



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Material Engineering—Article

## 用于个人降温和保暖的具有定制热传导和热辐射特性的双功能非对称织物

Yucan Peng<sup>a</sup>, Hiang Kwee Lee<sup>a</sup>, David S. Wu<sup>a</sup>, Yi Cui<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Materials Science and Engineering, Stanford University, Stanford, Menlo Park, CA 94305, USA

<sup>b</sup> Stanford Institute for Materials and Energy Sciences, SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park, CA 94025, USA

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 18 January 2021

Revised 30 March 2021

Accepted 30 April 2021

Available online 28 May 2021

#### 关键词

织物

个人热管理

双功能非对称织物

热传导

热辐射

### 摘要

为了让人体感到热舒适,同时节约能源,个人热管理正逐渐成为一种颇有前景的策略。通过更好地控制人体散热,个人热管理可以实现有效的个人降温和保暖。本文提出了一种简单的表面改性方法,在商用织物的基础上定制热传导和热辐射特性,以便更好地管理从人体到环境的整个传热路径。本文对一种同时具有降温和保暖效果的双功能非对称织物(BAF)进行论证。凭借粗糙度不对称和表面改性等优点,BAF在降温模式下通过增强热传导和热辐射表现出显著的降温效果;在保暖模式下,两条路径的散热都减少,从而实现个人保暖。结果表明,在BAF的降温和保暖模式下测得的皮肤温差可达4.6 °C,表明一件BAF衣服可以扩大人体的热舒适区。希望本研究可为用于个人热管理的织物的设计提供新的视角,并为现有的用于个人降温和保暖的织物的简单改性提供新的解决方案。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

由于人体体温调节系统脆弱,正常温度范围较窄,因此热舒适对人们的健康和安全至关重要[1–2]。一般认为,人体在休息时的正常温度范围为36–38 °C [3]。低温和高温都会对健康产生不利影响,并可能导致有害的甚至危及生命的低温症或高温症[4–5]。此外,是否处于舒适的热环境会影响人们的心理状态和劳动生产率,最终影响社会的发展[6]。人体热舒适不再依赖于整体外部环境,如建筑中的采暖、通风和空调系统[7–9]来实现,而更注重人体自身和局部环境的个人热管理策略[10–12]。通过更好地控制人体与局部环境之间的热传递,可以有效地调节人

体温度,从而提高热舒适性。相应地,用来维持建筑物内空旷空间和其他物体温度的大量能源就可以被节约下来[7,13–15]。

作为人体与外界空气能量交换的界面,衣服对人体热舒适起着重要的作用[16]。有报道称,以被动优化人体散热为目标的新型纺织材料已经被用于人体热管理。根据人体的散热路径来设计热特性,可以增加或减少特定路径的散热。例如,最近报道的红外(IR)透明纳米多孔聚乙烯(nanoPE)织物可以使人体散发的中红外波长范围的热辐射最大化,从而实现辐射降温[17–20]。还有研究报道了低辐射率织物,以减少中红外波长辐射通过衣服的散失,从而产生保暖效果[21–22]。可定制具有导热性质的织物,

\* Corresponding author.

E-mail address: [yicui@stanford.edu](mailto:yicui@stanford.edu) (Y. Cui).

以调节衣服系统的传导热阻。高导热材料作为复合填料、涂层等被应用于织物以增加热导率[23–25]，而一般通过在织物纤维中嵌入或添加微尺度或纳米尺度的气囊来改善隔热效果[26–28]。

当人体穿着衣服处于一般的室内环境中时，对于传统的红外不透明织物（IR-opaque textile）来说，传导是皮肤和衣服织物内表面之间以及织物内部的主要热传输途径[21]。然而，辐射和对流在织物外表面与环境之间的干热转移中发挥着更重要的作用[13,21]。因此，理想的情况是，能彻底控制从皮肤到环境的整个传热路径。较强的热传导和热辐射结合可以通过减小整体热阻来加快散热，以达到降温效果；而较弱的热传导和热辐射结合在一起能够进一步减少散热，以达到保暖效果。

在此，本文提出了一种基于定制的热传导和热辐射特性的双功能非对称织物（BAF），用于个人降温和保暖。利用织物表面粗糙度的不对称性，为市面上的织物开发了一种简单的改性方法，使织物的一侧在使用时有较高的热阻，而另一侧在使用时具有不同的热阻。BAF的概念化设计如图1所示。BAF是一种不对称织物，其两侧的表面粗糙度不同。采用导热材料对其进行改性，可以优化人体与织物内表面之间以及织物内部的热传导。织物的粗糙面采用一层薄薄的高辐射率（ $\epsilon$ ）材料。当光滑面与皮肤接触时，热量通过织物传导，到达高辐射率的外表面，并高效地排放到环境中；因此，穿着这种织物时就达到了降温的效果。反之，在保暖模式下，将织物翻转过来，使粗糙面与皮肤接触，这时粗糙面与皮肤之间的空气间隙成为额外的隔热层，减少传导过程中的散热。同时，辐射率降低的光滑面朝向环境，增加辐射热阻，产生保暖效果。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 样品准备

