面向个人热管理的降温纺织品

曾少宁¹, 胡佳雨¹, 张曼妮¹, 向远卓¹, 吴嘉威¹, 苏敏钰¹, 张雨琪¹, 沈梦², 洪平³, 黄朝林⁴, 陈敏^{1,5}, 周宁^{1,6}, 侯冲^{1,7}, 周华民⁸, 张定宇^{9*}, 陶光明^{1,8*}

1. 华中科技大学, 武汉光电国家研究中心和湖北光谷实验室运动与健康智能化技术创新中心, 武汉 430074;

2. 国家体育总局冬季运动管理中心, 北京 100044;

3. 北京体育大学, 北京 100091;

4. 武汉市金银潭医院, 武汉 430048;

5. 华中科技大学计算机科学与技术学院, 武汉 430074;

6. 华中科技大学附属同济医院, 武汉 430030;

7. 华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074;

8. 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

9. 湖北省卫生健康委员会, 武汉 430079

* 联系人, E-mail: zhangdy63@hotmail.com; tao@hust.edu.cn

2021-10-31 收稿, 2022-01-14 修回, 2022-02-23 接受, 2022-03-01 网络版发表

国家自然科学基金(62175082)资助

摘要 高温环境下人体的局部微环境热调控对人类健康具有重大意义. 纺织品作为人体与外界环境的一道防护屏障, 对个人的热舒适管理有重要作用. 普通纺织品由于缺乏高效的温度调控机制, 难以应对周围环境的剧烈温度变化, 尤其是在高温场景下如何实现有效的降温是亟须解决的难题. 通过物理光学、材料科学和纺织工程等多学科交叉融合而衍生的降温纺织品, 有望以更加有效和个性化的方式满足个体温度的调节需求, 将通过多学科交叉创新的科学研究助力体育运动与医疗健康的智能化发展. 本文重点讨论了降温纺织品的基本机制、研究进展和应用场景, 阐述其发展方向和产业化潜力, 并展望降温纺织品在多元化运动和智能化医疗中的广阔前景.

关键词 降温纺织品, 个人热管理, 辐射降温, 可穿戴技术, 功能织物

纺织品的基本功能是蔽体遮羞、隔湿保暖, 保护人们免受环境变化的影响. 随着现代生活需求的变化, 人们开始探索具有传感、变色、保暖、降温、致动等新兴功能的智能纺织品^[1,2]. 同时, 在健康中国的国家战略下, 智能纺织品作为一种便携无感的多场景器件, 正致力于通过多学科交叉创新的科学研究赋予纺织品多维应用, 助力运动与健康^[3].

全球变暖和极端高温天气的加剧对可持续发展和社会经济影响巨大^[4-6]. 虽然人体存在一定的自动体温调节机制, 如肌肉运动、出汗、血管舒张等, 但长时间

暴露于高温侵害和太阳辐射下, 皮肤极易产生脱水、老化甚至黑色素瘤等癌化反应; 且过度的热负荷会导致中暑反应, 降低工作效率甚至诱发心、脑血管疾病, 直接影响个人健康^[7]. 纺织品作为人体与外界环境的一道防护屏障, 在不同环境条件下对人体的热舒适调节起着重要作用. 1980年, 一个有趣的问题被提出^[8]: 在炎热沙漠中生存的贝都因人为什么会穿着黑色长袍? 当贝都因人暴露在阳光直射的沙漠中, 身穿黑色长袍会比白色长袍吸收更多太阳辐射, 从而产生更多的净辐射热量增加; 但长袍与皮肤间较大的间隔所引发

引用格式: 曾少宁, 胡佳雨, 张曼妮, 等. 面向个人热管理的降温纺织品. 科学通报, 2022, 67: 1167–1179

Zeng S N, Hu J Y, Zhang M N, et al. Cooling textiles for personal thermal management (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1167–1179, doi: 10.1360/TB-2021-1126

的波纹管作用、烟囱效应等可以增强黑袍下的对流热传递过程,从而增强热量散失,使得无论是穿黑袍还是白袍的人体净热量增加差别不大.由此可见,环境与人体的热量交换会因纺织品颜色、风速、皮肤与织物的空气间隔、织造方式等多方面因素的影响而产生差别.这种热量交换是一个包括多种热学机理(热对流、热蒸发、热传导、热辐射等)的复杂过程^[9].个人热管理技术利用纺织品对上述散热量进行有效调控,可以在一定程度上有效调节人体与周围环境之间的热交换,在降低建筑能耗和满足个人热舒适方面具有巨大潜力^[10].

高温环境下的降温防护问题在人们的生产和生活中引起了高度重视与广泛关注.随着科学技术的发展,具有降温防护功能的纺织品(图1)在医疗健康、体育运动、消防安全等领域为人类提供了工作便利和安全保障.在疫情防控常态化的形势下,大批医护工作者在一线为人们进行疫苗注射和病毒检测.由于防控传染性疾病的需要,隔离病房无法开空调,而室外环境又面临高温暴晒,医护人员们往往需要穿戴闷热的口罩与厚重的防护服进行长时间工作.目前已有一些方法被用在防疫过程中,比如“摸冰”“充冷气”等,通过增强热传

导、热对流以及提高体表汗液蒸发速率等方式实现高效降温.消防领域也根据特定环境的光热特性对服装功能提出了具体要求.根据ISO TC94/SC14/WG3要求^[11],消防服必须能够保护消防员免受辐射热的伤害且具有良好的透气、透湿性,允许汗液往外蒸发从而带走部分人体热量,在一定的火灾强度、气温环境和工作时间范围内为消防员提供热平衡与舒适度.

