

## 激光与光电子学进展

## 个人辐射制冷织物的研究进展

杜汐然, 王雪阳, 朱斌\*

南京大学现代工程与应用科学学院光热调控研究中心, 江苏 南京 210033

**摘要** 在高温环境中对人体降温以保持舒适性是很重要的。近年来,辐射制冷织物通过红外光学性能的设计,能够在不消耗能量的情况下将人体的热量尽可能散出去,为实现在室内和室外场景中的人体降温提供了新的机会。与室内可控热环境不同,室外热环境的特点是太阳辐照强度高,因此,在将人体热量尽可能散出去的同时还需阻止太阳热量的输入。基于室内和室外热环境的差异,分别从室内和室外应用场景的角度介绍了辐射制冷织物的设计策略,并综述了其发展情况,最后对辐射制冷织物的未来发展方向进行了展望。

**关键词** 辐射制冷; 热辐射; 织物; 人体降温

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231396

## Personal Radiative Cooling Textile Generation

Du Xiran, Wang Xueyang, Zhu Bin\*

Photothermal Manipulation Research Center, College of Engineering and Applied Sciences,  
Nanjing University, Nanjing 210033, Jiangsu, China

**Abstract** In a hot environment, personal cooling is important to maintain thermal comfort. In recent years, radiative cooling textiles can enhance the heat dissipation of the human body through the design of the infrared optical properties without consuming energy, which provides a new opportunity for realizing personal cooling in indoor and outdoor environments. Unlike the indoor controllable thermal environment, the outdoor thermal environment is characterized by strong solar irradiance intensity. Therefore, it is necessary to prevent the input of solar heat while enhancing human body heat dissipation. Based on the difference between indoor and outdoor thermal environments, we introduce the design strategy of radiative cooling textiles from the perspective of indoor and outdoor application scenarios, summarize the recent progress of radiative cooling textiles, and prospect the future development.

**Key words** radiative cooling; thermal radiation; textile; personal cooling

## 1 引言

随着全球变暖的加剧,在高温环境中给人体降温对于人体健康以及经济发展来说非常重要<sup>[1]</sup>。通常人体自身可以通过体温调节活动来应对高温环境,包括代谢率提高、血管扩张、排汗等。但是当人体的热负荷超过体温调节能力时,有必要调整环境的温度或开发先进的织物以保护人体免受热不适影响<sup>[2]</sup>。室内通常通过制冷系统来保证人体的舒适性,但是会消耗大量能源并且会对环境造成污染。据统计,建筑制冷系统

的用电量约占全球室内总用电量的 20%,而温室气体排放量占全球温室气体排放量的 10% 以上<sup>[3]</sup>。对于室外而言,用能源密集型的制冷系统为巨大开放空间降温是不切实际且不经济的。因此,节能和生态友好的人体降温手段是设计先进的织物来调节人体附近的微环境进行降温。

织物作为人体与环境之间的界面,在人体与环境的热交换中起着重要作用。人体皮肤是很好的红外发射器(发射率为 0.98),在静止时人体发出的热辐射主要要在 7~14  $\mu\text{m}$  的中红外波长范围内[图 1(a)]<sup>[4]</sup>,且热

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-06-17; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-06-29

基金项目: 国家重点研究发展计划(2022YFA1404704, 2021YFA1400700, 2020YFA0406104, 2017YFA0205700)、国家自然科学基金(52002168, 12022403, 11874211, 61735008, 62134009, 62121005)、江苏科学基金(BK20190311)、山东省科技创新重点项目(2019JZZY020704)、南京大学优秀科研项目(ZYJH005)、中央高校基础研究基金(021314380214, 021314380190, 021314380140, 021314380150)