从商业网站（<https://www.fabric.com/>）购买空白非对称织物，该织物由96%的聚酯纤维和4%的氨纶构成，密度约为 $220 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。为了制备BAF，首先要对空白织物进行清洗，然后在含有 $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸多巴胺（Sigma-Aldrich，美国）和 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨三乙醇缓冲剂（pH 8.5；Teknova，美国）的溶液中进行改性，之后在织物表面形成一层聚多巴胺（PDA）[29]。为了进行化学镀银（Ag），将带有PDA涂层的织物浸入 $25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{AgNO}_3$ 溶液（99.9%；Alfa Aesar，美国）中30 min，形成银种晶层。用去离子（DI）水漂洗后，将织物浸入含 $4.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$   $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ （将28%  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  逐滴加入 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{AgNO}_3$  中，直至溶液再次澄清）和 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖（无水；EMD Millipore Chemicals，美国）的电镀液中2 h [30]。然后将织物翻转，再放入新的电镀液中2 h。镀银并干燥后，在粗糙的一面涂上涂料（混合白；Winton，美国），烘干（ $25 \text{ cm}^2$ 的织物大约用 $0.29 \text{ g}$ 涂料），完成BAF的制备。上述银织物和高 $\epsilon$ 织物的制备分别省略了刷涂料和镀银的步骤。用于对比的棉织物取自一件短袖T恤（100%纯棉，单层针织，密度约为 $135 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，厚度约为 $400 \mu\text{m}$ ；Dockers，美国）。同样为了比较，从一件普通速干T恤[100%聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET），单层针织，密度约为 $143 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，厚度约为 $400 \mu\text{m}$ ；Nike，美国]上获得了速干织物样品。

### 2.2. 材料表征

使用美国的FEI Nova NanoSEM 450获得扫描电子显微镜（SEM）图像。红外波段的透过率和反射率由装有

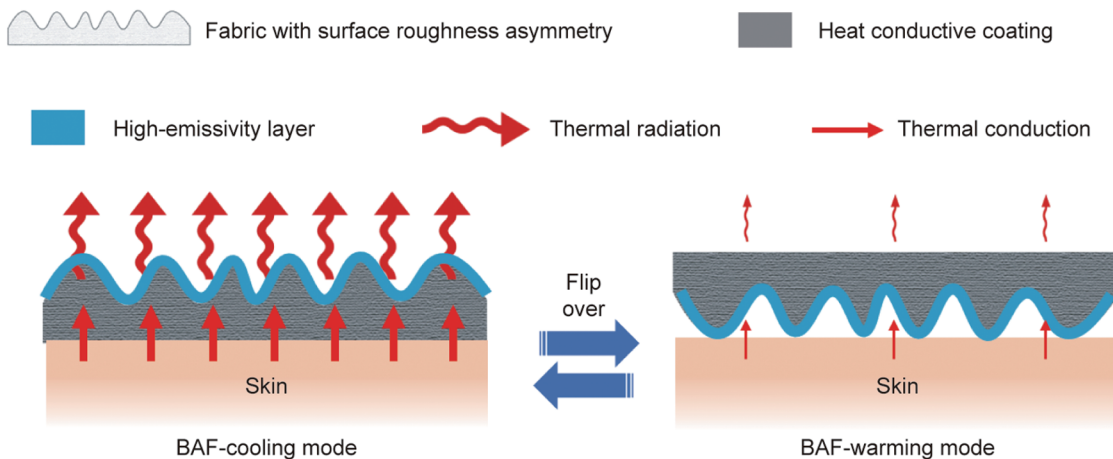


图1. 用于个人降温和保暖的具有定制热传导和热辐射性质的双功能非对称织物（BAF）概念图。在降温模式下，热传导和热辐射增强，促进热量从人体到环境的传输。在保暖模式下，空气间隙会产生额外的传导热阻，同时表面辐射率的降低会减少人体散热。

漫反射金积分球 (PIKE Technologies, 美国) 的傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪 (6700 型, Thermo Scientific, 美国) 测量。计算辐射率 (相当于  $1 - \text{透射率} - \text{反射率}$ )。热像图由热成像相机 (E6; FLIR, 美国) 拍摄。

