

基于红外辐射调控的个人热管理材料研究进展

史婷婷 刘东青 程海峰

Research progress of personal thermal management materials based on infrared radiation regulation

SHI Tingting, LIU Dongqing, CHENG Haifeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合材料夹芯圆柱壳水下振动和声辐射的三维弹性解

Three-dimensional elastic solutions for underwater vibration and sound radiation of composite sandwich cylindrical shells
复合材料学报. 2019, 36(5): 1159–1168 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180911.005>

电子束辐射对玻纤/尼龙6复合材料性能的影响

Electric beam irradiation effect on properties of glass fibers/nylon 6 composites
复合材料学报. 2017, 34(9): 1895–1901 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161124.007>

基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测

Nondestructive debonding detection of fiber reinforced plastics strengthened concrete structure based on infrared thermal imaging with laser thermal excitation
复合材料学报. 2020, 37(2): 472–481 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190428.001>

吸波超材料研究进展

Research progress in metamaterial absorber
复合材料学报. 2021, 38(1): 25–35 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004>

铁氧体及其复合吸波材料的研究进展

Research progress of ferrite and its composite absorbing materials
复合材料学报. 2020, 37(11): 2684–2699 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200727.002>

石墨烯及其衍生物掺配水泥基材料研究进展

Research progress of cement-based materials blended with graphene and its derivatives
复合材料学报. 2021, 38(2): 339–360 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200902.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.003

基于红外辐射调控的个人热管理材料
研究进展



分享本文

史婷婷, 刘东青*, 程海峰*

(国防科技大学 空天科学学院 新型陶瓷纤维及其复合材料重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 维持热舒适是人体进行正常生命活动的基本条件, 传统暖通空调系统调节温度能效较低, 同时产生大量碳足迹。基于红外辐射调控的个人热管理材料通过人体自身及局部微环境热管理实现个性化温度调节, 为缓解日益紧张的能源负担、维持人体热舒适提供了新途径。本文基于红外辐射调控的个人热管理材料最新研究进展, 分室内和室外两种环境阐述辐射降温、辐射保温机制, 并介绍辐射降温/保温一体的温度调节模式。论述基于红外辐射调控的个人热管理材料相关设计思路、制备方法、微观结构和温控效果, 分析个人热管理材料发展趋势。

关键词: 红外辐射; 个人热管理; 辐射降温; 辐射保温; 人体热舒适

中图分类号: P422.6; O432.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)05-2480-15

Research progress of personal thermal management materials based on
infrared radiation regulation

SHI Tingting, LIU Dongqing*, CHENG Haifeng*

(School of Aerospace Science and Engineering, Science and Technology on Advanced Ceramic Fibers and Composites
Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Maintaining thermal comfort is of essential significance for human normal life, but traditional heating, ventilation, and air conditioning systems are inefficient and produce large carbon footprint. Personal thermal management materials based on infrared radiation regulation provide new ways to mitigate the pressing burden of energy crisis and keep thermal comfort of humankind, which harnesses thermal management of human body and local microenvironment for personalized temperature control. Here, the latest progress on personal thermal management materials with engineered infrared radiation properties are reviewed. The regulation principles of radiative cooling and radiative heating are elucidated from both indoor and outdoor scenarios, and the bidirectional temperature regulation mode of radiative cooling/heating is discussed. The design ideas, fabrication, microstructure and temperature regulation effect of corresponding materials are elaborated, an outlook about development trend is provided as well.

Keywords: infrared radiation; personal thermal management; radiative cooling; radiative heating; human thermal comfort

热舒适感可以衡量人体对外界热环境的满意程度, 与人体体温调节机制、主观心理意识和建筑热物理均相关。人体凭借代谢、出汗、血液循

环等维持体温恒定、保持热舒适, 但这种自主调节能力有限, 面对剧烈变化的环境温度, 人体可能出现中暑或者失温等症状^[1-2]。调节人体热平衡、

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-07-02; 录用日期: 2022-07-29; 网络首发时间: 2022-08-09 15:04:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220809.003>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52073303); 湖南省自然科学基金 (2021JJ10049)

National Natural Science Foundation of China (52073303); Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ10049)

通信作者: 刘东青, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为自适应红外伪装、红外隐身和智能热控材料 E-mail: liudongqing07@nudt.edu.cn;

程海峰, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为动态自适应红外伪装及光电功能材料与器件 E-mail: chf.cfc@gmail.com

引用格式: 史婷婷, 刘东青, 程海峰. 基于红外辐射调控的个人热管理材料研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2480-2494.

SHI Tingting, LIU Dongqing, CHENG Haifeng. Research progress of personal thermal management materials based on infrared radiation regulation [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2480-2494(in Chinese).

保持热舒适是维持基本生命活动的前提，更影响着社会的生产发展。当前广泛使用的暖通空调(HVAC)系统约占全球用电能耗的40%，存在如下弊端：(1)建筑内部空间大、包含众多非生命体，调节室内整个空间的温度来维持个人热舒适能效较低；(2)热舒适感阈值存在个体差异，HVAC系统难以满足个性化温度调控需求；(3)HVAC系统限于室内使用，不适用于户外人员^[3-5]。有研究表明，空调的制冷、制热模式设置温度提高或降低4℃可分别减少约45%和35%的建筑能耗^[6]。在全球越来越重视环保和国家“双碳”战略背景下，个人热管理材料立足人体自身及周围局部微环境的热管理，在夏季提高热量耗散、在冬季抑制热量损失，满足个性化热舒适需求的同时有望带来空调设置温度的改变。根据是否需要外界能量驱动，个人热管理材料可以分为无源的红外辐射调控材料^[7-10]、热传导调控材料^[11-12]及有源的电热材料、热电冷却材料等^[13-14]。与HVAC系统相比，个人热管理材料着眼于人体而无需考虑室内空间冷热载荷，通过结构设计可将应用场景拓宽到室外。以往基于温度调控设计的个人降温材料如风冷和液冷服需外界能量，整体笨重、便携性差；相变冷却服需封装处理，结构复杂；蒸发冷却服需人体出汗量达到特定值才能发挥作用，不适用于室内人员^[15]。而个人热管理材料具有结构简单、效果明显、易兼容人体热舒适的优势，在应对环境温度变化和调控热舒适方面展现出巨大潜力，为缓解日益紧张的能源负担、维持人体热舒适提供了一个新途径。

个人热管理材料设计需综合考虑人体、衣物、环境三者的相互作用。热传导、热对流、热辐射和汗水蒸发是人体同环境进行热量交换的主要途径^[3]，人体红外辐射明显，净辐射功率密度约100 W/m²，皮肤表现出接近黑体的高发射率($\varepsilon_{\text{skin}} \approx 0.98$)。人体皮肤34℃时的红外辐射主要分布在7~14 μm，并在9.5 μm处达到峰值^[16]。而大气存在红外透过率较高的窗口，其中长波窗口为8~14 μm，与人体辐射主要分布波段重合。研究发现，室内静止状态下热辐射引起的人体热量损失超过60%^[17-21]。作为人体同外界热交换的重要界面，衣物使人们在炎热的夏季免受阳光暴晒，在冰冷的冬季免受严寒侵蚀，是最直接的热舒适调控手段^[22]。传统衣物材料主要为棉花、羊毛、亚麻、

蚕丝等天然纤维及聚酯等合成纤维，其结构中常见官能团及对应红外吸收峰有C—O伸缩振动峰(7.7~10 μm)、C—N伸缩振动峰(8.2~9.8 μm)、芳环C—H弯曲振动峰(7.8~14.5 μm)、亚硫酰基S=O伸缩振动峰(9.4~9.8 μm)等^[23-24]。这些特征峰位与人体红外辐射分布区间及长波大气透明窗口重叠，红外吸收率高，通常大于0.7^[25]。在夏季，非理想红外透明衣物材料不利于人体辐射散热；在冬季，红外高发射衣物材料不能消除人体向太空热沉(温度约-270.15℃)辐射散热。传统衣物材料未充分利用热辐射的重要作用，无法实现基于红外辐射调控的个人高效热管理。此外，传统衣物材料发射率特征单一固定，无法适应环境温度的动态变化。

以人体、衣物、环境间的相互作用为研究对象，基于红外辐射调控的个人热管理材料可通过调控衣物材料的红外发射率 ε 、透过率 τ 和反射率 ρ 来控制热交换、保持热舒适。目前，基于红外辐射调控的个人热管理材料主要包括辐射降温、辐射保温和辐射降温/保温一体三种类型，每种类型又可根据室内、室外不同应用环境进一步细分。本文基于红外辐射调控的个人热管理材料最新研究进展，分室内和室外两种环境阐述辐射降温、辐射保温机制，并讨论辐射降温/保温一体双向调节模式，介绍相关材料的设计思路、制备方法、微观结构和温控效果。最后总结了建筑用智能热管理材料向个人热管理材料推广所面临的挑战，并分析目前有望产业化的个人辐射热管理材料制备手段及未来发展趋势。

1 个人辐射降温材料

1.1 室内个人辐射降温材料

人体和环境之间的辐射热交换公式^[26]如下：

$$q_{\text{rad}} = \frac{\sigma(T_{\text{tex}}^4 - T_{\text{amb}}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{tex}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{amb}}} - 1} \approx \sigma\varepsilon(T_{\text{tex}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \tag{1}$$

其中： q_{rad} 代表经过衣物从人体到环境的辐射热流； σ 代表斯蒂芬-玻尔兹曼常数； ε_{tex} 代表衣物表面发射率； $\varepsilon_{\text{amb}} \approx 1$ 代表环境发射率^[27]； T_{tex} 和 T_{amb} 分别代表衣物表面和环境的温度。根据式(1)，当热传导和热对流一定时，提高辐射热流 q_{rad} 可实现降温，升高温度 T_{tex} 虽可提高辐射热流但无法为人体降温，而调控发射率 ε_{tex} 更可行。室内环境不受外部巨大辐射热源影响，根据室内环境下红外辐射