通信作者: \*binzhu@nju.edu.cn

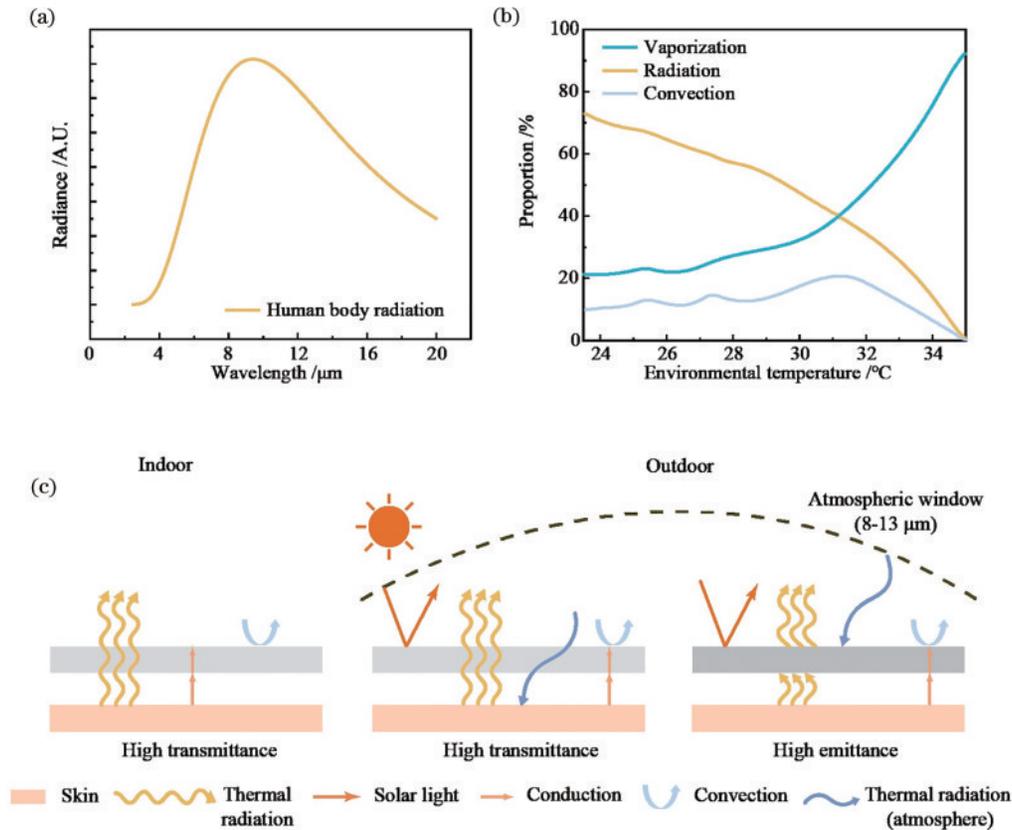


图 1 个人辐射制冷织物的机理。(a) 皮肤温度为 33 °C 的黑体辐射<sup>[4]</sup>; (b) 热辐射、蒸发和对流三种散热途径的占比随环境温度的变化<sup>[5]</sup>; (c) 用于室内和室外辐射制冷织物的传热过程示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Schematic of personal radiative cooling textiles. (a) Blackbody radiation at the skin temperature of 33 °C<sup>[4]</sup>; (b) proportion of thermal radiation, vaporization and convection as a function of ambient temperature<sup>[5]</sup>; (c) schematic heat transfer process of the radiative cooling textiles in indoor and outdoor environments<sup>[7]</sup>

辐射在人体散热途径中占较大的比重[图 1(b)]<sup>[5]</sup>。然而,传统织物如棉、涤纶等并未对人体的热辐射进行管理,表现出很高的红外吸收峰,在高温环境中容易引起人体体温升高<sup>[6]</sup>。近年来,研究人员提出了辐射制冷织物,通过设计织物的发射率、透射率和反射率,在不消耗能量的情况下对人体热辐射进行管理,是一种极具潜力的在室内和室外给人体降温的方式。

对于室内场景,由于人体热辐射是主要散热途径,因此需要设计具有红外高透射率的织物使人体热辐射可以不受阻碍地透过进而实现降温。而在室外环境中,由于大气窗口(8~13 μm 波段)的存在,可以通过具有红外高透射率或红外高发射率的织物将人体热辐射散到温度低的外太空(3 K)实现降温。同时由于太阳辐照的存在,需要保证织物在太阳光波段范围(0.25~2.5 μm)具有高反射率,以最大限度地减少热输入[图 1(c)]<sup>[7]</sup>。基于室内和室外热环境的差异,本文将从两种不同应用场景出发,分析各自热环境的特点,归纳总结相应场景下辐射制冷织物的红外光谱设计以及研究进展,为今后辐射制冷织物的研究提供一定参考。

## 2 室内红外高透射率织物

在办公室等典型室内场景中,人体红外辐射占全

身散热的 50% 以上,因此设计能够将人体红外热辐射有效向周围环境传递的织物是很重要的。在室内给人体降温主要采用的策略是设计具有红外高透射率的织物,使织物在 7~14 μm 的中红外波段内对人体热辐射透明,让人体热辐射几乎不受阻碍地透过织物传输出去。通过高效的辐射制冷织物设计可以扩展室内降温系统的设定点,从而节省能耗。2015 年, Tong 等<sup>[8]</sup>提出穿着衣服的人体与环境之间的传热模型[图 2(a)]并首次从理论上提出红外透明可见不透明织物(ITVOF)的概念,将本征红外吸收少的材料通过进一步结构设计来减少红外反射,同时保持可见光的不透明性[图 2(b)]。根据他们的模型,传统织物材料的红外吸收波长与人体辐射光谱重叠,因此织物会强烈吸收人体的辐射。而具有简单化学结构的聚乙烯(PE)和聚己内酰胺(PA6)是红外低吸收的,被确定为 ITVOF 的潜在候选材料,但其舒适性和耐用性有待进一步优化。

PE 只有 α-C 和 C-H 键,吸收峰较窄并且远离人体的红外发射谱,因此它在中红外波段对人体辐射是透明的。但是普通的 PE 膜光学透明并且透气性差,不适用作织物。为了设计实用的红外高透射率织物, Hsu 等<sup>[9]</sup>提出将纳米多孔 PE(nanoPE)用于人体降温,