### 2.3. 热效应测试

使用硅-橡胶柔性电加热器 ( $72 \text{ cm}^2$ ; Omega Engineering, 美国) 连接电源 (Keithley2400, 美国) 作为皮肤加热器。将 K 型热电偶 (直径为  $0.13 \text{ mm}$ ; Omega Engineering, 美国) 与模拟皮肤的上表面接触, 测量皮肤温度。另一个与模拟皮肤相同的加热器被放置在模拟皮肤下面, 作为一个保护加热器, 底部有一个热电偶。带有热电偶的保护加热器与温度控制器 (Omega Engineering, 美国) 连接。将保护加热器的温度始终设置为与皮肤加热器相同, 确保模拟皮肤的热流方向只向上。采用每层厚度为  $220 \mu\text{m}$  的多层胶带包裹样品周围区域, 防止边缘上的热量损失。所有设备都被封闭在由丙烯酸板 (McMaster Carr, 美国) 制成的房间内, 室内的空气温度 (环境温度) 由 K 型热电偶监测, 并由循环水系统控制在  $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将皮肤加热器的加热功率设置为  $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 模拟的裸露皮肤的温度为  $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。测量时, 将织物样品覆盖模拟皮肤 ( $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ )。将另一个 K 型热电偶放置在织物上表面。稳定至少  $20 \text{ min}$  后读取所有温度的测量值。

### 2.4. 水蒸气透过率测试

在美国材料与试验协会 (ASTM) E96 [31] 的基础上对直立杯测试流程进行修改。中瓶 ( $100 \text{ mL}$ ; Fisher Scientific, 美国) 装入  $80 \text{ mL}$  蒸馏水, 用织物样品密封 [使用开盖帽和硅胶垫圈 (Corning, 美国)]。织物外露区域的直径为  $3 \text{ cm}$ 。密封瓶置于环境室 (BTU-133; Espec, 美国), 温度为  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $30\% \pm 5\%$ 。定期测量密封瓶和样品的质量。用减少的水的质量除以瓶子的暴露面积, 就可以计算出水蒸气的透过率。

### 2.5. 透气性测试

在 ASTM D737 [32] 的基础上对测试流程进行修改。使用一个法兰适配器、一个定心 O 环和一个卡箍将织物样品固定在两根管道之间。暴露区域的直径为  $1.65 \text{ cm}$ 。其中一根管子与短/直腿处的 T 型接头连接, 然后连接压缩气源。流量计 (Dwyer, 美国; 最大流量为  $25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 置于压缩气源和 T 型接头之间。另一根管道也与短/直腿处的 T 型接头连接, 然后连接到户外。将差压计 (UEi Test Instruments; 美国) 连接到两个长/支腿上, 以测量在不同的空气流速下织物样品的压降。空气流动的线速度用

空气流量除以暴露面积来计算。

### 2.6. 洗涤测试

将 BAF ( $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ) 置于装有  $80 \text{ mL}$  蒸馏水和  $0.2 \text{ g}$  洗衣液 (Tid, 美国) 的  $100 \text{ mL}$  瓶中。用搅拌棒搅拌溶液, 速度为  $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。洗涤 BAF  $30 \text{ min}$  (1 个周期) 和  $50 \text{ h}$  (100 个周期)。收集洗涤前、洗涤 1 个周期和 100 个周期后的溶液, 用体积分数为  $5\%$  的硝酸稀释, 用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测定洗涤过程中银的质量损耗。洗涤  $50 \text{ h}$  后, 晾干 BAF, 再次进行表面辐射率和模拟皮肤热效应测试。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. BAF 的制作

为了演示这一概念, 通过图 2 (a) 所示的过程制造 BAF。采用一种层压结构的商业织物, 得到非对称的表面结构 (见附录 A 中的图 S1)。BAF 一侧的表面相对粗糙, 另一侧表面光滑, 这符合本研究概念设计中的理想结构。在织物的 SEM 图像中, 非对称结构清晰可见 (见附录 A 中的图 S2)。需要注意的是, 这种织物的选择并不固定, 可以用其他具有类似结构的织物代替, 或者通过将传统织物层层叠加, 制造出具有人工凸起的非对称织物。本文用空白非对称织物作为基材。采用化学镀法在织物纤维上镀银作为导热涂层。附录 A 中的图 S3 展示了镀银织物 (称为“银织物”) 的图片。最后, 用涂料在粗糙的一面添加一层薄薄的高辐射层。预制的 BAF 如图 2 (b) (光滑面) 和图 2 (c) (粗糙面) 所示。通过 SEM 对 BAF 的表面形貌进行表征, 发现银涂层是共形的, 完全覆盖在纤维表面, 如图 2 (d)、(e) 所示。银织物的 SEM 截面图证实了银涂层覆盖了织物内部的每根纤维, 而没有堵塞纤维之间的孔隙 (见附录 A 中的图 S4)。在织物光滑的一面, 将上部纤维的表面涂上涂料, 但纤维之间的缝隙保存完好 [图 2 (f)、(g)]。此外, 高辐射率改性层仅渗透织物表面数十微米, 如被放大的 BAF 粗糙面附近的 SEM 截面图所示 (见附录 A 中的图 S5)。

### 3.2. 红外辐射率和热效应测试

用带有漫反射金积分球的 FTIR 光谱仪研究样品的红外线总辐射率。测量 BAF 表面在中红外波长范围内的透射率 ( $\tau$ ) 和反射率 ( $\rho$ ), 用  $1 - \tau - \rho$  计算辐射率。如图 3 (a) 所示, 表面未经改性的空白非对称织物的粗糙面和光滑面辐射率几乎相同。银涂层降低了表面两侧的辐射率。

