

相变冷却服发展趋势

邓军,何骞,刘长春,肖旻,赵靖昱

西安科技大学安全科学与工程学院;西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,西安 710054

摘要 冷却服能够为高温作业人员提供降温保护,提高人体微气候区的舒适度。分析了各种类型冷却服(气体冷却服、液体冷却服和相变冷却服)的降温方式、原理、特点及研究进展,着重阐述了相变冷却服的关键技术及发展方向:研究易塑性、耐腐蚀性的封装材料和相应的封装技术,解决液相相变材料存在的变形、泄露及水蚀问题;将纳米技术与相变材料微胶囊结合,研制作用时间长、散热良好的复合相变材料,提高相变材料的导热系数;将相变冷却技术与其他技术相结合,开发作用效果可调控的新型冷却服,同时研制可快速激活相变材料的设备或新型材料,使相变材料能够快速蓄冷。

关键词 冷却服;相变冷却技术;相变材料

目前,中国各类高温矿井多达60多个,其中温度超过30℃的矿井有38个^[1]。随着浅部煤炭资源日趋减少,未来的开采主体将转向深部煤炭资源^[2]。因此,高温热害已成为继矿井瓦斯、火、煤尘、矿压、水之后第六大灾害^[3],严重制约着深部煤炭资源的合理有效化开采。另一方面,像钢铁冶炼人员其周围的环境温度有时可达到50℃。长期处于高温环境使人容易产生疲劳、精神不振,影响作业效率,同时体内水盐代谢紊乱,一些生理系统会因高温大量失水,危害作业人员的身心健康和人身安全^[4-5]。因此,研究适用于高温环境的冷却服具有重要意义。

1 冷却服的分类

1.1 按服装结构分类

1.1.1 局部性冷却服

局部性冷却服是根据人体不同部位产热量、散热量差异而设计的。研究表明,身体基础代谢主要集中在头部和躯干,人体工作时,不同部位的出汗、散热强度不同,躯干部位的基础代谢最大,热容量最高^[6]。因此,在当前局部冷却服的研究中,针对头部设计的降温帽、针对躯干设计的降温上衣或背心占了很大比例。早期美国海军服装和织物研究所研制的适用于潜艇人员穿着的被动式降温背心,其降温原理是通过预先置于服装内侧的冷冻凝胶,将人体产生的热量带走,达到降低体温的目的;背心的冷冻凝胶由淀粉、水、酒精、活化剂等一系列原料按一定比例混合而成,-22~-18℃时为胶状液体,热容量较大,柔软、贴身^[7-8]。郭宇称^[9]发明了一种

无需另设电源的降温服,其主要实现方法是,首先设置冷源,在冷源与降温服之间布置导热介质流道,在导热介质流道与冷源之间设置温差发电片,一面朝向冷源,一面朝向导热介质流道;在导热介质流道中设置泵或风扇,导热介质可通过泵或直流风扇输送,泵或风扇通过导线与温差发电片连接,同时泵或风扇推动导热介质的能量由温差发电片提供。此装置利用冷源与导热介质之间的温差作为推动导热介质流动的能量,对于使用者而言无需另设电源,非常方便。

局部性冷却服因其结构简单、适宜穿戴、降温效果良好、实用性强等特点,普遍应用于生产与生活各个领域。

1.1.2 全身性冷却服

全身性冷却服的优点在于可以对躯干、四肢等部位全面降温,使人体整体处于较舒适状态。全身性冷却服一般适用于特殊作业或特殊环境,如航天航空工作人员、极端高热需要全身保护的环境、有毒有害气体的环境等。例如,张吉洲^[10]设计的一种既适用于高温环境又适应于低温环境,同时还可在有害气体环境中使用的恒温防护服,此防护服由4部分组成,分别为服装本体、恒温源、空压机以及可在有害气体环境中使用的头盔,按人体造型特点在服装内设置有若干块带S形排列和螺旋形盘绕的液流管道的恒温板,采用双室四通结构的分配器,将胸与左臂、背与右臂、两腿部安放的恒温板管道串接呈3个支回路,恒温源、分配器、恒温板之间均用软管连接,构成闭路循环系统,当恒温液体在闭路管道中循环流动时,服装内的温度保持平衡。但是,全身性冷却服也存在缺点^[11],如应用于消防、井下采矿、轧钢等工作范围大、强

收稿日期:2016-12-16;修回日期:2017-08-30

基金项目:中国博士后基金项目(2016M590962);陕西省重点科技创新团队计划项目(2012KCT-09);陕西省煤矿灾害防治及应急救援工程技术研究中心项目(2010ZDGC-14)

作者简介:邓军,教授,研究方向为煤矿重大灾害防治技术、安全工程及技术,电子邮箱:693167478@qq.com

引用格式:邓军,何骞,刘长春,等.相变冷却服发展趋势[J].科技导报,2017,35(21):107-114;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.21.013

度大的高温作业人员,会影响其工作效率、工作方便性、着装舒适性。

1.2 按降温介质分类

1.2.1 气体冷却服

气体冷却服属于主动式降温。气体冷却服首先由制冷装置将空气冷却,经过净化后,再通过管道或服装夹层将冷气排入服装内,流动的冷空气对人体进行散热降温,使得人体微气候区^[12]处于相对舒适的状态。其散热原理是加速汗液的蒸发,增强空气对流,从而达到降温目的。