人们对纺织品的创新需求使其已不局限于审美设计,更着眼于功能性集成.基于个人热管理技术的降温纺织品可以辅助人体维持相对稳定的体温,服务于不同的应用场景.例如,在暴晒的户外,人们可以选择穿着可阻隔紫外线的防晒衣,从而避免紫外辐射抵达人体皮肤造成伤害;在炎热的环境下,可通过凉感织物增强人体与纺织品贴合时的舒适感,或提高热传导和对流蒸发带走更多的热量;对于矿井、建筑工地等高温环境作业人员而言,可选择有源供电的液冷服或气冷服等此类更为直接的方式来传导热量或促进蒸发吸热,使体表温度有效降低.此外,辐射降温纺织品则可通过选择性地调控纺织品的红外发射率/透过率和太阳辐射反射率,来实现人体无源热学调控,同样受到了研究人员的广泛关注^[12~16].本文将重点阐述面向个人热管理

图1 面向个人热管理的降温纺织品示意图

Figure 1 Schematic diagram of cooling textiles for outdoor personal thermal management

的降温纺织品的基本机制和应用场景,整理分析近年来的研究进展及发展方向,并展望降温纺织品在多元化运动和智能化医疗中的广阔前景。

1 防紫外线纺织品

太阳辐射主要由紫外光(UV)、可见光和近红外光组成(图2(a))^[17,18]。尽管紫外辐射仅占太阳辐射总能量的~3.4%(AM 1.5),但长期暴露仍然会导致皮肤老化、视力损伤、免疫力降低等健康问题^[19]。当紫外线照射到纺织品表面时,其相互作用主要分为透射、吸收和反射三部分^[20]。为了达到有效的阻隔效果,应增强织物对紫外线的吸收或反射作用来实现人体皮肤防护的功能。防紫外线纺织品,比如常见的防晒衣,可以减少紫外辐射对皮肤产生的伤害,但防晒衣往往具有一定的透明度,无法高效阻挡太阳光中的可见光部分,仍会使衣服表面的温度上升;若将具有光谱调控特性的涂料^[21]与防晒衣有效结合,或许可以赋予其一定的降温性能。

部分纤维自身就具有优异的防紫外线性能,例如大麻和羊毛等天然纤维、分子结构存在苯环的涤纶长丝等。Kocić等人^[22]针对织物的研究发现,纯棉针织物的紫外线防护系数(ultraviolet protection factor, UPF)最高可达118.7,其次是大麻和棉混纺纱针织物,而纯大麻针织物的UPF最低,其原因在于大麻纤维自身存在弹性

和柔性较差的问题,织物受限于疏松结构使得紫外线透过率较高。此外,国内外学者正在不断开发防紫外线性优异、环保且价格低廉的天然染料。Baaka等人^[23]将羊毛织物用葡萄渣提取的天然染料染色后,发现织物的UPF值从5提高到30,且通过使用明矾或硫酸亚铁媒染剂,UPF值进一步提高至50以上。目前,市场上的防紫外线产品大多是利用纺织品整理剂进行紫外线阻隔。防紫外线助剂^[24,25]主要可分为紫外线吸收剂和反射剂:紫外线吸收剂(图2(b))所含的纳米颗粒在其价带和导带间具有较大带隙,当纳米颗粒被能量高于其带隙的紫外光照射时,入射的紫外线光子被价带的电子所吸收,并激发电子跃迁至导带;紫外线反射剂(图2(c))所含纳米颗粒能使入射的紫外线发生散射,由此实现阻隔作用。

根据中国标准GB/T 18830-2009《纺织品防紫外线性能的评定》,当织物的UPF值大于40且长波紫外线透射比的平均值小于5%时,可称为“防紫外线产品”。影响纺织品防紫外线性能的因素众多,要达到优异的效果,需要从纤维、纱线及织物层面优选具有防紫外线性能的材料,还要具备可以上机织造得到紧密织物的条件。防紫外线助剂对织物进行改性处理是快速提高织物防紫外性能的一个重要手段,未来将进一步研究和开发绿色环保、低成本、高防护性的新型防紫外线助剂。

图2 防紫外线纺织品示意图: 太阳辐射功率密度(大气质量为1.5的状态, AM 1.5)(a)、紫外线吸收助剂(b)和反射助剂(c)的作用机理

Figure 2 Schematic diagram of UV protective textiles: Power density of solar irradiance (air mass (AM) 1.5) (a), interaction mechanisms of UV absorption agents (b) and UV reflection agents (c)

2 凉感纺织品

凉感纺织品主要通过提高纤维导热率、调控纤维的截面结构、引入相变材料以及采用织物后整理等技术,使面料具有迅速传热、加速排汗的降温作用或清凉效果,由此来提高人体的舒适性(图3)。当人体与凉感纺织品接触时,两者的温度差会促进接触部分的热交换,从而对皮肤产生温度刺激。提高导热率可以增强纺织品向环境散热的能力,因此人体的热量可通过接触衣物的方式进行传递。纤维截面结构设计和材料后整理技术则是从提高纺织品吸湿、导水速率角度出发,将人体产生的汗液快速吸收并排出,通过加速汗液蒸发以达到散热效果。而相变纤维主要利用相变材料的特性,吸收并储存人体热量以实现降温作用。

2.1 导热凉感纺织品

导热率可衡量物体导热能力强弱,纤维的导热率主要取决于材料内部大分子排列方式、纤维形态以及纤维内部微观结构等。由于聚合物分子链的无定形排列区域减少了导热声子的平均自由程,因此传统纺织品的导热系数通常都很低,会对人体散热产生屏障。针对这一问题,2014年, Singh等人^[26]利用模板辅助电聚

合的方法研发了一种沿纤维轴向具有显著分子链取向性的聚噻吩纳米纤维,链取向性使该纤维的导热率达到了 $4.4\text{ W}/(\text{m K})$,比原聚合物高20倍以上。2015年, Xin等人^[27]将小尺寸的石墨烯片引入石墨烯纤维内部,使其与高度有序的大尺寸石墨烯片共同形成紧凑结构,制备了一种具有高导热率、高导电率和高机械强度的石墨烯纤维。由于材料本身极高的导热性以及结构的进一步优化,此工作实现了高达 $1025\pm 40\text{ W}/(\text{m K})$ 的导热率。2017年, Gao等人^[28]制备了氮化硼/聚乙烯醇复合材料纤维及其纺织品,由于氮化硼纳米片具有高导热性和高度定向性,使复合纺织品的导热系数达到棉织物的2.22倍。2018年, Yuan等人^[29]利用聚多巴胺涂覆的铜纳米线制备了电绝缘的环氧树脂纳米复合纤维,由于铜纳米线固有的高导热率和高深宽比,纳米复合纤维的导热率可达 $2.87\text{ W}/(\text{m K})$,比环氧树脂高14倍。2019年, Wu等人^[30]制备了边缘选择性羟基化氮化硼纳米片(BNNSs)含量高达60%(质量百分比)的再生纤维素/BNNS复合纤维, BNNS薄而透明的二维形态更有利于热传导。由于出色的散热能力和良好的吸湿性,穿着者在进行运动时获得了比商业吸湿纺织品更好的动态降温效果。2020年, Chien等人^[31]制备了一种半结晶态

图3 凉感纺织品示意图^[26-31]: 高导热(a)和异形纤维吸湿(b)、后整理技术(c)的凉感纺织品示意图; 高导热纤维发展历程(d)
Figure 3 Schematic diagram of cooling textiles^[26-31]: Schematic diagram of cooling textiles with high thermal conductivity (a), the moisture absorption of profiled fibers (b) and finishing technologies (c); (d) the phylogeny of high thermal conductivity fibers

聚酰胺(尼龙)纳米纤维,并且通过退火处理提高了聚合物的构型有序性,使该纤维具有 59.1 W/(m K) 的高导热率,可用于提高人体热舒适性能.导热凉感纺织品的研发和应用为满足个人热舒适需求提供了新的选择.