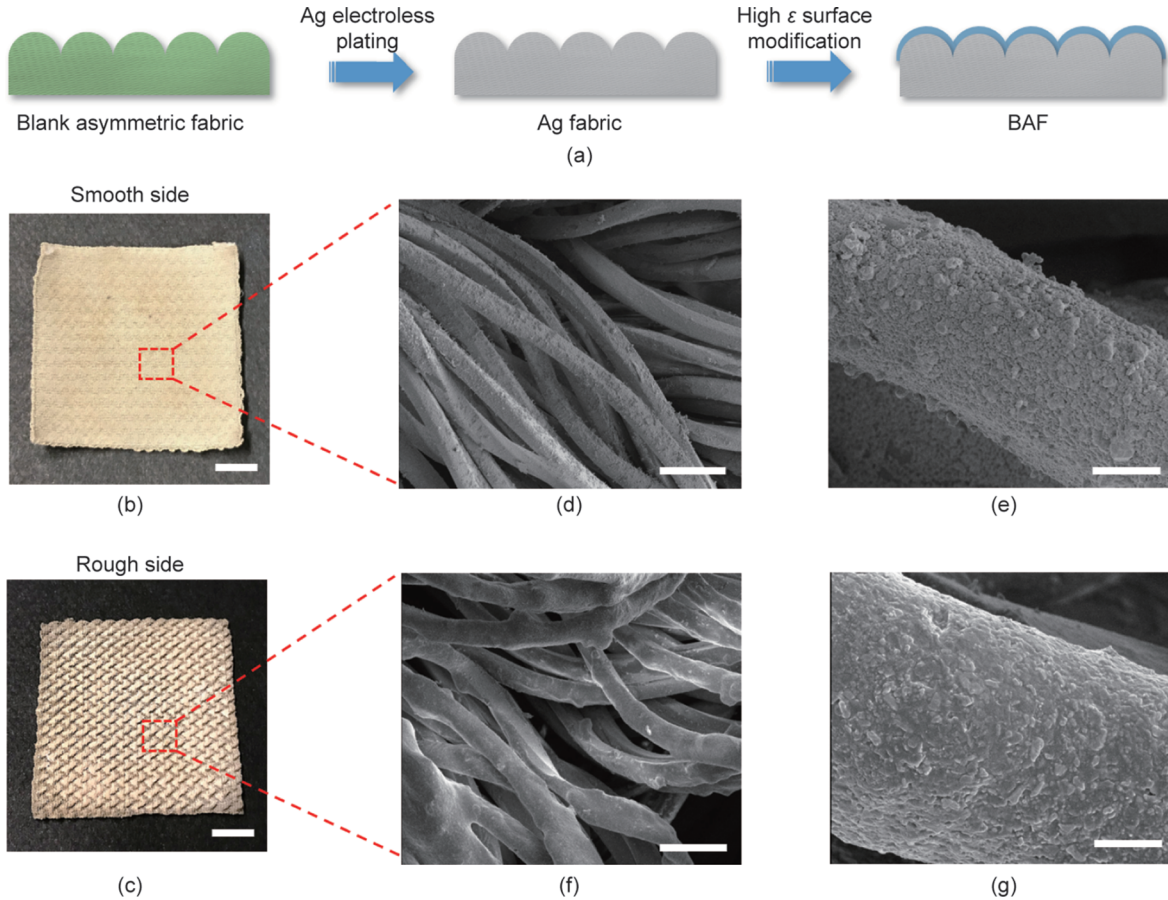


图2. BAF的制备及表面形态。(a) BAF制备过程示意图。对表面粗糙度非对称的层压织物进行化学镀银,得到导热银涂层。然后在粗糙面加上一层薄薄的高辐射层。(b)、(c) 预制BAF(比例尺: 1 cm)的光滑面(b)和粗糙面(c)。(d) BAF光滑面的SEM图像(比例尺: 50  $\mu\text{m}$ )。(e) BAF光滑面的放大SEM图(比例尺: 5  $\mu\text{m}$ )。(f) BAF粗糙面的SEM图像(比例尺: 50  $\mu\text{m}$ )。(g) BAF粗糙面的放大SEM图(比例尺: 5  $\mu\text{m}$ )。

虽然银是一种优良的低辐射率材料 ( $\varepsilon$ : 0.02 ~ 0.03) [33], 但由纤维或纱线编织而成的织物等粗糙基材可显著提高最终的辐射率[34]。这就是为什么银织物的辐射率比整块银要大。然而, 粗糙度不同的织物两面的辐射率差异明显。相对粗糙的一面的辐射率较高, 而光滑面的辐射率与镀银织物的光滑面相同。相比之下, 由于添加了高辐射率层, BAF的粗糙面在较宽的波长范围内表现出非常高的辐射率(约0.95)。