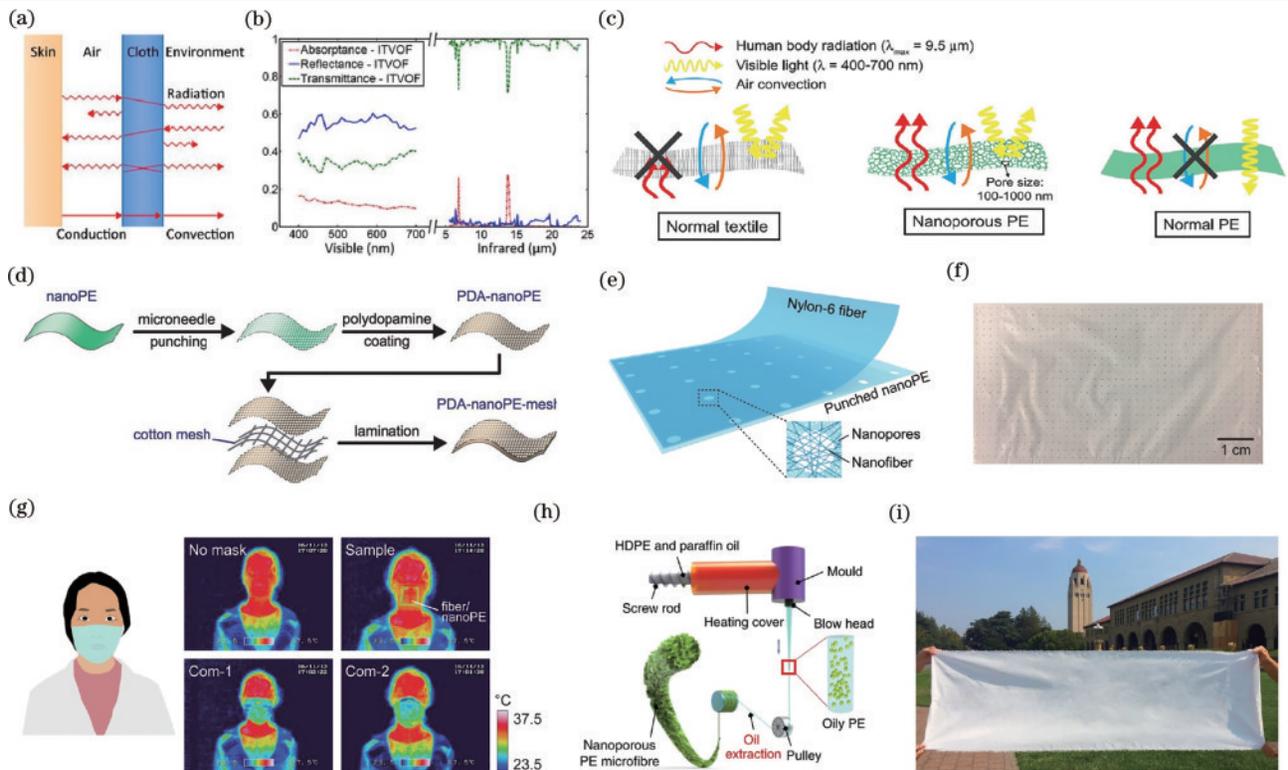


图2 室内红外高透射率织物。(a)人体与环境之间的传热模型<sup>[8]</sup>;(b)可见不透明、红外透明织物光谱<sup>[8]</sup>;(c)普通织物、nanoPE和普通PE之间的比较<sup>[9]</sup>;(d)提高 nanoPE 可穿戴性的制备工艺<sup>[9]</sup>;(e)纳米纤维/nanoPE 口罩示意图<sup>[10]</sup>;(f)纳米纤维/nanoPE 口罩实物图<sup>[10]</sup>;(g)裸露的和覆盖样品和商用面罩的人脸热成像<sup>[10]</sup>;(h) nanoPE 纤维制备工艺示意图<sup>[12]</sup>;(i)大型编织 nanoPE 织物图<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Indoor infrared (IR)-transparent textile. (a) Schematic heat transfer model between human body and environments<sup>[8]</sup>; (b) spectrum of IR-transparent visible-opaque textile<sup>[8]</sup>; (c) comparison among cotton, nanoPE, and normal PE<sup>[9]</sup>; (d) fabrication process for improving wearability of nanoPE<sup>[9]</sup>; (e) scheme of the fiber/nanoPE mask<sup>[10]</sup>; (f) photograph of the fiber/nanoPE mask<sup>[10]</sup>; (g) thermal imaging of bare face and faces covered with the sample and two commercial face masks<sup>[10]</sup>; (h) schematic of the manufacturing process for the nanoPE fiber<sup>[12]</sup>; (i) photograph of a large woven nanoPE textile<sup>[12]</sup>

它具有 50~1000 nm 的互连孔以散射太阳光使其在可见光波长范围内不透明,并且该互连孔比红外波长小得多,也可以保持红外波长范围内的高度透明[图 2(c)]。实验表明,相较于裸露的模拟皮肤来说,被 nanoPE 覆盖后人体温度仅升高了 0.8 °C,相较于商用织物来说实现了 2~3 °C 的降温。为了让其具有传统纺织品的耐磨性和机械强度等,他们进一步通过添加微针穿孔处理以及添加棉网层的方法对 nanoPE 进行改性[图 2(d)]。Yang 等<sup>[10]</sup>在经过微针穿孔处理的 nanoPE 上通过静电纺丝制备尼龙 6 用作口罩的热管理,能够实现 92.1% 的红外高透射率,在红外成像下几乎可以透射所有人体辐射,并且具有明显的辐射制冷效果。作为口罩它也可以有效去除颗粒物等污染物,并且 nanoPE 和尼龙 6 也是低成本材料适用于工业制造[图 2(e)~(g)]。除了微针穿孔外也可以将红外高透射率的材料与其他商用织物材料进行复合来提高红外透明纤维的可穿性。如 Catrysse 等<sup>[11]</sup>通过理论模型提出将红外透明的尼龙和传统红外高发射率的棉织物组成 6 层周期性平行纤维阵列,能够在保持传统棉纺织品穿着性的同时把红外的透过率提高到纯尼龙的水平,从而更有效地将人体热量散出去。这一理论模

