

评论

Commentary

辐射制冷材料的发展与进步

Development and progress of radiative cooling materials

金城, 裴刚*, 赵斌*

Cheng Jin, Gang Pei*, Bin Zhao*

热科学和能源工程系, 中国科学技术大学, 合肥市 230027, 安徽省, 中国

Department of Thermal Sciences and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui Province, China

通讯作者: 裴刚, peigang@ustc.edu.cn; 赵斌, zb630@ustc.edu.cn Corresponding authors: Gang Pei, peigang@ustc.edu.cn; Bin Zhao, zb630@ustc.edu.cn

引用格式

金城, 裴刚, 赵斌. 辐射制冷材料的发展与进步. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(1): 128.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.128>

Jin C, Pei G, Zhao B. Development and progress of radiative cooling materials (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(1): 128.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.128>

文章信息

收稿日期: 2024-01-25

录用日期: 2024-03-04

发表日期: 2024-03-11

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由

Universe Scientific Publishing 出版。

本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/144>

工业时代以来, 化石能源的大量使用导致温室气体的排放量不断增加, 进而加速全球变暖 [1]。制冷能耗是能源消耗的重要组成部分, 约占全球总能源消耗的20%, 因此迫切需要发展低能耗、高效且环保的新型制冷技术以满足不断增长的制冷需求。辐射制冷因其零能耗制冷特性受到国内外学者的广泛关注, 它的基本原理是地表物体通过大气层在“大气窗口”(8–13 μm) 波段的高透过特性, 将自身废热以热辐射的形式散失至低温太空, 从而获得被动降温 and 制冷效果 [2–4]。早期阶段, 辐射制冷的研究和探索局限于夜间工况, 因此辐射制冷材料的核心在于红外发射率的优化与调控 [5]。相比于单纯的夜间辐射制冷, 日间辐射制冷还可以在太阳辐射条件下实现被动降温与制冷, 因此更具应用价值。根据能量平衡可知 (图1(a)), 日间辐射制冷的核心挑战在于如何实现太阳辐射低吸收率 (一般对应高反射率) 和中红外高发射率的协同优化调控。

近年来, 随着微纳光学和加工领域的持续进步, 近/远场辐射调控 [6,7] 迅速发展, 极大推动了日间辐射制冷研究。2014 年, Raman 等 [8] 研制了一种多层膜光子晶体结构 (图 1(b)), 其太阳辐射反射率达到 97%, 首次在太阳直射条件下实现了比环境温度低近 5°C 的日间辐射制冷。考虑到加工成本和大规模应用, Zhai 等 [9] 研制了一种可大面积制备的超材料薄膜 (图 1(c)), 该薄膜通过在聚合物中掺入电介质颗粒, 强化在“大气窗口”波段内的红外发射率 (>0.93), 结合银反射层能够同时实现 96% 的太阳辐射反射率, 最终在白天可达到 93 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的净辐射制冷功率。除了上述辐射制冷材料, 通过探索新的制备技术和尝试不同材料组合, 一系列高性能日间辐射制冷材料陆续涌现, 如超白涂料 (图 1(d)) [10]、分级多孔膜 (图 1(e)) [11] 以及超白木材 (图 1(f)) [12]、复合电纺薄膜 [13] 等, 这些材料均具有宽谱域光谱选择特性, 且均能实现低于环境温度的被动降温效果。