2.2 导湿凉感纺织品

汗液蒸发对人体散热起着不可或缺的作用,通过纤维截面设计和织物表面处理增大纺织品的吸湿排汗能力,可提升织物的凉感效果. Su等人^[32]将异形涤纶纤维和天然棉混纺,结果表明异形聚酯纤维含量增加能够提高其毛细管效应,从而提高纺织品的吸湿能力.美国杜邦公司在20世纪90年代生产的吸湿排汗型Coolmax纤维^[33]是典型的异形截面聚酯纤维,凹槽式的截面结构能有效增强纤维的吸湿性和毛细管作用,已经广泛应用于内衣和运动衣领域.除此之外,目前市场上已开发出种类众多且具有针对性的织物亲水整理剂,如聚醛海藻糖^[34]、纳米晶纤维素^[35]整理剂等,使织物表面由疏水变为亲水,可有效改善人体热舒适性.近期, Peng等人^[36]利用静电纺丝和层压技术将尼龙6纳米纤维膜与导热铜结合,制备了集成汗液传输与热传导功能的降温纺织品.纳米纤维所构成的传输通道可以吸收汗液并大面积扩散,使汗液迅速蒸发到空气中,而内部高导热的铜则可以高效传递热量,从皮肤带走大量的热量.独特的结构设计和功能集成为下一代个人汗液管理纺织品的研发与应用提供了新的思路.

2.3 相变凉感纺织品

与上述汗液由液态转变为气态带走皮肤热量的原理类似,相变凉感纺织品通过将纤维与相变材料集成,利用相变材料(phase change material, PCM)在相转变时吸收、储存和释放热的性能,可实现对皮肤的温度调控. McCann等人^[37]通过同轴静电纺丝技术将长链碳氢化合物(二十烷等)封装在纳米纤维内,实现了 114 J/g 的相变焓,由于二十烷的熔点为 37°C ,接近人体温度,且其熔融过程可吸热从而为物体降温,因此该相变纤维具有应用于人体热调控的潜力.然而,由于相变材料和聚合物基底的导热率均很低,因此相变纤维较难发生理想的热调控响应.针对此问题, Li等人^[38]将多种PCM浸渍到石墨烯气凝胶纤维中,并利用氟碳树脂涂层进行封装.纤维内部PCM负载高达84%(质量百分比),可对电、热等外部刺激产生响应,且超疏水氟碳涂层赋予纤维良好的自清洁功能并提高其机械性能,

有望应用于可穿戴织物和便携式电气设备.为了获得高机械性能的气凝胶相变纤维, Liu等人^[39]通过湿法纺丝和冷冻干燥工艺制备了具有高孔隙率与高比表面积的Kevlar气凝胶纤维,优异的力学性能使其可以任意弯曲、打结、编织等,将其填充相变材料后可制备得到相变焓达 162 J/g 的相变纤维. Wu等人^[40]采用蚕丝蛋白为原料、通过冷冻纺丝法制备了具有高孔隙率的微结构纤维,并用聚乙二醇(PEG)填充后包覆聚二甲基硅氧烷涂层以避免泄露,相变焓约为 118.1 J/g .研究人员将编织好的织物内嵌入手套中进行测试,当佩戴手套后进入 50°C 的环境中,固体的PEG可从皮肤-织物微环境中吸收热量,冷却织物下覆盖的皮肤,且具有良好的循环使用稳定性.

相变凉感纺织品不仅具有降温性能,更重要的是,其集降温 and 保暖于一体,可以延缓温度升高或降低的速度,使皮肤适应多变的环境.人们正在相变材料的封装、相变纤维的批量制备、与纺织工业的兼容性等方面进行深入探究,有望实现满足个人热舒适需求的大规模应用.

2.4 功能性助剂后整理纺织品

除了上述方法外,在纺织品的后整理过程中引入一些功能性助剂,也可以用于提高人体与织物的接触凉感. Jin等人^[41]使用了薄荷醇微胶囊,当其与皮肤表面接触后可作用于冷感受体,产生特定的神经信号并传递到大脑,从而形成一种“凉爽”的感觉.一些已公开的专利也有使用这类物质来实现舒适的凉感面料^[42,43].此外,异氰酸酯^[44]、非离子接触冷感整理剂QUEEN-LIGHT CL-7S^[45]、蚕丝蛋白凉感整理剂TK COOL SP-6^[46]等均被应用于提高纺织品的接触凉感功能.人们对纺织品的要求不仅限于最初的接触凉感,同时也注重穿着过程中的排汗散热,这在无形之中对凉感织物提出了更高的要求.目前,凉感织物主要应用于家纺产品、夏季军训服、运动休闲服等领域,各大品牌均推出相关产品,并开始集成防晒、防蚊等功能.未来也会向着智能化、多功能化方向发展,以满足广大消费者对高品质织物的需求.