按照散热方式的不同,气体冷却服^[13-14]分为蒸发型气体冷却服和对流型气体冷却服。蒸发型气体冷却服对通风温度没有要求,主要利用水气压梯度促进汗液蒸发散热。例如,英国的MK1、K2及美国的MA-3型蒸发式全身通风服^[15],人体在受热出汗时,其冷却效果好。对流型气体冷却服主要利用风流在微小空间内的对流作用把热量带走,要求通风气体温度低于平均皮肤温度,因此需提前对风进行预冷。USN开发的“制冷盔甲”背心式空调系统,采用空气调节器将经过调节的低温空气输入飞行服内的导管,为人体降温,这套系统可以把飞行员周边温度降低18℃;系统采用电池独立供电,与飞机的供电系统无关,即使飞行员离开后也可以使用。但在通常情况下,通风系统更好地发挥其通风散热效果是在人体出汗的状态下进行的,因此在冷源不充足时,通风温度不宜过低,应根据系统实际需求合理选取^[16-17]。而以微型风扇、涡流管技术为核心的冷却服也是气体冷却服的一大特色,例如曾彦彰等^[18]研发的微型风扇阵列系统人体降温服,柳源等^[19]等设计的气冷式个体防护服。

气体冷却服具有气源丰富、降温时间长、降温效果良好等优点。但是,气体冷却服也有自身的局限性,例如,服装夹层充满空气影响作业人员的灵活性、可操作性,从而影响井下作业效率;另一方面井下装置设备对防爆要求非常高,气体冷却服及其附属装备存在这方面的危险性。因此,若要在井下推广气体冷却服,还需进行大量深入的研究工作。

1.2.2 液体冷却服

液体冷却服^[20-21]同气体冷却服一样,属于主动式降温,通常在服装内部布置管路,然后将低温液体输入管路中,循环流动带走人体的热量,达到对衣内微环境降温的目的。液体冷却服的冷却介质主要有水、冰水混合物、相变乳状液及微胶囊乳状液等^[22]。液体冷却服一般由基础服装部分和预冷装置组成。

1962年,Burton等^[23]开发研制出世界第一件以水作为降温介质的液体冷却服,如图1所示。随后,液体冷却服被应用到美国宇航局(NASA)的阿波罗登月计划,而阿波罗液冷服奠定了现代冷却服发展的基础^[24]。

从20世纪70年代到80年代末期,个体冷却系统迅速发展,美国、德国、英国等国家研制出各种特色的液冷服^[25-27],例如,德国(西德)德来格尔公司的冰水降温背心,美国的个体微气候制冷系统(IMCS)。在这之后,研制出以热管技术、半

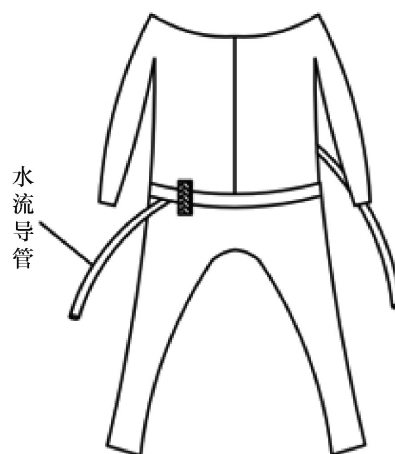


图1 第一件水冷服

Fig. 1 First water cooling garment

导体技术为核心的液体冷却服。例如,邢道明等^[28-29]研制的两款不同的冷却服,其结构不同但原理相似,均采用环路热管技术,实现了对人体微环境的主动式、低能耗、绿色环保的高效降温,结构如图2所示;文虎等^[30]发明的矿用半导体制冷降温防护服,结构如图3所示,该冷却服采用半导体为人体降温、水冷散热盒为半导体降温的方式,即半导体制冷片通过冷端制冷带走人体产生的热量,水冷散热盒中冷水循环流动带走半导体热端的热量,从而实现为井下作业人员降温的目的。经过几十年的发展,液体冷却服目前已经在多个领域得到应用。

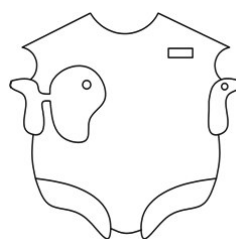


图2 用于酷热环境下的冷却服

Fig. 2 A cooling garment were used in hot environment

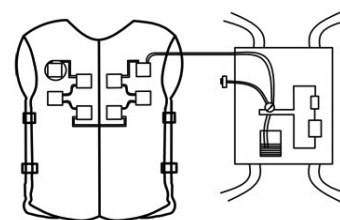


图3 矿用半导体制冷冷却防护服

Fig. 3 A mine semiconductor cooling protective garment

1.2.3 相变冷却服

相变冷却服^[31-33]属于被动式降温,通常将相变材料置于服装内,通过材料相态的变化吸收人体的热量,实现对人体降温。以固-液相变材料为例,当穿着相变材料冷却服时,相变材料周围的温度(包括人体温度和外界温度)高于材料的相变温度时,相变材料融化从固态变为液态吸收热量,为人体降温;相反,当液态的相变材料周围温度低于其相变温度时,材料从液态变为固态放出热量,以保持人体正常体温,为