在人体热量损失中的重要占比及人体皮肤高发射率特征(图1),结合人体红外辐射分布7~14 μm 与长波大气透明窗口8~14 μm 重叠的特点,红外透明材料有利于人体辐射散热,是室内个人辐射降温设计的理想候选者,同时衣物材料需具备可见光不透明特征。对此,Tong等^[28]于2015年首次

提出用于个人辐射降温的红外透明、可见光不透明衣物(ITVOF)概念。除基本的光谱需求外,个人热管理材料需尽可能兼顾透气、透湿等基本的穿着舒适性,结合Mie共振散射理论^[29],与可见光波长相当的纳米级孔隙结构能够散射可见光实现不透明,微观孔隙的存在还可保证透气性。

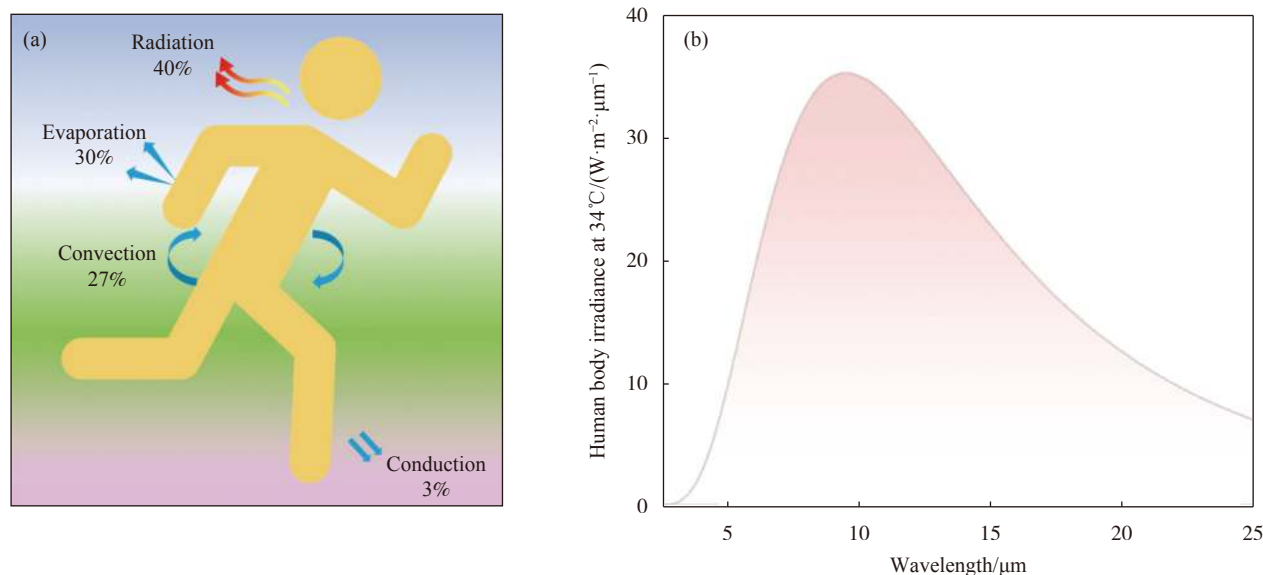


图1 (a) 人体主要散热途径及占比; (b) 人体皮肤 34℃ 的红外辐射出射度曲线

Fig. 1 (a) Major heat dissipation pathways of human body with corresponding proportions; (b) Human body infrared radiation curve at the skin temperature of 34℃

聚乙烯(PE)链段中仅含C—C和C—H键^[30]、聚丙烯(PP)特征官能团为—CH₃和—CH₂^[31]、聚四氟乙烯(PTFE)分子链中的—CF₂基团在1 155 cm⁻¹和1 215 cm⁻¹附近存在窄带吸收^[32]、脂肪族聚酰胺尼龙6(PA6)主要吸收峰来自酰胺基和亚甲基^[33],这几种聚合物红外特征峰离人体辐射区间相对较远,可视作红外透明。已有的室内个人辐射降温研究主要围绕PE材料进行设计,如广泛应用于锂离子电池行业的纳米多孔聚乙烯隔膜(nano PE),其孔径范围在50~1 000 nm,能散射可见光、呈白色不透明外观,是典型的ITVOF材料。但PE本征疏水、多孔膜呈电负性、穿戴易起静电^[34-35],对此,Hsu等^[7]利用聚多巴胺(PDA)对红外透明nano PE进行亲水改性,提高了nano PE的透气、透湿能力,而后与棉网层压得到室内辐射降温复合材料,体感温度比普通棉布降低2℃(图2(a))。除利用商用多孔结构的nano PE进行辐射降温设计,相分离法同样能够得到具有微观孔隙的PE材料,Liu等^[36]将液体石蜡与超高分子量聚乙烯(UHMWPE)在高

温熔融状态下混合挤压成膜,后期石蜡相分离留下散射可见光的纳米、微米级孔隙,满足不透明要求。此外,该研究利用甲氧基聚乙二醇胺(mPEG—NH₂)处理的PDA亲水微球颗粒(mPPDAs)进一步提高了UHMWPE多孔膜的透气、透湿性,与松散聚酯纤维网层压得到红外透过率约82.8%的层压结构材料(图2(b))。同年,Ke等^[37]首次基于人体工程学,以棉质衬衫作为对照组,验证了室内环境真实人体穿着nano PE衬衫时降温效果更优。

纤维形态的PE多采用熔体纺丝加工而成,在可穿戴性、可设计性和穿着舒适性方面比nano PE多孔膜更具优势,Peng等^[38]基于石蜡相分离留下纳米级孔洞的散射效应,制备了红外透明可见光呈白色的均匀多孔PE纤维,与棉织物对比降温效果约2.3℃,理论计算可节省约20.1%的能耗。鉴于彩色辐射降温材料更具有视觉舒适性,Cai等^[39]利用红外吸收较少的普鲁士蓝、直径100~200 nm黄色硅粉、氧化铁红与PE高温熔纺首次得到彩色PE辐射降温织物,与棉布相比辐

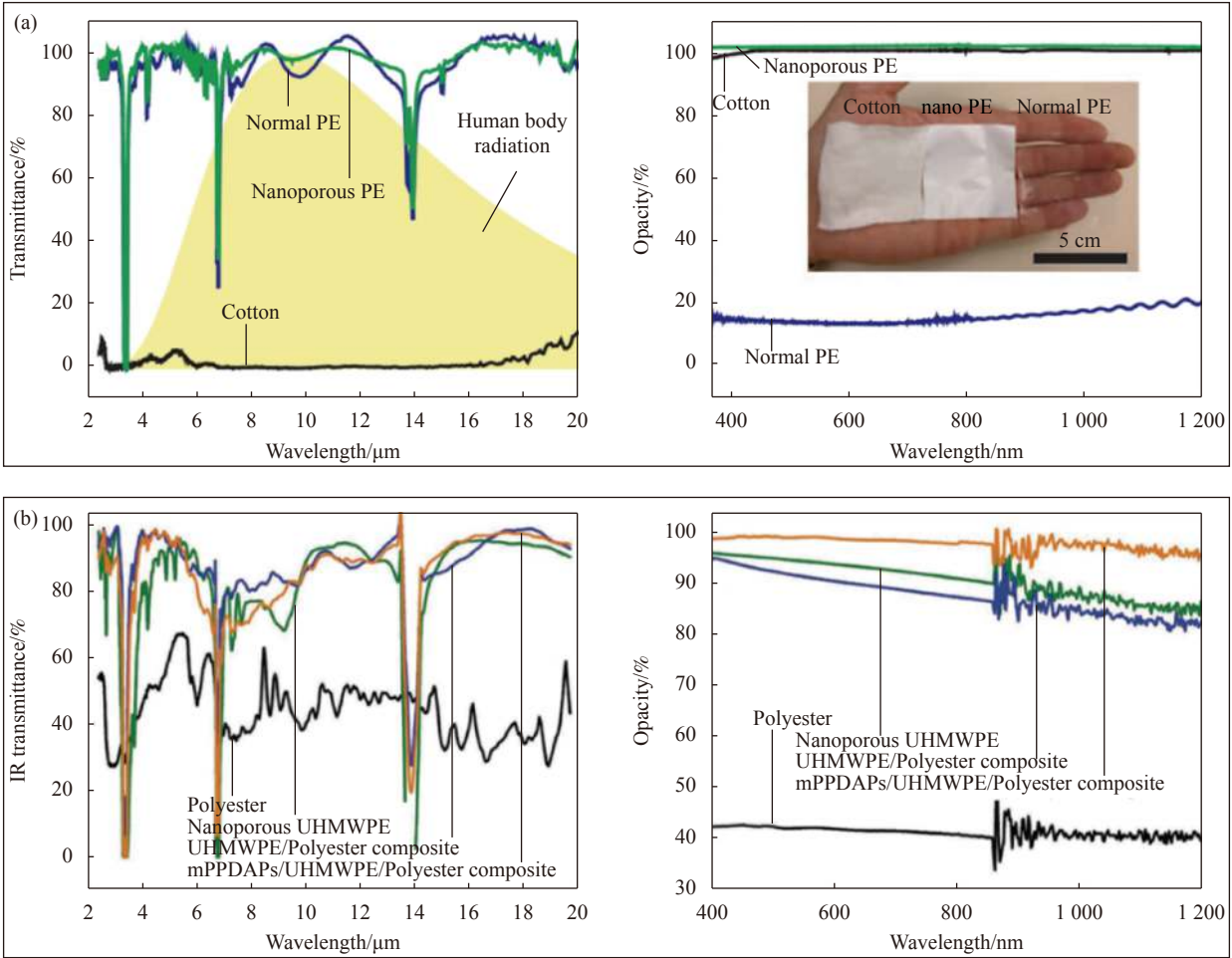


图2 (a) 纳米多孔聚乙烯隔膜 (nano PE) 和其他材料的红外透过率及可见光不透透率对比^[7]; (b) 利用甲氧基聚乙二醇胺处理的聚多巴胺 (PDA) 颗粒 (mPPDAPs)/超高分子量聚乙烯 (UHMWPE)-聚酯复合织物与同厚度对比材料的红外透过率和可见光不透明度^[36]