型的结论也适用于其他红外高发射率商用织物与红外高透射率织物的混合。

尽管如此,以上提到的红外高透射率薄膜的非织造性相较于商用织物来说,仍然无法提供足够的透气透湿性,可穿性有待进一步提升。因此有研究将这些具有红外高透射率的聚合物纤维编织或机织成纺织品,大大增强其透气性以便更舒适地穿戴。如图 2(h)所示,Peng 等<sup>[12]</sup>通过纤维挤出工艺制造了 nanoPE 纤维,并通过工业针织/织造工艺获得 nanoPE 编织织物[图 2(i)],得到的编织织物仍然保持着较高的红外透射率,并且相较于厚度相似的棉织物来说,它能够降低人体皮肤温度 2.3 °C,降低了超过 20% 的室内制冷能耗。这一制备方法也可以直接转移到工业中,促进辐射制冷织物投入生产。

### 3 户外日间辐射制冷织物

与室内不同,室外热环境存在来自太阳的热辐射能量。如图 3(a)所示,到达地球表面的太阳光主要分布在 0.25~2.50 μm 的可见光和近红外范围内,总功率密度约为 1000 W/m<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。在太阳照射下,衣服表面温度升高导致被覆盖的人体温度升高,因此需要阻挡

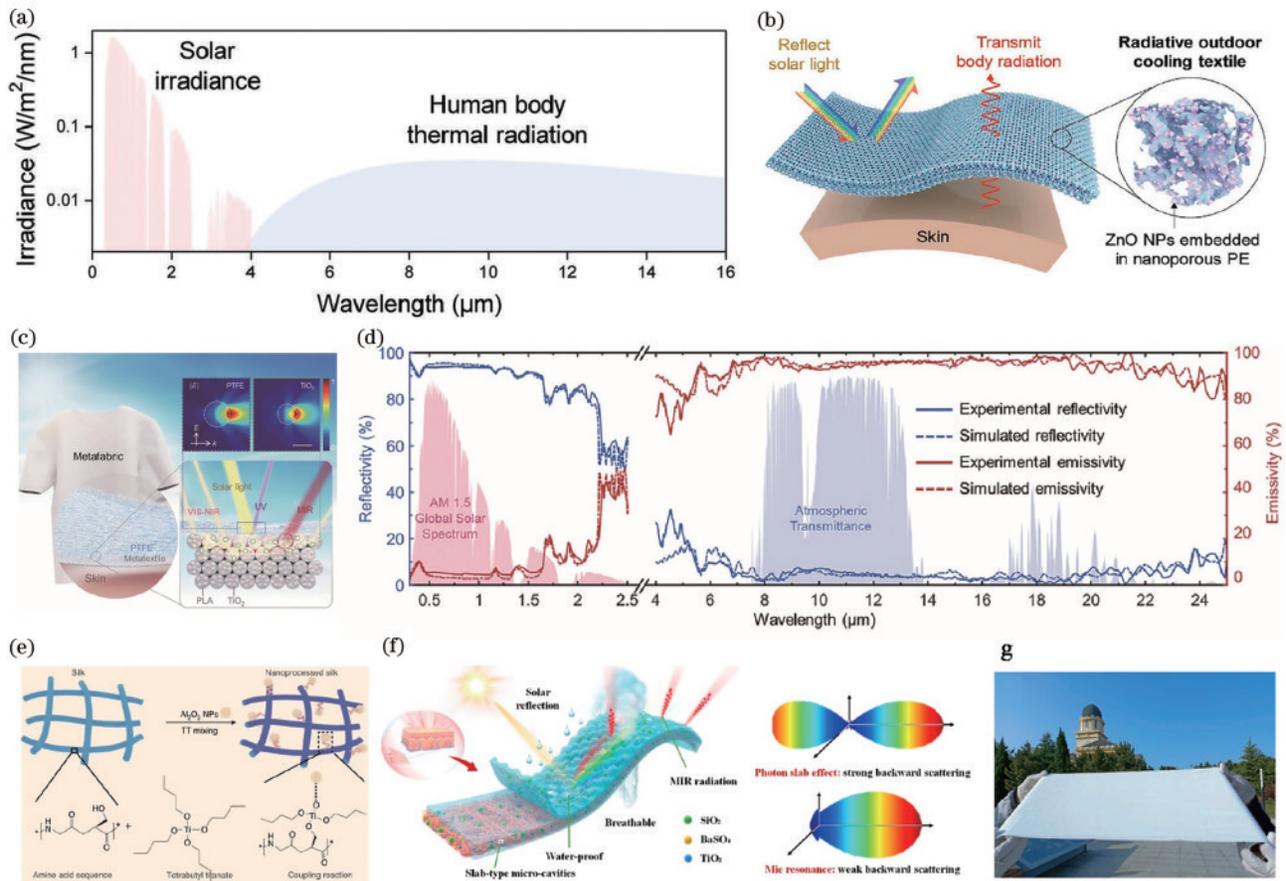


图3 室外红外高发射率织物。(a)AM 1.5 G(地球表面标准光谱)太阳辐射和在皮肤温度为 34 °C时的人体热辐射光谱<sup>[16]</sup>; (b)嵌入 ZnO 纳米颗粒的 nanoPE 纺织品示意图<sup>[16]</sup>; (c)用于日间辐射冷却的超织物示意图<sup>[18]</sup>; (d)超织物的紫外-可见-红外的反射和发射光谱<sup>[18]</sup>; (e)纳米加工丝绸的制造过程示意图<sup>[19]</sup>; (f)受人体皮肤启发的生物超织物示意图<sup>[20]</sup>; (g)生物超织物的实物图<sup>[20]</sup>

Fig. 3 Outdoor high IR emissivity textile. (a) Spectra comparison of AM 1.5 G (standard spectrum of the Earth's surface) solar irradiation and human body thermal radiation at the skin temperature of 34 °C<sup>[16]</sup>; (b) schematic of the ZnO nanoparticle-embedded nanoPE textile<sup>[16]</sup>; (c) schematic of a metafabric for daytime radiative cooling<sup>[18]</sup>; (d) spectral ultraviolet-visible-infrared reflectance/emittance of the metafabric<sup>[18]</sup>; (e) schematic for the fabrication of nanoprocessed silk<sup>[19]</sup>; (f) schematic of the bio-metafabric inspired by human skin<sup>[20]</sup>; (g) photograph of the fabricated bio-metafabric<sup>[20]</sup>

