2002, 73: 403-417
- 17 Zhai Y, Ma Y G, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science*, 2017, 355: 1062-1066
- 18 Zhu W K, Drognet B, Shen Q C, et al. Structurally Colored Radiative Cooling Cellulosic Films. *Adv Sci*, 2022, 9: 2202061
- 19 Zhao X, Li T, Xie H, et al. A solution-processed radiative cooling glass. *Science*, 2023, 382: 684-691
- 20 Harrison A W, Walton M R. Radiative cooling of TiO₂ white paint. *Sol Energy*, 1978, 20: 185-188
- 21 Nilsson T M J, Niklasson G A. Radiative cooling during the day: simulations and experiments on pigmented polyethylene cover foils. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1995, 37: 93-118
- 22 Huang Z, Ruan X L. Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 104: 890-896
- 23 Huang X, Li N, Wang J F, et al. Single Nanoporous MgHPO₄·1.2H₂O for Daytime Radiative Cooling. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 2252-2258
- 24 Carne D, Peoples J, Arentz F, et al. True benefits of multiple nanoparticle sizes in radiative cooling paints identified with machine learning. *Int J Heat Mass Transf*, 2024, 222: 125209
- 25 Tong Z, Peoples J, Li X, et al. Electronic and phononic origins of BaSO₄ as an ultra-efficient radiative cooling paint pigment. *Mater Today Phys*, 2022, 24: 100658
- 26 Hu D D, Sun S, Du P Y, et al. Hollow Core-Shell Particle-Containing Coating for Passive Daytime Radiative Cooling. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2022, 158: 106949
- 27 Cheng Z M, Han H, Wang F Q, et al. Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure. *Nano Energy*, 2021, 89: 106377
- 28 Dong Y, Meng W F, Wang F Q, et al. "Warm in Winter and Cool in Summer": Scalable Bio-chameleons Inspired Temperature Adaptive Coating with Easy Preparation and Construction. *Nano Lett*. 2023, 23: 9034-9041
- 29 Jing Y Y, Du M Z, Zhang P Y, et al. Advanced cooling textile technologies for personal thermoregulation. *Mater Today Phys*, 2024, 41: 101334
- 30 Tong J K, Huang X P, Boriskina S V, et al. Infrared transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management. *ACS Photonics*, 2015, 2: 769-778
- 31 Peng Y, Chen J, Song A Y, et al. Nanoporous polyethylene microfibres for large-scale radiative cooling fabric. *Nat Sustain*, 2018, 1: 105-112
- 32 Cai L, Song A Y, Li W, et al. Spectrally Selective Nanocomposite Textile for Outdoor Personal Cooling. *Adv Mater*, 2018, 30: 1802152
- 33 Maja R, Functionalization of textile materials with TiO₂ nanoparticles. *J Photochem Photobiol C*, 2013, 16: 62-76
- 34 Zeng S N, Pian S J, Su M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling. *Science*, 2021, 373: 692-696
- 35 Liu X Y, Huang F F, Yu W D. Preparation and property of TiO₂/SiO₂ multilayer film on the fabric by sol-gel process. *Fibers Polym*, 2013, 14: 1101-1106
- 36 Wei W, Zhu Y, Li Q, et al. An Al₂O₃-cellulose acetate-coated textile for human body cooling. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, 211: 110525
- 37 Yang P, He J, Ju Y, et al. Dual-Mode Integrated Janus Films with Highly Efficient NaH₂PO₄-Enhanced Infrared Radiative Cooling and Solar Heating for Year-Round Thermal Management. *Adv Sci*, 2023, 10: 2206176
- 38 Li X, Pattelli L, Ding Z M, et al. A Novel BST@TPU Membrane with Superior UV Durability for Highly Efficient Daytime Radiative Cooling. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2315315
- 39 Yao P, Chen Z, Liu T, et al. Spider-Silk-Inspired Nanocomposite Polymers for Durable Daytime Radiative Cooling. *Adv Mater*, 2022, 34: 2208236
- 40 Zhang J, Zhou Z H, Tang H J, et al. Mechanically Robust and Spectrally Selective Convection Shield for Daytime Subambient Radiative Cooling. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 14132-14140
- 41 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. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2109542
- 42 Chen G L, Wang Y M, Qiu J, et al. A visibly transparent radiative cooling film with self-cleaning function produced by solution processing. *J Mater Sci Technol*, 2021, 90: 76-84
- 43 Feng J, Santamouris M, Gao K. The radiative cooling efficiency of silica sphere embedded polymethylpentene (TPX) systems. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, 215: 110671
- 44 Meng S, Long L, Wu Z, et al. Scalable dual-layer film with broadband infrared emission for sub-ambient daytime radiative cooling. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2020, 208: 110393
- 45 Li T, Zhai Y, He S M, et al. A radiative cooling structural material. *Science*, 2019, 364: 760-763
- 46 Piao X X, Cao Y W, Guo H X, et al. Multifunctional Bamboo Fiber Hybrid Structural Materials for Daytime Radiation Cooling. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2022, 10: 15692-15698
- 47 Chen Y P, Dang B K, Fu J Z, et al. Cellulose-Based Hybrid

- Structural Material for Radiative Cooling. *Nano Lett*, 2021, 21: 397-404
- 48 Zhang Y, Zhu W K, Zhang C, et al. Atmospheric Water Harvesting by Large-Scale Radiative Cooling Cellulose-Based Fabric. *Nano Lett*, 2022, 22: 2618-2626
- 49 Li J L, Liang Y, Li W, et al. Protecting ice from melting under sunlight via radiative cooling. *Sci Adv*, 2022, 8: eabj9756
- 50 Gamage S, Banerjee D, Alam M M, et al. Reflective and transparent cellulose-based passive radiative coolers. *Cellulose*, 2021, 28: 9383-9393
- 51 Wang X Y, Zhang Q, Wang S H, et al. Sub-ambient full-color passive radiative cooling under sunlight based on efficient quantum-dot photoluminescence. *Sci Bull*, 2022, 67: 1874-1881
- 52 Zhu B, Li W, Zhang Q, et al. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocesed silk. *Nat Nanotechnol*, 2021, 16: 1342-1348
- 53 Wu X E, Wang Y, Liang X, et al. Durable Radiative Cooling Multilayer Silk Textile with Excellent Comprehensive Performance. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2313539
- 54 Zhu K X, Yao H Z, Song J J, et al. Temperature-adaptive dual-modal photonic textiles for thermal management. *Sci Adv*, 2024, 10: eadr2062

Progress in design and application of flexible radiative cooling materials

Zhuo Zhao^{1,3}, Jian Zhang^{2,3}, Aijun Hou³, Daxin Liang¹, Gang Zhang^{2,3*}

¹ Key Laboratory of Bio-based Material Science & Technology (Ministry of Education), Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

² School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

³ Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology (Jiaxing), Jiaxing 314019, China

Radiative cooling refers to the process by which objects on Earth's surface radiate heat to distant outer space through the atmospheric window (8-13 μm), thereby lowering their temperature. In recent years, the field of radiative cooling materials has experienced significant diversification, with key developments including micro-nano structured optical films, coating materials, fabrics, and biomass-based flexible materials. To address the practical demands of various applications, researches have shifted focus from rigid materials to flexible alternatives. This article reviews the balance between the optical properties and mechanical stability of radiative cooling materials with different structures, summarizes current research hotspots, and provides prospects for the future development of the radiative cooling field.

Radiative cooling, Infrared radiation, Flexibility

PACS: 44.40.+a, 78.20.-e, 62.20.-x

doi: *****