

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-14  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260413001

## 生物质基日间辐射制冷材料的研究进展

许焱<sup>1</sup> 刘相永<sup>2</sup> 白玲<sup>1</sup> 周建<sup>1</sup> 白忠薛<sup>1</sup> 黄梦晨<sup>3</sup>

(1 西南科技大学生命科学与农林学院 生物质材料教育部工程研究中心 绵阳 621010; 2 西南科技大学环境与资源学院 绵阳 621010; 3 西南科技大学制造科学与工程学院 制造过程测试技术教育部重点实验室 绵阳 621010)

**摘要** 在全球“双碳”目标与城市热环境治理需求的双重驱动下,辐射制冷技术以其零能耗、零排放的独特优势,已成为绿色制冷领域的研究热点。区别于现有综述聚焦光子晶体、超材料、石油基聚合物等传统体系,本文首次以生物质基材料为核心对象,系统梳理多层、多孔、随机介质三大经典光学结构向可再生生物质体系的迁移路径与设计原理,重点阐明纤维素、胶原、丝素蛋白等典型材料的本征光热调控机制、制备工艺与冷却效能,全面覆盖节能建筑、人体热管理、光伏器件三大应用场景,并从光谱调控精度、环境稳定性、规模化制备3方面提炼关键瓶颈与突破方向。本文填补了生物质基辐射制冷专题综述的空白,可为该类绿色材料的理性设计与工程化应用提供理论支撑与实践参考。

**关键词** 生物质材料;辐射制冷;结构设计;光热调控

中图分类号: TB64;TB66

文献标识码: A

## Research Progress on Biomass-Based Daytime Radiative Cooling Materials

Xu Yan<sup>1</sup> Liu Xiangyong<sup>2</sup> Bai Ling<sup>1</sup> Zhou Jian<sup>1</sup> Bai Zhongxue<sup>1</sup> Huang Mengchen<sup>3</sup>

(1. School of Life Sciences and Agri-forestry, Engineering Research Center of Biomass Materials, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. School of Manufacturing Science and Engineering, Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract** Driven by the dual impetus of the global “dual-carbon” goal and the imperative for urban thermal environment governance, radiative cooling technology has emerged as a research frontier in the realm of green cooling, owing to its distinctive merits of zero energy consumption and zero emissions. In contrast to existing reviews that focus on traditional systems, such as photonic crystals, metamaterials, and petroleum-based polymers, this review considers biomass-based materials as the exclusive core and systematically summarizes the migration paths and design principles of three classic optical structures (multilayer, porous, and random media) to renewable biomass systems. It clarifies the intrinsic photothermal regulation mechanisms, fabrication processes, and cooling performance of typical materials, including cellulose, collagen, and silk fibroin; covers three application scenarios (energy-efficient buildings, human thermal management, and photovoltaic devices); and extracts the key bottlenecks from spectral regulation precision, environmental stability, and large-scale preparation. This review fills a gap in exclusive reviews on biomass-based radiative cooling, providing dedicated theoretical support and practical references for the rational design and engineering applications of such green materials.

**Keywords** biomass-based radiative cooling materials; radiative cooling; structural design; photothermal regulation

在全球气候变化日益加剧的背景下,极端高温和热浪事件愈发频繁,城市作为人类活动最密集的区域,正面临日益严峻的热环境挑战。由于城市化进程加快、建筑密度提升以及绿地面积减少,城市热

岛效应不断加剧,城市中心区域温度显著高于周边郊区。研究预测,到22世纪,全球地表温度可能上升0.3~4.8℃,而城市扩张将进一步放大极端高温的发生频率与强度<sup>[1]</sup>。同时,工业化和城市建设的快速推

收稿日期:2026-04-13;修回日期:2026-05-20;录用日期:2026-05-23

责任编辑:王亚薇



移动阅读

进使得二氧化碳、甲烷等温室气体排放量持续攀升,强化了温室效应,由此引发的冰川消融、海平面上升、极端天气频发等问题,对人类社会基础构成了严峻挑战。

为应对能源需求增长与传统能源带来的环境压力,推动绿色低碳转型已成为全球共识。我国明确提出“碳达峰碳中和”目标,力争于2030年前实现碳排放达峰,并努力在2060年前实现碳中和<sup>[2]</sup>。“双碳”目标不仅体现了我国在全球气候治理中的责任担当,也为经济社会的发展注入了绿色低碳的新动能<sup>[3]</sup>。在此背景下,发展高效、环保、可持续的降温技术,对于降低建筑能耗、减少碳排放、实现生态宜居的目标具有重要意义。

为了实现该目标,辐射制冷技术作为一种新兴的被动式热管理策略应运而生,要理解该技术的巨大潜力,首先需要审视地球-大气系统的热力学平衡机制。通常情况下,地球向外太空的热辐射与入射的太阳辐射相平衡,从而维持着相对稳定的能量流<sup>[4]</sup>(图1)。在该能量交换过程中,地球大气层在8~13  $\mu\text{m}$ 的中红外波段存在一个高度透明的“大气窗口”。在该波段内,大气中的氮气、氧气、二氧化碳和水蒸气等组分对电磁波的吸收和散射极小。巧合的是,根据普朗克定律,在常规环境温度(约300 K)下,地球表面物体的峰值热辐射恰好落在此“大气窗口”范围内<sup>[5]</sup>。这意味着,地球表面物体的外向热辐射发射量可以超过其吸收的大气向下辐射,使得热量能够顺利穿透大气层,逃逸至温度近乎绝对零度(约3 K)的浩瀚外太空。在这个过程中,外太空充当了一个近乎无限的巨大热储存库。

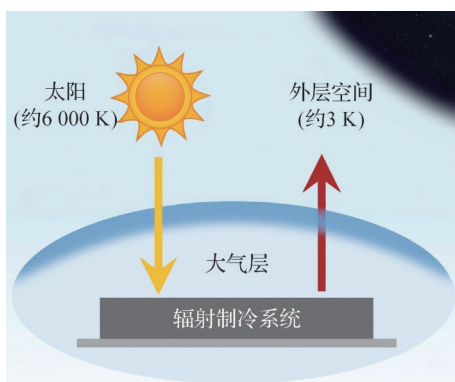


图1 辐射制冷的基本原理

Fig.1 Basic principle of radiative cooling

基于上述自然机制,现代辐射制冷技术通过精细调控材料的光学特性,主动利用了该“大气窗口”。通过设计材料,使其在太阳光波段具备高反射率以

最大限度减少太阳热量的吸收,同时在中红外波段保持高发射率,从而实现物体表面的无源持续降温<sup>[6-7]</sup>。相比传统主动制冷方式,这种技术因其无需外部能源输入、运行过程零能耗、零排放等核心优势,具备极其显著的节能潜力与环境适应性<sup>[4]</sup>。目前,该技术已经在建筑节能<sup>[8]</sup>、人体热管理<sup>[9-10]</sup>、光伏器件制冷<sup>[11-13]</sup>等多个领域展现出广阔的应用前景,受到学术界与产业界的广泛关注(图2)。

目前,关于日间辐射制冷的综述已有较多报道,但前人工作多侧重于光子晶体、超材料、无机陶瓷或传统石油基聚合物等体系的物理光学机制探讨<sup>[14]</sup>。这些传统材料在实际应用中往往面临不可再生、制备工艺复杂及高碳排放等问题。相比之下,主要来源于植物、动物或微生物的生物物质材料天然具有独特的微纳层级孔道与丰富的极性官能团,在实现高效光谱调控的同时,契合绿色低碳理念<sup>[15-16]</sup>。然而,当前鲜有综述专门针对“生物物质基”这一核心主题进行系统梳理。基于此,本文旨在填补该空白,凸显生物物质基材料的独特优势与应用潜力。本文的逻辑框架如下:首先,提炼传统辐射制冷材料的结构设计范式,并探讨其向生物物质体系迁移的可行性;其次,系统梳理不同生物物质基材料的深层制冷机理及其独特优势和局限性,并汇总主流生物物质材料体系的研究进展;最后,聚焦其在节能建筑、人体热管理、光伏器件三大领域的应用,并探讨工程化应用中的实际场景制约因素与长期服役性能。

## 1 辐射制冷材料的创新结构与范式迁移

近年来,研究者利用现代光学和微纳米加工技术,设计和构筑了多种创新结构的辐射制冷材料,如多层结构辐射制冷材料<sup>[17-18]</sup>、多孔结构辐射制冷材料<sup>[19-20]</sup>及随机分布介质结构辐射制冷材料<sup>[21]</sup>等,显著提升了材料的冷却性能。随着绿色材料的发展,这些经典的光学设计范式正逐步迁移并应用于纤维素、胶原、丝素蛋白等生物物质体系中。