人体提供舒适的“衣内微气候”环境,使人体始终处于舒适状态。因此,相变冷却服既可起到制冷作用,又能起到保暖作用^[34]。应用于冷却服的相变材料有冰、干冰、石蜡、水凝胶、吸水树脂等,其中以冰、水凝胶和石蜡的应用较为广泛。

相变冷却服具有成本低、结构简单、穿戴方便、制冷效果好等优点,同时相变材料种类多,包括有机相变材料、无机相变材料以及有机-无机混合相变材料^[35-37],可以应用到工业、制冷、采矿冶金等各个领域,成为国内外学者研究的热点。

此外,相变微胶囊在个体防护服中应用的研究也日趋增多^[38],它是一种具有核壳结构的复合相变材料,而核壳结构就是应用微胶囊技术在固-液相变材料微粒表面包覆一层性能稳定的膜而制成的,微胶囊的储热、传热应用范围广,同时极大地提高了储热率和传热率。

以上是按照服装结构和降温介质对冷却服进行分类,还有按照制冷方式、应用范围、应用领域等进行划分,但基本包含在以上划分之内。各类冷却服特性对比如表1所示。

表1 各类冷却服特性对比

Table 1 Comparison of characteristics of various types of cooling garments

分类方法	冷却服名称	降温方式或原理	优缺点
按照服装结构分类	局部冷却服	根据人体不同部位产热量、散热量差异而设计,针对躯干设计的降温上衣或背心占比例较大	冷却服因其结构简单、适宜穿戴、降温效果良好、实用性强;应用有其局限性,某些需要全身保护的特殊岗位不能应用
	全身性冷却服	对躯干、四肢等部位全面降温,使人体整体处于较舒适状态	对人体各部位全面降温保护,特别适用于特殊作业或特殊环境;但活动范围、活动舒适性受限,会影响操作及作业效率,而且穿戴不方便,重量大
按照冷却介质分类	气体冷却服	散热原理是加速汗液的蒸发,增强空气对流	气体冷却服具有气源丰富、降温时间长、降温效果良好等优点;但其服装内充满空气影响人员作业,如果应用于井下会涉及防爆问题
	液体冷却服	利用低温液体在人体内循环,带走热量。从人体经过的液体变热,经处理后温度降低,重新进入系统	如果其供电系统足够强大,液冷服可以长时间为人体降温,降温速度快;但其通常附属装备多、重量大,液体会泄露,应用于井下涉及防爆问题
	相变冷却服	利用材料的相态变化,伴随吸热过程,从而为人体降温	具有成本低、结构简单、穿戴方便、制冷效果好等优点,相变材料种类多、污染小,既可制冷又可保温,前景广阔;材料会发生泄漏、变形,温度不可调

2 相变冷却服的发展

2.1 相变冷却服研究进展

相变冷却服在开发初期,研究者利用冰作为相变材料,待其融化后为人体降温。例如,金曼蓉等^[39]研制的高分子冰防护服,该防护服采用阻燃布或纯棉布制作,外层用布片缝制有若干个呈格子状排列的口袋,高分子冰袋放入其中;高分子冰袋为双层结构,装有含水蓄冰的高分子化合物,其结构如图4所示。20世纪90年代,美国Triangle^[40]公司申请了一项关于可逆相变材料纤维的专利,此专利所述的纤维本质是石蜡类碳氢化合物,利用微胶囊技术将此化合物包覆在直径为1.0~10.0 μm的微胶囊里,然后与聚合物溶液一起纺丝制得。Bennett等^[41]在海军消防服的口袋中放入凝胶,进行了降温研究。Outlast公司和Frisby公司利用微胶囊与聚合物溶液纺丝技术生产出腈纶纺织品,从而使蓄热调温微胶囊被广泛应用到纤维、织物和泡沫中,并进行量产和销售,实现了微胶囊织物技术的商业化^[42]。

近年来,相变冷却服包括相变材料、服装结构得到了全方位、多方面的发展。Yang等^[43]基于真空干燥冷却技术,提



图4 高分子冰防高温服装

Fig. 4 Anti-high temperature clothing with high polymer ice

出一种新型冷却服,其降温能力可达373.1 W/m²。Searle^[44]开发了一种蒸发冷却装置及与该装置连用的冷却服,被冷却的液体通过毛细作用被吸水材料吸收,然后通过容器壁进行散热,容器壁为肋片状可加以风扇辅助散热,冷却服的进水口、出水口分别与冷却装置的出水口、进水口相连,经测试该冷却服的降温效果良好。Almqvist^[45]发明了一种新型相变冷却服,其相变材料主要应用于四肢,可快速拆卸。该冷却服的创新在于有一个用于指示相变材料冷却能力的传感器和一