来自太阳的能量输入,目前最有效的方法是让织物在太阳光波段的反射率最大化。织物太阳光波段的高反射率可以通过在纤维中嵌入高折射率的纳米颗粒或通过聚合物中孔隙的 Mie 散射等来实现<sup>[14]</sup>。此外,地球大气对于 8~13 μm 波长范围内的红外辐射是透明的,这一透明窗口也与人体辐射光谱重叠。因此,在室外人体产生的热辐射可以从大气窗口发射到低温太空(3 K)从而实现降温<sup>[15]</sup>。总的来说,设计高效户外日间辐射制冷织物首先要提高太阳光谱波段的反射率减少太阳光吸收;其次要有效地将人体产生的热辐射散至外太空,主要通过两种红外光谱设计,即高透射率和高发射率来实现。

在室内应用场景中已经介绍过 nanoPE 具有红外高透射率可以很好地将人体热量散出去,但应用于室外时,需要提高其太阳光波段的反射率。Cai 等<sup>[16]</sup>将 ZnO 纳米颗粒嵌入 nanoPE 中[图 3(b)],能够反射超过 90% 的太阳辐照度并且将人体热辐射透过。与普

通棉纺织品相比,它能够在日照高峰条件下避免皮肤过热超过 10 °C,并且这一材料也可以通过熔融挤出得到 ZnO-PE 纤维,进一步编织成具有更高耐磨性和透气性的实用纺织品。然而为了保持红外高透射率,织物的厚度通常需要小于 150 μm,这使得织物的韧性和机械性能受到限制。

因此有研究通过材料的选择或光子结构的合理设计制备具有红外高发射率的织物,将人体产生的热量通过大气窗口辐射到外太空从而实现降温<sup>[17]</sup>。如图 3(c)和图 3(d)所示,Zeng 等<sup>[18]</sup>设计了由氧化钛-聚乳酸和聚四氟乙烯层组成的多层超织物,实现了太阳光波段的高反射率以及中红外的高发射率,被超织物覆盖的人体相较于商用棉织物覆盖的人体,实现了 4.8 °C 的降温。如图 3(e)所示,Zhu 等<sup>[19]</sup>通过偶联试剂将无机 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒引入本身在太阳光波段具有高反射率的天然蚕丝材料中,进一步提高了紫外波长区域内的反射率。加工后的天然蚕丝在太阳光波段实现了

0.95 的高反射率,在红外波段实现了 0.9 的高发射率。在不影响耐磨性和舒适性的情况下首次实现了比环境温度低  $\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的亚环境日间辐射冷却织物。织物实现亚环境日间辐射制冷能够比皮肤直接暴露在环境中提供更凉爽的感觉。如图 3(f)~(g) 所示,Zhang 等<sup>[20]</sup>受人体皮肤表皮和真皮结构的高效光学性能和防水透气性的启发,设计了红外大气窗口 97% 发射率和太阳光波段 97% 反射率的超织物,能够实现  $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  的亚环境冷却,制成帽子后能够比白色棉帽温度低  $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 4 结束语

辐射制冷织物通过调控人体的热辐射来实现降温,能够在高温环境中保持人体的热舒适性。本文从室内和室外两种应用场景的角度介绍了辐射制冷织物的研究进展,分析了室内和室外热环境的特点以及两种应用场景下辐射制冷织物的光谱设计和研究现状。在室内通过设计红外高透射率的织物,相较于传统织物可以增强人体向外辐射散热的能力从而实现降温,