### 1.1 多层结构辐射制冷材料

多层结构辐射制冷材料是通过各种方法叠加不同功能层,实现对太阳光谱的高反射与对中红外波段的高发射的一种材料,可在日间无需额外能源消耗的情况下有效降低物体表面温度。在传统材料体系中,常采用刮涂等物理叠加工艺制备多层薄膜,例如将聚二甲基硅氧烷与介孔二氧化硅复合涂覆于柔性基底形成超薄发射层<sup>[22]</sup>。然而,层间热应力失配和聚合物难降解性限制了其长期应用。将该设计范

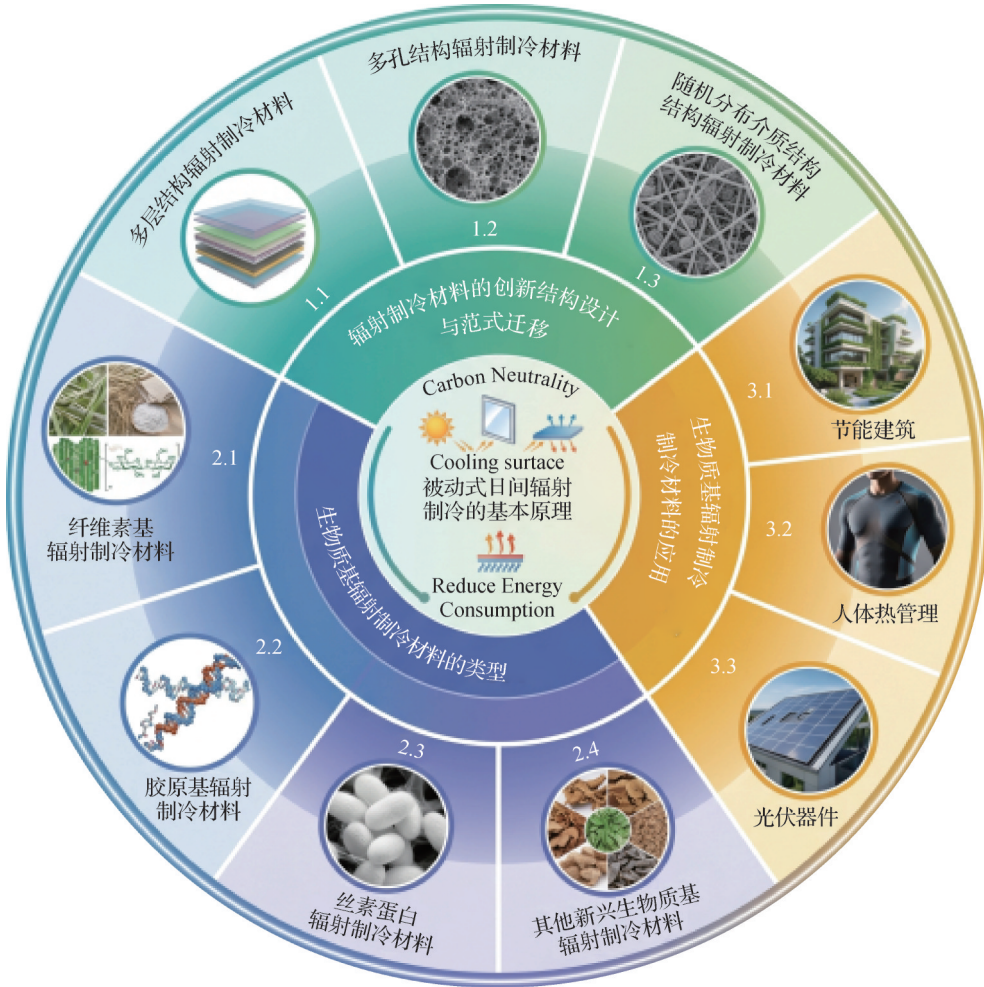


图2 被动式日间辐射制冷 (PDRC): 基本原理、创新结构与范式迁移、种类、多功能应用

Fig.2 Passive daytime radiative cooling (PDRC): fundamental principles, innovative structural design & paradigm migration, material categories, and multifunctional applications

式向生物质体系迁移时,其核心思路摒弃了简单的物理层压,而是利用生物大分子的优异成纤性与成膜性,通过湿法纺丝<sup>[23]</sup>(图3)、同轴静电纺丝或层层自组装等工艺实现异质层的有机结合。迁移过程高度依赖纤维素、胶原等分子链间丰富的氢键网络与物理缠结来强化层间界面。这不仅完美保留了多层结构对特定波段的光学调控能力,还有效避免了界面剥离风险,同时赋予了生物质基制冷材料单向导水、不对称润湿等多重热湿管理功能<sup>[24]</sup>。

### 1.2 多孔结构辐射制冷材料

多孔结构辐射制冷材料是一种通过内部多孔结构设计,增强太阳光反射和中红外热辐射,从而实现高效降温效果的材料。传统研究多通过相转化或烧结工艺在氧化铝陶瓷<sup>[6]</sup>或聚偏二氟乙烯-六氟丙烯<sup>[25]</sup>等人工介电材料中构筑微纳孔隙。为克服无机物脆性及合成工艺的高能耗,该范式向生物质体系的迁移发展出了自上而下与自下而上2种主流工艺路径。

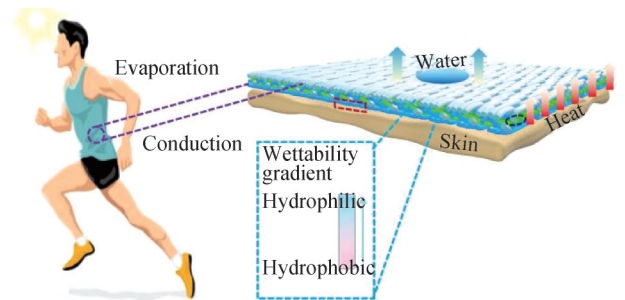


图3 d-CCF 热湿传递和汗液管理<sup>[23]</sup>

Fig.3 The d-CCF heat and moisture transfer and sweat management<sup>[23]</sup>

自上而下策略直接利用木材、棉麻等天然生物质固有的各向异性管胞与层级微观结构,通过化学脱木质素等处理原位扩大孔隙率,在保持天然骨架强度的同时大幅提升散射截面;自下而上策略则通过溶剂诱导相分离或冰模板定向冷冻干燥技术(图4)<sup>[25-26]</sup>,将提取出的生物质大分子溶液重新诱导凝胶化,构建出孔径分布精确匹配太阳光谱的三维分级

孔网络。这种结构迁移充分利用了生物质材料极性键的本征宽频红外吸收,实现了绿色可持续的高效制冷<sup>[27]</sup>。



图4 天然纤维素气凝胶制备<sup>[26]</sup>

Fig.4 Preparation of natural cellulose aerogel<sup>[26]</sup>

### 1.3 随机分布介质结构辐射制冷材料

随机分布介质结构辐射制冷材料是一种通过在聚合物基体中随机分布散射颗粒从而实现高效太阳反射和中红外热辐射的材料,能够在无需额外能源消耗的情况下有效降低物体表面温度<sup>[28]</sup>。例如,在聚甲基丙烯酸甲酯(图5)<sup>[29]</sup>或硅树脂<sup>[30]</sup>中随机分散SiO<sub>2</sub>微球或银纳米粒子。但在传统合成体系中,简单的物理共混极易导致无机颗粒团聚,且界面相容性较差。向生物质体系迁移时,该结构的设计思路转变为原位生长与化学锚固。研究者利用生物大分子主链上密集的氨基、羟基和羧基等活性位点作为微反应器,通过静电吸附或配位键合作用,诱导无机介电纳米颗粒在生物质三维支架内部原位形核并均匀生长。这种基于化学键合的迁移过程从根本上解决了高浓度介质团聚的难题,使得光学散射体在天然高分子网络中实现了高密度、高均匀性的随机分布,显著提升了复合材料的光学稳定性和力学韧性<sup>[31]</sup>。

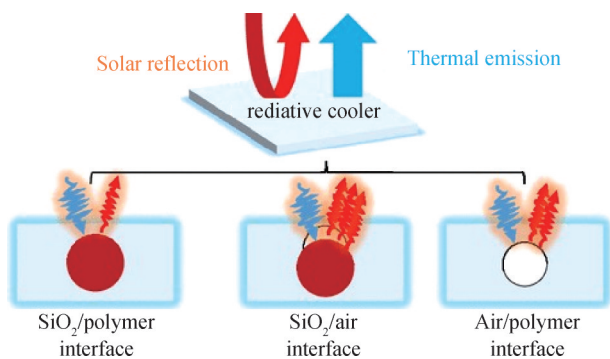


图5 复合柔性涂层的工作原理<sup>[29]</sup>

Fig.5 Working principle of composite flexible coatings<sup>[29]</sup>

## 2 生物质基辐射制冷材料的类型

生物质材料是指利用植物、动物或微生物等可再生生物质资源,通过物理、化学或生物方法加工制成的材料。这类材料具有相对廉价易得、可再生的特点,并且具有的独特化学结构和光学特性使其具有较高的太阳光反射率和高红外发射率,从而可以发挥辐射制冷的作用。利用生物质材料能够开发绿色环保且无污染的辐射制冷材料,助力国家“双碳”目标的实现<sup>[32]</sup>。