个具有活化物质的便携式容器,传感器可根据材料温度不同显示不同的颜色,从而更科学地为使用者提示是否需要更换材料;便携式容器是独立呼吸装置的一部分,使用者可以把材料浸入其中使得相变材料再次活化制冷。此外,德国开发的降温背心,其外表与普通运动背心无较大差异,但背心夹层中分布排列着细小的水管,水管中降温介质温度为17℃,可以起到抵御高温、同时帮助运动员保持体能的作用,而关键在于背心外层采用隔热材料,可以阻止外界热量进入人体,延长降温时间。Ayers等^[46]发明了一种具有保暖性和冷却性的可逆服装,当人体穿着服装的一面时,通过捕获空气和人体的热量给人体加热,而当穿着另一面时,通过加速织物上的水分运动提供冷量,给人体降温。Lennart等^[47]研制出供消防员使用的相变冷却服,其降温效果良好,使用的相变材料为丙烯酸树脂高吸水性聚合物。

在国内,关平等^[48]、朱颖心等^[49]设计了以NaCl、KCl、CaCl₂和水的混合物作为相变材料的冷却服,供工厂和医疗机构使用,为避免人体脏器官受冷,在头部、颈部、胸和肋部两侧将口袋布置成“门”字形。曹光荣^[50]设计了一种抗高温多功能消防服,该防护服将头套和上衣套连接在一起,利用束缚弹簧连接裤子套和上衣套,通过在不同夹层内添加石棉纤维、玻璃纤维达到抵抗高温的目的。杨铁兰等^[51]、王先鹏等^[52]通过将蓄冷模块装入口袋的形式,再结合不同的面料或款式结构,研制出各式个体降温防护服。周孟颖等^[53]设计了一种矿用多功能防护服,其内侧设有隔冷板、隔冷袋,能消除蓄冷材料与人体直接接触时的不适感。该防护服结构如图5所示,防护服的上衣内侧均匀布置4个以上用于装相变材料的口袋,相变蓄冷材料为一种聚合物水凝胶,材料放冷均匀而且低温时较柔软。王云仪等^[54]以暖体假人的形式研究钢铁工人在热辐射下的人体温度变化情况,设计了一种以凝胶为蓄能降温材料的降温背心。于小航^[55]设计了一种带冰贴的水循环降温服,该降温服将冰贴缝制在服装中的固定位置,整个服装的下端布置水泵以及与水泵连接的进水口,水泵左右侧分别连接导线和出水管,整体结构如图6所示;主要应用于医疗行业,可有效地降低高温中暑人员体温和实施抢救。洪凯^[56]设计了一种适用于医疗领域的物理降温服,有效地将服



图5 一种矿用多功能防护服

Fig. 5 Multifunctional protective clothing for mine

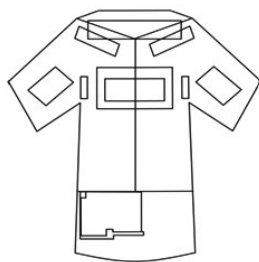


图6 一种带冰贴的水循环降温服

Fig. 6 A water cycle cooling suit with an ice stick

装与降温水袋相结合,以冷热交换的方式为高烧病人降温,其特点是在腋下的水袋中增设体温感应探头,病人体温显示在降温服的温度显示屏上,这样就可以对儿童在穿衣时就行物理降温,而且降温效果明显。

在研制和开发冷却服的过程中,服装的舒适性、合理性必须加以考虑。目前,已经形成了微气候测试评价、暖体假人评价^[57]、真人着装评价^[58]三阶段的评价系统。诸多研究者对服装及服装材质的舒适性、合理性进行了测试和评价。Choi等^[59]研究了在不同环境下相变材料用量对人体舒适性的影响。Ying等^[60]通过分析冷却服的热、湿的传递机制,提出相应的指数及测试方法来表征服装的热性能,从而考虑其舒适性及应用性。Wang^[61]、Zhao等^[62]对降温服的热舒适性进行了较深入的探究。总之,对于冷却服从设计到生产,国内外已经形成了较完善的评价机制。

2.2 相变冷却服关键技术

相变冷却服因其系统简单、使用方便、没有电源、无防爆要求、材料相变范围宽、制冷效果好以及污染小等优势具有广泛的应用前景,成为国内外学者研究的热点。

相变材料在服装上的应用始于20世纪70年代的美国,以CO₂为相变材料发生气-固相变为人体保温^[63]。20世纪80年代以后,研究人员通过不断的探索、尝试,将CaCl₂·6H₂O、SrCl₂·6H₂O、聚乙二醇等应用于服装中^[64-65],研究表明其具有一定的调温效果,但是由于经济可行性、穿着舒适性、可携带性等各种原因使其推广和应用方面仍具有一定困难。20世纪90年代以后,美国诸多公司将相变材料合成微胶囊应用于服装表面,能有效地为人体降温使人处于舒适状态;欧洲、日本等一些发达国家也进行了相关研究。中国也是在20世纪90年代以后开始进行将相变材料应用于服装上的研究,其中以清华大学、天津工业大学、东华大学的研究较为突出。张寅平等^[66]除了开发出相变材料冷却服外,还研究了如何提高相变材料的导热性等。20世纪末国内外研究者在相变材料开发应用上,取得了优异的成绩,相变材料已经在服装上有诸多应用^[67-68]。