Fig.2 (a) Infrared transmittance and visible opacity of nanoporous polyethylene (nano PE) compared with other materials^[7]; (b) Infrared transmittance and visible opacity of methoxypoly(ethylene glycol)-aminoethyl/polydopamine particles (mPPDAPs)/ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE)-polyester composites and contrast materials with same thickness^[36]

射降温效果约 1.6~1.8℃。根据衣物材料全生命周期衡量指标, Alberghini 等^[40] 综合评估了 PE 用于个人辐射降温织物的可持续性, 发现熔体纺丝制备 PE 纤维可带来其表面的部分氧化, 这在一定程度上能提高亲水性从而改善穿着舒适性, 证明未经化学处理也能获得吸水性好, 集辐射降温、蒸发冷却于一体的速干 PE 织物。该研究证明着色颗粒与 PE 熔融共混这种干法着色过程绿色环保, 且着色颗粒不影响回收阶段对 PE 的近红外扫描识别^[3], 可做到全生命周期“低环境足迹”。

综上, 从 nano PE 多孔膜到 PE 多孔纤维再到彩色环保织物, 室内个人辐射降温 PE 材料在穿着舒适性、视觉舒适性和环保可持续方面的研究逐步完善, 而改善着色性和透气、透湿等穿着舒适性也是其他红外透明材料如 PTFE、PP 等实现

个人辐射降温应用亟待突破的难题。

1.2 室外个人辐射降温材料

设计室外个人辐射降温材料需考虑太阳辐射的影响, 经臭氧层吸收后到达地球表面的太阳辐射主要包括 5% 的紫外区、46% 的可见光区 and 49% 的近红外区, 总功率密度约 1 000 W/m²。其中, 可见光 (400~700 nm) 和近红外区 (700~2 500 nm) 共同占据太阳总辐照度的 93.4%^[41-42], 图 3 为大气质量 1.5 的地球表面标准 AM 1.5 G 太阳辐照光谱。除太阳辐射外, 空气温度、湿度和风速共同构成影响人体热舒适的环境因素。室外场景下人体和环境热交换公式如下^[43]:

$$P_{\text{heat stress}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{sun}} - P_{\text{rad}} - P_{\text{evap}} - P_{\text{conv}} - P_{\text{cond}} \quad (2)$$

其中: $P_{\text{heat stress}}$ 代表人体热负荷; P_{gen} 、 P_{sun} 分别代表人体代谢产热和吸收的太阳辐射能; P_{rad} 、

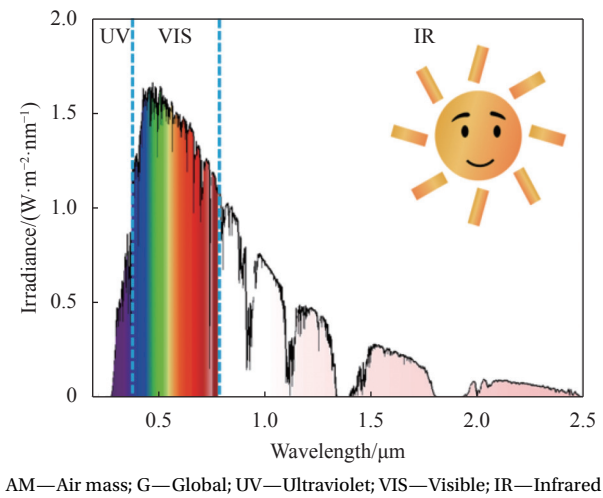


图3 AM 1.5 G 太阳辐射光谱

Fig. 3 Spectra of AM 1.5 G solar irradiation

P_{evap} 、 P_{conv} 、 P_{cond} 分别代表辐射、蒸发、对流和传导引起的热损耗。上述红外透明材料虽适用于室内辐射降温设计，但厚度需限制在150 μm内，且环境温度超过30℃时，红外辐射对人体散热贡献较小，单一红外透明材料不适用于室外个人辐射降温设计^[19]。此外，人体皮肤在太阳波段反射率低，可吸收超过60%的太阳辐射能^[43]。针对室外日间辐射降温，应选择太阳波段高反射率材料使吸热量最小化，配合长波大气窗口高发射率或红外透明材料使散热量最大化。已有材料设计思路具体包括利用高折射率无机纳米颗粒进行整理、利用聚合物纤维膜层压复合、将纳米颗粒与聚合物纤维膜复合，对应材料辐射降温效果往往还受微观形貌影响，有学者围绕纤维形貌对光谱性能的影响进行了特别研究。

由于纳米颗粒的折射率指数 n 和尺寸均会影响太阳波段反射率，可利用无机纳米颗粒对红外高发射率织物进行整理。Panwar等^[44]制备了一种半面高折射率 TiO_2 ($n \approx 2.44$)、半面低折射率 SiO_2 ($n \approx 1.48$)双组分复合球形颗粒，结合粒径调控实现近红外波段反射率的提高^[45-46]。其中，纳米 TiO_2 层存在大量晶界，经 $\text{SiO}_2@ \text{TiO}_2$ 粒子处理的棉织物比仅用单一 TiO_2 颗粒处理或未处理的对照组棉织物表现出更高的近红外反射率，即更优的反射隔热性能。基于高折射率纳米 Al_2O_3 颗粒对可见光的Mie散射，Wei等^[47]采用刮涂、浸渍工艺，对普通棉T恤进行 Al_2O_3 /醋酸纤维素涂层整理，使太阳波段反射率从62.6%提高到80.1%。此外，纳米 Al_2O_3 颗粒导热系数高(30~40 W/(m·K))，

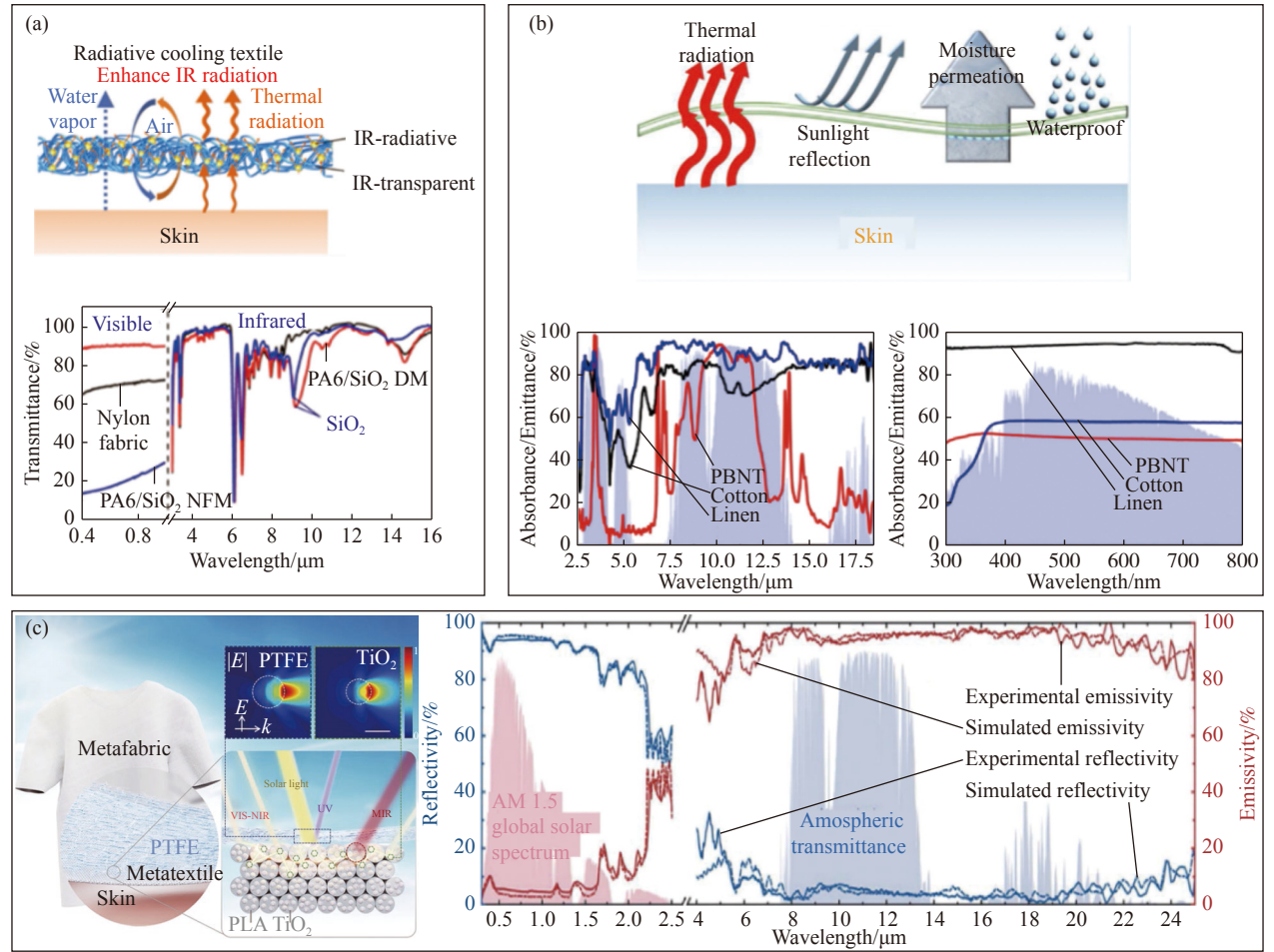
而醋酸纤维素红外发射率高，协同作用可实现2.3~8.0℃的降温效果。随后，Zhu等^[48]使用钛酸四丁酯偶联剂辅助分子键合，实现了高折射率纳米 Al_2O_3 颗粒对蚕丝的浸涂处理。丝素蛋白自组装赋予蚕丝分层结构，其红外发射率高、触感凉爽，引入纳米 Al_2O_3 颗粒可弥补蚕丝的本征紫外高吸收，使太阳波段反射率提高至95%同时不影响原有服用性能，实现了基于传统织物的日间辐射降温。