大大节省建筑制冷系统所需的能量。而在室外有太阳辐照的情况下,通过设计使织物在太阳光波段具有高反射率以减少太阳热量输入,同时在红外波段具有高透射率/高发射率,将人体热辐射通过大气窗口尽可能散出去以实现降温。

尽管辐射制冷织物已经在过去几年取得了巨大进展,但其广泛应用仍存在挑战,具体表现在以下几个方面:

1) 彩色辐射制冷织物。为了实现特定的红外光谱性质,织物通常都是白色的,但出于美学和商业实际应用的考虑需要对其进行着色。对于室内红外高透射率织物而言,要在保持红外光学性质的同时进行着色是极具挑战的,因为常见的有机染料分子特有的化学键会强烈吸收中红外波长范围内的人体辐射。如图 4(a)~(c) 所示,Cai 等<sup>[21]</sup>将无机颜料普鲁士蓝、氧化铁和硅的纳米颗粒掺入 PE 来进行染色,这些纳米颗粒在红外区域的吸收可忽略不计。给 PE 纺织品着色的同时保持了约 80% 的红外透明度,着色后的织物与

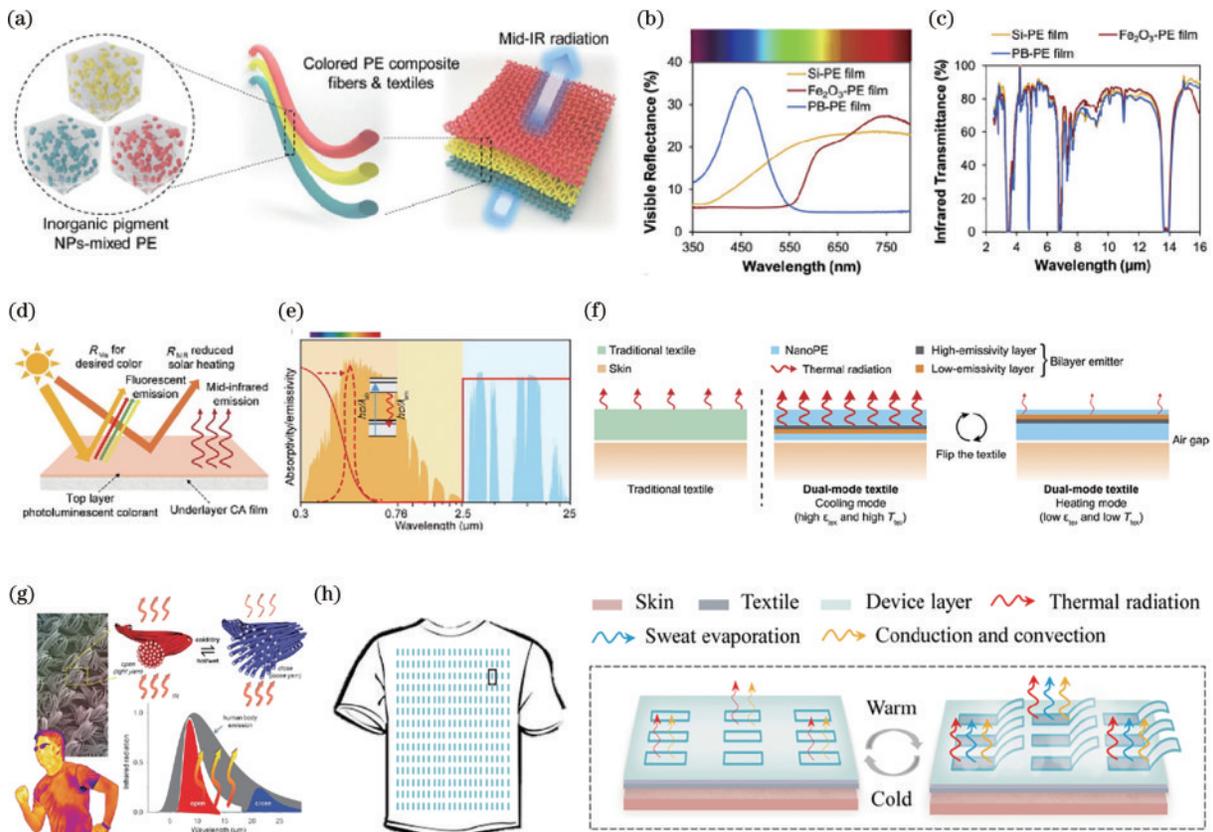


图 4 个人热管理织物。(a) 彩色红外高透辐射制冷织物示意图<sup>[21]</sup>; (b) 无机颜料纳米颗粒混合 PE 复合薄膜的紫外可见反射率<sup>[21]</sup>; (c) 无机颜料纳米颗粒混合 PE 复合薄膜的红外透射率<sup>[21]</sup>; (d) 基于光致发光的亚环境冷却彩色辐射制冷<sup>[22]</sup>; (e) 亚环境彩色辐射制冷的理想吸收率/发射率<sup>[22]</sup>; (f) 基于翻转的双模式织物结构<sup>[27]</sup>; (g) 红外门控织物的设计准则<sup>[29]</sup>; (h) 基于尼龙/银异质结构的多模态可穿戴设备工作原理<sup>[30]</sup>