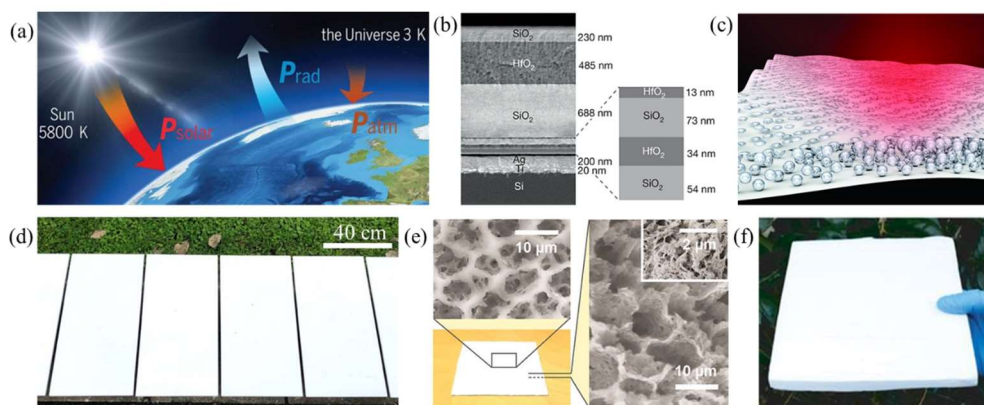


图 1. 辐射制冷原理及高性能辐射制冷材料。(a) 辐射制冷原理图 [2], P_{rad} 表示自身热辐射, P_{atm} 表示吸收的大气辐射, P_{solar} 表示吸收的太阳辐射; (b) SiO_2 和 HfO_2 交替组成的多层膜光子晶体 [8]; (c) SiO_2 颗粒掺入聚甲基戊烯基体形成的超材料薄膜 [9]; (d) TiO_2 与含氟聚合物混合形成的超白涂料 [10]; (e) 相反转法制备的分级多孔膜 [11]; (f) 脱木质素压制成型的超白木材 [12]。

Figure 1. Principle of radiative cooling and high-performance radiative cooling materials. (a) Principle diagram of radiative cooling [2], P_{rad} represents the thermal radiation, P_{atm} represents the absorbed atmospheric radiation, and P_{solar} represents the absorbed solar radiation; (b) Multilayer film photonic crystal alternately composed of SiO_2 and HfO_2 [8]; (c) Metamaterial film formed by SiO_2 particles incorporated into polymethylpentene matrix [9]; (d) Ultra-white coating formed by mixing TiO_2 and fluoropolymer [10]; (e) Hierarchically porous membrane prepared by phase inversion method [11]; (f) Delignified pressed ultra-white wood [12].

在光谱选择性性能优化基础上, 辐射制冷材料的发展呈现出多元化趋势。这种多元化不仅表现为丰富的材料选型和制备技术, 还体现于超疏水、彩色、热导率调制等不断集成的性能特点 (图 2)。超疏水辐射制冷材料 [14] 就是一种经典的延伸, 其目的主要是为了防止污染物在材料表面粘附堆积, 保持光谱特性不受影响。通过刻蚀法、模板法等去除基体表面材料或在基体表面进行沉积、分层组装来构筑疏水化的表面微结构, 可以使得辐射制冷材料表面实现超疏水特性。这一特性赋予了材料自清洁功能, 只需要借助少量的水滴, 就可以将灰尘等污染物清除, 从而解决辐射制冷材料在户外长期运行中可能面临污染导致制冷性能下降的问题。此外, 考虑到传统辐射制冷材料呈现银色或白色, 这使得单调色彩无法完全满足美感设计, 尤其是在建筑、汽车等具有明显色彩要求的领域, 因此发展彩色辐射制冷材料也是一个研究热点。针对涂层类材料 [15], 最简单的方式就是添加相应的色素成分, 通过窄波段可见光吸收来实现色彩呈现。针对光子晶体类材料, 通用的方法是设计色彩微结构, 从而实现颜色的精确呈现, 同时也可以进一步优化对太阳辐射的吸收, 达到太阳辐射低吸收与颜色的协同调控 [16]。

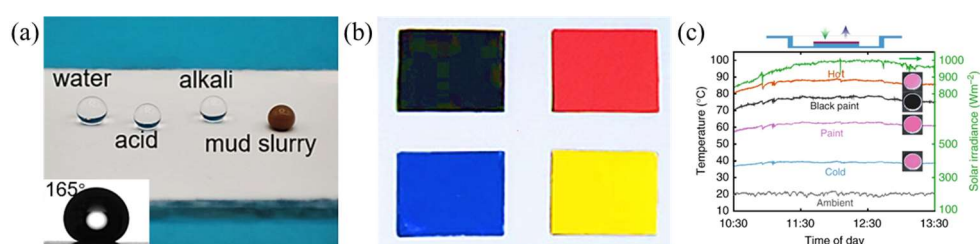


图 2. 辐射制冷材料的多功能性。(a) 超疏水特性，在辐射制冷涂层表面的水、酸、碱和泥浆液滴均能保持较大接触角，左下角展示了水在辐射制冷涂层表面的接触角为 165° [14]；(b) 四种双层彩色辐射制冷涂层 [15]，都是由含着色剂的顶层和具有辐射制冷功能的底层组成；(c) 光子晶体辐射制冷材料颜色与吸光特性的协同调控，通过特殊光子晶体设计，可以在实现相同颜色的同时，表现出不同的等效太阳辐射吸收率，从而产生不同的温度特性 [16]。

Figure 2. Versatility of radiative cooling materials. (a) Super hydrophobic properties. Water, acid, alkali and mud droplets on the surface of the radiative cooling coating can maintain a large contact angle. The lower left corner shows that the contact angle of water on the surface of the radiative cooling coating is 165° [14]; (b) Four double-layer colorful radiative cooling coatings [15], all consisting of a top layer containing colorants and a bottom layer with radiative cooling function; (c) The synergetic regulation of the color and light absorption characteristics of photonic radiative cooling materials. Through special photonic crystal design, the same color can be achieved while showing different equivalent solar absorptivity, thereby producing different temperature characteristics [16].