对比传统织物，静电纺丝聚合物纤维膜更轻薄，且电纺纤维直径和纤维相邻间隙多在纳米级别，对太阳光具有一定的Mie散射效应。聚氧乙烯(PEO)红外吸收峰限域在长波大气窗口内，呈选择性红外高发射特征，Li等^[49]根据Mie散射的建模结果进行分子与纳米尺度分级设计，卷对卷静电纺丝制备了厚约500 μm的PEO纳米纤维膜，其纤维直径为500~1 200 nm、呈宽分布特征，可强烈散射太阳光，结合PEO的红外选择性辐射可避免寄生吸热效应，实现全天候高效辐射降温。此外，多层聚合物纤维膜层压复合有利于构建非对称表面能梯度，实现汗液单向传输，Song等^[50]将尼龙PA-聚偏二氟乙烯-nano PE(PA-PVDF-nano PE)三层复合，内层PA和中间层PVDF纤维直径分别为100 nm和700 nm，与孔径10~1 000 nm的外层nano PE复合实现了300~800 nm的反射隔热。PVDF红外吸收峰集中在8~14 μm内，也具有红外选择性辐射特征，结合PVDF的红外选择性辐射及纳米结构对光的散射作用，该复合层压材料在太阳照射下可实现4.5~6.5℃的降温效果。内层PA亲水、外层nano PE疏水，可增强汗液自内向外传输、加速蒸发。综上，引入高折射率纳米颗粒或纳米级结构散射单元可将个人辐射降温材料应用场景拓宽到室外环境，聚合物膜层压复合可实现多种散射单元、多重散射机制的叠加，也为非对称功能层设计提供可能，提高材料的穿着舒适性。

基于纳米颗粒与聚合物纤维膜复合策略，由于纳米ZnO颗粒折射率高($n \approx 2$)且在0.4~16 μm几乎无吸收，Cai等^[43]将纳米ZnO颗粒与利用石蜡相分离得到的PE多孔膜复合，弥补了PE本征折射率不足($n \approx 1.5$)在太阳波段的吸热效应，得到光谱选择性室外个人辐射降温材料。光谱表征其在太阳波段反射率大于90%，长波大气窗口透过率约80%，可实现19.6℃降温效果。鉴于纳米 SiO_2 颗粒在9 μm附近的表面声子共振吸收，Xiao等^[51]制备了一种由 SiO_2 增强红外辐射的PA

6 复合纤维膜，其中纳米、微米级孔隙能反射可见光，兼顾透气性与热、湿舒适性(图 4(a))。类似地，纳米 Si₃N₄ 颗粒仅在 10 μm 处有红外吸收也可增强红外辐射，Song 等^[52] 利用经 PDA 亲水改性的 PE 做内层，原始 nano PE 做疏水外层，与负载纳米 Si₃N₄ 颗粒的红外选择性辐射 PVDF 中间层复合制备了聚合物基纳米光子织物 (PBNT)。PVDF 纤维直径在 200~600 nm，纳米 Si₃N₄ 粒径在 200~1 000 nm，Si₃N₄/PVDF 中间层表现出基于 Mie 散射的可见光高反射率，二者共振吸收呈红外高发射特征，室外辐射降温效果为 7.7~10.8℃(图 4(b))。同样，利用 SiO₂ 微球本征声子极化共振和聚合物分子骨架振动吸收可增强红外辐射，Wang 等^[53] 以 PVDF 和正硅酸乙酯 (TEOS) 混

合纺丝作为基底，在其表面沉积无序分布的 SiO₂ 微球得到柔性光子杂化结构，溶剂挥发制备的多孔混纺纤维和纤维间相邻孔隙共同构成散射单元，该结构太阳光反射率高达 97%，平均红外发射率超过 96%，峰值太阳辐射下可产生约 6℃ 降温效果。综合利用纳米颗粒及聚合物纤维膜进行全波段微纳结构分级设计，Zeng 等^[54] 利用高折射率纳米 TiO₂ 颗粒反射太阳光，与绿色环保、生物可降解的聚乳酸 (PLA) 熔体纺丝制备了均匀连续超纤维，后续加捻、上浆、编织，同紫外高反射率的膨体聚四氟乙烯 (ePTFE) 层压得到辐射致冷超材料织物。ePTFE 提高紫外反射率、纳米 TiO₂ 颗粒提高可见-近红外反射率、PLA 红外高发射，各组分协同作用可实现全波段光谱性能调控 (图 4(c))。



DM—Dense membrane; NFM—Nano fibrous membrane; PBNT—Polymer-based nanophotonic textile; PTFE—Polytetrafluoroethylene; PLA—Polylactic acid; VIS-NIR—Visible-near infrared; MIR—Mid-Infrared; E —Electric field of the incident light; k —Wave vector of the incident light

图 4 (a) 尼龙 6(PA 6)/SiO₂ 纤维膜的传热过程示意图和透射率^[51]; (b) 聚合物基纳米光子织物 (PBNT) 与光的相互作用及 PBNT 与棉和亚麻的光学性能^[52]; (c) 超材料织物的原理图和反射/发射光谱^[54]

Fig. 4 (a) Schematic heat transfer process and transmittance spectra of nylon 6 (PA 6)/SiO₂ fibrous membrane^[51]; (b) Interaction between the polymer-based nanophotonic textile (PBNT) and light, and optical properties of PBNT, cotton and linen^[52]; (c) Schematic and measured reflectivity/emissivity of the metafabric^[54]

该超材料织物具有 92.4% 的太阳光反射率和 94.5% 的长波大气窗口发射率，对比商用织物具有 5~7℃ 的降温效果。

无机纳米颗粒与聚合物纤维膜复合，衍生出多元化辐射调控单元，使分级结构设计成为可能，同时多重散射机制、多种散射单元协同作用可实现全波段光谱调控。

个人辐射降温材料降温效果往往还受形貌如孔隙、纤维直径的影响，围绕纤维微观形貌对光谱性能的影响进行特别研究，以红外透明 PA 6 为例，Song 等^[55]调控纺丝液浓度得到纳米串珠结构 PA 6 纤维，主体纤维直径约 100 nm，可引起基于 Mie 散射的紫外高反射；而直径约 230 nm 的串珠结构可拓宽 PA 6 纤维的尺寸分布，保持红外透过率的同时能提高可见光反射率，与红外透明 nano PE 层压得到可见光反射率约 73.6%、红外透过率大于 90% 的双层复合结构。随后，该研究团队选用 PE 和 PEO 经熔体纺丝、冷拉伸、浸泡去除表面 PEO 组分后得到具有褶皱结构的多孔复合纤维^[56]。孔隙和褶皱结构的 Mie 散射可弥补单一

PE 折射率不足在太阳波段的吸热效应，赋予该织物高达 93.77% 的太阳光反射率，在太阳直射下可实现 6.8℃ 的辐射降温效果。另一方面，PEO 中 C—O—C 化学键的伸缩振动增强了限域在长波大气窗口内的选择性红外辐射，该混纺织物红外发射率约 90.97%，质量轻、柔性高、力学强度良好、透湿防水、防紫外线，服用前景良好。

对长波大气窗口存在本征吸收的材料而言，调控纤维形貌也可在一定程度提高红外透过率，分析球形、椭球形串珠结构及圆柱形聚丙烯腈 (Polyacrylonitrile, PAN) 纳米纤维对太阳光的散射作用，Kim 等^[57]发现具有椭球形串珠结构 PAN 纳米纤维膜辐射降温性能最优，可实现超过 95% 的太阳光反射率和超过 70% 的红外透过率，证明即使 PAN 存在本征吸收也可通过调控纤维形貌提高红外透过率 (图 5(a))。同样，依据对纤维直径和质量密度建模优化结果，Kim 等^[58]利用存在本征红外吸收的 PVDF 制备了一种紫外-可见-近红外高反射、红外半透明的 PVDF 纳米纤维膜，与普通棉织物相比可实现约 12℃ 的降温效果 (图 5(b))。

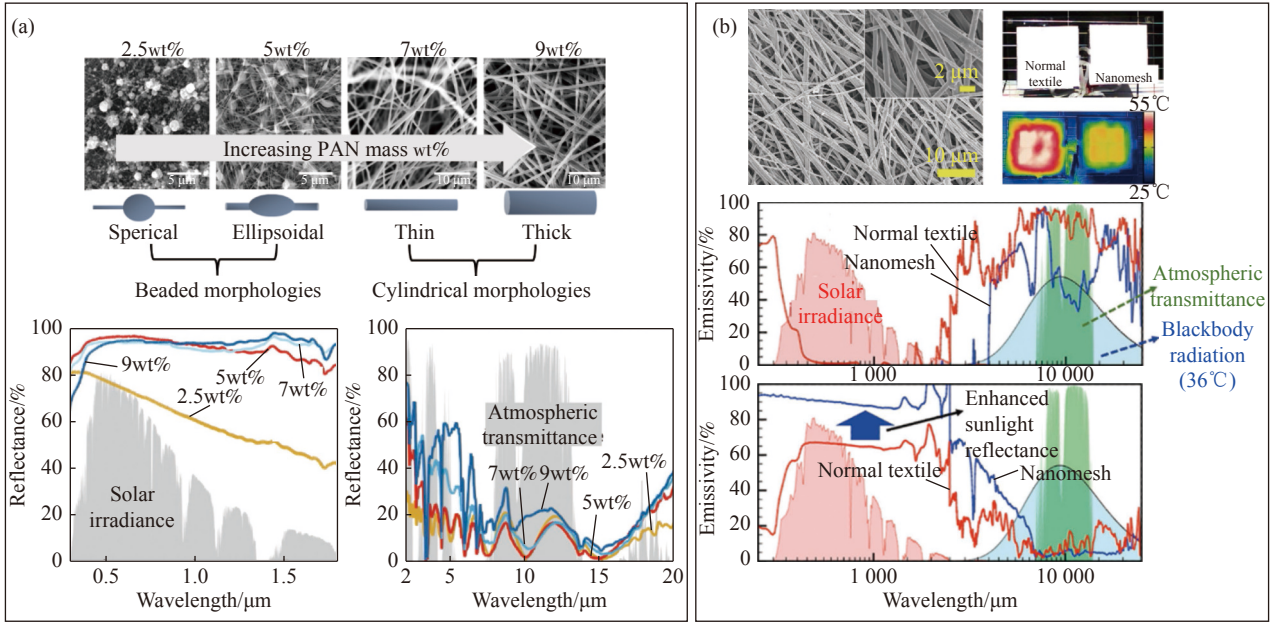


图 5 (a) 聚丙烯腈 (PAN) 纳米纤维的 SEM 图像和全光谱反射率^[57]; (b) 聚偏二氟乙烯 (PVDF) 纤维膜的 SEM 图像及同常规织物的光学特性和热图对比^[58]