为了表征织物的导热性能, 通过模拟皮肤的热效应测试, 测量了模拟皮肤表面 ( $T_{\text{skin}}$ ) 和织物外表面 ( $T_{\text{top}}$ ) 之间的温差 ( $\Delta T$ ), 如图3 (b) 所示。皮肤加热器的功率密度维持在一个恒定的水平, 同时不断地调整保护加热器的温度, 使其与皮肤温度一致, 防止热流向下。整个测量系统被封闭在一个温度稳定的环境中, 由循环水系统控制。如附录A中的图S6所示,  $\Delta T$  可以作为反映从皮肤到织物上表面整体传热能力的指标, 其中热传导是主要的传热路径。测量结果如图3 (c) 所示。高  $\varepsilon$  织物是指在粗糙面只有高辐射率改性层而没有银涂层的织物。与粗糙面朝上时

的测量结果相比, 光滑面朝上时测得的温差高出了 1.1~1.7  $^{\circ}\text{C}$ 。这一发现表明, 当粗糙面接触皮肤时, 空气间隙的加入能有效地创造更多的传导热阻。结果还表明银涂层可以降低从表皮到织物外表面的总热阻, 原因是镀银样品(即银织物和BAF)表现出更小的  $\Delta T$ 。值得注意的是, 通过热传导进行的热量传输变化可能不是导致  $\Delta T$  变化的唯一因素。尽管热传导在整体热量传输中占主导地位, 但辐射等其他传热途径的变化也可能有一定影响。

另外, 本研究在不同模式下测量了织物样品的模拟皮肤温度, 以表征综合热效应, 如图3 (d) 所示。因为所有的改性都是基于空白织物, 而且传统织物通常以类似的光滑面与皮肤接触, 所以本文以空白织物(以光滑面与皮肤接触, 即粗糙面朝上)为基准。在降温模式(粗糙面朝上)下, 由于热传导和辐射增强, BAF下的皮肤温度比空白织物低约 2.6  $^{\circ}\text{C}$ 。由于表面辐射率降低, 银织物虽然比空白织物具有更强的导热性, 但并没有表现出明显的降温效果。此外, 只进行高辐射率改性的织物无法达到与BAF相媲美的降温效果。这些事实证明, 以皮肤到环境