3 主动式降温服

在服装与人体皮肤表面的空气层被称为服装微气候区^[47],该区域的温度、湿度及气流速度影响着人体的舒适性.主动式降温服^[48,49]利用外接电源作为动力,

通过风冷或液冷装置控制服装微气候区状态,从而提高人体的传导、对流或蒸发散热,由此实现良好的降温效果(图4)。主动式降温服主要针对矿井、铸造厂、锅炉厂、建造工地等高温环境下的作业人员,可以根据工作条件进行风力大小、液体流速等参数的调整,旨在为人们提供一种基于个人热管理的降温装备。

3.1 气体介质嵌入式降温服

气体降温服(图4(a))主要通过外接电源驱动风扇或鼓风机装置,在服装与皮肤表面形成流动空气,加速汗液蒸发,由此起到对微气候区降温的作用。Zhao等人^[50]制

作了5件带有电池、小型通风装置(风扇)和可关闭开口的夹克(图4(b))。保持统一气流速度的风扇被放置于身体不同部位进行测试,结果显示,通风位置和开口对身体整体降温无影响,但对局部降温有显著影响。Zhao等人^[51]开发了一种便携式热电转换单元(TECU),可通过在橡胶管网络内输送冷或热空气来调节人体的热舒适度(图4(c))。Lu等人^[52]和Kang等人^[55]设计了一套结合通风装置与相变材料的便携式个人降温系统(图4(d)),通过两者的协同作用可以为人体提供有效的热舒适。气体降温服主要利用气体作为介质、以增强蒸发和对流散热的方式达到降温效果。该方式气源丰富,但对于风

图4 基于气冷(a)和液冷(e)的主动式降温服示意图: 通风夹克(b)^[50]、便携式热电转换单元(c)^[51]、结合通风系统和相变材料的个体降温服饰(d)^[52]、液冷服装(f)^[53]、基于液态金属的降温服饰(g)^[54]

Figure 4 Schematic diagram of active cooling suit based on air cooling (a) and liquid cooling (e): Ventilation jackets (b)^[50], a portable thermoelectric energy conversion unit (TECU) (c)^[51], and personal cooling suit combining a ventilation system and phase change materials (d)^[52], liquid cooling garment (f) and active cooling suit based on liquid metal (g)^[54]

扇及电池安放位置的选择设计有较高要求,且气体的流动易造成服装膨胀,同时在实际使用过程中需要综合考虑噪声、充电、身体局部温度过低等问题。

3.2 液体介质嵌入式降温服

在液体降温服(图4(e))上设置输水管道,主要通过外接电源驱动水箱使管道内部水流动,从而加快皮肤表面与循环管之间的热交换,带走体表热量。Guo等人^[53]建立了人体皮肤通过液冷服装向环境传热的详细理论模型,该模型的实验结果与计算结果误差小于10%。在环境温度为45℃,流量为224.5 mL/min,最大冷却速率为243.2 W/m²时,液冷服装的最长工作持续时间为3.36 h(图4(f))。Rahman等人^[54]设计了一种使用无毒的镓基液态金属Galinstan作为冷却剂的主动降温系统。Galinstan通过一个低功率直流泵泵入连接在降温服饰内嵌的管道,通过热传导带走身体的热量,继而与冷包中嵌入的相变材料进行热交换使自身冷却。与其他主动降温系统相比,液态金属降温系统的降温时间延长了4倍,重量降为1/3,成本降为1/8(图4(g))。液体降温服利用液体作为介质,提高人体的热传导散热,由此实现降温,具有效率高、降温效果好等优点,然而其储水装置笨重、需要及时充电等问题,可能为生产、生活中的实际应用带来不便。

目前,主动式降温服已有相关市售产品。气体介质嵌入式降温服又被称为风扇服,风扇与移动充电装置在服饰上集成,可应用于炎热的工作和生活环境。而市售的液体介质嵌入式降温服通常利用水作为介质进行降温,亦被称为水冷服,循环水以背包或者挎包的形式附在服装上,常用于高温的作业环境。主动式降温服的设计通常需要涉及电路的连接与控制,并综合考虑重量、功耗等参数的设置,因此,开发更加轻便、降温效果显著且价格低廉的主动式降温服是未来发展的趋势。

4 辐射降温纺织品

传统服饰的热量交换过程主要利用地表约300 K的周围环境作为冷源,较小的温差限制了被降温物体的散热效率。事实上,人体皮肤本身不论肤色如何,其在热辐射波段均可看作基于普朗克定律发出电磁波辐射的近乎完美的黑体,红外发射率可达98%^[56]。在皮肤温度为34℃时,人体热辐射主要集中在7~14 μm的中红外波段^[57],而该波段与大气透明窗口(8~13 μm)是重叠的,因此热量可以通过大气透明窗口向温度为3 K的宇

宙环境进行耗散,实现辐射降温。辐射降温技术^[58~60]通过选择性的光谱调控,使面向天空的地表物体可以通过大气透明窗口向宇宙辐射热量,同时高效阻挡太阳辐射波段(0.3~2.5 μm)的能量输入。辐射降温织物从原理上主要可以分为两种:第一种是在中红外波段具有高透过率的直接辐射降温纺织品(图5(a)),热辐射从人体体表发出,透过纺织品直接散失。此类纺织品适用于高发射率的物体表面,且两者即使存在一定的间隔也可以实现较好的辐射热散失。第二种是在中红外波段具有高发射率的间接辐射降温纺织品(图5(b)),其对中红外波段(8~13 μm)不透明,热量需从被降温物传导到纺织品表面后,由纺织品外表面进行辐射散失。此类纺织品还可应用于金属等低发射率的物体表面,且在环境温度较高时能够对环境热辐射起到一定的阻挡作用。

4.1 中红外高透过型辐射降温纺织品

中红外高透过型辐射降温纺织品可使人体热辐射从皮肤直接散失到环境中,从而避免“红外屏蔽”效应,最大化人体热辐射的热量耗散^[67]。大多数的纺织材料对人体辐射具有很强的吸收能力,红外透明度较低。但聚烯烃(比如聚乙烯(PE))只有脂肪族的C—C和C—H键,其吸收峰都远离人体辐射峰值,是较理想的红外透明材料。然而,普通的PE薄膜无法用于日常穿着,因为其具有高可见透明度且不具备透气性等穿戴性能。针对此问题,Hsu等人^[61]将50~1000 nm的相互连通的孔隙引入薄膜内(图5(c)),该孔径大小与可见光波长相当,从而产生了强烈的散射,达到大于99%的不透明度。同时,该孔径远小于中红外波长,因此在该波段具有77.8%的平均红外透过率,可较好地传输热辐射,从而实现低于棉织物2℃的室内降温效果。在此基础上,该团队^[62]利用发射率和材料厚度的不对称性进一步研发了可以同时实现保暖与降温的双模式纺织品(图5(d))。该纺织品可通过翻转织物打破其原有的单一功能,在低发射率层朝外时实现保暖,在高发射率层朝外时实现降温,帮助人体适应环境温度变化。然而,聚合物薄膜从本质来说并不适合穿着,因为其不透气、不透湿,缺乏必要的舒适性。为了解决这些问题,该团队^[63]研发了具有类似棉花柔软度的纳米聚乙烯微孔纤维,可用于构建织物(图5(e))。纤维内部的多孔结构可有效散射阳光中的可见光;而织物本身的孔隙带来良好的透气性,有助于皮肤与周围环境之间的空气热对流交换;且纺织品的组织结构使其更具弹性,与薄膜相比大