Fig. 5 (a) SEM images and total spectral reflectance of polyacrylonitrile (PAN) nanofibers^[57]; (b) SEM images of polyvinylidene fluoride (PVDF) nanomesh and its optical properties, thermal images compared with those of the normal textile^[58]

控制材料纳米尺度的几何形貌来调控相关光学性能可在一定程度上改善聚合物种类、折射率指数 n 及材料本征红外吸收对光谱性能的制约，为个人智能辐射降温材料设计提供新思路。

2 个人辐射保温材料

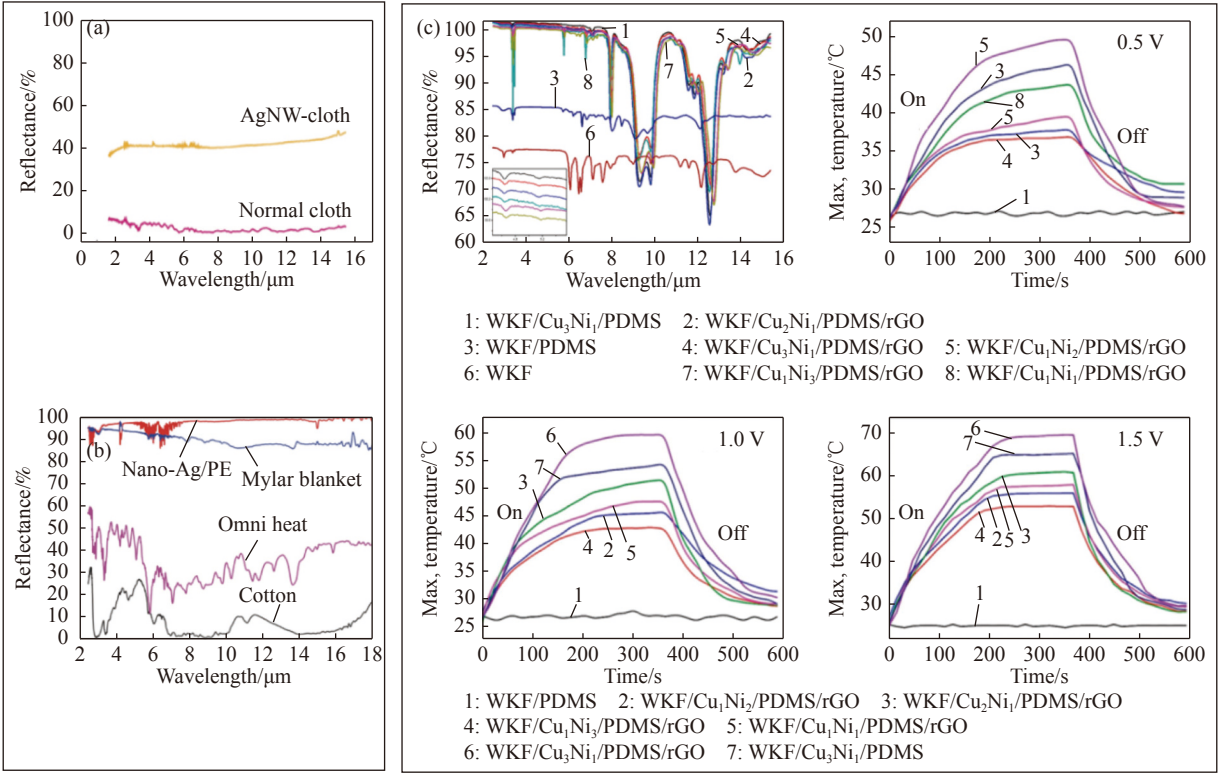
2.1 室内个人辐射保温材料

研究发现，建筑总能耗中内部空间制热占比 22.5%、制冷占比 14.8%，即制热模式更耗能^[59]，

传统衣物材料往往通过限制人体周围空气流动削弱热对流、或增加衣物厚度抑制热传导实现保温,但传统衣物材料发射率高,不具有辐射保温能力。已有的商业化辐射保温材料尚存在不足,如 Columbia 开发的 Omni-Heat 冲锋衣内层 Ag 质金属圆点可反射人体辐射,但分布稀疏、反射率低,辐射保温效果不理想^[60]; Mylar 应急保温毯由聚酯薄膜和 Ag 涂层构成,金属层可有效反射人体热辐射实现保温,但不具有透气性。开发兼顾穿着舒适性的个人辐射保温材料成为研究热点,基于前述人体红外辐射特征,已有室内个人辐射保温设计主要采用内层红外高反射率材料反射人体辐射或外层低发射率材料降低辐射散热。鉴于金属材料红外发射率低、导电性良好,附带焦耳热效应可提供补偿加热,是室内个人辐射保温设计常见选择,金属层同其他功能层复合,为改变复合结构亲疏水性、透气性等提供了更多可能。

利用单一金属材料做反射层, Hsu 等^[61]采用 Ag 纳米线浸涂棉织物,但棉织物表面粗糙导致

Ag 纳米线彼此连接不充分,该结构只能反射约 40.8% 的人体辐射(图 6(a)),保温效果比普通布料高 0.9℃。对比 Ag 纳米线,均匀连续化金属 Ag 层孔隙率远小于人体红外辐射波长,具有更高的红外反射率, Cai 等^[8]在红外透明 nano PE 一侧化学镀 Ag,与棉布层压获得红外反射率高达 98.5% 的金属化 PE 材料(图 6(b)),可使制热模式的 HVAC 系统设置温度降低 7.1℃,据估算能节省 35% 的采暖能耗。该结构保留有微观孔隙,兼容透气、透湿、耐水洗和可着色等服用性能。同时,该工作基于一维稳态热传递模型,给出织物外表面的红外发射率对保温效果起决定性作用这一重要结论。基于金属材料与其他功能层复合思路, Liu 等^[62]在棉网一侧涂覆 SiO₂/聚二甲硅氧烷(PDMS)作为疏水层,另一侧依次浸渍沉淀多孔醋酸纤维素层、热蒸发沉积金属 Ag 层,得到防水透气辐射保温复合材料。金属 Ag 层还具有抗菌性,同时基于焦耳热效应 Ag 层可充当柔性电加热层,红外热图下该复合材料比未处理棉布表面温度低 1.3~1.6℃,



Ag NW—Ag nanowire; PDMS—Polydimethylsiloxane; rGO—Reduced graphene oxide

图6 (a) Ag 纳米线布的红外反射率^[61]; (b) 纳米 Ag/聚乙烯 (PE) 及其他材料的红外反射光谱^[8]; (c) 芳纶纤维 (WKF) 及其复合材料的红外反射率和焦耳热效应测试^[63]

Fig. 6 (a) IR reflectance of Ag nanowire cloth^[61]; (b) IR reflectance of nano Ag/polyethylene (PE) and other materials^[8]; (c) IR reflectance and Joule heating measurement of woven kevlar fiber (WKF) and its composites^[63]

即保温效果更优。协同利用金属纳米线和还原氧化石墨烯 (rGO) 良好的导电性及红外反射能力, Hazarika 等^[63] 在芳纶纤维 (WKF) 表面水热法生长 Cu@Ni 核壳纳米线, 与 rGO/PDMS 层复合, 可反射超过 98% 的人体红外辐射并能够提供补充性焦耳加热功能, 该结构在 1.5 V 外电压下表面温度高达 70℃(图 6(c))。

2.2 室外个人辐射保温材料

太阳作为室外巨大辐射热源, 辐射分布遍及紫外到近红外区, 光热转换材料可以吸收太阳辐射转化为热能, 如碳基材料往往在太阳辐射波段呈宽带吸收^[64], 有望应用于室外个人辐射保温设计。羽绒服作为当前冬季御寒必备衣物, 其传导隔热设计与北极熊出色的热防护系统有相通之处。研究表明, 北极熊的毛发为一根根中空且透明的管状结构, 内表面粗糙存在大量的空气-固体界面, 能随机散射光线、呈肉眼所见白色外观。中空的管状毛发可以保留大量低热导率的静止空气, 实现传导隔热。另一方面, 中空毛发粗糙的内表面能够散射光线, 将高能紫外线沿毛发传输到底层的黑色皮肤, 继而吸收转化成热能。其密实的毛发还能反射自身的红外辐射, 阻挡热量散发^[11, 65]。受此启发, Yue 等^[66] 以纤维素膜做基体, 在其外侧刮涂碳纳米管 (CNT), 内侧磁控溅射沉积金属

Ag 层。黑色 CNT 层在紫外到近红外波段吸收率大于 90%, 而金属 Ag 层对人体红外辐射的平均反射率接近 76%, 并具有焦耳热效应。CNT 层与金属层协同作用, 该柔性结构保温效果比普通棉布高 5.1℃, 可最大化吸收太阳热辐射, 最小化输出人体红外辐射, 兼顾亲水、透气和力学稳定性, 服用前景良好 (图 7(a))。由于 MXene 涂层同样具有高光热转换能力、且红外发射率低、导电性优良, Shi 等^[67] 设计了一种由 nano PE 薄膜和 Ti₃C₂T_x MXene 涂层构成的复合织物材料, 该结构集辐射保温、太阳能加热和补偿型焦耳加热 3 种模式于一体, 其覆盖的皮肤模拟器晴天峰值温度高达 73.5℃。3 种模式可切换、组合, 满足全天候个人精准保暖控温需求 (图 7(b))。