相较于传统的无机陶瓷或石油基聚合物,生物质材料在辐射制冷领域展现出显著的本征优势。首先,此类材料源于自然界生物体,具备高度的可再生性,其加工制备多基于水相体系或低能耗的物理改性,全生命周期碳足迹远低于人工合成高分子<sup>[33]</sup>。其次,生物质大分子内部天然存在大量极性官能团,例如纤维素的醚键及蛋白质的酰胺键,其本征分子振动频率能与中红外大气窗口发生强烈共振,这使得基体材料无需进行复杂的无机功能粒子掺杂即可获得优异的大气窗口热发射率<sup>[34]</sup>。

然而,生物质基辐射制冷材料同样存在难以忽视的物性限制。一方面,其大分子链中普遍存在不饱和键、共轭结构或微量杂质,在长期日光辐照下极易引发光氧自由基反应,导致材料分子链断裂并出现宏观黄变,从而使可见光反射率随服役时间延长而发生本质性变化<sup>[24]</sup>。另一方面,大分子链段上密集的羟基或氨基赋予了材料强烈的本征吸湿性。水分子的侵入和层间结合不仅会改变原始固气界面的折射率差,还极易削弱生物质大分子间的强氢键交联网络,导致微纳光学结构溶胀松弛或基体软化,这对其本征光谱调控精度的长期维持构成了底层物性层面的根本制约<sup>[35]</sup>。

目前,多种生物质材料(纤维素<sup>[36]</sup>、胶原<sup>[37]</sup>、蚕丝<sup>[18]</sup>、丝素蛋白<sup>[38]</sup>等)已经被用于制备辐射制冷材料。

### 2.1 纤维素基辐射制冷材料

纤维素作为自然界储量最丰富的可再生高分子,凭借其来源广泛、绿色可再生及易于进行化学与物理修饰的特性,已成为辐射制冷材料领域的研究热点<sup>[39]</sup>。纤维素适合制备辐射制冷材料的原因在于其含有丰富的化学键振动模式和多层次宏微观结构,这使纤维素具有高红外发射率和高太阳光反射率,从而具有优异的辐射制冷性能<sup>[40]</sup>。

目前,制备纤维素基辐射制冷材料的方法一类是采用自上而下的设计理念,直接利用纤维素本体的多级孔结构制备具有高散射性能的多孔纤维素基

辐射制冷材料<sup>[40]</sup>。针对传统制冷技术能耗高、加剧城市热岛效应等问题,袁帅霞<sup>[32]</sup>以生物质资源(木屑和红麻)为原料,去除对太阳光有较强吸收的木质素,保留原料本身的孔道结构,制备了具有优良日间辐射制冷性能的天然纤维素基降温材料。纤维素材料的多层次结构可实现太阳光范围内的高反射,再结合纤维素 C-O-C 振动峰赋予的辐射性能,其制备的木纤维膜平均反射率为 82.6%,平均发射率为 99%,对比原木纤维可实现 6~10 °C 的温降;麻纤维膜具有 97.9% 的发射率和 91.3% 的反射率,对比红麻原料可降温约 6~10 °C。

同时,为推进辐射制冷材料的规模化应用,Sun Haodong 等<sup>[41]</sup>通过成熟的制浆造纸工艺,开发了一种由纤维素纤维和纳米羟基磷灰石颗粒组成的多孔纤维素辐射制冷薄膜。由于纤维素纤维内部独特的微纳米结构特性,使其表现出 94% 的高太阳反射率、95% 的超高红外热发射率,这使得其在日间的最大温度下降可达 8.8 °C。Li Jianguo 等<sup>[42]</sup>受果实分枝的独特结构和性质关系的启发设计了一种方法,即先对纤维素纤维(果树的枝干)进行纤维化处理,然后原位合成 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒(果树的果实),制备了可持续、坚固、可定制和可扩展的辐射冷却降温纤维素织物。这种纤维素纤维纤维化与 SiO<sub>2</sub> 原位生长的耦合策略显著增加了纤维素织物的粗糙度,使得该织物能够有效反射太阳光,反射率高达 97% (0.4~1.0 μm),并发射中红外光,发射率为 97% (8~13 μm)。特别值得注意的是,此冷却纤维素织物在经受 100 次机械洗涤和 100 d 暴露于空气中的情况下,仍具有耐用且有效的冷却特性以及理想的、高强度(~48 MPa)的水分蒸发率和透气性。

此外,另一类是采用自下而上的设计理念,以纤维素为基本构筑单元,通过相转换和整合等方式,从微观尺度逐步构建具有特定微观结构的纤维素基辐射制冷材料。为降低辐射制冷材料的制备成本与环境影响,J. Jaramillo-Fernandez 等<sup>[43]</sup>在较干燥的条件下利用反相法,未使用任何复杂的纳米结构和充当光学散射体的介电颗粒,仅使用丰富且可生物降解的纤维素衍生物就获得了高效的分层多孔醋酸纤维素薄膜。由于纤维素具有无序的网络形态,赋予此薄膜丰富的孔隙率,其太阳光反射率可达 87.9%,中红外发射率可达 78.2%。此外,Cai Chenyang 等<sup>[44]</sup>通过一种合理的溶剂诱导相分离技术,开发了一种具有明确分层微/纳米结构的新型纤维素复合薄膜,用于高效日间辐射冷却(图 6)。利用空气孔隙/纤维素界面的多重散射以及纤维素复合系统中高效的化学

键(C-O-C、C-O、Ti-O),纤维素复合薄膜表现出 97.6% 的超高太阳反射率和 95% 的高发射率,可实现低于空气温度 6.5 °C 的日间辐射冷却。最重要的是,此薄膜具有优异的抗紫外性能,在连续 720 h 紫外光照测试后,其太阳光反射率仍保持恒定。

受天然纤维素层次结构启发,Zhong Shenjie 等<sup>[45]</sup>将天然纤维素材料的层次结构与微纳米气孔整合到纤维素涂层中,以此研究出一种环保的分层纤维素基织物,该种织物具有优良的被动日间辐射冷却性能。由于天然纤维素材料具有独特的层级微观结构及纤维素大分子链的分子振动和拉伸,研究所获得的辐射冷却纤维素基织物在太阳光谱(0.3~2.5 μm)内具有 90.2% 的高太阳反射率,在大气窗口(8.0~13.0 μm)内具有 98.1% 的高发射率。在 728 W/m<sup>2</sup> 的太阳辐射下,有织物覆盖的模拟皮肤温度比原始棉低 6.5 °C。

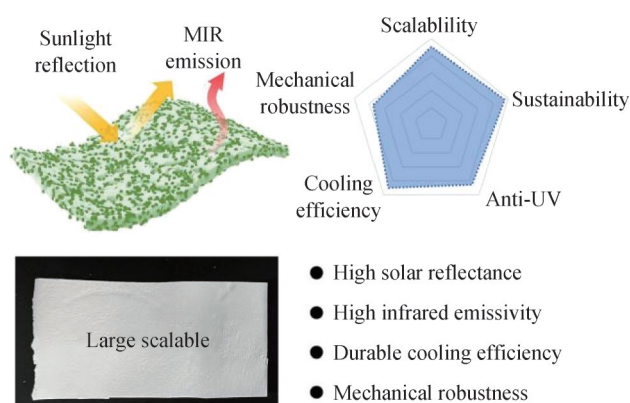


图 6 新型纤维素复合薄膜辐射制冷示意图及其性能<sup>[44]</sup>

Fig.6 Schematic diagram and performance of radiation-induced cooling in novel cellulose composite films<sup>[44]</sup>

## 2.2 胶原基辐射制冷材料

天然胶原蛋白是一种生物质材料,其分子由 3 条  $\alpha$  肽链组成,形成了一种螺旋状的结构。该结构使胶原蛋白具有独特三维网络空间、微观层级结构及多反应活性官能团,从而赋予胶原良好的辐射制冷性能<sup>[46]</sup>,能够将人体热量以电磁波的形式通过大气窗口耗散至外太空<sup>[47]</sup>,可用于制备胶原基辐射制冷材料。

为开发一种具有优异辐射制冷性能的生物基可穿戴材料,Xie Long 等<sup>[48]</sup>将 Mg<sub>11</sub>(HPO<sub>3</sub>)<sub>8</sub>(OH)<sub>6</sub> 填充在胶原蛋白纤维内部,同时将 Mg<sub>11</sub>(HPO<sub>3</sub>)<sub>8</sub>(OH)<sub>6</sub> 和聚偏氟乙烯-六氟丙烯共聚物复合涂饰在胶原蛋白纤维表面,通过“里应外合”策略构筑双层可穿戴天然皮肤(图 7)。由于胶原微纳米纤维和复合涂层具有不规则微孔结构,使该种材料具有较高的太阳光反射率