然而,相变材料在应用过程中存在一些缺点和问题,因此在研究相变冷却过程中存在一些关键技术,如果能够把这些技术改进、结合、应用起来,对于相变降温服将会是重要突破。第一,相变材料在使用过程中从始态到末态,发生相变变形,同时相变材料存在液相泄露、水蚀、过冷、导热系数小等问题,这取决于相变材料的多功能封装和复合。第二,将纳米技术与微胶囊相结合,制备出纳米微胶囊材料,同时提高微胶囊本身的导热性和降温时间。第三,相变材料降温过程中温度一般不可调,因此寻找调温效果好的相变材料非常重要。第四,目前的相变冷却服到达冷却使用一段时间后,都是去专门地点或由专人更换材料,程序复杂,浪费时间。

基于以上所述,在研究相变冷却服的过程中可以从以下几个方面着手。第一,寻找耐腐蚀性、易塑性的封装材料,与良好的封装技术相结合,从封装技术上防止材料变形、泄

露。第二,从封装袋研究,如对封装带进行特定打孔、塑封,增加材料散热面积,提高降温效果;此外根据不同场合选择不同的封装袋,在急需降温的环境中,采用导热较好的封装袋,使得材料加速融化,快速为人体降温,在热冲击适中但需要降温的环境中,采用具有隔热作用的封装袋,减慢材料融化延长降温时间。第三,寻求更高效实用的方法提高相变材料的导热系数,如在纳米胶囊里添加粒径更小的金属纳米粉末等;另一方面研制散热效果良好、续航时间长的复合相变材料。第四,研发能快速激活相变材料的新型材料或设备,当材料即将失效时快速将其激活,重新投入使用,既可以节约时间、又可提高作业效率。第五,将相变材料进行固封,即寻求与相变材料能够较好结合、又有不同导热系数的固体材料,它能够融化后的液体相变材料包覆其中,即使为液体也不会外露;同时根据相变材料导热系数选择不同的应用场合。第六,研发基于相变材料的一种新型综合冷却服,既能结合相变材料的各项优点,又可加以辅助系统对温度也能进行调控及监测。此外,新型冷却服研究要结合热力学、服装卫生学、人机工程学等学科,以满足减轻负荷、冷却时间适宜、穿着舒适、容易操作、功能多样化等方面的要求,侧重人性化的设计,突出体现以人为本的理念。

3 结论

国内外对于冷却服的研究已经取得丰硕的成果,应用于航天、军工、厂矿等多个领域,但目前问世的冷却服存在各自缺点,如系统复杂、携带不便、成本较高、热电制冷效率低、过冷及降温时间短等问题,要进一步在工业和民用方面的普及还需要进一步研究创新。

局部冷却服和全身性冷却服因其各自的特点,应用于不同的场所、不同的工作环境,为不同的人群提供个体降温防护装置。但它们各自的缺点也使得其在全面推广上比较困难,所以开发即易穿卸又易清理且活动范围广的综合性冷却服很有必要。

气体冷却服虽然具有降温效果好、气源丰富的优点,但其要在井下推广还需要做大量的研究工作。首先,气体冷却服服装夹层充满空气,影响井下人员作业;其次,井下装备的防爆工作要求较高,气体冷却服及其附属装备存在爆炸的可能性。

相变冷却服有着广阔的应用前景。寻求良好的封装材料和封装方法、提高相变材料的导热系数、研制散热效果好、续航时间长的复合相变材料,同时开发能快速激活相变材料的新型材料或设备,在基于相变材料的基础上研发既有良好降温效果又有温度控制功能的新型综合冷却服,进一步推动相变冷却服的发展。

参考文献(References)

[1] 何国家, 杨社. 我国煤矿高温热害现状及防治技术措施[C]//第七次煤炭科学技术大会论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2011: 15-18.

He Guojia, Yang She. Present situation of high temperature and heat damage in coal mines in China and its prevention and control measures[C]//Proceedings of the Seventh Coal Science and Technology Conference. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011: 15-18.