图5 基于中红外高透(a)和中红外高发(b)的辐射降温纺织品示意图; 商用多孔聚乙烯(PE)(c)^[61]、双模式织物(d)^[62]、多孔PE机织物(e)^[63]、ZnO-PE材料和纤维(f)^[56]、彩色聚乙烯纤维(g)^[64]、PEO薄膜(h)^[65]和超材料织物(i)^[66]

Figure 5 Radiative cooling textiles based on mid-infrared high transmittance (a) and emissivity (b); a photo of commercial nanoPE (c)^[61], the dual-mode textile (d)^[62], woven nanoPE fabric (e)^[63], the ZnO-PE textile material and a roll of fibers (f)^[56], the colored PE fibers (g)^[64], a PEO thin film (h)^[65], and the metafabric (i)^[66]

大降低了带电性和不可逆的起皱, 提高了穿着舒适性. 该织物相较于棉织物可使人体皮肤降温 2.3°C , 实现室内降温节能20%以上, 且可以通过熔融和挤出进行回收再利用, 具有潜在的成本效益和可持续发展潜力.

辐射降温纺织品可使人体在不需要任何能量输入的情况下充分传递身体辐射热, 但对于阳光直射的室外环境, 太阳光具有近 1000 W/m^2 的辐照度(AM 1.5G), 而人体的热辐射功率密度大约为 100 W/m^2 ^[57]. 为了避免如此巨大的外部加热, 除了要增强大气窗口的红外热辐射外, 还要尽可能降低整个太阳辐射波段的吸收. Cai等人^[56]首次研发了用于室外辐射降温的光谱选择性纳米复合织物(图5(f)), 展示了超过90%的太阳辐射反射率和80%的中红外波段透过率. 内部粒径为 $0.1\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 的氧化锌纳米颗粒可高度反射可见-近红外光, 阻挡来自太阳的热量输入; 聚乙烯基底在人体热辐射区域的高透过率可以最大限度地释放辐射热. 在峰值太阳辐照度超过 900 W/m^2 的户外环境下, 相较于常规棉织物, 复合织物可以使模拟皮肤降温超过 10°C . 尽管红外透明纺织品已被证明可以用于调节辐射散热, 但是颜色的多样性是支配可穿戴市场的重要影响因素之一. 常用有机染料分子的化学键在中红外波长范围内往往具有强烈的吸收特性, 因此, 在不影响中红外特性的情况下, 纺织品染色用染料的缺乏仍是该纺织品

进行商业化应用的主要障碍. 对此, Cai等人^[64]采用独特的、在人体热辐射波段几乎无吸收的无机纳米颗粒(普鲁士蓝、氧化铁和硅)作为染料, 制备了稳定着色的聚乙烯纤维(图5(g)), 并通过优化浓度和颗粒尺寸使其能反射某些可见光, 解决了可见光和中红外光之间的困境. 他们首次展示了具有~80%的高红外透明度的彩色聚乙烯降温纺织品, 相较于常规棉织物具有 $1.6\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 的辐射冷却性能. 在大规模制备的工艺兼容性下, 丰富可调的可见色彩、良好的耐洗涤稳定性和易着色性将进一步激发该降温纺织品在可穿戴市场中的应用潜力, 实现更好的人体健康防护、节能经济效益和可持续发展.

4.2 中红外高发射型辐射降温纺织品

基于中红外高发射率的降温纺织品在太阳辐射波段的调控方面, 与中红外高透过型的辐射降温纺织品具有类似的高反射率要求, 而在中红外波段的调控使其可以成为良好的发射体, 增强人体皮肤散热. 且其材料的选择更为广泛、织物厚度局限性小, 在实现太阳辐射的有效阻挡、较高的强度韧性、良好的实用性等方面都具有极大优势. 聚合物材料对于红外光的吸收和发射是由官能团的振动所引起的^[68], 含有多个官能团的聚合物可能具有多种振动频率, 因此, 通过研究官

能团的发射或吸收可以帮助我们选择适用于日间辐射降温的聚合物。Shi等人^[69]在彗星蛾茧的单丝纤维中发现其内部存在随机分布于纤维横截面上的高密度丝状孔隙,这样的一维纳米结构使纤维对太阳辐射波段产生强烈的背向散射作用,而丝蛋白化学键导致其在中红外光谱中的高发射率。受此启发,该团队^[69]通过湿法纺丝和拉伸工艺制备了具有仿生纳米结构的再生丝素蛋白和聚偏二氟乙烯纤维,高密度的丝状孔隙和材料本身特性赋予了纤维高达93%的太阳辐射反射率和91%的中红外发射率,使其在辐射降温方面具有极大的应用潜力。与此方法类似,Hu等人^[70]制备了具有~500 nm纳米孔和~34 μm 微米孔的无序多孔结构弹性纤维,不同尺度的孔隙可以最大限度反射阳光辐射并增强人体热辐射散失。与上述非选择性的辐射降温器件相比,在大气透明窗口具有选择性的辐射降温器件可以避免吸收来自大气的热辐射。基于此,Li等人^[65]通过静电纺丝法制备了聚乙烯氧化物(PEO)纳米纤维膜(图5(h)),其中PEO独特的化学键使其表现出中红外波段78%的选择性发射率,而丝径为500~1200 nm的随机分级纳米纤维提供了在太阳光谱波段96.3%的反射率,赋予PEO纳米纤维膜良好的降温性能。近期,Zeng等人^[66]基于形态分级的设计理念,利用工业纤维制造技术开发了一种具有光谱选择性响应的光学超材料纤维及织物(图5(i)),为了提高对紫外波段的散射、拓宽随机结构的光谱响应范围,超材料织物引入了紫外反射层,以实现对于这部分不可忽略的能量阻隔,最终实现了高达92.4%的太阳光反射率和94.5%的人体红外发射率。在户外暴晒环境下,相较于常规棉织物,这种光学超材料织物可使人体皮肤降温近5°C。光学超材料纤维及织物可以集成到多种产品中,从而应用于不同的场景;同时,通过优化和探索纤维结构特征,有望通过热辐射和汗液蒸发的联合作用来提高冷却效率。