(92.7%)与红外发射率(95%),在户外环境下,表现出优异的辐射冷却性能。面对现代军事与特种领域对集热伪装、物理防护及环境适应性于一体的多功能柔性材料的迫切需求,Wang Xiaoling等<sup>[49]</sup>以牛皮为基底,通过戊二醛交联制备原始皮革后,采用原位生长法在其三维层级纤维支架上引入SiO<sub>2</sub>纳米颗粒,再于其背面刷涂200 μm厚的SiO<sub>2</sub>纳米颗粒/聚氨酯隔热层,最后经聚二甲基硅氧烷表面改性,成功开发出多功能热伪装装甲。牛皮的微结构使该装甲表现出高达61.4%的孔隙率、低热扩散率(1.24×10<sup>-7</sup> m<sup>2</sup>/s)和导热系数(0.04 W/(m·K)),在0.9~2.3 μm波段的近红外波反射高达80%,可实现1 h的持久热伪装效果,同时其兼具疏水性、阻燃性、柔韧性及可裁剪性。

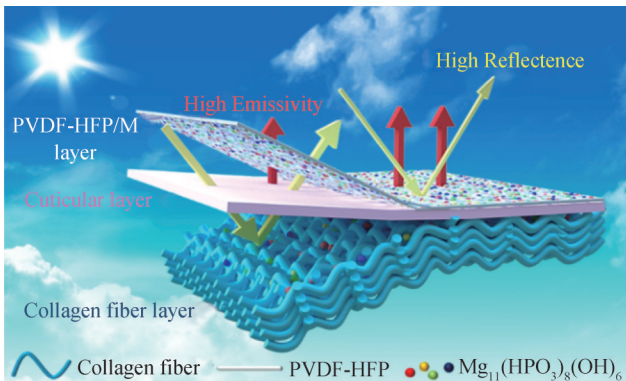


图7 可穿戴辐射冷却皮肤原理<sup>[48]</sup>

Fig.7 Working principle of wearable radiative cooling skin<sup>[48]</sup>

为开发出能够适应复杂多变环境、能按需进行冷却或加热的智能热管理生物质基辐射制冷材料,Mo Caiqing等<sup>[37]</sup>先将多壁碳纳米管通过真空抽滤的方式渗透到天然皮革的超细纤维主链中,再在其背面喷涂多孔乙酸,开发了一种不对称双层皮革/多壁碳纳米管/多孔乙酸织物。皮革的层级多孔结构和多孔乙酸分子的化学键使得此织物的冷却层具有高太阳反射率(92.0%)和高红外发射率(90.2%),能够提供平均10℃的亚环境辐射冷却效果,而加热层具有高太阳吸收率(98.0%),可实现出色的被动辐射加热,并通过焦耳加热有效补偿加热。

### 2.3 丝素蛋白辐射制冷材料

丝素蛋白作为蚕丝的主要组成部分,是一种天然的高分子蛋白质,其独特的结构与性能使其成为制备辐射制冷材料的理想基材,这主要是由于丝素蛋白的蛋白质骨架(即酰胺基团)具有高红外发射率,能够通过8~13 μm的大气窗口将人体热量以红外辐射形式直接散发到宇宙中;同时,直径在0.37~1.52 μm的丝素微球可以通过米氏散射效应反射

0.3~2.5 μm波段的太阳光,减少热量吸收,这使得蚕丝在辐射制冷领域有广泛应用。

为提升天然蚕丝纺织品的热舒适性与功能性,同时赋予其持久的辐射冷却性能,Zhu Bin等<sup>[50]</sup>利用分子键合设计和可伸缩耦合试剂辅助浸涂的方法,以四丁基钛酸酯作为耦合试剂,通过将其与氧化铝纳米颗粒和蚕丝纤维耦合,制备纳米加工蚕丝纺织品。蚕丝中丝素蛋白分子链的活性位点和表面氨基/羧基官能团促进Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米颗粒的键合与稳定附着,从而增强纺织品的辐射冷却性能。在阳光直射下,纳米加工的蚕丝温度比环境温度低约3.5℃,与天然蚕丝相比,涂有纳米加工蚕丝的模拟皮肤温度降低了8℃。Wang Yuting等<sup>[51]</sup>将再生丝素蛋白水溶液通过简单的乙醇诱导自组装方法制备丝素蛋白微球,并利用丝素蛋白微球高红外发射率和高太阳反射率作用在棉织物表面,赋予其辐射冷却能力。在白天户外测试中,与纯棉织物和纯丝织物相比,涂有丝素蛋白微球的棉织物分别实现了5.1℃和2.3℃的平均温度下降。

针对创面愈合过程中因局部过热导致的不适与炎症风险,Zhang Qian等<sup>[52]</sup>开发出一种具有日间辐射制冷功能的新型创面敷料,该敷料由双层结构组成,其中底部伤口接触层由具有生物相容性的丝素蛋白纤维薄膜构成,上层由聚酰胺纳米纤维构成。丝素蛋白分子链中的氨基和羧基官能团可与聚酰胺纳米纤维形成氢键网络,在纤维界面构建稳定的分子级结合,同时其天然的多孔微观结构为敷料提供了丰富的光散射界面,协同聚酰胺纳米纤维的中红外透明特性,使该敷料在太阳光波段的反射率高达96%,在大气窗口波段的发射率达到94%,展现出理想的辐射冷却特性。此外,经过优化的分级纳米纤维架构在确保水蒸气顺利传输的同时,可有效阻隔外源性微生物侵入(图8)。

### 2.4 其他新兴生物质基辐射制冷材料

除上述三大类外,该领域的材料谱系正不断扩展。例如,通过化学脱木素处理的木材或竹纤维,不仅完全保留了天然管胞的各向异性直通孔道结构,大幅提升了光散射截面,还展现出比原木更优异的机械强度<sup>[53]</sup>。细菌纤维素凭借其超细的纳米三维网络和极高的比表面积,被证实是构筑高透明辐射制冷薄膜的理想前驱体<sup>[54]</sup>。此外,壳聚糖与海藻酸盐等海洋源生物质多糖材料,因其极佳的成膜性、凝胶化特性及丰富的金属离子配位能力,近期也被广泛用于开发具有相变储热或湿度响应功能的智能复合辐射制冷涂层<sup>[55]</sup>。

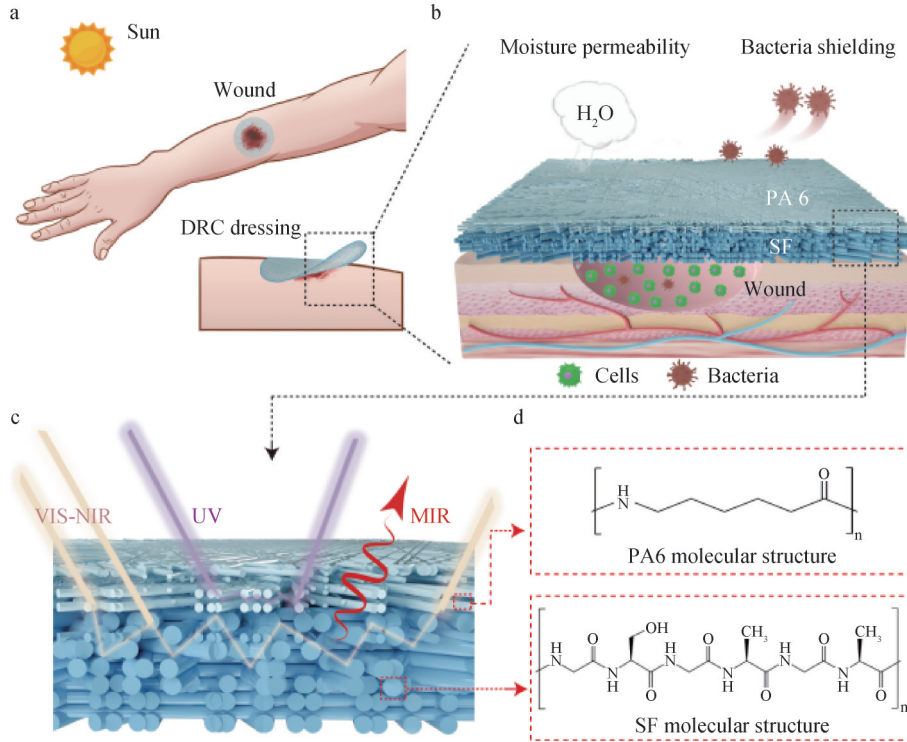


图8 阳光照射下局部伤口环境管理DRC敷料结构设计及其工作机理<sup>[52]</sup>

Fig.8 Structural design and working mechanism of the DRC dressing for local wound microenvironment management under sunlight irradiation<sup>[52]</sup>