- [2] 黄瑶瑶. 矿井制冷降温技术发展综述[J]. 科技与企业, 2016(6): 195-195.
Huang Yaoyao. The review on the development of refrigeration cooling technology in coal mine[J]. Science-Technology Enterprise, 2016(6): 195-195.
- [3] 褚召祥, 张习军, 姬建虎, 等. 我国煤矿高温热害及防治技术研究现状[C]//第三届全国煤矿机械安全装备技术发展高层论坛暨新产品技术交流论文集. 长沙: 中国矿业大学出版社, 2012: 274-278.
Chu Zhaoxiang, Zhang Xijun, Ji Jianhu, et al. Research status of high temperature and heat hazard and prevention technology of coal mines in China[C]//Proceedings of the Third Session of The National Coal Mine Machinery Safety Equipment Technology Development Forum and The New Product Technology Exchange. Changsha: China University of Mining and Technology press, 2012: 274-278.
- [4] 黄华良. 热害矿井气候与人体生理反应研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(3): 50-53.
Huang Hualiang. Study on climate and physiological reaction[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2012, 39(3): 50-53.
- [5] 黄建华, 张惠. 人与热环境[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 66-69.
Huang Jianhua, Zhang Hui. Human and thermal environment[M]. Beijing: Science Press, 2011: 66-69.
- [6] 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[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(3): 232-237.
- [7] Giblo J W, Avellini B A. Outfitting navy ships with microclimate cooling systems: An engineering evaluation to determine the initial costs[R]. California: Navy Clothing and Textile Research Facility, 1989.
- [8] Walter B T. Alternate configurations for tetered air microclimate cooling systems[R]. California: Navy Clothing and Textile Research Facility, 1995.
- [9] 郭宇称. 一种无需另设电源的降温服: 201210225864. 4[P]. 2014-01-22.
Guo Yucheng. A cooling garment without additional power supply: 201210225864. 4[P]. 2014-01-22.
- [10] 张吉洲. 恒温防护服: 97247949. X[P]. 1999-04-14.
Zhang Jizhou. Constant temperature protective clothing: 97247949. X [P]. 1999-04-14.
- [11] 陈柔曦. 基于相变材料热缓冲作用的高温防护服设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
Chen Rouxi. Design of the high temperature protective clothing based on the heat buffer action of PCM[D]. Suzhou: Soochow University, 2013.
- [12] 陈东生. 服装卫生学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2000: 132-134.
Chen Dongsheng. Clothing hygiene[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2000: 132-134.
- [13] 吴钊. 用于人体散热的带风扇夹克气流场研究及其结构优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

- Wu Zhao. Research on the air flow field in the fan-including jacket for the purpose of human cooling and the optimal design of jacket structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [14] 张行周, 钟晓辉, 吴玉庭, 等. 单兵空调系统研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 749-752.
Zhang Xingzhou, Zhong Xiaohui, Wu Yuting, et al. Study of soldier's air-conditioning system[J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(6): 749-752.
- [15] 刘长明, 房瑞华. 防护服及其舒适性[J]. 中国个体防护装备, 1996, 5(4): 12-18.
Liu Changming, Fang Ruihua. Protective clothing and its comfort[J]. China Personal Protection Equipment, 1996, 5(4): 12-18.
- [16] 韩增旺, 唐世昌, 赖军, 等. 国内外冷却服的发展现状及关键技术[J]. 中国个体防护装备, 2009, 4(1): 11-14.
Han Zengwang, Tang Shichang, Lai Jun, et al. The current international research situation and key techniques of cooling garment[J]. China Personal Protection Equipment, 2009, 4(1): 11-14.
- [17] 李珩, 邱义芬, 姜南, 等. 通风温度对全身通风服热防护性能影响研究[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(3): 205-209.
Li Heng, Qiu Yifen, Jiang Nan, et al. Effects of ventilation temperature on thermal protection performance of general ventilation garment[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(3): 205-209.
- [18] 曾颜彰, 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.
- [19] 柳源, 陈宁, 王磊, 等. 矿井热害气冷式个体防护服设计及研制[J]. 煤炭工程, 2011(7): 120-121.