辐射降温纺织品受材料科学、纳米光子学、纺织

工程和可穿戴技术等多学科交叉创新的启发,实现了被动式的人体局部微环境降温^[71],且目前已经利用规模化、高通量、全自动的纺织织造技术实现了批量稳定的制备^[12],展现了极高的商业化潜力。如何能在有效降温的基础上达到与日常衣物相当的可穿戴性、鲁棒性和色彩多样性,从而应用于更广泛的场景,将是辐射降温纺织品面临的一大挑战。

5 展望

具有降温防护功能的新兴纺织品由于其优异的性能、与人体良好的亲近性及灵活的可定制性,在走入百行千业、千家万户的同时也成为了学术研究的新高地,对传统纺织工业的革新发展和新型智能织物的研究创新具有重要启示。尽管现有的部分降温防护纺织品已展示出不俗的性能并走上货架,但其在拓宽应用端时仍存在诸多挑战,亟待多学科的协同参与和发展。基于仿生科学和热管理技术的发展,除了应对炎热环境的“热防护”纺织品外,无源“冷防护”纺织品也受到深入研究。通过降低导热率、减弱热辐射等与降温织物相对的调控方式,大量高效、轻质的先进保暖材料和服饰被开发与探索,在众多场景中均实现了有效应用,为人们应对极端寒冷环境提供良好的保障。

在传统纺织工程和可穿戴技术的蓬勃发展下,通过纺织、材料、光学、热学及机械等各领域多学科交叉协同创新,降温纺织品将合理兼容服饰的降温性能和可穿戴性能,同时实现更低成本的批量化制造,并以此为基础,为人类建立更强、更广、更细微的降温管理体系。在未来,降温纺织品通过与数字孪生技术和柔性电子器件集成,有望实现具有热舒适调节、感知交互、热电自供能、短途通信、实体社交等多种功能的新一代纺织品,更好地契合多元化运动需求和智能化医疗服务^[72],打造虚拟与现实结合的无感交互和智能管理。

参考文献

- 1 Weng W, Yang J, Zhang Y, et al. A route toward smart system integration: From fiber design to device construction. *Adv Mater*, 2020, 32: 1902301
- 2 Yan W, Dong C, Xiang Y, et al. Thermally drawn advanced functional fibers: New frontier of flexible electronics. *Mater Today*, 2020, 35: 168–194
- 3 Chen M, Jiang Y, Guizani N, et al. Living with I-fabric: Smart living powered by intelligent fabric and deep analytics. *IEEE Network*, 2020, 34: 156–163
- 4 Biarreau L T, Davis L W, Gertler P, et al. Heat exposure and global air conditioning. *Nat Sustain*, 2019, 3: 25–28
- 5 Shi J, Han D, Li Z, et al. Electrocaloric cooling materials and devices for zero-global-warming-potential, high-efficiency refrigeration. *Joule*, 2019, 3: 1200–1225

- 6 Qian X, Han D, Zheng L, et al. High-entropy polymer produces a giant electrocaloric effect at low fields. *Nature*, 2021, 600: 664–669
- 7 Lucas R A I, Epstein Y, Kjellstrom T. Excessive occupational heat exposure: A significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers. *Extreme Physiol Med*, 2014, 3: 14
- 8 Shkolnik A, Taylor C R, Finch V, et al. Why do Bedouins wear black robes in hot deserts? *Nature*, 1980, 283: 373–375
- 9 Hardy J D, Dubois E F. Regulation of heat loss from the human body. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1937, 23: 624–631
- 10 Ma Z, Zhao D, She C, et al. Personal thermal management techniques for thermal comfort and building energy saving. *Mater Today Phys*, 2021, 20: 100465
- 11 Nayak R, Houshyar S, Padhye R. Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing. *Fire Sci Rev*, 2014, 3: 4
- 12 Shin S, Chen R. Cool textile. *Joule*, 2021, 5: 2258–2260
- 13 Pan S, Peng H. Making passive daytime radiative cooling metafabrics on a large scale. *Adv Fiber Mater*, 2022, 4: 3–4
- 14 Zhu L, Zhu M. Metafabric that can cool the human body. *Natl Sci Rev*, 2021, 8: nwab176
- 15 Zhang S. Metafabrics for cooling under a scorching sun. *Light Sci Appl*, 2021, 10: 218
- 16 Liu H, Zhu S N. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3787–3790 [刘辉, 祝世宁. 基于形态分级结构设计的超材料辐射制冷织物. 科学通报, 2021, 66: 3787–3790]
- 17 Peoples J, Li X, Lv Y, et al. A strategy of hierarchical particle sizes in nanoparticle composite for enhancing solar reflection. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 131: 487–494
- 18 Fu Q. Radiation (solar). In: Holton, James R, eds. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Amsterdam: Academic Press, 2003. 1859–1863
- 19 Gallagher R P, Lee T K. Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review. *Prog Biophys Mol Biol*, 2006, 92: 119–131
- 20 Mondal S. Nanomaterials for UV protective textiles. *J Ind Text*, 2021, doi: 10.1177/1528083721988949
- 21 Mandal J, Fu Y, Overvig A C, et al. Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*, 2018, 362: 315–319
- 22 Kocić A, Bizjak M, Popović D, et al. UV protection afforded by textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibres. *J Cleaner Prod*, 2019, 228: 1229–1237
- 23 Baaka N, Ticha M B, Haddar W, et al. Upgrading of UV protection properties of several textile fabrics by their dyeing with grape pomace colorants. *Fibers Polym*, 2018, 19: 307–312
- 24 Wang R H, Xin J H, Tao X M. UV-blocking property of dumbbell-shaped ZnO crystallites on cotton fabrics. *Inorg Chem*, 2005, 44: 3926–3930
- 25 Emam H E. Generic strategies for functionalization of cellulosic textiles with metal salts. *Cellulose*, 2019, 26: 1431–1447
- 26 Singh V, Bougher T L, Weathers A, et al. High thermal conductivity of chain-oriented amorphous polythiophene. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 384–390
- 27 Xin G, Yao T, Sun H, et al. Highly thermally conductive and mechanically strong graphene fibers. *Science*, 2015, 349: 1083–1087
- 28 Gao T, Yang Z, Chen C, et al. Three-dimensional printed thermal regulation textiles. *ACS Nano*, 2017, 11: 11513–11520
- 29 Yuan H, Wang Y, Li T, et al. Highly thermal conductive and electrically insulating polymer composites based on polydopamine-coated copper nanowire. *Compos Sci Technol*, 2018, 164: 153–159
- 30 Wu K, Yu L, Lei C, et al. Green production of regenerated cellulose/boron nitride nanosheet textiles for static and dynamic personal cooling. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 40685–40693
- 31 Chien H C, Peng W T, Chiu T H, et al. Heat transfer of semicrystalline nylon nanofibers. *ACS Nano*, 2020, 14: 2939–2946
- 32 Su C I, Fang J X, Chen X H, et al. Moisture absorption and release of profiled polyester and cotton composite knitted fabrics. *Text Res J*, 2007, 77: 764–769
- 33 Wang F, Annaheim S, Morrissey M, et al. Real evaporative cooling efficiency of one-layer tight-fitting sportswear in a hot environment. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24: e129–e139
- 34 Lou J, Yuan J, Wang Q, et al. Preparation and application of polyaldehyde trehalose as a new hydrophilic anti-crease finishing agent for cotton fabric. *Text Res J*, 2020, 91: 335–346
- 35 Zaman M, Liu H, Xiao H, et al. Hydrophilic modification of polyester fabric by applying nanocrystalline cellulose containing surface finish. *Carbohydr Polym*, 2013, 91: 560–567
- 36 Peng Y, Li W, Liu B, et al. Integrated cooling (i-Cool) textile of heat conduction and sweat transportation for personal perspiration management. *Nat Commun*, 2021, 12: 6122

