

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170902407

制冷与制热空调服的研究进展

范一强, 贺建芸, 刘士成, 高克鑫, 张亚军

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要 针对人体在高温或高寒环境中长时间工作可能导致中暑、热痉挛、低体温症等疾病的问题,在介绍人体体温调节基本原理和换热机制的基础上,着重介绍了利用制冷或制热空调服对人体体温进行主动调节的基本原理,同时归纳和总结了现阶段各类制冷制热空调服的工作原理,并比较了其优缺点。在制冷空调服领域,着重介绍了空气冷却、相变冷却、冰袋冷却、液体冷却等主被动降温方法;在制热空调服领域,着重介绍了电热、相变制热、化学制热等方法。在空调服未来的发展方向上,伴随可穿戴技术的发展,提出了可穿戴技术与空调服结合应用的新构想,对同时具有生命体征监测和体温调节功能的新型空调服进行了展望。

关键词 空调服; 可穿戴技术; 体温调节; 着装舒适性

中图分类号: TS 941.731 文献标志码: A

Review of cooling and heating garments

FAN Yiqiang, HE Jianyun, LIU Shicheng, GAO Kexin, ZHANG Yajun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract Based on the problems that person working in the extremely hot or cold environment may suffer from injuries like heat stroke, heat cramps and hypothermia, the basic principle of human thermal regulation was reviewed, and the working principles of heating/cooling garments was concluded, and the advantages and disadvantages were compared. On the aspect of personal cooling garments, the air cooling, phase change microcapsule (PCM) cooling, ice pack cooling and liquid cooling method were introduced. For the personal heating garments, the electrical heating, PCM heating, and chemical heating method were introduced. Based on the current research trend, the outlook for the emerging trend of personal garments and wearable technologies were also discussed. A new type of personal cool/heating garment which is integrated with life monitoring function was also proposed.

Keywords heating/cooling garment; wearable technology; human thermal regulation; clothing comfort

空调服作为一种具有温度调节功能的特殊服装,在维持极冷极热环境中的人体温度方面具有特殊重要作用。在高温环境中,当人体的自身温度调节机制不能满足散热需要,人体核心温度接近40℃时,就容易发生热射病^[1]、热痉挛^[2]以及热衰竭^[3]等疾病。相反的,在极低温环境中,如果人体热量散失过快,核心温度低于35℃时,会导致低温症;人体核心温度进一步下降接近30℃时,就会逐渐丧失意识^[4]。

空调服作为一种可对人体温度进行主动调节的可穿戴设备,其应用非常广泛。在医学领域,可用于

特殊疾病病人的体温控制、神经外科手术中病人的体温保持等;在工业领域,可用于在极端环境(井下、玻璃/钢铁熔炉中)各类作业工人的体温保持;在体育领域,还可用于调节赛车手比赛过程中的体温,以及各类运动医学研究等;在军事领域,不仅可协助调节士兵体温适应各类战场环境的需要,还可应用在各种军用车辆的高温环境或寒冷深海潜水等活动中。

本文根据近年来国内外最新研究成果,尝试将制冷、制热空调服按照制冷/制热原理进行分类介绍和比较,并对制冷/制热空调服的融合发展趋势,以

收稿日期: 2017-09-08 修回日期: 2018-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51573017); 中央高校基本业务费专项资金资助项目(ZY1613, buctrc201609)

第一作者简介: 范一强(1986—)男,副教授,博士。主要研究方向为微流控与微机电系统。E-mail: fanyq@mail.buct.edu.cn。

及空调服与可穿戴生命体征监测系统的一体化进行展望。

1 人体体温调节机制

人体由于新陈代谢而产生热量,除去人体用于做机械功的热量外,其他热量通过热传导、热辐射、呼吸以及汗液蒸发等方式被扩散到环境中^[5]。人体新陈代谢速率与人体所做机械功的差值是人体通过热传导、热对流、热辐射、出汗蒸发与外界环境热交换之间的和^[6]。

正常情况下,人体体温为 37 °C,并通过人体自身的体温调节机制将人体核心温度维持在 (37 ± 1) °C,人体自身体温调节机制的有效工作范围为 35 ~ 40 °C。人体肌肉在运动时,所消耗的能量只有 30% ~ 70% 被转化为了机械能,其他消耗的能量都转化为热量^[6]。静态情况下成年人的产热量为 70 ~ 100 W,在走路时发热量为 280 ~ 350 W,极限情况下的发热量可达 1 000 W 以上^[5]。