除了上述这些功能特性外，耐候性、使用寿命也是辐射制冷材料发展和应用必须考虑的因素。耐候性决定材料在可能面临长时间暴露在如高温、低温、雨水侵蚀、紫外线等恶劣环境下的稳定情况，而使用寿命直接关系到辐射制冷器件的经济性和可持续性。《科学》杂志近期连续发表了三篇关于这一话题的论文 [17–19]。Lin 等 [17] 基于白甲虫鳞片结构通过相转化和烧结法研制了一种多孔氧化铝辐射制冷陶瓷（图 3(a)），其太阳辐射反射率高达 99.6%，正午的净辐射制冷功率达到 $130 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，在不同地区可实现低于环境温度 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $8.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却效果。建筑能耗模拟结果表明在极端炎热地区，室内空调每年可节约 10% 以上的能源。Zhao 等 [18] 则设计了一种微孔玻璃框架和介电颗粒结合的多孔光子复合材料（图 3(b)），该材料不仅具有良好光学性能，同时具有良好的稳定性，可以在各种工况下工作并保持长期稳定。这些陶瓷基材料有效解决了聚合物基、光子晶体类辐射制冷材料在实际应用中的局限性，进一步推动辐射制冷技术的发展。

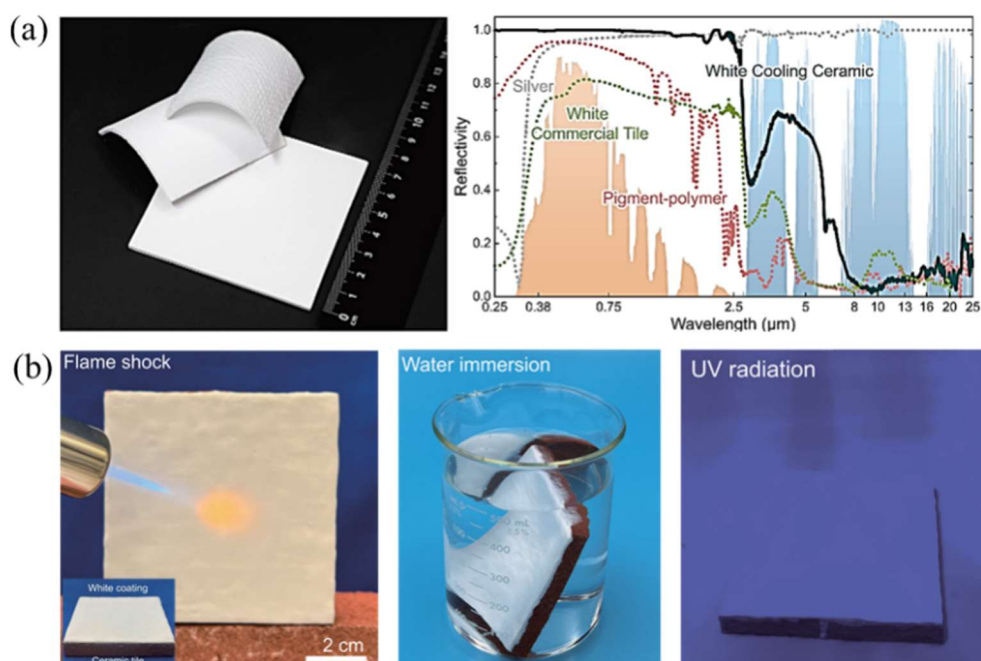


图 3. 两种陶瓷基辐射制冷材料。(a) 左侧为可根据使用需求烧结成不同形状的多孔氧化铝陶瓷，右侧为冷却陶瓷、填料聚合物、银膜、白色商业瓷砖的光谱性能 [17]；(b) 经过溶液处理后烧结成型的陶瓷基辐射冷却玻璃涂层及其稳定性测试，依次为：高温火焰冲击测试、浸水测试和紫外线暴露测试 [18]。

Figure 3. Two ceramic-based radiative cooling materials. (a) The left side shows porous alumina ceramics that can be sintered into different shapes according to usage requirements, and the right side shows the spectral properties of cooling ceramics, filler polymers, silver films, and white commercial ceramic tiles [17]; (b) Ceramic-based radiative cooling glass coating sintered after solution treatment and its stability test, in order: high-temperature flame shock test, water immersion test and ultraviolet exposure test [18].