- 37 McCann J T, Marquez M, Xia Y. Melt coaxial electrospinning: A versatile method for the encapsulation of solid materials and fabrication of phase change nanofibers. *Nano Lett*, 2006, 6: 2868–2872
- 38 Li G, Hong G, Dong D, et al. Multiresponsive graphene-aerogel-directed phase-change smart fibers. *Adv Mater*, 2018, 30: 1801754
- 39 Liu Z, Lyu J, Fang D, et al. Nanofibrous kevlar aerogel threads for thermal insulation in harsh environments. *ACS Nano*, 2019, 13: 5703–5711
- 40 Wu J, Hu R, Zeng S, et al. Flexible and robust biomaterial microstructured colored textiles for personal thermoregulation. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 19015–19022
- 41 Jin Z M, Cai Y L, Tao J W, et al. The fabric finishing giving fabric mint cool feel and fresh smell. *Adv Mat Res*, 2012, 441: 275–278
- 42 Ji P, Wang C X, Ji G M, et al. Preparation method for cool-feeling finishing of China-hemp fabric (in Chinese). PRC Patent, CN113186724-A, 2021-04-26 [季萍, 王潮霞, 季国苗, 等. 一种汉麻织物凉感整理的制备方法. 中国专利, CN113186724-A, 2021-04-26]
- 43 Zhang H X, Zhang Y H, Ren C Y, et al. Preparation method of pure flax and mint antibacterial and cool-feeling fabric and fabric prepared by the adopting method (in Chinese). PRC Patent, CN113123125-A, 2021-04-13 [张红霞, 张艳红, 任长友, 等. 一种纯麻薄荷抗菌加凉感面料的制备方法及其采用该方法制备的面料. 中国专利, CN113123125-A, 2021-04-13]
- 44 Huang Z F R, Hou L L, Zuo K J. Polyester fabric with aromatic and cool touch combined function and its preparation method (in Chinese). PRC Patent, CN109056343-A, 2018-07-03 [黄庄芳容, 侯丽丽, 左凯杰. 具有芳香、凉爽触感复合功能的涤纶织物及其制备方法. 中国专利, CN109056343-A, 2018-07-03]
- 45 Deng T. Knitted fabric easy to color and a production method (in Chinese). PRC Patent, CN113445189-A, 2021-06-25 [邓铁. 一种易上色的针织面料及其生产方法. 中国专利, CN113445189-A, 2021-06-25]
- 46 Cai Y D. LF type Tencel/Shengma/alloy germanium fiber blended contact cool-sense multifunctional shirt fabric (in Chinese). PRC Patent, CN11118898-A, 2019-12-20 [蔡永东. LF型天丝/圣麻/合金锗纤维混纺接触凉感多功能衬衫面料. 中国专利, CN11118898-A, 2019-12-20]
- 47 Zhong W, Xing M M Q, Pan N, et al. Textiles and human skin, microclimate, cutaneous reactions: An overview. *Cutan Ocul Toxicol*, 2006, 25: 23–39
- 48 Peng Y, Cui Y. Advanced textiles for personal thermal management and energy. *Joule*, 2020, 4: 724–742
- 49 Farooq A S, Zhang P. Fundamentals, materials and strategies for personal thermal management by next-generation textiles. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2020, 142: 106249
- 50 Zhao M, Gao C, Wang F, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *Int J Ind Ergonom*, 2013, 43: 232–237
- 51 Zhao D, Lu X, Fan T, et al. Personal thermal management using portable thermoelectrics for potential building energy saving. *Appl Energy*, 2018, 218: 282–291
- 52 Lu Y, Wei F, Lai D, et al. A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: An investigation on its cooling efficiency. *J Thermal Biol*, 2015, 52: 137–146
- 53 Guo T, Shang B, Duan B, et al. Design and testing of a liquid cooled garment for hot environments. *J Thermal Biol*, 2015, 49–50: 47–54
- 54 Rahman M A, Elassy K S, Roose L R, et al. A lightweight, low-cost liquid-metal personal cooling system for prolonged cooling. In: 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). New York: IEEE, 2020, doi: 10.1109/ICCE46568.2020.9043069
- 55 Kang Z, Udayraj Z, Wan X, et al. A new hybrid personal cooling system (HPCS) incorporating insulation pads for thermal comfort management: Experimental validation and parametric study. *Build Environ*, 2018, 145: 276–289
- 56 Cai L, Song A Y, Li W, et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling. *Adv Mater*, 2018, 30: 1802152
- 57 Steketee J. Spectral emissivity of skin and pericardium. *Phys Med Biol*, 1973, 18: 686–694
- 58 Yin X, Yang R, Tan G, et al. Terrestrial radiative cooling: Using the cold universe as a renewable and sustainable energy source. *Science*, 2020, 370: 786–791
- 59 Wang S, Jiang T, Meng Y, et al. Scalable thermochromic smart windows with passive radiative cooling regulation. *Science*, 2021, 374: 1501–1504
- 60 Peng Y, Fan L, Jin W, et al. Coloured low-emissivity films for building envelopes for year-round energy savings. *Nat Sustain*, 2021, doi: 10.1038/s41893-021-00836-x
- 61 Hsu P C, Song A Y, Catrysse P B, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*, 2016, 353: 1019–1023
- 62 Hsu P C, Liu C, Song A Y, et al. A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling. *Sci Adv*, 2017, 3: e1700895
- 63 Peng Y, Chen J, Song A Y, et al. Nanoporous polyethylene microfibres for large-scale radiative cooling fabric. *Nat Sustain*, 2018, 1: 105–112
- 64 Cai L, Peng Y, Xu J, et al. Temperature regulation in colored infrared-transparent polyethylene textiles. *Joule*, 2019, 3: 1478–1486