人体与外界环境的热量传递主要通过 2 个途径:一是借助人体核心与外界环境的温度梯度,通过人体组织间的热传导完成热量传递,这种热传导方式在外界环境温度很高时对于散热的贡献非常有限;二是通过人体的动静脉循环,通过血液将人体热量传送到温度较低的四肢等部位进行散热^[7]。人体穿着衣物后,对这 2 种散热方式都产生了显著影响,衣物的积极作用是,通过衣物可在外界高温和寒冷环境情况下阻碍人体向外界的过度吸热/放热;衣物的消极作用是,当人体进行剧烈运动而发热时衣物阻碍了人体向外界环境的快速散热^[8]。可见,衣物对于人体与外界环境的热交换起到了关键作用。

人体体表温度的差异很大,一般分为手脚、四肢、躯干和头颈部 4 个区域^[9]。其中,发热量最大的是躯干,其次是血管密集的头颈部。空调服作为人体体温调节的辅助手段,通常情况下也是通过对躯干^[10]和头颈部^[11]温度的调节来实现平衡人体吸放热,维持人体核心温度的目的。

2 制冷空调服

制冷空调服用于降低和维持在高温高湿环境中作业人员的体温,不同研究者对于制冷空调服的分类不尽相同,本文根据制冷空调服的工作原理将制冷空调服分为空气制冷、凝胶/冰袋制冷、相变制冷以及液体制冷 4 类,并分别加以介绍和比较。其他几种不常见或者还只停留在概念阶段的空调服,如

半导体制冷空调服^[12]、真空干燥制冷空调服^[13-14]则不在本文讨论范围之内。

空气冷却空调服通过加速干燥空气在皮肤表面的流动:一方面加速蒸发汗液,带走热量;另一方面对体表进行强制对流冷却,以达到降温的目的。凝胶/冰袋冷却方法则是将冷冻后的凝胶或冰袋放置在空调服内层的口袋中,通过凝胶/冰袋融化吸热达到降低人体温度的目的。相变冷却则利用某些材料(如石蜡)在从固体到液体相变时吸热的性质,将相变材料整合在空调服内部,当人体温度升高时通过相变材料吸热带走多余热量。液体冷却空调服则使用埋藏在空调服内部的液体管道,通过低温液体在管道内的循环达到降低人体温度的目的。

2.1 空气冷却空调服

在没有空调服对人体进行体温主动调节的情况下,排汗是人体最为原始和有效的散热方式。研究表明,1 L 汗液蒸发大约可带走 2 400 kJ 的热量。汗液的蒸发效率与皮肤面积、人体与外界的水蒸气压力差以及衣物的透气性能直接相关。

空气冷却空调服一般具有 2 种结构形式。第 1 种空气冷却空调服具有 2 层结构:外层的不透气材料和内层的透气材料。经干燥和冷却的空气在 2 层织物间流动,通过加速汗液蒸发和对皮肤表面进行强制对流散热^[15-16]降低人体体表温度。第 2 种空气冷却空调服只具有 1 层结构,由安装在空调服织物上不同部位风扇或风扇阵列直接将外界空气送入空调服中,加速空调服内的空气流动^[17-18]。

从空气制冷空调服的发展来看,由于其应用场合较为单一,不能在空调服内外穿着其他衣物,且在外界环境温度很高的情况下无法实现制冷效果,仅在室内环境工作人员中使用,目前还未在工业或军事等领域得到广泛应用。

2.2 凝胶/冰袋冷却空调服

通过凝胶/冰袋进行制冷的空调服内层一般具有数个用来装凝胶/冰袋的口袋,人体热量通过血液循环带到体表后被凝胶或者冰袋吸收。通常情况下,单个冰袋的质量为 400 ~ 700 g,空调服内使用 2 ~ 6 个,计算结果表明,1 kg 冰融化可吸热 335 kJ^[19]。使用凝胶/冰袋空调服可有效降低高温环境中穿着者的心率以及体表温度^[20-21]。

通过凝胶/冰袋进行冷却的空调服结构简单,成本低廉,且凝胶/冰袋可以重复利用。凝胶/冰袋冷却空调服具有以下几个缺点:1) 凝胶/冰袋使用后需要重新冷冻才能再使用(过程可能需要数小时);2) 凝胶/冰袋在使用过程中表面会产生冷凝水,浸透衣物后增加空调服穿着者的不适,可能导致