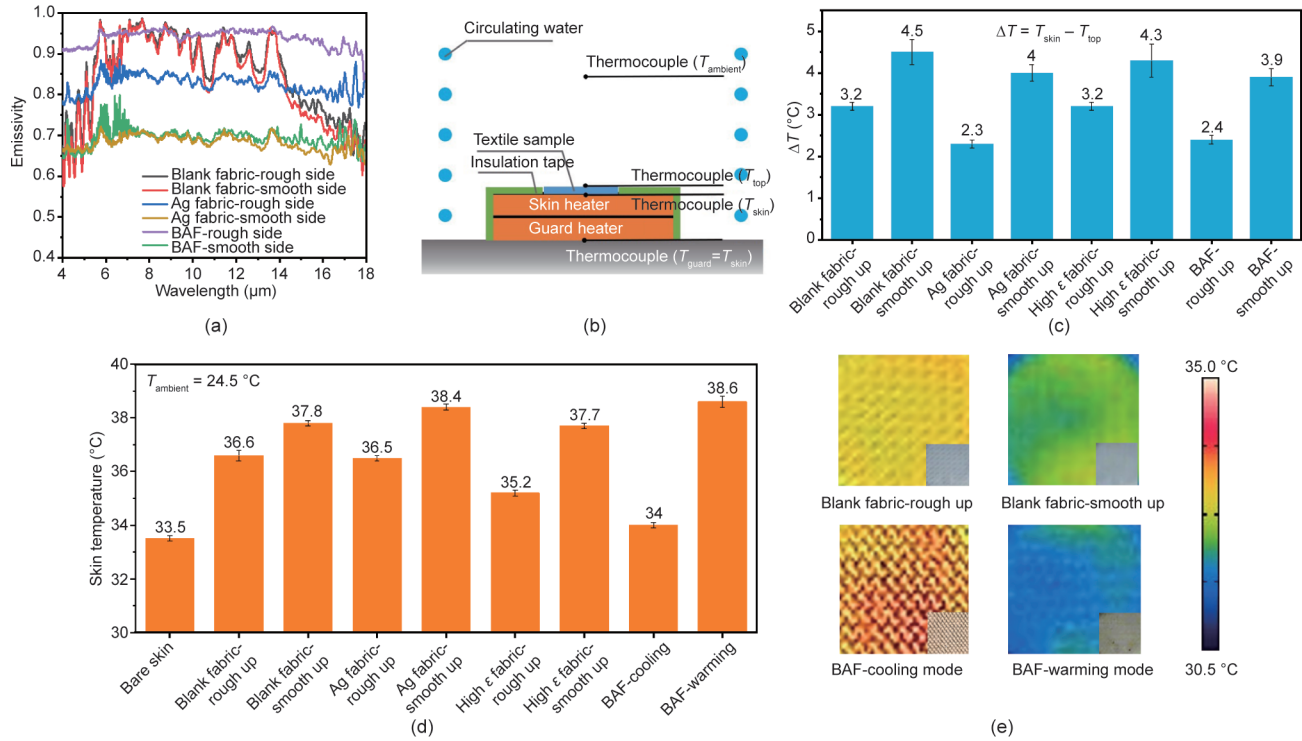


图3. BAF的表面辐射率表征和热效应测试。(a)空白织物、银织物和BAF在中红外波长范围的两面辐射率。银织物是指只经过银涂层改造的非对称织物。(b)热效应测试原理图,环境温度和皮肤加热器功率密度保持不变,保护加热器温度始终与皮肤加热器相同。(c)织物在不同模式下的皮肤和织物上表面之间的温差,显示从皮肤到织物上表面的整体传热阻力。高 $\epsilon$ 织物是指只在粗糙面进行高辐射率改性的非对称织物。(d)热效应测试中不同模式下不同织物的模拟皮肤温度。(e)在35 °C下将空白非对称织物和BAF放置在模拟皮肤上的红外热像。四张图片右下方的方块展示了织物表面的光学照片。

的整条传热路径为重点,同时改变热传导与辐射性能,这种方式比仅应用其中一种方法对个人降温更有效。在保暖模式下,由于非对称结构的粗糙性产生了额外的空气间隙,因此将空白织物翻转会使皮肤温度提高约1.2 °C。通过添加低辐射率的外表面,也加强了保暖效应。相应地,与基准相比,保暖模式下的BAF产生了约2 °C的升温效果。因此,表面改性使降温模式和保暖模式下的皮肤温差扩大到4.6 °C;说明与结构对称的传统织物相比,单层BAF可将热舒适区扩大4.6 °C。

将织物样品放置在相同的模拟皮肤上,用红外摄像机观察其在35 °C下的热效应[图3(e)]。上表面的实际温度及其辐射率共同决定了热像[35]中的表现温度。对于空白织物,当光滑面朝上时,由于空气间隙导致其上表面温度下降,因此其热像看起来比粗糙面朝上时的图像更冷。在降温模式下,BAF减小了模拟皮肤与织物上表面之间的温差。随着辐射率的提高,BAF热像的温度看起来最高。反之,在保暖模式下,由于较大的传导热阻和较低的辐射率,BAF的表面温度较低,其呈现的热像更冷。

### 3.3. 穿着性能测试

商用织物经表面改性制备得到BAF,其穿着性能可

满足日常穿着的要求。因此,本研究更注重最可能被表面改性所破坏的特征。图4(a)展示了BAF、空白非对称织物、纯棉T恤织物和速干T恤织物的水蒸气透过率测试结果。BAF的水蒸气透过率与空白非对称织物相当,说明表面改性仅对最初的水蒸气透过能力有影响。这两种织物的水蒸气透过率也与纯棉和速干织物相似,后两者都是公认的水蒸气透过率相当高的织物。这一发现也证实了表面粗糙度非对称的层压织物结构可以表现出与传统织物一样高的水蒸气透过率。本文还研究了四种织物的透气性,结果显示这四种织物的透气性都不错[图4(b)]。此外,还对BAF进行了洗涤测试,在水中洗涤30 min作为一个周期。用电感耦合等离子体质谱分析一个周期和100个周期的银损耗量。结果发现,一个洗涤周期会损耗0.2%的银,而100个洗涤周期会损耗0.38%的银[图4(c)]。这一发现表明,洗涤后的银损耗非常小,在实际使用中,洗涤后的BAF可以很好地维持银涂层。洗涤100个周期后,再次测定织物两面的表面辐射率。如图4(d)所示,织物两侧的辐射率与洗涤前相当。本文重新进行了模拟皮肤热效应测试,以确定其降温/升温效果。洗涤100个周期后,测得的皮肤温度基本保持不变[图4(e)]。