Liu Yuan, Chen Ning, Wang Lei, et al. Design and development of personal gas cooling garment in high temperature mine[J]. Coal Engineering, 2011(7): 120-121.
- [20] 黄明月. 应用于液冷服的热电制冷系统的特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
Huang Mingyue. Study on characteristics of thermoelectric cooling system for liquid cooling garment[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [21] 邱义芬, 袁修干, 梅志光, 等. 舱外航天液冷服传热分析[J]. 航天医学与医学工程, 2001, 14(5): 364-367.
Qiu Yifen, Yuan Xiugan, Mei Zhiguang, et al. Heat transfer analysis of liquid cooling garment used for extravehicular activity[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2001, 14(5): 364-367.
- [22] 李利娜, 钱晓明, 徐杰. 冷却服装的发展现状及应用[J]. 个体防护设备, 2008(2): 24-28.
Li Lina, Qian Xiaoming, Xu Jie. Development and application of cooling garment[J]. China Personal Protection Equipment, 2008(2): 24-28.
- [23] Nunnery S A. Water Cooled Garments: A Review[J]. Space Life Science, 1970, 2(3): 335-360.
- [24] 温谷. 意义深远的阿波罗载人登月工程: 纪念首次载人登月40周年[J]. 国际太空, 2009(8): 29-32.
Wen Gu. Apollo's manned lunar landing project with far-reaching significance: Commemorate the first manned lunar landing 40th anniversary[J]. Space International, 2009(8): 29-32.
- [25] Speckman K L, Allan A E, Sawka M N, et al. A review: Microclimate cooling of protective over garments in the heat[R]. Natick: United States Army Research Institute of Environmental Medicine, 1988.
- [26] Webbon B, Montgomery L, Miller L, et al. A comparison of three liquid-ventilation cooling garments during treadmill exercise[J]. Aviat Space Environ Med, 1981, 52(7): 408-415.
- [27] Beiko K. Evaluation of personal cooling systems explosive ordnance disposal suits[R]. Canada: Canadian Police Research Center, 1993.
- [28] 邢道明. 降温服: 201510779506.1[P]. 2016-01-13.
Xing Daoming. Cooling garment: 201510779506.1[P]. 2016-01-13.
- [29] 邢道明, 戴秋敏. 基于环路热管技术的降温服: 201510781567.1[P]. 2016-01-20.
Xing Daoming, Dai Qiumin. Cooling garment based on loop heat pipe technology: 201510781567.1[P]. 2016-01-20.
- [30] 文虎, 丁喜梅, 刘长春, 等. 一种矿用半导体制冷降温防护: 201610085486.2[P]. 2016-05-04.
Wen Hu, Ding Ximei, Liu Changchun, et al. A mine semiconductor cooling protective garment: 201610085486.2[P]. 2016-05-04.
- [31] Hunter I, Hopkins J T, Case D J. Warming up with an ice vest: core body temperature before and after cross country racing[J]. Journal of Athletic Training, 2006, 41(4): 371-374.
- [32] 朱方龙, 樊建彬, 冯倩倩, 等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(8): 124-132.
Zhu Fanglong, Fan Jianbin, Feng Qianqian, et al. Application and feasibility analysis of phase change materials for fire-fighting suit[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(8): 124-132.
- [33] 张东霞. 相变材料在调温服装中的应用研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2006.
Zhang Dongxia. Research on the application of PCM in temperature-adjusting garments[J]. Beijing: Beijing Institute of Fashion Technology, 2006.
- [34] 郭瑞. 一种基于相变材料的空调服: 201420591639.7[P]. 2015-01-14.
Guo Rui. An air conditioning clothes based on phase change material: 201420591639.7[P]. 2015-01-14.
- [35] 方贵银, 邢琳, 杨帆, 等. 相变蓄冷材料制备及热性能研究[J]. 低温与超导, 2006, 34(1): 68-70.
Fang Guiyin, Xing Lin, Yang Fan, et al. Preparation and thermophysical performance investigation on a coolstorage phase change material[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2006, 34(1): 68-70.
- [36] 马保国, 蹇守卫, 金磊, 等. 无机/相变定型储能材料的制备研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(12): 36-39.
Ma Baoguo, Jian Shouwei, Jin Lei, et al. Recent research progress in preparation of inorganic/shape stabilized phase change energy storage materials[J]. Materials Review, 2008, 22(12): 36-39.
- [37] 李夔宁, 郭宁宁, 王贺. 有机相变蓄冷复合材料的研究[J]. 化工新型材料, 2009, 37(4): 87-88.
Li Kuining, Guo Ningning, Wang He. Research on the organic phase change material for energy storage[J]. New Chemical Materials, 2009, 37(4): 87-88.