### 2.5 生物质基辐射制冷材料类型总结

针对上述三大类生物质基辐射制冷材料,表1总结了典型生物质基材的选择、对应的光学调控机理及其在实际应用中的优缺点。

### 3 生物质基辐射制冷材料的应用

生物质基辐射制冷材料不仅展现出优异的辐射制冷性能,还具备生物安全性高、功能多样及成本较

低等优势。通过对其多尺度结构进行调控,可进一步赋予材料柔韧性、耐久性和智能响应等特点。目前,该类材料已广泛应用于节能建筑<sup>[58-60]</sup>、人体热管理<sup>[9-10,61]</sup>和光伏器件<sup>[12-13,62]</sup>等领域,为零能耗被动式制冷提供了可持续的解决方案,有助于推动“双碳”目标的实现。

#### 3.1 节能建筑

生物质基辐射制冷材料具有良好的环境亲和性

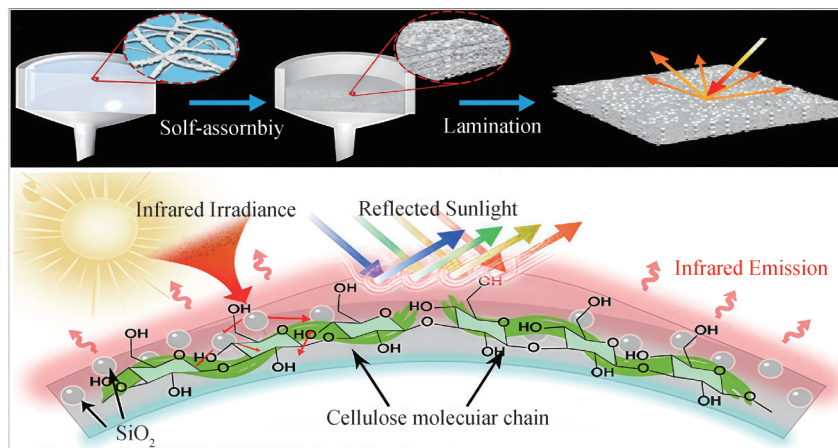
表1 典型生物质基辐射制冷材料的结构与性能

Tab.1 Structures and properties of typical biomass-derived radiative cooling materials

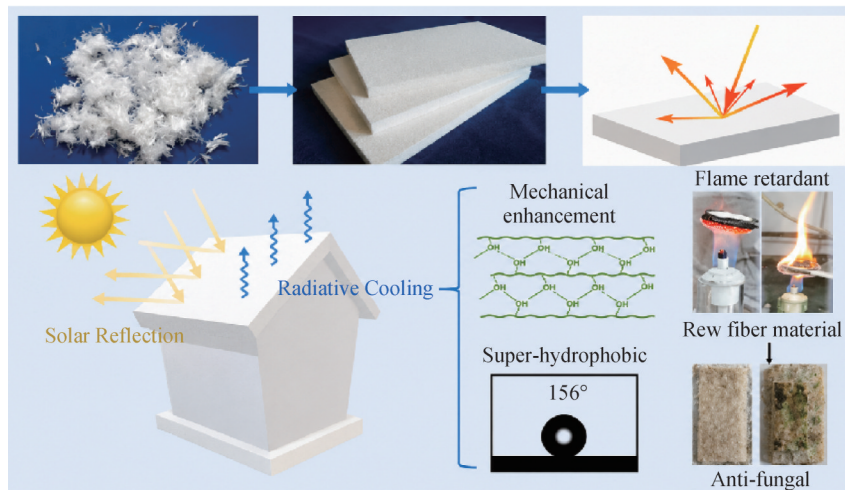
生物质材料	核心材料体系	结构特征	核心制备方法	反射率/发射率/%	降温效能	参考文献
纤维素	纤维素+纳米羟基磷灰石	多孔网络	制浆造纸工艺	94/95	表面降温 8.8 °C	[41]
	纤维素+SiO <sub>2</sub>	多孔网络	纤维化与原位合成	97/97	具持久冷却能力	[42]
	醋酸纤维素衍生物	分层多孔	溶剂反相法	87.9/78.2	亚环境降温约 5 °C	[43]
	纤维素复合体系	分层多孔	溶剂诱导相分离	97.6/95	亚环境降温 6.5 °C	[44]
	天然纤维素织物	多孔网络	结构整合	90.2/98.1	模拟皮肤降温 6.5 °C	[45]
胶原基	皮胶原+磷酸盐+聚合物	分层多孔	表面涂饰与内部填充	92.7/95	优异辐射冷却	[48]
	牛皮胶原+SiO <sub>2</sub> +聚氨酯	随机分布	戊二醛交联与原位生长	80	实现 1 h 持久热伪装	[49]
	天然皮革+碳纳米管	分层结构	真空抽滤与原位喷涂	92.0/90.2	亚环境降温约 10 °C	[37]
丝素蛋白基	天然蚕丝+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米颗粒	多孔网络	偶联剂辅助浸涂	~95/>90	独立降温约 3.5 °C	[50]
	再生丝素蛋白微球+棉织物	随机分布	乙醇诱导自组装	显著高于纯棉基底	较纯棉织物降温 5.1 °C	[51]
	丝素蛋白膜+聚酰胺纳米纤维	分级多孔	氢键网络构建	96/94	展现理想冷却特性	[52]

与建筑适配性,能与多种建筑基材稳定复合,且具有可再生、加工能耗低等优点。其多孔结构有助于高效发射中红外辐射并高反射太阳光谱,在无需外部能源驱动下持续降低建筑结构表面与室内环境温度,显著减少主动制冷的能源消耗与温室气体排放,为节能建筑的可持续发展提供关键技术支持<sup>[61]</sup>。Chen Yipeng等<sup>[56]</sup>为应对建筑领域日益严峻的能耗与环境压力,通过将脱木质素的生物质纤维素纤维和无机微球自底向上组装到3D网络主体中,再进行热

压工艺加工后,得到一种高性能且价格低廉的木质纤维素冷却结构材料。这种结构材料不仅具有出色的阻燃性和户外抗菌性能,还具有高红外发射率和高太阳光反射率,能够达到优异的辐射降温效果(图9)。户外的建筑应用结果显示,该材料能够在日间和夜间分别以6℃和8℃的平均温度完成24h连续冷却,且机械强度比纯木纤维散装材料强8倍,比大多数结构材料具有更高的比强度,赋予建筑优异的机械性能。



(a) 木质纤维素冷却结构材料的结构及辐射制冷原理<sup>[56]</sup>



(b) 冷却结构材料制备过程及所具备的性能<sup>[62]</sup>

图9 木质纤维素制冷结构材料

Fig.9 Lignocellulosic cooling structural materials

Wang Peipei等<sup>[57]</sup>将纤维素溶液作为黏合剂,结合脱木质素木片,并通过冷冻铸造策略构建了一种具有定向多孔结构的纤维素/木片复合泡沫。这种泡沫辐射制冷材料在紫外至近红外光范围内的平均反射率高达95.2%,在大气透明窗口的平均发射率为94.8%,理论冷却功率约为130 W/m<sup>2</sup>,能够有效降低建筑表面的温度。同时,复合泡沫上涂有疏水涂层,不仅使建筑具备了良好的防潮性,而且增强了建筑

的反射率。为了满足人们对于建筑美学的追求,Chen Yipeng等<sup>[58]</sup>以离子染色纤维素为原料,采用凝胶辅助和热压方法制备出不同离子染色的冷却纤维素块状材料。该材料可通过大气透明窗在红外波段向外太空散热,表现出稳定的发射率,且在太阳辐射光谱中具有高反射率。户外建筑测试结果表明,在阳光直射下,3种不同颜色的离子染色冷却纤维素块体材料在保持自身颜色的同时实现了低于空气温度

2.2~3.9 °C的降温效果。此外,这种材料具有优异的机械性能,抗弯强度达到 111 MPa,冲击韧性达到 79.8 kJ/m<sup>2</sup>,而且制造工艺简单,有利于产业化。

然而,在节能建筑的实际户外大规模应用中,生物质基辐射制冷材料面临着严苛的长期环境老化制约。首先是紫外光老化问题。研究指出,天然生物质对紫外线极其敏感,长期的光氧暴露会导致大分子主链断裂与表面严重黄变,直接削弱可见光波段的反射率,还可能导致材料的相对分子质量、拉伸强度和模量下降<sup>[63]</sup>;其次是生物污损难题。由于生物质本身是微生物的优质碳源,在高温高湿的建筑外环境中,多孔表面极易滋生真菌与藻类,这种生物污损不仅会降解机械骨架,还会使表面发黑,将材料致命性地从“辐射散热器”转变为“太阳能吸收器”。

### 3.2 人体热管理

生物质基辐射制冷材料具有良好的生物相容性,与皮肤接触具有不致敏性,且具有可再生、轻质柔软、透气舒适的特点,能通过高效发射中红外辐射实现炎热环境中高效的零能耗被动降温,在可穿戴热管理领域应用前景广阔。针对现有功能性降温织物在力学强度、耐用性和穿戴舒适性方面难以兼顾的普遍问题,Jiang Shan 等<sup>[9]</sup>创新性地将再生纤维素气凝胶与空心二氧化硅的混合物构筑护套层,采用