- 65 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. [Nat Nanotechnol](#), 2021, 16: 153–158
- 66 Zeng S, Pian S, Su M, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling. [Science](#), 2021, 373: 692–696
- 67 Tong J K, Huang X, Boriskina S V, et al. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management. [ACS Photonics](#), 2015, 2: 769–778
- 68 Stuart B H. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 2004
- 69 Shi N N, Tsai C C, Carter M J, et al. Nanostructured fibers as a versatile photonic platform: Radiative cooling and waveguiding through transverse Anderson localization. [Light Sci Appl](#), 2018, 7: 37
- 70 Hu X, Tian M, Xu T, et al. Multiscale disordered porous fibers for self-sensing and self-cooling integrated smart sportswear. [ACS Nano](#), 2020, 14: 559–567
- 71 Zhu B, Li W, Zhang Q, et al. Subambient daytime radiative cooling textile based on nanoprocesed silk. [Nat Nanotechnol](#), 2021, 16: 1342–1348
- 72 Chen M, Wang R, Wang R, et al. Digital medical education empowered by intelligent fabric space. [Nat Sci Open](#), 2022, 1: 20220011

Summary for “面向个人热管理的降温纺织品”

Cooling textiles for personal thermal management

Shaoning Zeng¹, Jiayu Hu¹, Manni Zhang¹, Yuanzhuo Xiang¹, Jiawei Wu¹, Minyu Su¹, Yuqi Zhang¹, Meng Shen², Ping Hong³, Zhaolin Huang⁴, Min Chen^{1,5}, Ning Zhou^{1,6}, Chong Hou^{1,7}, Huamin Zhou⁸, Dingyu Zhang^{9*} & Guangming Tao^{1,8*}

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics and Optics Valley Laboratory Sport and Health Initiative, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² Winter Sports Administration Center, General Administration of Sport of China, Beijing 100044, China;

³ Beijing Sport University, Beijing 100091, China;

⁴ Wuhan Jinyintan Hospital, Wuhan 430048, China;

⁵ School of Computer Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

⁶ Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China;

⁷ School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

⁸ State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

⁹ Health Commission of Hubei Province, Wuhan 430079, China

* Corresponding authors, E-mail: zhangdy63@hotmail.com; tao@hust.edu.cn

Textiles play an extremely important role in various aspects of our life since prehistoric times. Toward passionate and imperceptible sport and health, people have begun to explore evolving functions beyond the basic values of textiles. Smart textiles with functions such as communication, sensing, color change, warming, cooling, actuation, and computing have become the new frontier of wearable technology. Global warming and the enormously scorching weather have adversely affected human production and living as well as the sustainable development of society. As being homothermal, the human body has the ability of automatic temperature regulation. However, people are still vulnerable to excessive heat load without the protection of buildings and traditional cooling systems.

As the largest organ of the human body, the skin can sense the temperature changes of the external environment and regulate its own temperature. Human skin heat dissipation is a complex process including heat convection, heat evaporation and heat radiation. As the boundary between human skin and the external environment, textiles play an important part for the human body to attain thermal comfort under different environmental conditions. Therefore, personal thermal management, a technology regulating the microenvironments around the human body, can effectively control the heat exchange of the human body, and thus become an eco-friendly solution.

With the progress of thermal and materials science, diverse cooling textiles have provided people with convenience and safety in the fields of medicine, firefighting, aerospace, and military technology. In the perspective of cooling principles, personal thermal management solutions based on textiles are categorized as UV-protective textiles, cooling textiles, active cooling suits, and radiative cooling textiles. Some of them have been utilized to maintain a relatively stable body temperature in different scenarios. Textile applications at present are no longer confined to social intercourse and aesthetics, but are more focused on functional breakthroughs. The urgency of global warming and the danger of outdoor work in special occupations have greatly increased the demand for innovations in cooling textiles. It is crucial to maintain thermal comfort of individuals for physical and mental health in extreme environments. Although certain cooling textiles have been commercialized and become basic essentials for specific occasions, stringent challenges remain for weakening the perception of cooling textiles during utilization, expanding their application scenarios to make them available life-essentials.

This review focuses on the regulation mechanism and development of various cooling textiles for personal thermal management. We summarize recent research progress and its significance in energy saving and emission reduction. We also propose solutions toward related challenges in the research and development of high-performance protective textiles, and finally give a perspective to the rise of cooling protective textiles. Through multidisciplinary innovations in textile engineering, materials science, optics, thermal science, and mechanics, cooling textiles can be yielded in a low-cost way with multi-functional performance, while maintaining superior wearability and durability compatible with our daily activities. Cooling textiles would enable the construction of more effective, more comprehensive, and more subtle cooling systems for people. In the perspective of intelligent sport and health, the combination of cooling textiles with flexible electronics and digital twins technology can further enable common-looked textiles with intelligence such as autonomous thermal regulation, perception and interaction, thermoelectrical self-powering, short-haul communication, and metaverse.

cooling textile, personal thermal management, radiative cooling, wearable technology, functional fabric

doi: [10.1360/TB-2021-1126](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1126)