皮肤过敏; 3) 凝胶/冰袋的温度较低, 穿着过程中紧贴皮肤可能导致血管收缩, 导致皮肤附近外周血回流, 反而影响了人体的自身温度调节机制, 导致身体核心温度上升、心跳加快。

2.3 相变冷却空调服

相变冷却空调服基于相变材料(PCM)可在相变时吸收热量但温度不发生变化的原理, 吸收人体表面热量, 降低人体温度。常用的相变材料有基于石蜡^[22-23]、聚乙二醇(PEG)^[24-25]等的混合物, 其常见的融化吸热温度区间为 20~40℃; 在人体正常体温范围内, 其固化吸热的温度区间为 -30~10℃^[26]。相变材料与空调服的常见结合方式有 3 种: 1) 将相变材料袋(5~15 cm 大小)装入空调服内的口袋中^[22]; 2) 将含有相变材料的微胶囊(10~100 μm)编织在空调服中^[27]; 3) 将相变材料纳米纤维埋藏在空调服织物中^[28]。

Yazdanirad 等^[29]研制的空调服中, 将 17 个分别装有 135 g 石蜡相变材料的铝制袋子放入马甲外形的空调服中, 在 30 min 的轻度和中度运动测试中, 受试者的体表温度分别下降了 0.32℃和 1.96℃。Bartkowiak 等^[22]则介绍了 3 种由不同纺织方式加工成的含有相变材料微胶囊(微米直径胶囊)或相变材料大颗粒(直径为 4 mm)的制冷空调服, 结果表明这 3 种空调服均可有效将人体表面温度降低 2~4℃。

从相变制冷空调服相变材料的排布方式看, 将含有微胶囊纤维编织成的空调服透气性较好, 柔软舒适, 但是由于相变材料的总量不足, 只能维持大约 15 W 的吸热, 且能持续使用的时间不足; 使用袋装相变材料的空调服则由于与人体贴合面积较大, 不利于湿气排出, 且影响了织物的柔软度, 穿着不舒适。

与其他制冷方式的空调服相比, 相变制冷的空调服具有以下独特优势: 1) 相变吸热过程中材料温度不发生改变, 不会像冰袋制冷那样可能造成皮肤冻伤, 能够贴身穿戴降低热损失; 2) 相变材料使用后从液态到固态的恢复快, 只需要在冷水中浸泡约 20 min。其缺点为: 1) 与冰袋相比, 吸热量不足, 难以维持长时间(3 h 以上)的工作; 2) 某些相变材料具有一定毒性, 破裂后与人体直接接触可能导致伤害。

2.4 液体冷却空调服

凝胶/冰袋以及相变冷却 2 种空调服的工作方式均为被动工作, 其吸热量和速度并不能人为进行控制, 而液体冷却空调服则通过冷却液在换热管道中循环的方式带走人体多余热量, 这种制冷方式可根据人体和空调服的工作情况对液体工质的温度和

流量进行实时控制, 具有主动控制的能力, 代表了制冷空调服未来的发展方向。

早期的液体冷却空调服是提供给空间环境中的宇航员使用, 在美国阿波罗计划中登月用空调服就是基于液体冷却原理^[30]。到目前为止, 液体冷却空调服已被广泛应用在工业^[31]、矿井^[32]、消防^[33]、医疗^[34]等领域。液体冷却空调服通常由液体储存罐、循环泵、换热器、空调服内排布的换热管道以及各类流量和温度传感器组成^[35]。

目前液体冷却空调服对液体工质的冷却方法有 2 种: 使用冰块等^[36]制冷剂对液体工质进行冷却或者使用类似空调原理的压缩机系统^[37-38]对液体工质进行冷却。其中: 利用冰块、冰袋等在换热槽中对液体工质进行冷却的方法较为常见且成本较低; 使用压缩机系统对循环液体工质进行冷却的研究还集中于军用方面。

大部分现有研究中, 液体循环冷却空调服由 3 层结构构成, 外层保护层、中间层以及内层与皮肤接触层, 液体工质循环管道被缝制在中间层与内层之间^[39]。由于需要保证换热管与皮肤的紧密接触, 提高换热效率, 空调服的外形设计上往往采取了一定程度的收紧。目前大部分换热管采用了聚氯乙烯(PVC)材质^[40], 内径为 1.5~1.7 mm, 长度为 90~100 m, 覆盖了 15%~20% 的皮肤面积, 典型的循环速度为 0.5~2 g/s, 换热速度为 100~400 W^[41]。常用的液体工质为水, 或者 50% 水和 50% 丙二醇的混合物。