上述 CNT 和 MXene 吸光层虽具有较高的太阳光吸收率, 但黑色外观制约着其应用。早在 2019 年, Luo 等^[68] 曾利用 Au/Ge 双层膜制备了一种具有结构色的超薄纳米光子复合材料, 以 nano PE 多孔膜为基底, 磁控溅射红外高反射 Au 层和超薄 Ge 介质层, 改变 Ge 介质层厚度可实现对太阳光的选择性吸收从而获得橙色、品红、紫色或蓝色等不同结构色外观。该微纳光学复合结构太阳光峰值吸收率约 50%, 红外反射率大于 90%, 厚度仅 16 μm 但保温效果与 5.2 mm 厚运动衫相当,

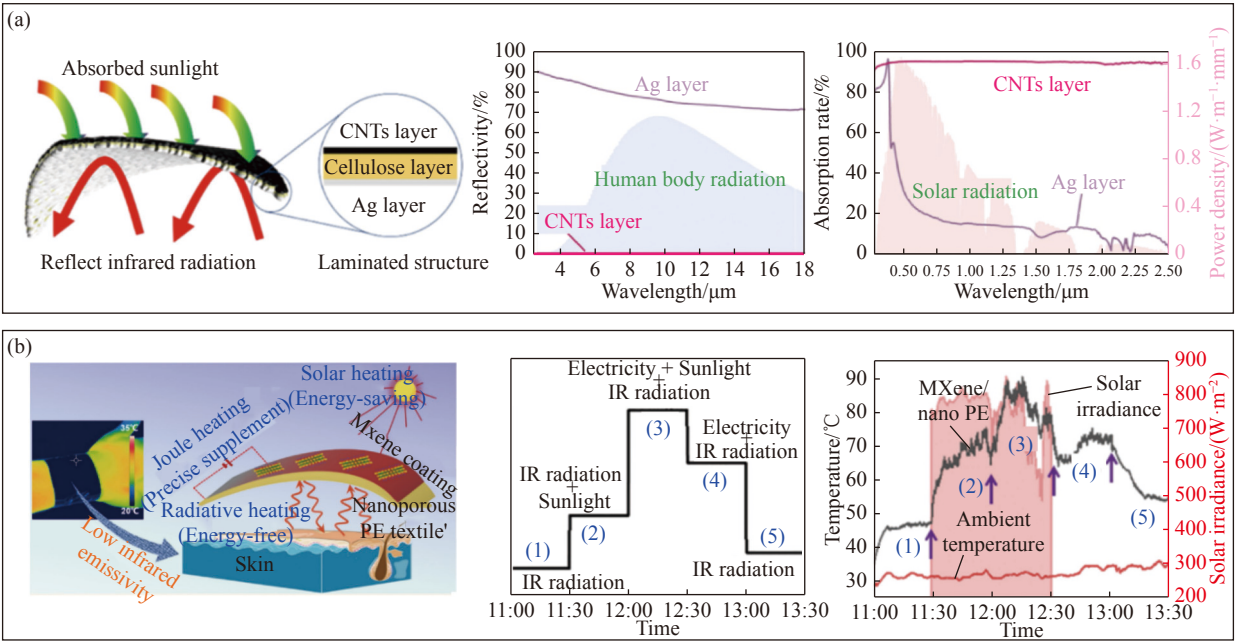


图 7 (a) 碳纳米管 (CNTs)/醋酸纤维素/银仿生薄膜的层状结构图和光谱表征图^[66]; (b) MXene/nano PE 示意图和切换加热模式的实时温度^[67]

Fig. 7 (a) Laminated structure and spectra characterization of the biomimetic carbon nanotube (CNTs)/cellulose acetate/Ag membrane^[66];

(b) Schematic of MXene/nano PE and real-time temperature for switching its heating mode^[67]

兼顾透气、透湿性能。

综上，无论室内还是室外个人辐射保温设计均可利用导电性良好的红外低发射率材料来反射人体辐射，室外环境下可与光热转换材料复合提高对太阳辐射能的吸收转化。基于微纳光学的结构色设计可实现对个人辐射保温材料的颜色管理，同时避免了传统织物印染过程的废液污染。

3 个人辐射降温/保温一体材料

上述辐射降温、辐射保温材料均呈单向温度调节特征，而环境实时变化，开发智能化双向温度调节材料更具应用价值。植物界中荷叶具有特殊的微纳结构，上表面超疏水、下表面超疏油，既能在空气中自清洁又能在水中防油污^[69]，具有双面非对称功能特性。类似地，具有非对称辐射特性的个人热管理材料被相继报道，包括静态和动态辐射降温/保温一体材料。

3.1 静态辐射降温/保温一体材料

室内静态辐射降温/保温材料依靠双侧非对称发射率层，正穿保暖、反穿降温，Hsu 等^[26]利用

金属 Cu 和炭黑 (CB) 调控热辐射，结合红外透明 nano PE 层厚度变化控制热传导。微观孔隙可兼顾透气性，实现辐射、传导、对流协同作用，高发射率 CB 层朝外可实现 3.1℃ 的降温效果，低发射率金属层朝外可实现 3.4℃ 的保温效果，综合体感温度舒适区扩大了 6.5℃(图 8(a))。随后，Yue 等^[70]在粗糙的纤维素膜表面原位生长层状双金属氢氧化物 (LDH) 做高发射率层，接着依次真空抽滤超长 MnO₂ 纳米线过渡层、Cu 纳米线低发射率层，得到发射率非对称的柔性、透气复合材料，其中，金属 Cu 层抗菌、还可提供补偿性焦耳热效应。

室外静态辐射降温/保温材料则根据太阳辐射影响，融合了在太阳波段具有非对称吸收率涂层。例如，Qiu 等^[71]在织物两侧磁控溅射沉积 TiO₂ 和 ZrN 涂层，TiO₂ 层太阳光谱反射率高达 90%，可反射太阳能、隔热降温；而 ZrN 涂层在可见-近红外波段吸收率约 70%，可吸收太阳热辐射。Luo 等^[72]利用微纳结构进行多波段分级调控，在红外

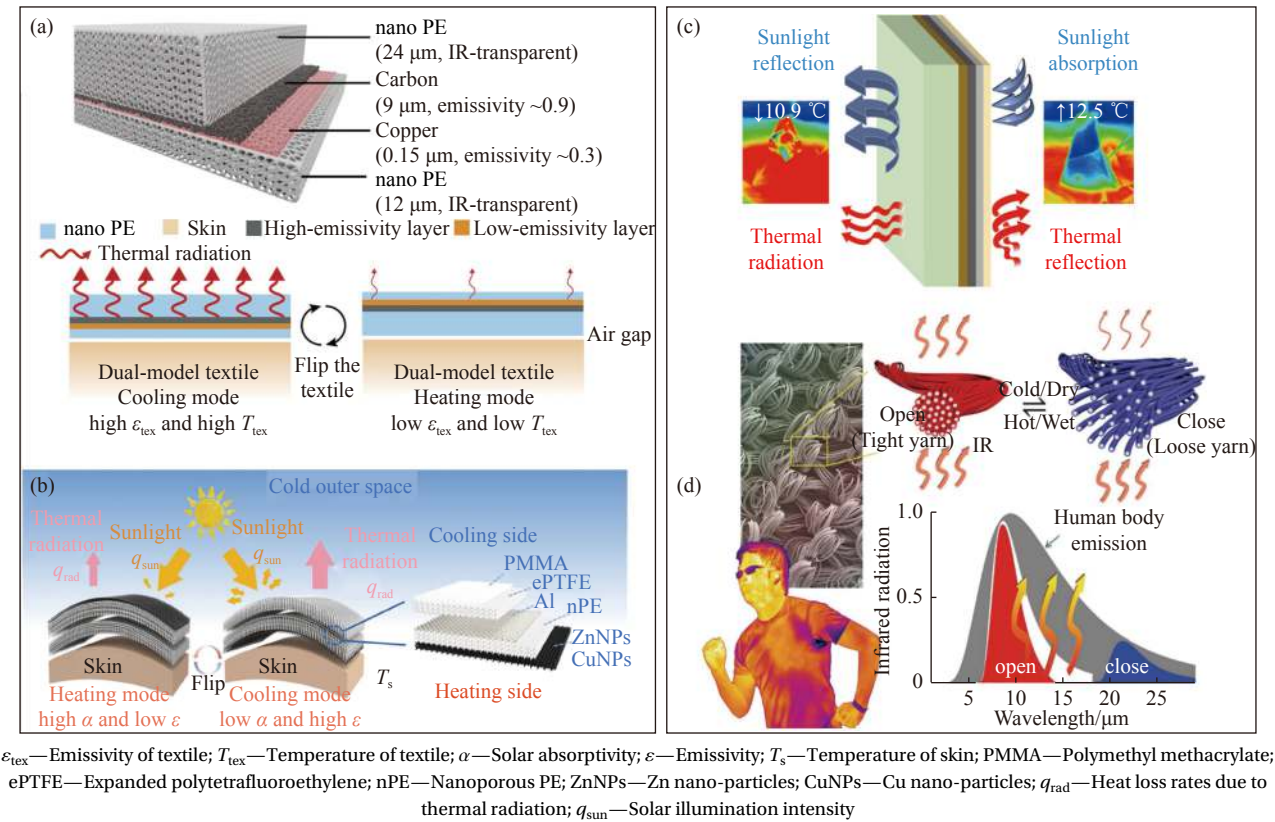


图 8 (a) 双模式织物原理图^[26]; (b) 双模式织物材料的工作原理和结构图^[72]; (c) 具有双模式的多层膜示意图^[74]; (d) 红外辐射“门控”效应织物材料工作原理图^[76]

Fig. 8 (a) Schematic of the dual-mode textile^[26]; (b) Schematic and structure diagram of the Janus textile^[72]; (c) Schematic of the multilayer membrane with dual mode^[74]; (d) Working principle diagram of the infrared radiation "gated" fabric material^[76]