湿法同轴纺丝和常压干燥相结合的方式制备得到具有树轮结构(HSiO<sub>2</sub>/C@C)的复合气凝胶降温织物。该织物具有高太阳反射率(92.6%)、高红外发射率(96.1%)、隔热性能(0.062 W/(m·K))及优异的机械强度(19.4 MPa)。户外织物应用实测数据显示,该复合气凝胶降温织物在 850 W/m<sup>2</sup>阳光下可比棉织物低 5 °C,进一步验证了其优异的降温效果。值得注意的是,该复合材料还兼顾了良好的透气性、防尘性与耐久性,解决了功能性降温织物在实际应用中易破损、舒适度差等问题。

随着可穿戴技术的发展,人们对能够根据环境或需求进行智能温度调节的个人热管理纺织品提出了更高要求。Cheng Ningbo 等<sup>[10]</sup>通过一步静电纺丝技术开发了一种透气的双模式皮革纳米纺织品,该材料具有不对称的皱纹光子微结构和双面润湿性,可实现高效的个人热管理(图 10)。这种双模式皮革纳米纺织品不仅具有良好的透气性、柔软性、拉伸性和排汗能力,经实验证明,该纺织品的两侧均表现出优异的太阳反射率和红外发射率,其冷却侧平均太阳反射率高达 94.8%,红外发射率为 95.0%,而加热侧的平均太阳反射率可达 95.3%,红外发射率为 91.5%,显著优于棉(平均太阳反射率为 51.3%,红外发射率为 90.5%)和黑棉(平均太阳反射率为 75.5%,红外发射率为 91.7%)。

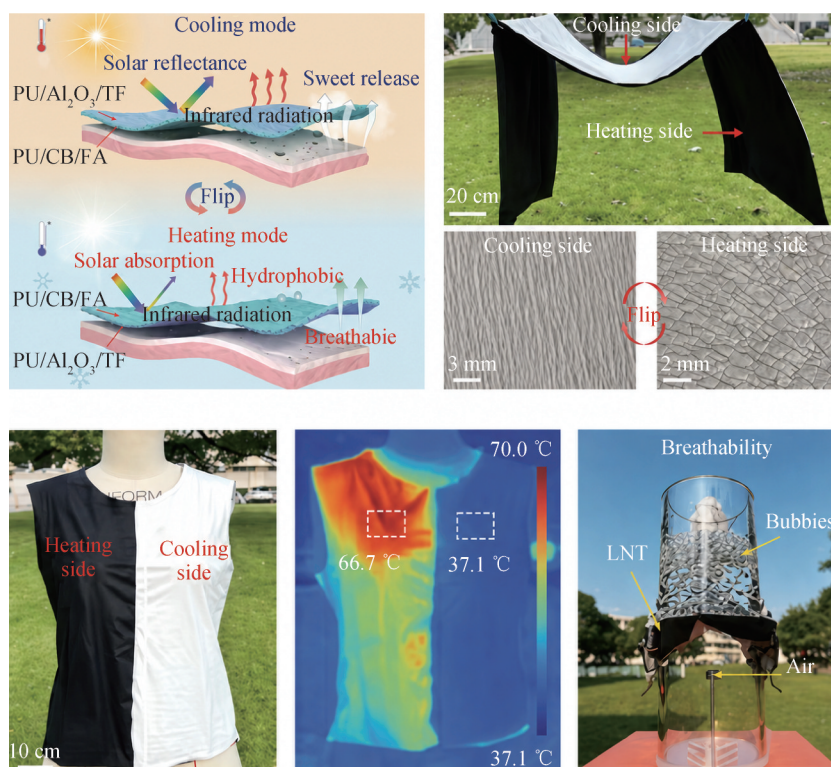


图 10 双模式皮革纳米纺织品(LNT)的冷却和加热原理<sup>[10]</sup>

Fig.10 Cooling and heating principles of the dual-mode leather-like nanotextile (LNT) <sup>[10]</sup>

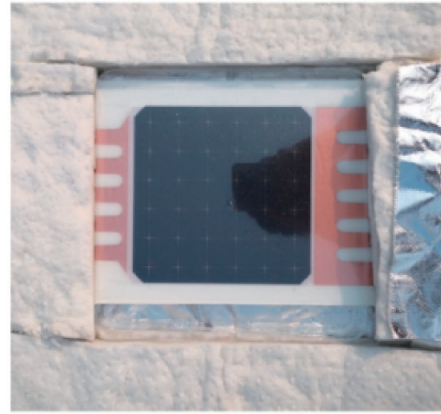
针对传统辐射制冷材料在智能热管理中缺乏动态响应能力的问题, Shi Shukuan 等<sup>[59]</sup>采用原位培养法, 在细菌纤维素纳米纤维网络形成过程中引入二氧化硅微球, 通过生物合成工艺制备了具有可切换透明度的辐射制冷薄膜。在人体热管理应用方面, 这种材料能够根据人体出汗状态自动调节散热模式, 在干燥状态下其呈现不透明状态, 太阳反射率高达 95.3%, 而在润湿状态下可切换为透明状态(太阳透过率为 70%), 中红外发射率达到 93.4%。实验数据显示, 在正午太阳辐射条件下, 该材料可实现平均低于环境温度 3.7 °C 的降温效果, 日间和夜间冷却功率分别为 95.7 W/m<sup>2</sup> 和 103.3 W/m<sup>2</sup>。

在人体热管理应用中, 虽然部分生物质基辐射制冷材料已具备一定的优良特性, 其实际工程化仍受限于微环境传热与光学本征缺陷。其一是高湿微气候下的辐射阻滞效应。由于水分子在 8~13 μm 波段存在强红外吸收, 所以皮肤-织物界面的高饱和水蒸气会形成“红外屏障”, 严重削弱织物向冷宇宙的净辐射散热功率, 导致实际降温幅度远低于理论值。其二是复杂化学暴露导致的界面光学失效。在日常穿戴中, 人体皮肤表面分泌的皮脂及洗涤剂外源有机物, 其折射率(1.45~1.50)与生物质大分子相近。当此类低表面张力脂质渗入织物的分级多孔网络时, 会引发折射率匹配效应, 直接消解用于诱发多重米氏散射的固-气界面, 造成织物可见光及近红外波段太阳反射率的不可逆衰减<sup>[31]</sup>。

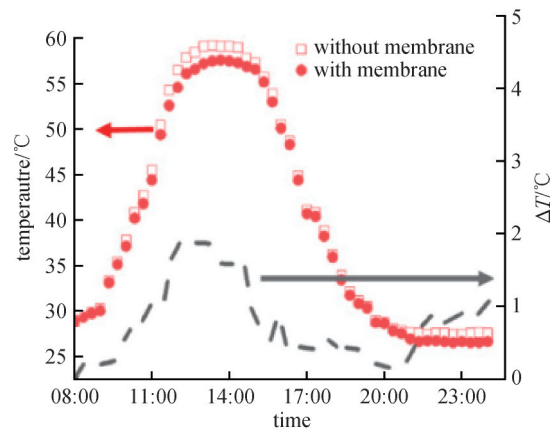
### 3.3 光伏器件

生物质基辐射制冷材料具有良好的光伏相容性, 与器件封装体系适配性高, 且具有轻质低耗、结构可设计性强等特点, 能通过高效发射中红外波段热量并反射太阳光谱实现光伏组件在户外环境中的高效零能耗被动冷却, 在提升光伏效率与延长器件寿命方面应用潜力显著。Lü Tiezheng 等<sup>[12]</sup>为提高光伏组件的发电效率与长期运行稳定性, 制备了一种人造纤维素膜, 并将其嵌入透明塑料乙烯/醋酸乙烯酯封装层内, 以实现太阳能组件的降温。热实验结果表明, 在常规工作条件下, 有纤维素膜嵌入的太阳能组件温度与普通太阳能组件相比可降低约 2 °C (图 11), 这是由于嵌入的纤维素膜使太阳能组件具有折射率匹配和高热发射率的特性, 故可利用这种透明辐射冷却功能降低组件温度。嵌入的纤维素膜不仅有助于增强太阳能组件的辐射冷却能力, 还可以通过其雾度特性增强光捕获能力, 有助于提升晶体硅太阳能组件的综合性能。

此外, 为提升现有光伏组件的散热性能, F. I.