目前液体冷却空调服作为空调服领域应用前景最为广泛的技术, 具有以下几个显著优点: 1) 换热量可以根据空调服内外温湿度环境的变化利用液体工质循环速度进行调节; 2) 与其他被动式制冷空调服相比, 持续使用时间长; 3) 换热管可对头部进行冷却, 这是其他制冷空调服技术不能实现的。液冷空调服作为未来智能服装的发展方向, 还需克服以下几个缺点: 1) 提高换热效率, 减少空调服质量, 需要开展空调服内层织物、换热管外形等方面的研究; 2) 需要与生命体征传感器结合, 实现根据维持人体生命体征的需要, 对空调服的运行进行主动调节的目的; 3) 优化空调服的外形结构, 以适应不同体型的人群穿着, 优化换热管的排布, 提高换热效率; 4) 考虑和增强头部制冷, 头部的发热量仅次于躯干且头部过热会直接导致神志不清甚至昏厥, 在后续的空服研究中, 需要充分考虑头部冷却的需要。

2.5 小结

表 1 所示内容对上述讨论的几种空调服在换热介质、空调服成本、换热速度、工作时间、穿戴舒适程

度这几个方面进行了比较。实际研究和应用中,还需要根据不同使用场合的具体需要合理选择。在制冷空调服的试验检测标准上,目前国内尚无相关标准,国外可以参考的空调服检测标准有2项:一是用于穿戴在暖体假人身上的空调服试验标准,ASTM F2371—2010e1《加热人体模型测量个人冷却系统的换热效率标准试验方法》;二是用于真人穿戴空调服的试验检测方法,ASTM F2300—2010《个人冷却系统的性能测试方法》。

表1 不同制冷技术空调服比较表

Tab.1 Various cooling methods for cooling garments

冷却方式	换热介质	成本	换热速度	工作时间	舒适程度
空气冷却	空气	很低	慢	长	高
凝胶/冰袋冷却	冰/凝胶	低	快	中等	低
相变材料冷却	相变材料	中	中等	短	中等
循环液体冷却	液体	高	快	长	中等

3 制热空调服

人体暴露在极冷环境中,很容易发生冻结性^[42]和非冻结性^[43]损伤。在极冷环境中穿戴制热空调服(或制热头套、手套等),可有效主动预防低温症和手指、脚趾冻伤,适合应用于寒冷地区或特殊环境(如冷库)中低温作业、深海潜水、登山等场合。近年来,在医学领域研究者发现,制热空调服可有效保持心脏、肝脏移植等手术中病人的体温^[44];在体育领域研究者发现,使用制热空调服可帮助游泳运动员在比赛前提高热身环节的效率,从而提高比赛成绩^[45]。相比于制冷空调服,制热空调服的发展较晚,发展过程中也充分借鉴了制冷空调服的换热方法,形成了电制热空调服、相变材料制热空调服、化学反应制热空调服这3种结构形式。

值得指出的是,制冷空调服的设计和使用是以降低人体核心温度为主要目的,因此在四肢部位一般无需空调服覆盖。然而,人体在低温环境中伴随着代谢降低,皮肤和肢端血管出现持续性收缩,因此皮肤和肢端非常容易发生局部冻伤,在制热空调服的研究中需要着重于肢端(四肢手脚)的保护。这也是制冷与制热空调服在外形设计上的最主要区别。

不同于制冷空调服,制热空调服在国内外还没有成熟的设计与检测标准规范。

3.1 电制热空调服

使用电加热方法通过衣物对人体加热具有悠久的历史,早在第二次世界大战时期轰炸机飞行员就已经使用具有电加热功能的飞行夹克保持在高空环境的人体体温^[30]。

从制热空调服的电加热方法看,主要使用电阻丝、石墨烯^[46-47]、导电橡胶^[48]、导电纱线^[49]等材料加热。电制热空调服的设计和加热方法选择上主要考虑尽量减少对穿戴者运动的限制以及使用合理高效的加热方法。Liu等^[50]则将具有银质涂层的导电纱线与棉线混合纺织制成了电制热空调服。