辐射制冷作为一种新的可再生能源制冷方式，在推动可持续能源发展、缓解全球变暖等方面具有巨大的研究价值和潜力。辐射制冷能够高效地将热量辐射至太空，无需消耗额外能源即可实现被动降温，在多种应用场景中均可展现出显著的节能优势。例如，在建筑领域，将其应用于建筑外墙、屋顶等部位，可在夏季显著降低室内温度，减少空调等制冷设备负载，从而实现节能减排。在车辆热管理中，则有助于稳定车内温度，提升舒适度并降低能耗。同时，透明的辐射制冷材料还可以用于太阳能电池板冷却，以提高光电转换效率。如果未来能进一步突破材料的耐用性、稳定性、系统兼容性、能源效率及经济可行性等关键问题，辐射制冷技术的大规模市场化应用将会迅速崛起。

致谢：该工作得到了国家自然科学基金（52106276，52130601）、中国科协青年人才托举工程（2023QNRC001）的资助。

利益冲突：作者声明没有潜在的利益冲突。

参考文献

1. Wu C. Rapid rising in radiative forcing. *Clean Energy Science and Technology*. 2024; 2(1). doi: 10.18686/cest.v2i1.110
2. 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(6518): 786-791. doi: 10.1126/science.abb0971
3. Zhao B, Hu M, Ao X, et al. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects. *Applied Energy*. 2019; 236: 489-513. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.018
4. Cui Y, Luo X, Zhang F, et al. Progress of passive daytime radiative cooling technologies towards commercial applications. *Particuology*. 2022; 67: 57-67. doi: 10.1016/j.partic.2021.10.004
5. Orel B, Gunde MK, Krainer A. Radiative cooling efficiency of white pigmented paints. *Solar Energy* 1993; 50: 477-482. doi: 10.1016/0038-092X(93)90108-Z
6. Baranov DG, Xiao Y, Nechepurenko IA, et al. Nanophotonic engineering of far-field thermal emitters. *Nature Materials*. 2019; 18(9): 920-930. doi: 10.1038/s41563-019-0363-y
7. Zhang J, Shi K, Lu L, et al. Experiments on near-field radiative heat transfer: A review. *Clean Energy Science and Technology*. 2023; 1(1). doi: 10.18686/cest.v1i1.45
8. Raman AP, Anoma MA, Zhu L, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*. 2014; 515(7528): 540-544. doi: 10.1038/nature13883
9. Zhai Y, Ma Y, David SN, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science*. 2017; 355(6329): 1062-1066. doi: 10.1126/science.aai7899
10. Song J, Zhang W, Sun Z, et al. Durable radiative cooling against environmental aging. *Nature Communications*. 2022; 13(1). doi: 10.1038/s41467-022-32409-7
11. Mandal J, Fu Y, Overvig AC, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*. 2018; 362(6412): 315-319. doi: 10.1126/science.aat9513
12. Li T, Zhai Y, He S, et al. A radiative cooling structural material. *Science*. 2019; 364(6442): 760-763. doi: 10.1126/science.aau9101
13. Yang W, Zhang E, Zhao J, et al. Dawn of clean energy: Enhanced heat transfer, radiative cooling, and firecracker-style controlled nuclear fusion power generation system. *Clean Energy Science and Technology*. 2023; 1(1). doi: 10.18686/cest.v1i1.61
14. Meng X, Chen Z, Qian C, et al. Durable and mechanically robust superhydrophobic radiative cooling coating. *Chemical Engineering Journal*. 2023; 478: 147341. doi: 10.1016/j.cej.2023.147341
15. Chen Y, Mandal J, Li W, et al. Colored and paintable bilayer coatings with high solar-infrared reflectance for efficient cooling. *Science Advances*. 2020; 6(17). doi: 10.1126/sciadv.aaz5413
16. Li W, Shi Y, Chen Z, et al. Photonic thermal management of coloured objects. *Nature Communications*. 2018; 9(1). doi: 10.1038/s41467-018-06535-0
17. Lin K, Chen S, Zeng Y, et al. Hierarchically structured passive radiative cooling ceramic with high solar reflectivity. *Science*. 2023; 382(6671): 691-697. doi: 10.1126/science.adi4725
18. Zhao X, Li T, Xie H, et al. A solution-processed radiative cooling glass. *Science*. 2023; 382(6671): 684-691. doi: 10.1126/science.adi2224
19. Zhao D, Tang H. Staying stably cool in the sunlight. *Science*. 2023; 382(6671): 644-645. doi: 10.1126/science.adk9614