(a) 微型太阳能组件的热实验装置



(b) 测量太阳能组件的表面温度曲线

图 11 嵌入纤维素膜的太阳能组件热实验及表面温度响应<sup>[12]</sup>

Fig.11 Thermal experiment and surface temperature response of the solar module embedded with a cellulose membrane<sup>[12]</sup>

Chowdhury 等<sup>[13]</sup>通过将纤维素与聚二甲基硅氧烷混合, 经溶液浇铸与热压得到一类新型纤维素改性聚合物辐射冷却薄膜。由于此类薄膜具有 10% 的太阳光吸收率和 90% 的红外发射率, 将其覆于光伏组件玻璃表面, 可在阳光直射下使光伏组件表面温度比环境低 3.97 °C, 从而增强光伏组件的功率输出。户外对比测试显示, 覆膜组件正午峰值温度较未覆膜对照降低约 2 °C; 其高太阳透过率与 8~13 μm 波段 92% 的热发射率协同实现折射率匹配与高效辐射散热, 同时膜层雾度提升光捕获能力, 使短路电流增益 0.6%, 综合效率得以优化。针对光伏器件户外工作时因积热导致光电转换效率下降的问题, S. Gamage 等<sup>[60]</sup>采用静电纺丝法和流延法, 制备出多孔结构反射型与均一结构透明型 2 种纤维素基辐射制冷材料, 通过调控微观结构实现对太阳光相互作用的精准调控。制备结果显示, 2 种材料均具备高红外发射率和低太阳吸收率, 其中反射型材料太阳反射率达 90%, 透明型材料太阳透过率超 90%。将二者作为涂层应

用于硅基光伏样品,日间照射下反射型可使样品降温 15 °C,透明型可降温 5 °C。

在光伏器件被动冷却的工程化应用中,生物质基辐射制冷材料受限于界面传热衰减与动态热评估维度的缺失。一方面是多层结构带来的界面热阻累积与热应力疲劳。在户外高低温交变循环下,生物质高分子与无机封装基底的热膨胀系数差异极易导致界面微观脱层。由此引入的空气隔热层会直接切断电池向冷却层的传热途径,导致散热性能发生断崖式退化。另一方面是实际非稳态工况下传热评估机制的局限性。当前部分研究多依赖于稳态或模拟条件下的表面单点温度测量,而光伏面板在自然太阳光下长期运行时,其内部的光热耦合场是高度动态且非均匀的。为了准确量化系统的整体散热效能,单纯考察顶层薄膜的绝对温降已难以反映真实工况,评估体系必须引入针对组件正面与背面温度-时间变化梯度的多维监测<sup>[64]</sup>。

## 4 结论

近年来,生物质基日间辐射制冷材料因其来源广泛、环境友好等优势,在被动式制冷领域展现出广阔的应用前景。本文系统综述了纤维素、皮胶原、丝素蛋白等典型生物质基辐射制冷材料的最新进展。通过多层复合、分级多孔以及随机介质等创新微纳结构设计,这类材料不仅实现了对太阳光谱的高效反射和中红外波段的强发射,还在节能建筑、人体热管理及光伏器件冷却等多个领域展现出卓越的实际应用潜能。

究其本质,上述宏观制冷效能源于生物质本征化学特性与物理微纳结构的深度协同,其核心机制如下:在分子尺度,生物质富含的极性官能团的分子振动频率与 8~13 μm 中红外波段高度重合,凭借本征共振即可实现极高的大气窗口发射率;在介观尺度,天然生物质的分级多孔骨架构建了丰富的折射率突变界面,通过缩短光子散射自由程引发强烈的米氏散射与多重散射,实现全太阳光谱的宽频高反射。此外,实际制冷效能是多维参数协同的结果。孔径分布需精准匹配太阳辐射峰值波长,孔隙率需与厚度和表面粗糙度相适配以确保彻底消光。为突破性能极限,常引入无机填料以强化热发射并弥补近红外吸收盲区。然而,该复合策略面临必然的性能权衡,高浓度刚性微粒虽能提升冷却功率,但强烈的内部散射会牺牲材料的本征透明性,破坏氢键网络导致柔韧性丧失;同时,高能耗无机填料的引入也削弱了生物质“全生命周期可降解”的绿色属性。

未来,生物质基辐射制冷材料的研究应聚焦于精准光谱调控、多功能集成与绿色工艺创新,以推动其在“双碳”目标下的实际应用与可持续发展:1)深化结构与光谱的构效关系研究,解决生物质宽频带辐射导致的大气窗口选择性调控精度不足问题,突破高温高湿环境下的制冷效率制约;2)通过绿色交联或仿生界面工程,开发在抗紫外老化、耐水分侵蚀、耐久性与全生命周期环境友好性之间取得平衡的新型生物质材料体系;3)发展可大规模连续化生产的微纳加工技术,平衡材料微纳结构调控精度与加工成本,推动其走向规模化工程应用。

本文受四川省自然科学基金(2026NSFSC1382)、西南科技大学博士基金(25zx7143)、西南科技大学大学生创新基金精准资助专项(JZ25-061)项目资助。(The project was supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2026NSFSC1382), Natural Science Foundation of Southwest University of Science and Technology (No. 25zx7143), and Precision Funding Special Program of the College Students' Innovation Fund of Southwest University of Science and Technology (No. JZ25-061).)

## 参考文献

- [1] Xu Aokang, Shi Jing, Zhao Lefan, et al. Urban ventilation network identification to mitigate heat island effect [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 125: 106364.
- [2] Meng Weihao, Kragt A J J, Gao Yingtao, et al. Scalable photochromic film for solar heat and daylight management [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(5): 2304910.
- [3] 唐立涛. 面向寒冷气候个人热管理棉织物的构筑及性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2024. (Tang Litao. Construction and properties of personal thermal management cotton fabric toward frigid weathers [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2024.)
- [4] 黄梦晨. 聚合物基辐射降温材料的功能化及其调温机理研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2024. (Huang Mengchen. Functionalization and temperature regulation mechanism of polymer-based radiative cooling materials [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2024.)
- [5] Fan Shanhuai, Li Wei. Photonics and thermodynamics concepts in radiative cooling [J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(3): 182-190.
- [6] Lin Kaixin, Chen Siru, Zeng Yijun, et al. Hierarchically structured passive radiative cooling ceramic with high solar reflectivity [J]. *Science*, 2023, 382(6671): 691-697.
- [7] Grocholski B. Cooling in a warming world [J]. *Science*, 2020, 370(6518): 776-777.

- [8] 吴娴. 辐射致冷材料应用于夏热冬冷地区居住建筑的性能实测研究及节能潜力模拟分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2024. (Wu Xian. Experimental testing on the actual performance and simulation analysis on the energy saving potential of radiative cooling materials as applied to residential buildings in hot summer and cold winter zone in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.)
- [9] Jiang Shan, Jiang Shaoqi, Yan Jiatong, et al. Large-scale continuous production of cellulose/hollow SiO<sub>2</sub> composite aerogel fibers for outdoor all-day radiation cooling [J]. *Nano Energy*, 2025, 136: 110688.
- [10] Cheng Ningbo, Wang Zhaohui, Lin Yanyan, et al. Breathable dual-mode leather-like nanotextile for efficient daytime radiative cooling and heating [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(33): 2403223.
- [11] Yun J H, Yoo Y J, Kim H R. Recent progress in thermal management for flexible/wearable devices [J]. *Soft Science*, 2023, 3(2): 12.
- [12] Lü Tiezheng, Huang Jiangpin, Liu Wei, et al. From sky back to sky: Embedded transparent cellulose membrane to improve the thermal performance of solar module by radiative cooling[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, 18: 100596.
- [13] Chowdhury F I, Xu Qiwei, Sinha K, et al. Cellulose-upgraded polymer films for radiative sky cooling [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 272: 107824.
- [14] Dong Yan, Zhang Xinping, Chen Lingling, et al. Progress in passive daytime radiative cooling: a review from optical mechanism, performance test, and application [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 188: 113801.
- [15] Zhang Kai, Mo Caiqing, Tang Xuelian, et al. Hierarchically porous cellulose-based radiative cooler for zero-energy food preservation [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(20): 7745–7754.
- [16] Lu Jing, Fan Yile, Lou Xing, et al. Diatomite-based recyclable and green coating for efficient radiative cooling [J]. *Biomimetics*, 2024, 9(1):50.
- [17] Jiang Shubao, Li Ming, Hu Zhikun, et al. A low-cost and large-scale producible polymer multilayer radiative cooling film for reducing plant heat stress [J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(1): 528–536.
- [18] Wu Xunen, Wang Yida, Liang Xiaoping, et al. Durable radiative cooling multilayer silk textile with excellent comprehensive performance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(11): 2313539.
- [19] Luo Mingkai, Liao Jiakuan, Wei Xiongbang, et al. High-performance radiative cooling PVDF-HFP film based on controllable porous structure [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2025, 199: 108901.
- [20] Ma Ruijie, Xue Tong, Yu Guo, et al. Multifunctional radiative cooling cellulose fabrics by *in situ* grown ZnO for personal thermal management [J]. *Cellulose*, 2024, 31(18): 11185–11198.
- [21] Li Linhu, Zhang Qing, Liu Guimin, et al. Durable hybrid metamaterial with hierarchically porous structure for efficient passive daytime radiative cooling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498: 155516.
- [22] Yu Tao, Liu Rumin, Wang Xu, et al. Transparent radiative cooling films based on dendritic silica for room thermal management [J]. *Carbon Neutralization*, 2025, 4(4): e70020.
- [23] Li Zhijiang, Lu Yanping, Guo Ning, et al. Hygroscopic and cool boron nitride Nanosheets/Regenerated flax fiber material microstructure Dual-Cooling composite fabric [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 633: 489–499.
- [24] Song Jianing, Zhang Wenluan, Sun Zhengnan, et al. Durable radiative cooling against environmental aging [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4805.
- [25] Zhai Yaling, Li Jiabin, Su Xiaolong, et al. Subambient daytime radiation cooling protective materials based on micro-nano polyethylene fibers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(32): 46208–46217.
- [26] Sun Jidan, Zhou Yahui, Zhou Jingyi, et al. Filtration capacity and radiation cooling of cellulose aerogel derived from natural regenerated cellulose fibers [J]. *Journal of Natural Fibers*, 2023, 20(1): 2181276.
- [27] Tian Yanpei, Shao Hong, Liu Xiaojie, et al. Superhydrophobic and recyclable cellulose-fiber-based composites for high-efficiency passive radiative cooling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(19): 22521–22530.
- [28] 黎子琦, 祝智军, 吴晓鸿, 等. 辐射冷却材料的结构调控及其在建筑领域应用的研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(11): 5783–5799. (Li Ziqi, Zhu Zhijun, Wu Xiaohong, et al. Research progress on structural control of radiative cooling materials and its application in buildings [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 5783–5799.)
- [29] Lei Maoqin, Hu Yufan, Song Yingnan, et al. Transparent radiative cooling films containing poly(methylmethacrylate), silica, and silver [J]. *Optical Materials*, 2021, 122: 111651.
- [30] Atiganyanun S, Plumley J B, Han S J, et al. Effective radiative cooling by paint-format microsphere-based photonic random media [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4):