碳纤维材料具有柔软和热转换效率高的特点,代表了未来电加热空调服的发展方向。碳纤维进行电加热可达到99.9%的能量转换效率,1 kW·h的制热量可达到6.9 kJ,碳纤维发热过程中的远红外发射效率可达到0.95,且可在1.5~12 V的低电压区间工作,安全性高^[51]。从现阶段电加热空调服的发展看,尽管碳纤维材料具有诸多优点,但是由于价格较高,其应用还未普及。电加热空调服的明显缺点是耗电量大,往往电池只能维持30~40 min,且电池质量对空调服的轻便灵活性造成了严重影响。伴随环境温度的下降,产热要求逐渐提升,但是电池性能却不断下降,目前技术条件下低于-14℃环境中电加热空调服就基本失去了有效制热能力。

3.2 相变材料制热空调服

本文2.3节中介绍了相变制冷空调服的基本原理,将相变材料的吸热过程反过来变成放热过程,就得到了基于相变材料的具有自主放热能力的空调服。相变制热空调服的结构与相变制冷空调服完全一致,将各类相变温度与人体温度相近的材料通过微胶囊^[52]、含有相变材料的纤维或者相变材料袋等方式整合在空调服中。

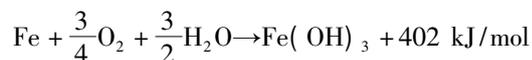
相变制热空调服在穿着过程中,相变材料在较为温暖的环境中从人体吸热储存,在人体进入寒冷环境中后再向人体放热。尽管相变材料空调服具有结构简单等优点,但从其工作过程不难看出其吸放热过程完全取决于人体与外界环境的温度梯度,然而,环境温度变化范围较大,很难保证人体进入寒冷环境后相变空调服能实现向人体放热的过程。后续研究中应着重从相变材料和控制方法2个方面入手,研究具有主动控制吸放热能力的相变材料制热空调服系统。

3.3 化学制热空调服

化学制热空调服利用化学反应产生热量(通常为氧化反应)的方法对人体放热,在潜水等领域的应用较为广泛。Chan等^[53]将镁与铁的混合颗粒装

在 45 mm² 的加热袋中,加热袋被海水激活后发生放热反应,可为 50 m 以下的潜水活动提供辅助加热功能,还可通过颗粒大小和混合比例等对放热反应进行调节。

近年来,自发热贴(暖宝宝)得到了越来越广泛的应用,为化学制热空调服的发展提供了新思路,发热贴的主要成分是碳粉、NaCl 固体、Fe₂O₃ 固体以及含镁铝的盐类,暴露在空气中后可发生缓慢的氧化反应,放出热量,其发热时间可长达 12 h,最高可达 68 ℃,其反应方程为



自发热贴由 3 层材料构成,分别为原料层、明胶层和非织造布袋,通过缓慢与氧气发生反应控制自发热贴发热速度。目前,还没有成熟的基于暖宝原理的制热空调服。

针对化学制热空调服的研究目前还较少,现有各种加热方法都使用了基于氧化反应原理的加热袋,加热袋具有成本低,易于与各类衣物结合的特点。然而,其发热过程控制较为困难,加热袋的温度在 42 ℃ 以上老人和儿童使用就很容易发生烫伤,同时,如何避免使用过程中化学药品发生泄漏也是后期研究中需要着重考虑的方面。

4 空调服发展中存在的问题

空调服目前的发展具有以下不足,需要进一步研究。1) 空调服功能单一。各类空调服都只具有单一的制冷或者制热功能,还没有同时具备制冷制热双向功能的空调服,无法满足复杂气候环境中使用的需要(如军事用途)。2) 自主控制性能缺失。本文介绍各类加热和制冷空调服中,相变冷却、冰袋冷却等在原理上无法对换热过程进行主动控制,液体循环换热空调服的研究中也还未形成基于空调服内外环境变化的自适应控制技术。3) 缺少对使用者生命体征进行监控的功能。空调服作为使用者的生存环境保障工具,对于使用者生命体征信息的获知至关重要,现有空调服技术中还未形成对系统性的生命体征进行全面检测、监控技术。

伴随着可穿戴技术的发展,各类可与衣物结合或可直接穿戴的生命体征传感器发展迅速,提供了血氧、心电、心率、血压、体温传感器等生命体征信息。顺应这一发展,基于空调服的智能化需求,应当充分考虑将现有空调服技术与可穿戴生命体征传感技术相结合的可能性。具备生命体征检测功能的空调服一方面可对空调服穿戴者的生命体征进行实时