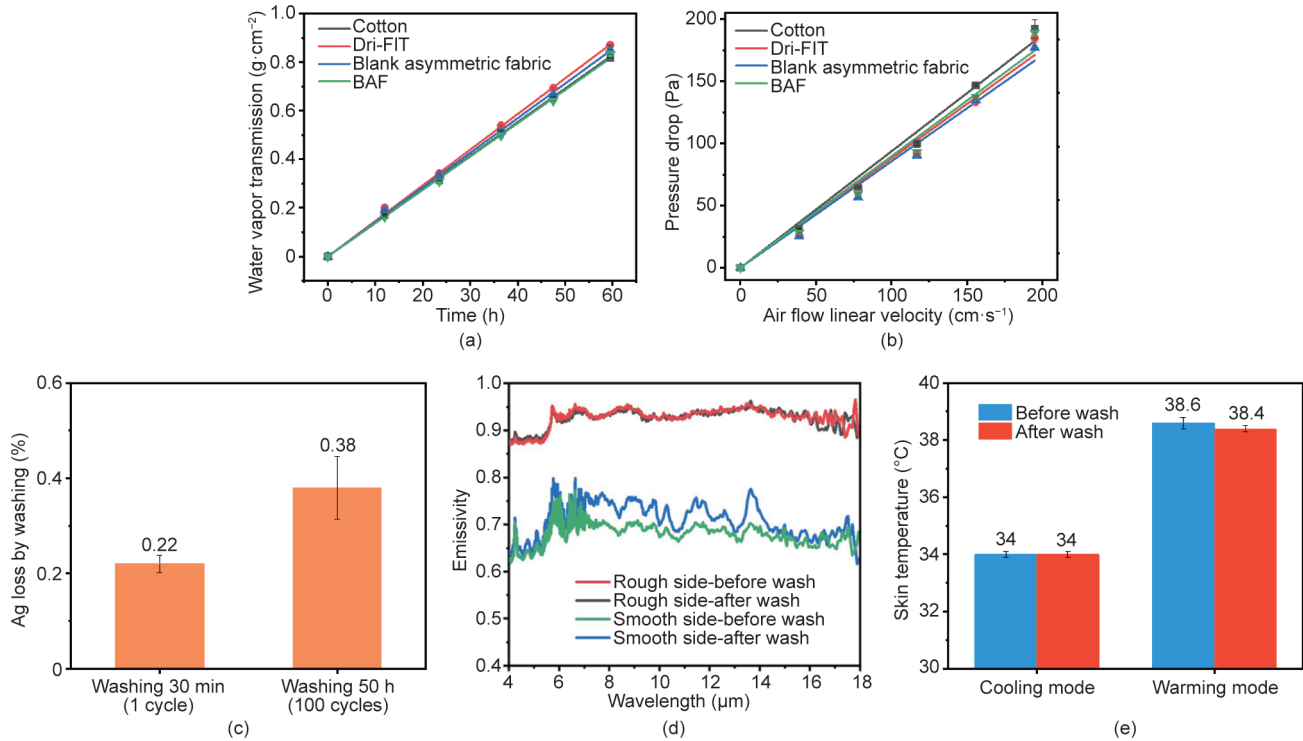


图4. BAF穿着性能测试。(a)水蒸气透过率测试显示人体产生的水蒸气通过织物的速度。(b)透气性测试衡量空气通过织物的难易程度。(c)用ICP-MS测定洗涤后BAF的银损耗。(d)测量洗涤100个周期前后织物两表面辐射率。(e)在降温和保暖模式下的模拟皮肤热效应测试中,洗涤100个周期前后测得的皮肤温度。

## 4. 结论

本文通过简单的表面改性方法,开发了具有定制热传导和热辐射特性的BAF,可用于个人降温和保暖。温度调节能力的提升是通过同时调整热传导和热辐射实现的,这样能够更好地控制从皮肤到环境的整个传热路径。凭借表面粗糙度非对称和所提出的表面改性方法的优点,BAF实现了有效的个人降温和保暖,单件衣服可将人体热舒适区扩大 $4.6^{\circ}\text{C}$ 。希望本研究能为用于个人热管理的织物的设计提供新的视角,并为现有的用于个人降温和保暖的织物的简单改性提供新的解决方案。

## Acknowledgements

Part of this work was performed at the Stanford Nano Shared Facilities and the Stanford Nanofabrication Facility. The authors thank S. Fan for lending the thermal camera.

## Compliance with ethics guidelines

Yucan Peng, Hiang Kwee Lee, David S. Wu, and Yi Cui declare that they have no conflict of interest or financial

conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.04.016>.

## References

- [1] Xiong J, Lian Z, Zhou X, You J, Lin Y. Effects of temperature steps on human health and thermal comfort. *Build Environ* 2015;94:144–54.
- [2] Djongyang N, Tchinda R, Njomo D. Thermal comfort: a review paper. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14(9):2626–40.
- [3] Goldstein LS, Dewhirst MW, Repacholi M, SummaryKheifets L., conclusions and recommendations: adverse temperature levels in the human body. *Int J Hyperthermia* 2003;19(3):373–84.
- [4] Desforges JF, Simon HB. Hyperthermia. *N Engl J Med* 1993;329(7):483–7.
- [5] Sosnowski P, Mikrut K, Krauss H. Hypothermia—mechanism of action and pathophysiological changes in the human body. *Postepy Hig Med Dosw* 2015; 69:69–79. Polish.
- [6] Chan APC, Yi W. Heat stress and its impacts on occupational health and performance. *Indoor Built Environ* 2016;25(1):3–5.
- [7] Hoyt T, Arens E, Zhang H. Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Build Environ* 2015;88:89–96.
- [8] Sadinani SB, Madala S, Boehm RF. Passive building energy savings: a review of building envelope components. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15(8): 3617–31.
- [9] Yang L, Yan H, Lam JC. Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Appl Energy* 2014;115:164–73.
- [10] Zhang XA, Yu S, Xu B, Li M, Peng Z, Wang Y, et al. Dynamic gating of