透明 nano PE 一侧磁控溅射沉积金属 Al 红外反射层, 另一侧生长太阳波段高吸收、红外低发射纳米 Cu、Zn 颗粒, 形成保温层; 同时以太阳波段高反射、红外高发射聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 涂覆 ePTFE 做辐射降温层, 保温、降温层缝合制备了具有非对称光学特性的全天候个人热管理材料。与普通棉布相比, 该复合材料保温效果约 8.1°C , 降温效果约 6°C , 其局部控温效果产生的温差还可与热电模块集成 (图 8(b))。SiO₂ 微球的散射效应同样能提高太阳波段反射率, Dai 等^[73]在 Al 基底一侧刮涂 SiO₂/PDMS 多孔复合涂层作为降温面, 该侧太阳波段反射率约 0.85、红外发射率高达 0.95; 另一侧刮涂 CNT/PDMS 作为太阳光吸收层, 该双模式复合材料降温、保温效果分别为 2°C 和 7°C 。将非对称辐射单元与静电纺丝聚合物纤维膜复合, Song 等^[74]以电纺 PVDF 纤维膜做基底, 依次喷涂 ZnO 纳米片、CNT、Ag 纳米线和 PDMS 得到辐射降温/保温双模式柔性复合材料。PDMS 外层具有减反作用, 可辅助低发射率 Ag 纳米线、CNT 层吸收太阳辐射实现 $3.8\sim 4.6^{\circ}\text{C}$ 的保温效果; 反之, 红外高发射率 PVDF 层朝外可实现 $8.2\sim 12.6^{\circ}\text{C}$ 的降温效果, 制冷模式下该多层膜红外热图颜色可随背景变化, 具有一定的红外伪装潜能 (图 8(c))。除上述以涂层形式进行复合外, Ye 等^[75]以聚丙烯腈为基体, 分别同太阳波段高反射率 BaTiO₃ 和高吸收率 CB 分散混合静电纺丝制备了降温侧为 BaTiO₃/PAN, 保温侧为 CB/PAN 的双向控温纤维复合材料, 模拟辐射降温、保温效果分别为 2.5°C 和 8.7°C 。

3.2 动态辐射降温/保温一体材料

不同于上述静态双向调节材料的翻转机制, 动态辐射降温/保温一体材料可响应外界刺激如湿度、温度、应变等调控辐射。Zhang 等^[76]利用涂覆 CNT 的双晶态三醋酸纤维素纤维制备了具有红外辐射“门控”效应的湿度响应双向智能热管理织物, 可调节超过 35% 的红外辐射。湿热环境下纤维收缩, CNT 电磁共振耦合增强, 织物发射率提高, 同时纤维间隙变大可实现对流、蒸发协同散热; 而寒冷干燥环境下, 纤维以相反的方式响应环境变化, 阻隔人体热量损失 (图 8(d))。Leung 等^[77]利用红外透明嵌段共聚物苯乙烯-乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SEBS) 与金属 Cu 反射层复合制备了应变响应型红外辐射动态调节材料, 原本致密排列

的金属层能随 SEBS 弹性体在机械拉伸下可逆产生裂纹, 从而调控可见光透过率和红外反射率。

辐射降温/保温一体材料具备双向温度调节能力, 其静态结构多采用非对称发射率层设计, 室外应用可融入太阳波段非对称吸收率材料, 使用时需机械翻转发挥作用; 而动态结构具有自适应特征, 根据外界环境刺激适时调整以满足个性化温度需求, 目前个人动态辐射降温/保温一体材料研究仍有较大空白。“双碳”战略背景下, 绿色节能建筑领域辐射热管理风潮渐起, 作为建筑与外界热交换的主要通道, 窗户既是采光构件, 亦是提高建筑能效的薄弱环节。近期以掺钨 VO₂^[78-79]、水凝胶^[80]热致变色智能窗为代表的相关研究也取得突破, 逐步实现太阳辐射和热辐射的大幅调控。由于其在四季均需具备一定的可见光透过率以确保采光需求, 智能窗与个人热管理材料在应对环境冷热变化方面的光谱需求相似又有区别, 但其相关变色机制可为开发温度、湿度响应型智能化动态个人热管理材料提供思路。超材料结构智能窗制备多采用复杂的精细微纳加工技术, 如光刻、脉冲激光等, 高成本制备工艺限制了其向个人热管理材料的推广。其次, 智能窗用材料辐射调控临界温度、可控程度、调节范围是否直接适用于人体有待研究。同时透气、透湿、柔性化等穿戴要求也是建筑智能热管理材料向个人动态热管理材料转变所面临的挑战。

传统聚合物加工技术如熔体纺丝、静电纺丝、熔体挤出、流延成膜等可实现批量化、规模化生产, 在个人辐射热管理领域具有良好的应用前景^[81]。纤维的结构特点使其更易兼顾良好的透气性, 能适应复杂的变形, 与薄膜、涂层等相比更适合人体使用。利用纺丝工艺, Peng 等^[38]、Cai 等^[39, 43]制备的熔纺多孔 PE、彩色 PE 辐射降温织物和 ZnO/PE 光谱选择性辐射降温织物、Song 等^[56]制备的多孔 PEO/PE 熔纺辐射降温织物、Li 等^[49]卷对卷静电纺丝制备的 PEO 选择性辐射降温织物及 Zeng 等^[54]制备的熔纺超材料织物均推动了个人辐射热管理材料的产业化发展。

4 结论与展望

个人热管理材料与人体热舒适密切相关, 为建筑领域节能提供了新思路。本文总结了基于红外辐射调控的个人热管理材料最新研究进展, 分室内和室外两种场景阐述辐射降温、辐射保温和

集辐射降温/保温于一体的双向温度调节原理及相关材料设计思路。相比于调控建筑整体温度来维持人体热平衡,个人热管理材料立足人体自身及周围局部微环境热管理,灵活高效、经济节能,以人体、衣物、环境间的相互作用为研究对象,利用合理的结构设计拓宽应用场景以满足个性化温度需求,极大缓解了暖通空调(HVAC)系统能耗。基于红外辐射调控的个人热管理材料蓬勃发展,更面临以下的机遇与挑战:

(1)目前相关研究多处于实验阶段。为实现商业化目标,在结构设计和材料选取方面需充分考虑服用性能,如透湿、透气、耐水洗、触感、力学强度、对人体皮肤温和无刺激等及与颜色相关的视觉舒适性,商业化生产还需考虑原材料成本、工艺难度、可回收性;

(2)现有个人热管理材料多依赖于单一的传导、辐射、对流、蒸发等热调节机制,温度调节能力有限。为提高环境适应性,需发展多种热调节机制交叉融合的智能化个人热管理材料,如光热转换材料、相变材料、仿生材料等均可作为结合对象。此外,考虑与柔性电子器件集成,可促进个人热管理材料智能化发展;

(3)需建立通用化的个人热管理材料测试评价标准。人体温度调节涉及自身、织物、环境等多种因素,热舒适感还与主观意识相关,已有研究报道的降温、保温效果测试论证方法虽能做到自洽,但在测试装置、环境参数、参比样品的选取方面彼此存在差异,为不同个人热管理材料的优劣对比造成困难。

参考文献:

[1] WEBB P. Temperatures of skin, subcutaneous tissue, muscle and core in resting men in cold, comfortable and hot conditions[J]. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1992, 64(5): 471-476.

[2] NASTOS P T, MATZARAKIS A. Weather impacts on respiratory infections in Athens, Greece[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 50(6): 358-369.

[3] FANG Y, ZHAO X, CHEN G, et al. Smart poly-ethylene textiles for radiative and evaporative cooling[J]. *Joule*, 2021, 5(4): 752-754.

[4] WANG Z, DE DEAR R, LUO M, et al. Individual difference in thermal comfort: A literature review[J]. *Building and Environment*, 2018, 138: 181-193.

[5] FONG K F, HANBY V I, CHOW T T. HVAC system optimiza-

tion for energy management by evolutionary programming[J]. *Energy and Buildings*, 2006, 38(3): 220-231.

[6] HOTY T, LEE K H, ZHANG H, et al. Energy savings from extended air temperature setpoints and reductions in room air mixing [C]//*Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Ergonomics*. San Jose: Curran Associates, Inc., 2009: 1-5.

[7] HSU P C, SONG A Y, CATRYSSSE P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile[J]. *Science*, 2016, 353(6303): 1019-1023.

[8] CAI L, SONG A Y, WU P, et al. Warming up human body by nanoporous metallized polyethylene textile[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-8.

[9] ZHU F L, FENG Q Q. Recent advances in textile materials for personal radiative thermal management in indoor and outdoor environments[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 165(6303): 106899-106912.

[10] GU B, LIANG K, ZHANG T, et al. Multifunctional laminated membranes with adjustable infrared radiation for personal thermal management applications[J]. *Cellulose*, 2020, 27(14): 8471-8483.

[11] CUI Y, GONG H, WANG Y, et al. A thermally insulating textile inspired by polar bear hair[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(14): 1706807-1706814.

[12] LIU Z, LYU J, FANG D, et al. Nanofibrous kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(5): 5703-5711.

[13] LIU P, LI Y, XU Y, et al. Stretchable and energy-efficient heating carbon nanotube fiber by designing a hierarchically helical structure[J]. *Small*, 2018, 14(4): 1702926-1702931.

[14] HONG S, GU Y, SEO JOON K, et al. Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): 536-547.

[15] MOKHTARI YAZDI M, SHEIKHZADEH M. Personal cooling garments: A review[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2014, 105(12): 1231-1250.

[16] FORT J. On the nonequilibrium generalization of the Wien displacement[J]. *Physics Letters A*, 1999, 253(5): 266-272.

[17] BORISKINA S V. Nanoporous fabrics could keep you cool[J]. *Science*, 2016, 353(6303): 986-987.

[18] STEKETEE J. Spectral emissivity of skin and pericardium[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1973, 18(5): 686-694.

[19] HARDY J D, DUBOIS E F. Regulation of heat loss from the human body[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1937, 23(12): 624-631.