- 1181–1187.
- [31] Zeng Shaoning, Pian Sijie, Su Minyu, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling [J]. *Science*, 2021, 373 (6555) : 692–696.
- [32] 袁帅霞. 天然纤维素基日间被动辐射制冷材料的制备及应用研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022. (Yuan Shuaixia. Preparation and application of natural cellulose based materials for passive daytime radiation cooling [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2022.)
- [33] Ma Jianwen, Zeng Furong, Lin Xincen, et al. A photoluminescent hydrogen-bonded biomass aerogel for sustainable radiative cooling [J]. *Science*, 2024, 385 (6704): 68–74.
- [34] Zhang Yun, Zhu Wenkai, Zhang Chi, et al. Atmospheric water harvesting by large-scale radiative cooling cellulose-based fabric[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(7): 2618–2626.
- [35] Xu Jiajia, Li Jingyu, Wan Chenqi, et al. Water variation and its induced structural changes in cellulose extracted from wood[J]. *Cellulose*, 2025, 32(8): 4689–4703.
- [36] Zhang Kai, Lei Xiaojuan, Mo Caiqing, et al. A zero-energy, zero-emission air conditioning fabric [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(11): 2206925.
- [37] Mo Caiqing, Lei Xiaojuan, Tang Xuelian, et al. Nanoengineering natural leather for dynamic thermal management and electromagnetic interference shielding [J]. *Small*, 2023, 19(42): 2303368.
- [38] Chen Y H, Hwang C W, Chang S W, et al. Eco-friendly transparent silk fibroin radiative cooling film for thermal management of optoelectronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(33): 2301924.
- [39] Wang Qianqian, Zhou Rui, Sun Jianzhong, et al. Naturally derived Janus cellulose nanomaterials: anisotropic cellulose nanomaterial building blocks and their assembly into asymmetric structures[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(9): 13468–13491.
- [40] 蔡晨阳, 丁春香, 武小丹, 等. 生物质纤维素基日间辐射制冷材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2024, 41 (11): 5800–5811. (Cai Chenyang, Ding Chunxiang, Wu Xiaodan, et al. Research progress of biomass cellulose based daytime radiative cooling materials [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(11): 5800–5811.)
- [41] Sun Haodong, Tang Fengjie, Chen Qunfeng, et al. A recyclable, up-scalable and eco-friendly radiative cooling material for all-day sub-ambient comfort [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 445: 139786.
- [42] Li Jianguo, Tang Fengjie, Bi Yinghao, et al. Engineering biomimetic cellulose fabric for sustainably and durably cooling human body [J]. *Nano Energy*, 2023, 117: 108921.
- [43] Jaramillo-Fernandez J, Yang Han, Schertel L, et al. Highly-scattering cellulose-based films for radiative cooling[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(8): 2104758.
- [44] Cai Chenyang, Chen Fuling, Wei Zechang, et al. Large scalable, anti-ultraviolet, strong cellulose film with well-defined dual-pores for longtime daytime radiative cooling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 476: 146668.
- [45] Zhong Shenjie, Song Limiao, Ren Wenjun, et al. Radiative cooling cellulose-based fabric with hierarchical structure for outdoor personal thermal management [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151482.
- [46] Chen Qijue, Pei Ying, Tang Keyong, et al. Structure, extraction, processing, and applications of collagen as an ideal component for biomaterials – a review [J]. *Collagen and Leather*, 2023, 5(1): 20.
- [47] Huang Mengchen, Yang Maiping, Guo Xiao-Jing, et al. Scalable multifunctional radiative cooling materials [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 137: 101144.
- [48] Xie Long, Wang Xuechuan, Bai Zhongxue, et al. Facile “synergistic inner-outer activation” strategy for nano-engineering of nature-skin-derived wearable daytime radiation cooling materials [J]. *Small*, 2023, 19 (26) : 2207602.
- [49] Wang Xiaoling, Tang Yi, Wang Yaping, et al. Leather enabled multifunctional thermal camouflage armor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 196: 64–71.
- [50] Zhu Bin, Li Wei, Zhang Qian, et al. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocessed silk [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(12): 1342–1348.
- [51] Wang Yuting, Zhang Haiyan, Xu Zhiguang, et al. Silk fibroin microsphere-enabled passive radiative cooling ability for cotton fabrics [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2025, 57: 105766.
- [52] Zhang Qian, Qi Chao, Wang Xueyang, et al. Daytime radiative cooling dressings for accelerating wound healing under sunlight[J]. *Nature Chemical Engineering*, 2024, 1 (4): 301–310.
- [53] Cai Chenyang, Zhao Xin, Miao Chao, et al. Bioinspired durable daytime radiative cooling wood: realizing outdoor longtime use [J]. *Nano Letters*, 2025, 25 (11) : 4369–4378.
- [54] Ding Yuancheng, Tang Guowei, Zhao Haoyu, et al. Scalable, flexible, and UV-resistant bacterial cellulose composite film for daytime radiative cooling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17 (4) : 6857–6866.
- [55] Lauster T, Mauer A, Herrmann K, et al. From chitosan to chitin: bio-inspired thin films for passive daytime

- radiative cooling[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(11): 2206616.
- [56] Chen Yipeng, Dang Baokang, Fu Jinzhou, et al. Cellulose-based hybrid structural material for radiative cooling[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(1): 397–404.
- [57] Wang Peipei, Fang Luxin, Wang Shihao, et al. Thermal insulating cellulose/wood foam for passive radiant cooling [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 294: 139438.
- [58] Chen Yipeng, Zhang Jiayi, Zhuang Zirui, et al. Ion-dyed cellulose-based radiative cooling structural material [J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 220: 119094.
- [59] Shi Shukuan, Lv Pengfei, Valenzuela C, et al. Scalable bacterial cellulose-based radiative cooling materials with switchable transparency for thermal management and enhanced solar energy harvesting [J]. *Small*, 2023, 19 (39): 2301957.
- [60] Gamage S, Banerjee D, Alam M M, et al. Reflective and transparent cellulose-based passive radiative coolers [J]. *Cellulose*, 2021, 28(14): 9383–9393.
- [61] Kousis I, D’Amato R, Pisello A L, et al. Daytime radiative cooling: a perspective toward urban heat island mitigation[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(7): 3239–3250.
- [62] Piao Xixi, Cao Yanwei, Guo Hanxiang, et al. Multifunctional bamboo fiber hybrid structural materials for daytime radiation cooling [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(48): 15692–15698.
- [63] Song Jianing, Shen Qingchen, Shao Huijuan, et al. Anti-environmental aging passive daytime radiative cooling [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(10): 2305664.
- [64] Sun Bo, Lu Lin, Chen Jianheng, et al. Full-spectrum radiative cooling for enhanced thermal and electrical performance of bifacial solar photovoltaic modules: a nationwide quantitative analysis [J]. *Applied Energy*, 2024, 362: 123037.

#### 通信作者简介

黄梦晨,女,特聘副教授,西南科技大学制造科学与工程学院,13109146810, E-mail: mengchenhuang@swust.edu.cn。研究方向:微纳仿生制造、光热调控材料、功能表界面涂层材料。

#### About the corresponding author

Huang Mengchen, female, distinguished associate professor, School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, 86-18292001608, E-mail: mengchenhuang@swust.edu.cn. Research fields: micro-nano bionic manufacturing, photothermal regulation materials, and functional surface & interface coating materials.