监控;另一方面可使用生命体征监控数据对空调服的运行进行实时自主控制。

5 结束语

本文对制冷、制热空调服现阶段国内外的情况进行了分析和总结。在制冷空调服方面,梳理了液冷、冰袋制冷、相变制冷等类型空调服的工作原理和适用范围;在制热空调服方面,介绍和梳理了电热、相变产热、化学制热空调服等的基本工作原理和应用范围。

未来空调服发展方向包括以下 3 个方面:1) 新材料的应用,伴随材料科学的飞速发展,可以预见碳纤维、石墨烯、纳米材料凭借其优异的换热性能与空调服相结合能够显著提升空调服的性能;2) 制冷与制热空调服相结合,目前绝大部分空调服都只具有单一制冷或制热功能,面向复杂极端环境的需要,可以预见未来空调服的发展必将向制冷制热双功能结合方向发展;3) 空调服与各类可穿戴生命体征检测技术相结合,即在空调服内部通过可穿戴技术整合一系列生命体征监测传感器,通过生命体征的监测信号对空调服进行实时主动调节,实现自主控制的智能空调服。

FZXB

参考文献:

- [1] 王美红,鞠小宁,周庆博,等. 热射病致神经系统损害 9 例临床分析 [J]. 中国神经精神疾病杂志, 2015(8): 460-465.
WANG Meihong, JU Xiaoning, ZHOU Qinbo, et al. Clinical analysis on 9 cases of nervous system disorder caused by heat stroke [J]. Chinese Journal of Nervous and Mental Diseases, 2015(8): 460-465.
- [2] 陈艳,顾香. 热痉挛 1 例报告 [J]. 现代医药卫生, 2015(7): 1119-1120.
CHEN Yan, GU Xiang. One report for heat cramp [J]. Journal of Modern Medicine and Health, 2015(7): 1119-1120.
- [3] 骆海山,步金星. 常温下 10 公里负重跑致热衰竭 4 例 [J]. 中国保健营养, 2016, 26(11): 506-507.
LUO Haishan, BU Jinxin. Heat exhaustion caused by 10 km running under normal temperature [J]. China Health Care Nutrition, 2016, 26(11): 506-507.
- [4] 潘树义,郭大志,杨晨,等. 低温症的研究现状和高压氧治疗应用前景分析 [J]. 中华航海医学与高压医学杂志, 2015, 22(1): 76-78.
PAN Shuyi, GUO Dazhi, YANG Chen, et al. The research status of hypothermia and the application prospect of hyperbaric oxygen therapy [J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine,