- [38] 杨晓博, 袁卫星, 姜军. 不同温区相变微胶囊的制备及研究进展[J]. 制冷学报, 2009, 28(4): 55-63.
 Yang Xiaobo, Yuan Weixing, Jiang Jun. The research of development of application and preparation of phase change microcapsule in different temperature ranges[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 28(4): 55-63.
- [39] 金曼蓉, 王世昌, 尹秋山. 高分子冰防高温服装: 88215539.3[P]. 1989-05-03.
 Jin Manrong, Wang Shichang, Yin Qiushan. Anti-high temperature clothing with high polymer ice: 88215539.3[P]. 1989-05-03.
- [40] Bryant Y G, Colvin D P. Fiber with reversible enhanced thermal properties and fabrics made therefrom: US 4756958[P]. 1988-07-12.
- [41] Bennett B L, Hagan R D, Huey K A, et al. Comparison of two cool vests on heat strain reduction while wearing a firefighting ensemble[J]. European Journal of Applied Physiology, 1995, 70(4): 328-332.
- [42] Nelson G. Microencapsulates in textile coloration and finishing[J]. Coloration Technology, 2008, 21(1): 72-85.
- [43] Yang Y, Stapleton J, Diagne B T, et al. Man-portable personal cooling garment based on vacuum desiccant cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 47(5): 18-24.
- [44] Searle M. Evaporative cooling device for cooling water or other liquids and a cooling garment incorporating the same: US 8322156[P]. 2012-12-4.
- [45] Almqvist H O. Cooling garment having phase change material in its extremity portions: US 8499367[P]. 2013-08-06.
- [46] Ayers D, Cortina K, Lindemann C. Reversible garment with warming side and cooling side: US 8813525[P]. 2014-08-26.
- [47] Teunissen L P, Wang L C, Chou S N, et al. Evaluation of two cooling systems under a firefighter coverall[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(6): 1433-1438.
- [48] 关平, 周翔, 李俊, 等. 医用相变降温服人体热舒适性实验研究[C]/全国暖通空调制冷2004年学术年会论文集. 兰州: 中国建筑工业出版社, 2004: 333-338
 Guan Ping, Zhou Xiang, Li Jun, et al. Experimental study on thermal comfort of medical phase change cooling garment[C]/Proceedings of the National Academic Conference on Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration in 2004. Lanzhou: China Architecture & Building Press, 2004: 333-338.
- [49] 朱颖心, 张寅平, 周翔, 等. 一种相变材料降温服: 200410009720.0 [P]. 2006-03-22.
 Zhu Yingxin, Zhang Yinping, Zhou Xiang, et al. A phase change material cooling garment: 200410009720.0[P]. 2006-03-22.
- [50] 曹光荣. 一种抗高温多功能消防服: 200720024083.3[P]. 2008-06-25.
 Cao Guangrong. A multi-functional anti-high temperature fire fighting garment: 200720024083.3[P]. 2008-06-25.
- [51] 杨铁兰, 邵国庠. 具有抗辐射热阻燃蓄冷防护服: 93203356.3[P]. 1994-02-23.
 Yang Tielan, Shao Guoxiang. Anti radiation, heat fire retardant, cold storage protective clothing: 93203356.3[P]. 1994-02-23.
- [52] 王先鹏, 于湘林, 于远成. 一种高温作业防护服: 94217830.0[P]. 1993-04-14.
 Wang Xianpeng, Yu Xianglin, Yu Yuancheng. A protective clothing for high temperature operation: 94217830.0[P]. 1993-04-14.
- [53] 周梦颖, 李宾, 梁国治, 等. 矿井用多功能防护服: 201020136669.0 [P]. 2011-01-22.
 Zhou Mengying, Li Bin, Liang Guozhi, et al. Multifunctional protective clothing for mine: 201020136669.0[P]. 2011-01-22.
- [54] 王云仪, 赵蒙蒙. 高温强辐射下相变降温背心的热调节作用客观测评[J]. 纺织学报, 2012, 33(5): 101-105.
 Wang Yunyi, Zhao Mengmeng. Objective evaluation on thermal adjusting effect of PCM cooling vest under high temperature and strong radiation[J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(5): 101-105.
- [55] 于小航. 一种带冰贴的水循环降温服: 201310343330.6[P]. 2015-02-11.
 Yu Xiaohang. A water cycle cooling suit with an ice sticker: 201310343330.6[P]. 2015-02-11.
- [56] 洪凯. 物理降温服: 201520943796.4[P]. 2016-04-27.
 Hong Kai. Physical cooling garment: 201520943796.4[P]. 2016-04-27.
- [57] Pamuk O, Abreu M J, Oendogan Z. An investigation on the comfort properties for different disposable surgical gowns by using thermal manikin[J]. Tekstil Ve Konfeksiyon, 2008, 18(3): 236-239.
- [58] Park Y, Kim E. Wearing Comfort of temperature-adaptable textiles by dual-phase coatings between phase change materials and silicon carbide particles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(Suppl 2): E151-E158.
- [59] Choi K, Chung H, Lee B, et al. Clothing temperature change of phase change material-treated warm-up in cold and warm environment[J]. Fibers and Polymers, 2005, 6(4): 343-347.
- [60] Ying B A, Kwok Y L, Li Y, et al. Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials[J]. Polymer Testing, 2004, 23(5): 541-549.
- [61] Wang S. Intelligent thermal protective clothing[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2008.
- [62] Zhao M, Gao C, Li J, et al. Effects of two cooling garments on post-exercise thermal comfort of female subjects in the heat[J]. Fiber and Polymers, 2015, 16(6): 1403-1409.
- [63] Hansen R H. Temperature-adaptable Fabrics: US 3607591[P]. 1971-09-21.
- [64] Vigo T L, Frost C M. Temperature-adaptable fabrics[J]. Textile Research Journal, 1985, 12(55): 737-743.
- [65] Pause B. Development of Heat and Cold Insulating Membrane Structures with Phase Change Material[J]. Journal of Industrial Textiles, 1995, 25(1): 59-68.
- [66] Zhang Y, Liang X. Numerical analysis of effective thermal conductivity of mixed solid materials[J]. Materials and Design, 1995, 16(2): 91-95.
- [67] Gao C, Kuklane K, Holmer I. Cooling vests with phase change materials: The effect of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment[J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(6): 1207.
- [68] Hamdan H, Ghaddar N, Ouahrani D, et al. PCM cooling vest for improving thermal comfort in hot environment[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 102(12): 154-167.

Key technology and development trend of phase change cooling garment

DENG Jun, HE Qian, LIU Changchun, XIAO Yang, ZHAO Jingyu

Key Lab of Western Mining and Disaster Prevention of Ministry of Education; School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract Cooling garment can provide cooling protection for all kinds of workers under high temperature and improve the comfort degree of human microclimate zone. This paper analyzes the cooling method, principles and characteristics of different types of garment, and summarizes the current research progress of the state of the art cooling garment. Moreover, key technologies and research directions of phase change cooling garment are described. Also discussed are issues such as liquid phase change material against leakage and erosion, easy plastic packaging materials and good packaging technology, improved thermal conductivity of phase change material, combining nano technology with phase change material microcapsule for long-life and good heat dissipation composite phase change material, and combining phase change cooling technology with other technologies for cooling effect controllable garment. New equipment or new material which can quickly activate the phase change material is proposed as well so that the phase change material can quickly store cold and reduce the heat of human body.

Keywords cooling garment; phase change cooling technology; phase change material

(责任编辑 韩星明)