Fig. 4 Personal thermal management textile. (a) Schematic of colored IR-transparent radiative cooling textile<sup>[21]</sup>; (b) ultraviolet-visible reflectivity of inorganic pigment-embedded PE composites<sup>[21]</sup>; (c) infrared transmissivity of inorganic pigment-embedded PE composites<sup>[21]</sup>; (d) schematic of the sub-ambient full-color radiative cooling based on photoluminescence<sup>[22]</sup>; (e) ideal absorptivity/emissivity spectra of photoluminescence based colored radiative cooling<sup>[22]</sup>; (f) schematic of dual-mode textile<sup>[27]</sup>; (g) design principles of an IR gating textile<sup>[29]</sup>; (h) working principle of nylon/Ag heterostructure-based multimodal wearable<sup>[30]</sup>

传统棉织物相比仍有 1.6~1.8 °C 的降温效果。而对于日间辐射制冷织物来说,彩色会带来可见光谱中的光吸收,使其不可避免地吸收太阳光,导致冷却性能下降。目前有各种彩色辐射制冷的的设计,如光子结构设计、化学吸收剂设计等,来尽可能减少可见光部分的吸收<sup>[7]</sup>。但在保持亚环境日间辐射制冷的同时保持彩色是极具挑战的,因为可见光范围内的太阳热效应将导致太阳光反射率无法达到 90% 以上。如图 4(d)~(e) 所示,Wang 等<sup>[22]</sup>将量子点光致发光技术引入辐射制冷中,通过将紫外-可见光转换为发射光来最大限度地减少太阳能热量的吸收,使太阳光波段的反射率达到 90% 以上,实现了比环境温度低 2.2~5.4 °C 的彩色亚环境冷却。虽然已经有一些关于辐射制冷织物可以实现彩色的报道,但是其复杂的制备工艺限制了其大规模使用,因此有待进一步向实用化发展。

2) 多模态热管理织物。尽管热辐射占人体散热的主要部分,但是人体散热方式除了热辐射还包括传导、对流和蒸发,这 4 种散热途径共同作用才保持人体稳定的体温。这 4 项的重要性在不同情况中有所不同。在人体皮肤与织物内表面的界面处,热传导就是主要传热途径,在制冷时需要尽可能提高织物导热性,而在保暖时需要织物进行高度隔热<sup>[23]</sup>。许多织物也通过设计襟翼结构来调节空气对流的影响,通过打开襟翼增强空气对流,降低皮肤表面湿度水平和表皮温度,相反通过关闭襟翼减少空气对流带来的温度降低<sup>[24]</sup>。此外,当环境温度较高或人体运动时人体会出汗,蒸发就成为了人体散热的主要方式,并且由于水的潜热较大,蒸发能够带走大量热量,因此织物设计出色的汗液传输通道和蒸发通道也是实现有效降温的重要途径,有研究将单向导湿引入辐射制冷织物中减少出汗时皮肤的黏腻感<sup>[25]</sup>。结合人体的多种传热机制同时对不同散热途径进行调控,可以增强人体热管理的效果。

3) 双模式织物。大多数织物具有单一的降温或者加热效果,仅能提供一种场景下的舒适度,导致人体无法适应复杂场景。因此,开发具有降温 and 保暖性能的双模式织物是很重要的。与人体降温相反,给人体加热主要通过减少人体的热量损失来实现,之前大多数织物通过设计内表面的高反射率来反射回人体红外辐射从而减少热量损失。Cai 等<sup>[26]</sup>基于个人加热的传热模型分析,表明抑制人体辐射散热的关键是织物外表面的红外低发射率。他们进一步根据个人制冷和个人加热所需要的材料发射率不同,设计了具有不对称结构的织物<sup>[27]</sup>,通过机械翻转让高发射率或低发射率的一面朝外从而实现降温 and 保暖效果的切换,提高人体对于不同环境的适应性[图 4(f)]。此外,环境温度随天气实时变化,能够灵活管理人体附近微气候的自适应智能织物也是人们所追求的人体热管理方式。一些研究已经提出了对环境和生理条件变化进行响

应性模式切换,如湿度响应、温度响应等,来保持人体热舒适的织物<sup>[28]</sup>。如图 4(g) 所示,Zhang 等<sup>[29]</sup>提出了一种织物,用一层薄薄的碳纳米管涂覆三醋酸纤维素双晶型纤维,可以动态调节人体热辐射。当环境潮湿时,相邻纤维更紧密地结合在一起产生共振电磁耦合使织物的发射率提高从而进行降温,且每根纱线之间的空间增加,冷却效果增强;而在寒冷干燥的环境中,则相反。如图 4(h) 所示,Li 等<sup>[30]</sup>设计了汗液响应性的织物,通过襟翼的打开和关闭同时调控对流、汗液蒸发和辐射 3 种散热方式,将人体的热舒适区扩展。尽管有关双模式织物和自适应智能织物的研究很多,但织物穿戴的舒适性有待进一步发展并落实到实际使用中。