- infrared radiation in a textile. *Science* 2019;363(6427):619–23.
- [11] Tong JK, Huang X, Boriskina SV, Loomis J, Xu Y, Chen G. Infrared-transparent visible-opaque fabrics for wearable personal thermal management. *ACS Photonics* 2015;2(6):769–78.
- [12] Hsu PC, Liu X, Liu C, Xie X, Lee HR, Welch AJ, et al. Personal thermal management by metallic nanowire-coated textile. *Nano Lett* 2015;15(1):365–71.
- [13] Peng Y, Cui Y. Advanced textiles for personal thermal management and energy. *Joule* 2020;4(4):724–42.
- [14] Yang B, Ding X, Wang F, Li A. A review of intensified conditioning of personal micro-environments: moving closer to the human body. *Energy Built Environ* 2021;2(3):260–70.
- [15] Ghahramani A, Zhang K, Dutta K, Yang Z, Becerik-Gerber B. Energy savings from temperature setpoints and deadband: quantifying the influence of building and system properties on savings. *Appl Energy* 2016;165:930–42.
- [16] Yu W. Achieving comfort in intimate apparel. In: Song G, editor. *Improving comfort in clothing*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2011. p. 427–48.
- [17] Hsu PC, Song AY, Catrysse PB, Liu C, Peng Y, Xie J, et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science* 2016;353(6303):1019–23.
- [18] Peng Y, Chen J, Song AY, Catrysse PB, Hsu PC, Cai L, et al. Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric. *Nat Sustain* 2018;1(2):105–12.
- [19] Cai L, Peng Y, Xu J, Zhou C, Zhou C, Wu P, et al. Temperature regulation in colored infrared-transparent polyethylene textiles. *Joule* 2019;3(6):1478–86.
- [20] Cai L, Song AY, Li W, Hsu PC, Lin D, Catrysse PB, et al. Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling. *Adv Mater* 2018;30(35):1802152.
- [21] Cai L, Song AY, Wu P, Hsu PC, Peng Y, Chen J, et al. Warming up human body by nanoporous metallized polyethylene textile. *Nat Commun* 2017;8(1):496.
- [22] Hsu PC, Liu C, Song AY, Zhang Ze, Peng Y, Xie J, et al. A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling. *Sci Adv* 2017;3(11): e1700895.
- [23] Abbas A, Zhao Y, Wang X, Lin T. Cooling effect of MWCNT-containing composite coatings on cotton fabrics. *J Textil Inst* 2013;104(8):798–807.
- [24] Manasoglu G, Celen R, Kanik M, Ulcay Y. Electrical resistivity and thermal conductivity properties of graphene-coated woven fabrics. *J Appl Polym Sci* 2019;136(40):48024.
- [25] Gao T, Yang Z, Chen C, Li Y, Fu K, Dai J, et al. Three-dimensional printed thermal regulation textiles. *ACS Nano* 2017;11(11):11513–20.
- [26] Cui Y, Gong H, Wang Y, Li D, Bai H. A Thermally insulating textile inspired by polar bear hair. *Adv Mater* 2018;30(14):1706807.
- [27] Wang Z, Zhong Y, Wang S. A new shape factor measure for characterizing the cross-section of profiled fiber. *Text Res J* 2012;82(5):454–62.
- [28] Jabbari M, Åkesson D, Skrifvars M, Taherzadeh MJ. Novel lightweight and highly thermally insulative silica aerogel-doped poly(vinyl chloride)-coated fabric composite. *J Reinf Plast Compos* 2015;34(19):1581–92.
- [29] Lee H, Dellatore SM, Miller WM, Messersmith PB. Mussel-inspired surface chemistry for multifunctional coatings. *Science* 2007;318(5849):426–30.
- [30] Hsu PC, Kong D, Wang S, Wang H, Welch AJ, Wu H, et al. Electrolessly deposited electrospun metal nanowire transparent electrodes. *J Am Chem Soc* 2014;136(30):10593–6.
- [31] ASTM International. E96/E96M-16: Standard test methods for water vapor transmission of materials. ASTM standards. West Conshohocken: American Society of Testing Materials International; 2016.
- [32] ASTM International. D737-18: Standard test method for air permeability of textile fabrics. West Conshohocken: American Society of Testing Materials International; 2018.
- [33] Woods SI, Jung TM, Sears DR, Yu J. Emissivity of silver and stainless steel from 80K to 300K: application to ITER thermal shields. *Cryogenics* 2014;60:44–8.
- [34] Wen CD, Mudawar I. Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys. *Int J Heat Mass Transf* 2006;49(23–24):4279–89.
- [35] Fragopoulou A, Institutet K, National M. Infrared thermography imaging: evaluating surface emissivity and skin thermal response to IR heating infrared thermography imaging. *e-J Sci Technol* 2016;3:9–14.