- 2015, 22(1): 76–78.
- [5] KEIM S M, GUISTO J A, SULLIVAN J B. Environmental thermal stress [J]. *Annals of Agricultural & Environmental Medicine*, 2002, 9(1): 1.
- [6] PARSONS Ken. *Human Thermal Environments* [M]. [S. l.]: Crc Press, 2003: 67–68.
- [7] ZINGANO B W. A discussion on thermal comfort with reference to bath water temperature to deduce a midpoint of the thermal comfort temperature zone [J]. *Renewable Energy*, 2001, 23(1): 41–47.
- [8] HAVENITH G. Interaction of clothing and thermoregulation [J]. *Exogenous Dermatology*, 2002, 1(5): 221–230.
- [9] CRAWSHAW L I, NADEL E R, STOLWIJK J A, et al. Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation [J]. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, 1975, 354(1): 19–27.
- [10] CONGER B. High performance torso cooling garment [C]// MAKINEN Janice. 46th International Conference on Environmental Systems. Shimerville: ICES Inc, 2016: 1–14.
- [11] KU Y T, MONTGOMERY L D, WEBBON B W. Hemodynamic and thermal responses to head and neck cooling in men and women [J]. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 1996, 75(6): 443.
- [12] 杨帆, 廉璐. 将半导体制冷应用于空调服的可行性分析 [J]. *建材发展导向*, 2016, 14(7): 81.
YANG Fan, LIAN Lu. Analysis of the feasibility of applying semiconductor refrigeration to air conditioning [J]. *Development Guide to Building Materials*, 2016, 14(7): 81.
- [13] YANG Yifan, STAPLETON Jill, DIAGNE Barbara Thiané, et al. Man-portable personal cooling garment based on vacuum desiccant cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 47(5): 18–24.
- [14] YANG Yifan, RANA Dipak, LAN Christopher Q, et al. Flame burn protection: assessment of a new, air-cooled fireproof garment [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(24): 15778–15787.
- [15] LOPEZ Rebecca, CLEARY Michelle, JONES Leon, et al. Thermoregulatory influence of a cooling vest on hyperthermic athletes [J]. *Journal of Athletic Training*, 2008, 43(1): 55–61.
- [16] ELDAD A, SALMON A Y, BREITERMAN S, et al. Flame burn protection: assessment of a new, air-cooled fireproof garment [J]. *Military Medicine*, 2003, 168(8): 595–599.
- [17] 曾彦彰, 邓中山, 刘静. 基于微型风扇阵列系统的人体降温空调服 [J]. *纺织学报*, 2007, 28(6): 100–105.
ZENG Yanzhang, DENG Zhongshan, LIU Jing. Micro-fan-array system enabled air conditioning suit for cooling human body [J]. *Journal of Textile Research*, 2007, 28(6): 100–105.
- [18] ZHAO Mengmeng, GAO Chuansi, WANG Faming, et al. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2013, 43(3): 232–237.
- [19] JIM House, HEATHER Massey, ROWAN Taylor, et al. The impact of a phase-change cooling vest on heat strain and the effect of different cooling pack melting temperatures [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 113(5): 1223–1231.
- [20] KENNY G P, SCHISSLER A R, STAPLETON J, et al. Ice cooling vest on tolerance for exercise under uncompensable heat stress [J]. *Journal of Occupational & Environmental Hygiene*, 2011, 8(8): 484.
- [21] BISHOP Phillip A. Effects of a novel ice-cooling technique on work in protective clothing at 28 °C, 23 °C, and 18 °C WBGTs [J]. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1999, 60(1): 96–104.
- [22] BARTKOWIAK Grażyna, DABROWSKA Anna, MARSZAŁEK Anna. Analysis of thermoregulation properties of PCM garments on the basis of ergonomic tests [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 83(2): 148–159.
- [23] FELINSKI P, SEKRET R. Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM [J]. *Energy*, 2016(114): 1063–1072.
- [24] ANDRIAMITANTSOA Radoelizo S, DONG Wenjun, GAO Hongyi, et al. PEG encapsulated by porous triamide-linked polymers as support for solid-liquid phase change materials for energy storage [J]. *Chemical Physics Letters*, 2017(671): 165–173.
- [25] ALKAN Cemil, SARI Ahmet, UZUN Orhan. Poly-(ethylene glycol)/acrylic polymer blends for latent heat thermal energy storage [J]. *Aiche Journal*, 2010, 52(9): 3310–3314.
- [26] MOKHTARI Yazdi Motahareh, SHEIKHZADEH Mohammad. Personal cooling garments: a review [J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2014, 105(12): 1231–1250.
- [27] BARTKOWIAK Grażyna, DABROWSKA Anna, MARSZAŁEK Anna. Analysis of thermoregulation properties of PCM garments on the basis of ergonomic tests [J]. *Textile Research Journal*, 2012, 83(2): 148–159.
- [28] YING Bo An, KWOK Yi Lin, LI Yi, et al. Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials [J]. *Polymer Testing*, 2004, 23(5): 541–549.
- [29] YAZDANIRAD Saeid, DEGHAN Habibollah. Designing of the cooling vest from paraffin compounds and evaluation of its impact under laboratory hot conditions [J]. *International Journal of Preventive*