- [20] WINSLOW C E A, GAGGE A P, HERRINGTON L P. The influence of air movement upon heat losses from the clothed human body[J]. *American Journal of Physiology*, 1939, 127(3): 505-518.
- [21] BOIS E. Heat loss from the human body: Harvey lecture, December 15, 1938[J]. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 1939, 15(3): 143-173.
- [22] SHIN S, CHEN R. Cool textile[J]. *Joule*, 2021, 5(9): 2258-2260.
- [23] SILVERSTEIN R M, BASSLER G C. Spectrometric identification of organic compounds[J]. *Journal of Chemical Education*, 1962, 39(11): 546-553.
- [24] STUART B H. Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications[M]. London: John Wiley & Sons, Inc., 2004: 76-79.
- [25] LOTENS W A, PIETERS A M J. Transfer of radiative heat through clothing ensembles[J]. *Ergonomics*, 1995, 38(6): 1132-1155.
- [26] HSU P C, LIU C, SONG A Y, et al. A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling[J]. *Science Advances*, 2017, 3(11): 1700895-1700903.
- [27] LIENHARD J H, LIENHARD J H. A heat transfer textbook[M]. 3th Edition. Cambridge: Phlogiston Press, 2016.
- [28] TONG J K, HUANG X, BORISKINA S V, et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(6): 769-778.
- [29] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. London: John Wiley & Sons, Inc., 2008: 72-78.
- [30] GULMINE J V, JANISSEK P R, HEISE H M, et al. Polyethylene characterization by FTIR[J]. *Polymer Testing*, 2002, 21(5): 557-563.
- [31] 余长辉, 于宏伟. 聚丙烯变温傅里叶变换透射红外光谱研究[J]. *化学工程师*, 2016, 30(7): 75-78.
SHE Changhui, YU Hongwei. Temperature effect on FTIR spectrum of polypropylene[J]. *Chemical Engineer*, 2016, 30(7): 75-78(in Chinese).
- [32] 朱开贵, 石建中, 李可斌, 等. 聚四氟乙烯薄膜的制备及其红外光谱研究[J]. *物理学报*, 1997, 46(9): 1764-1767.
ZHU Kaigui, SHI Jianzhong, LI Kebin, et al. Preparations and infrared spectrum studies of polytetrafluoroethylene thin films[J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 46(9): 1764-1767(in Chinese).
- [33] 朱吴兰. 红外光谱法鉴别不同种类的聚酰胺[J]. *塑料*, 2009, 38(3): 114-117.
ZHU Wulan. Discrimination of different polyamides by IR[J]. *Plastics*, 2009, 38(3): 114-117(in Chinese).
- [34] CHEN J, WANG Z L. Reviving vibration energy harvesting and self-powered sensing by a triboelectric nanogenerator[J]. *Joule*, 2017, 1(3): 480-521.
- [35] UGBOLUE S C. Polyolefin fibres: Structure, properties and industrial applications[M]. Sawston: Woodhead Publishing, 2017: 14-15.
- [36] LIU R, WANG X, YU J, et al. A novel approach to design nanoporous polyethylene/polyester composite fabric via TIPS for human body cooling[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2018, 303(3): 1700456-1700465.
- [37] KE Y, WANG F, XU P, et al. On the use of a novel nanoporous polyethylene (nano PE) passive cooling material for personal thermal comfort management under uniform indoor environments[J]. *Building and Environment*, 2018, 145: 85-95.
- [38] PENG Y, CHEN J, SONG A Y, et al. Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(2): 105-112.
- [39] CAI L, PENG Y, XU J, et al. Temperature regulation in colored infrared-transparent polyethylene textiles[J]. *Joule*, 2019, 3(6): 1478-1486.
- [40] ALBERGHINI M, HONG S, LOZANO L M, et al. Sustainable polyethylene fabrics with engineered moisture transport for passive cooling[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(8): 715-724.
- [41] WEI J F, HU X Y, SUN L Q, et al. Technology for radiation efficiency measurement of high-power halogen tungsten lamp used in calibration of high-energy laser energy meter[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2289-2295.
- [42] AKHALAYA M Y, MAKSIMOV G V, RUBIN A B, et al. Molecular action mechanisms of solar infrared radiation and heat on human skin[J]. *Ageing Research Reviews*, 2014, 16: 1-11.
- [43] CAI L, SONG A Y, WEI L, et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(35): 1802152-1802158.
- [44] PANWAR K, JASSAL M, AGRAWAL A K. TiO₂-SiO₂ Janus particles treated cotton fabric for thermal regulation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 309: 897-903.
- [45] WONG A, DAOUD W A, LIANG H H, et al. Application of rutile and anatase onto cotton fabric and their effect on the NIR reflection/surface temperature of the fabric[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 134: 425-437.
- [46] MEHRIZI M K, MORTAZAVI S M, MALLAKPOUR S, et al. The effect of nano- and micro-TiO₂ particles on reflective behavior of printed cotton/nylon fabrics in VIS/NIR regions[J]. *Color Research & Application*, 2012, 37(3): 199-205.
- [47] WEI W, ZHU Y, LI Q, et al. An Al₂O₃-cellulose acetate-

- coated textile for human body cooling[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 211: 110525-110531.
- [48] ZHU B, LI W, ZHANG Q, et al. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocessed silk[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(12): 1342-1348.
- [49] LI D, LIU X, LI W, et al. Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(2): 153-158.
- [50] SONG Y N, LI Y, YAN D X, et al. Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 130: 105738-105746.
- [51] XIAO R, HOU C, YANG W, et al. Infrared-radiation-enhanced nanofiber membrane for sky radiative cooling of the human body[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(47): 44673-44681.
- [52] SONG Y N, LEI M Q, DENG L F, et al. Hybrid metamaterial textiles for passive personal cooling indoors and outdoors[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(11): 4379-4386.
- [53] WANG X, LIU X, LI Z, et al. Scalable flexible hybrid membranes with photonic structures for daytime radiative cooling[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(5): 1907562-1907570.
- [54] ZENG S, PIAN S, SU M, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.
- [55] SONG Y N, MA R J, XU L, et al. Wearable polyethylene/polyamide composite fabric for passive human body cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(48): 41637-41644.
- [56] SONG Y N, LEI M Q, LEI J, et al. A scalable hybrid fiber and its textile with pore and wrinkle structures for passive personal cooling[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(7): 2000287-2000295.
- [57] KIM H, MCSHERRY S, BROWN B, et al. Selectively enhancing solar scattering for direct radiative cooling through control of polymer nanofiber morphology[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(39): 43553-43559.
- [58] KIM G, PARK K, HWANG K J, et al. Highly sunlight reflective and infrared semi-transparent nanomesh textiles[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(10): 15962-15971.
- [59] DOE U S. Buildings energy databook[M]. US Department of Energy: Energy Efficiency and Renewable Energy Department, 2011: 286-287.
- [60] HAYES S G, VENKATRAMAN P. Materials and technology for sportswear and performance apparel[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016: 153-169.
- [61] HSU P C, LIU X, LIU C, et al. Personal thermal management by metallic nanowire-coated textile[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(1): 365-371.
- [62] LIU Q, HUANG J, ZHANG J, et al. Thermal, waterproof, breathable, and antibacterial cloth with a nanoporous structure[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(2): 2026-2032.
- [63] HAZARIKA A, DEKA B K, KIM D, et al. Woven kevlar fiber/polydimethylsiloxane/reduced graphene oxide composite-based personal thermal management with free-standing Cu-Ni core-shell nanowires[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(11): 6731-6739.
- [64] LUO Y, FU B, SHEN Q, et al. Patterned surfaces for solar-driven interfacial evaporation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(7): 7584-7590.
- [65] PRECIADO J A, RUBINSKY B, OTTEN D, et al. Radiative properties of polar bear hair [C]//ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME Press, 2002: 57-58.
- [66] YUE X, HE M, ZHANG T, et al. Laminated fibrous membrane inspired by polar bear pelt for outdoor personal radiation management[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(10): 12285-12293.
- [67] SHI M, SHEN M, GUO X, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-decorated nanoporous polyethylene textile for passive and active personal precision heating[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(7): 11396-11405.
- [68] LUO H, LI Q, DU K, et al. An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and passive heating abilities[J]. *Nano Energy*, 2019, 65: 103998-104006.
- [69] YANG H C, HOU J, CHEN V, et al. Janus membranes: Exploring duality for advanced separation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(43): 13398-13407.
- [70] YUE X, ZHANG T, YANG D, et al. Multifunctional Janus fibrous hybrid membranes with sandwich structure for on-demand personal thermal management[J]. *Nano Energy*, 2019, 63: 103808-103817.
- [71] QIU S, JIA H, JIANG S X. Fabrication and characterization of thermal management fabric with heating and cooling modes through magnetron sputtering[J]. *Materials Letters*, 2021, 300: 130217-130220.
- [72] LUO H, ZHU Y, XU Z, et al. Outdoor personal thermal management with simultaneous electricity generation[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3879-3886.
- [73] DAI B, LI X, XU T, et al. Radiative cooling and solar heating Janus films for personal thermal management[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(16): 18877-18883.
- [74] SONG Y N, LEI M Q, HAN D L, et al. Multifunctional mem-

brane for thermal management applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(16): 19301-19311.

[75] YE G, WAN Y, WU J, et al. Multifunctional device integrating dual-temperature regulator for outdoor personal thermal comfort and triboelectric nanogenerator for self-powered human-machine interaction[J]. *Nano Energy*, 2022, 97: 107148-107161.

[76] ZHANG X A, YU S, XU B, et al. Dynamic gating of infrared radiation in a textile[J]. *Science*, 2019, 363(6427): 619-623.

[77] LEUNG E M, COLORADO E M, STIUBIANU G T, et al. A dynamic thermoregulatory material inspired by squid skin[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-10.

[78] TANG K, DONG K, LI J, et al. Temperature-adaptive radiative coating for all-season household thermal regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1504-1509.

[79] WANG S, JIANG T, MENG Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation[J]. *Science*, 2021, 374(6574): 1501-1504.

[80] LIN C, HUR J, CHAO C Y H, et al. All-weather thermochromic windows for synchronous solar and thermal radiation regulation[J]. *Science Advances*, 2022, 8(17): 7359-7369.

[81] ZHANG X, LIU C, SHEN C, et al. Promising commercial fabrics with radiative cooling for personal thermal management[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 229-231.