4) 实用性和可穿性。尽管辐射制冷织物的发展很迅速,但实验室概念验证与实际应用和商业化之间仍然存在差距<sup>[31]</sup>。目前实现红外高透射率或红外高发射率的织物大部分是聚合物基薄膜材料制成的,在长期太阳光紫外线照射时会存在稳定性的问题,加速聚合物材料机械性能的下降,从而导致降温性能下降<sup>[32]</sup>。此外,作为织物还应当满足基本的可穿戴物理属性如柔软性、透气性和透湿性等,因此可穿戴性与热管理效果需要进一步地平衡。并且辐射制冷织物的制造过程也会比传统纺织品更复杂,复杂的制备工艺也会限制其从实验室到大规模的发展,未来的研究需要进一步从成本、生产过程的角度进行考虑。

## 参 考 文 献

- [1] Chan A P C, Yi W. Heat stress and its impacts on occupational health and performance[J]. *Indoor and Built Environment*, 2016, 25(1): 3-5.
- [2] 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: 106899.
- [3] 刘扬,潘登,陈文,等. 纳米光学辐射传热:从热辐射增强理论到辐射制冷应用[J]. *物理学报*, 2020, 69(3): 036501.  
Liu Y, Pan D, Chen W, et al. Radiative heat transfer in nanophotonics: from thermal radiation enhancement theory to radiative cooling applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(3): 036501.
- [4] Peng Y C, Cui Y. Advanced textiles for personal thermal management and energy[J]. *Joule*, 2020, 4(4): 724-742.
- [5] Ma Z, Zhao D, She C, et al. Personal thermal management techniques for thermal comfort and building energy saving[J]. *Materials Today Physics*, 2021, 20: 100465.
- [6] Peng L H, Su B, Yu A B, et al. Review of clothing for thermal management with advanced materials[J]. *Cellulose*, 2019, 26(11): 6415-6448.
- [7] Liang J, Wu J W, Guo J, et al. Radiative cooling for passive thermal management towards sustainable carbon

- neutrality[J]. *National Science Review*, 2023, 10(1): nwac208.
- [8] Tong J K, Huang X P, Boriskina S V, et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(6): 769-778.
- [9] Hsu P C, Song A Y, Catrysse P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile [J]. *Science*, 2016, 353(6303): 1019-1023.
- [10] Yang A K, Cai L L, Zhang R F, et al. Thermal management in nanofiber-based face mask[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(6): 3506-3510.
- [11] Catrysse P B, Song A Y, Fan S H. Photonic structure textile design for localized thermal cooling based on a fiber blending scheme[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(12): 2420-2426.
- [12] Peng Y C, Chen J, Song A Y, et al. Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(2): 105-112.
- [13] Li Z Z, Chen Q Y, Song Y, et al. Fundamentals, materials, and applications for daytime radiative cooling [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(5): 1901007.
- [14] Zhang Q, Wang S H, Wang X Y, et al. Recent progress in daytime radiative cooling: advanced material designs and applications[J]. *Small Methods*, 2022, 6(4): 2101379.
- [15] Zhao D L, Aili A, Zhai Y, et al. Radiative sky cooling: fundamental principles, materials, and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(2): 021306.
- [16] Cai L L, Song A Y, Li W, et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(35): 1802152.
- [17] Cui Y, Luo X Y, Zhang F H, et al. Progress of passive daytime radiative cooling technologies towards commercial applications[J]. *Particuology*, 2022, 67: 57-67.
- [18] Zeng S N, Pian S J, Su M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.
- [19] 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.
- [20] Zhang X P, Cheng Z M, Yang D L, et al. Scalable bio-skin-inspired radiative cooling metafabric for breaking trade-off between optical properties and application requirements[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1624-1632.
- [21] Cai L L, Peng Y C, Xu J W, et al. Temperature regulation in colored infrared-transparent polyethylene textiles[J]. *Joule*, 2019, 3(6): 1478-1486.
- [22] 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[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(18): 1874-1881.
- [23] Fang Y S, Chen G R, Bick M, et al. Smart textiles for personalized thermoregulation[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 17(50): 9357-9374.
- [24] Chai J L, Kang Z X, Yan Y S, et al. Thermoregulatory clothing with temperature-adaptive multimodal body heat regulation[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2022, 3(7): 100958.
- [25] Zhang X S, Yang W F, Shao Z W, et al. A moisture-wicking passive radiative cooling hierarchical metafabric [J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 2188-2197.
- [26] Cai L L, Song A Y, Wu P L, et al. Warming up human body by nanoporous metallized polyethylene textile[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 496.
- [27] 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): e1700895.
- [28] Hu R, Liu Y D, Shin S, et al. Emerging materials and strategies for personal thermal management[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(17): 1903921.
- [29] Zhang X A, Yu S J, Xu B B, et al. Dynamic gating of infrared radiation in a textile[J]. *Science*, 2019, 363(6427): 619-623.
- [30] Li X Q, Ma B R, Dai J Y, et al. Metalized polyamide heterostructure as a moisture-responsive actuator for multimodal adaptive personal heat management[J]. *Science Advances*, 2021, 7(51): eabj7906.
- [31] Lei L Q, Shi S, Wang D, et al. Recent advances in thermoregulatory clothing: materials, mechanisms, and perspectives[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(3): 1803-1830.
- [32] Yao P C, Chen Z P, Liu T J, et al. Spider-silk-inspired nanocomposite polymers for durable daytime radiative cooling[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(51): 2208236.