- Medicine, 2016, 7(1): 47.
- [30] SCOTT R A. The technology of electrically heated clothing [J]. Ergonomics, 1988, 31(7): 1065–1081.
- [31] BUTTS C L, SMITH C R, GANIO M S, et al. Physiological and perceptual effects of a cooling garment during simulated industrial work in the heat [J]. Appl Ergon, 2017, 59: 442–448.
- [32] SAYED Chady Al, VINCHES Ludwig, HALL Stéphane. Towards optimizing a personal cooling garment for hot and humid deep mining conditions [J]. Open Journal of Optimization, 2016, 5(1): 35–43.
- [33] KIM J H, COCA A, WILLIAMS W J, et al. Effects of liquid cooling garments on recovery and performance time in individuals performing strenuous work wearing a firefighter ensemble [J]. J Occup Environ Hyg, 2011, 8(7): 409–416.
- [34] BEENAKKER E A, OPARINA T I, HARTGRING A, et al. Cooling garment treatment in MS: clinical improvement and decrease in leukocyte NO production [J]. Neurology, 2001, 57(5): 892–894.
- [35] WESTIN Johan K, KAPAT Jayanta S, CHOW Louis C. An improved thermoregulatory model for automatic cooling control development in liquid cooling garment systems [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2010, 2(1): 1–11.
- [36] WANG Tao, WANG Liang, BAI Lizhan, et al. Experimental study on the performance of a liquid cooling garment with the application of MEPCMS [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 103: 943–957.
- [37] MORRIESEN André. Personal cooling system based on vapor compression cycle for stock car racing drivers [C]// RESENDE Frederico, RAMOS Luciana. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Purdue: Purdue University, 2012: 2285–2296.
- [38] CADARETTE B S, LEVINE L, KOLKA M A, et al. Heat strain reduction by ice-based and vapor compression liquid cooling systems with a toxic agent protective uniform [J]. Aviation Space & Environmental Medicine, 2002, 73(7): 665.
- [39] BARTKOWIAK G, DABROWSKA A, MARSZALEK A. Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment [J]. Appl Ergon, 2017, 58: 182–189.
- [40] FLOURIS A D, CHEUNG S S. Design and control optimization of microclimate liquid cooling systems underneath protective clothing [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2006, 34(3): 359–372.
- [41] CHEUVRONT S N, KOLKA M A, CADARETTE B S, et al. Efficacy of intermittent, regional microclimate cooling [J]. Journal of Applied Physiology, 2003, 94(5): 1841.
- [42] 唐虹, 施耘, 曲年震. 职业性手指急性深度冻伤的早期减张治疗 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2016, 34(6): 457–458.
- TANG Hong, SHI Geng, QU Nianzheng. Early subtraction treatment of acute deep freeze injury in occupational fingers [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2016, 34(6): 457–458.
- [43] 康思宁, 吴斗, 刘强, 等. 综合治疗透水矿难幸存者“浸渍足”28例 [J]. 中华创伤杂志, 2011, 27(7): 581–582.
- KANG Sining, WU Dou, LIU Qiang, et al. A total of 28 cases of “impregnation” of water permeable mine were treated [J]. Chinese Journal of Trauma, 2011, 27(7): 581–582.
- [44] SURY M R, SCUPLAK S. Water-filled garment warming of infants undergoing open abdominal or thoracic surgery [J]. Pediatr Surg Int, 2006, 22(2): 182–185.
- [45] COOK Christian, HOLDCROFT Danny, DRAWER Scott, et al. Designing a warm-up protocol for elite bobskeleton athletes [J]. International Journal of Sports Physiology & Performance, 2013, 8(2): 213.
- [46] PANG E, PICKERING S, CHAN A, et al. Use of recycled carbon fibre as a heating element [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(16): 2039–2050.
- [47] ELGAFY Ahmed, MISHRA Sarthak. A heat transfer model for incorporating carbon foam fabrics in firefighter’s garment [J]. Heat & Mass Transfer, 2014, 50(4): 545–557.
- [48] KONCAR V, COCHRANE C, LEWANDOWSKI M, et al. Electro-conductive sensors and heating elements based on conductive polymer composites [J]. International Journal of Clothing Science & Technology, 2011, 21(2): 82–92.
- [49] MEY Gilbert De, ÖZ ELIK Mert, SCHWARZ Anne, et al. Designing of conductive yarn knitted thermal comfortable shirt using battery operated heating system [J]. Tekstil Ve Konfeksiyon, 2014, 24(1): 26–29.
- [50] LIU Hao, ZHANG Yi, CHEN Li, et al. Development and characterization of flexible heating fabric based on conductive filaments [J]. Measurement, 2012, 45(7): 1855–1865.
- [51] 李峻, 李灵妍, 曹霄洁, 等. 碳纤维发热服装设计的研究 [J]. 江苏纺织, 2007(9): 48–51.
- LI Jun, LI Lingxin, CAO Xiaojie, et al. Research on the design of carbon fiber heating clothing [J]. Jiangsu Textile, 2007(9): 48–51.
- [52] SARIER Nihal, ONDER Emel. The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics [J]. Thermochimica Acta, 2007, 452(2): 149–160.
- [53] CHAN C Y L, BURTON D R. Local heating source for shallow water divers [J]. Journal of Power Sources, 1981, 6(3): 291–304.