

# 冷却服发展状况述评

刘何清<sup>1,2</sup>, 高黎颖<sup>1</sup>, 李伊洁<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 高温工作环境严重影响工人的工作效率, 并容易造成人的中枢神经系统失调, 使人疲劳、精神恍惚, 进而造成事故率上升。穿着冷却服是抵御高温侵害、提高工作效率的有效方法之一。根据冷却面积的大小可将冷却服分为全身性冷却服和局部性冷却服, 根据冷却介质不同又可将冷却服分为气体冷却服、液体冷却服和相变冷却服。并从冷却服结构、重量、方便拆洗、持续工作时间、穿着舒适性等方面进行了分析, 总结了已有冷却服普遍存在的突出问题, 为各行业今后进一步探索、改进、研发新型冷却服提供参考。

**关键词:** 冷却服; 气体; 液体; 相变

**中图分类号:** X968      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2015)04-0075-06

## Review of cooling garment development situation

LIU Heqing<sup>1,2</sup>, GAO Liying<sup>1</sup>, LI Yijie<sup>1</sup>

(1. School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In high temperature working environment, the worker's productivity would be affected seriously, the central nervous system would be disordered easily, people would feel tired, and the spirit would become trance, thus the accident rates would be on the rise. One of the effective methods to resist the high temperature and improve the efficiency is to wear cooling garment. According to the size of cooling area, the cooling garment may be divided into systemic cooling garment and localized cooling garment. Depending on the difference of cooling medium, it can also be divided into gas cooling garment, liquid cooling garment, and phase change cooling garment. This paper analyzes the cooling garment from the aspects of the garment's structure, weight, convenience for being easily washable, continuous working time and wearing comfort. Meantime, this paper summarizes the currently highlighted issues, and provides references for the further exploration, improvement and research of new cooling garment.

**Key words:** cooling garment; gas; liquid; phase change

高温工作环境严重影响工人的工作效率, 并容易造成人的中枢神经系统失调, 使人疲劳、精神恍惚, 进而造成事故率上升。穿着冷却服是抵御高温侵害、提高工作效率的有效方法之一。

冷却服的研究开始于第二次世界大战空军飞行员用冷却服的研究, 1962年 Burton 和 Collier 为英国皇家空军研制出世界上第一件液冷服<sup>[1,2]</sup>, 从而拉开了冷却服研究的序幕。

早期的冷却服主要用于军事与航空航天领域<sup>[3-5]</sup>, 20世纪70年代中后期, 医疗、消防、矿山和冶金等领域也根据行业作业环境特点, 研发出适合本行业特点的冷却服。根据冷却范围大小可将冷却服分为全身

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474105)

通信作者: 刘何清(1964-), 男, 山东荣成人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 工业通风安全与矿井热害防治。E-mail: hqliu8222638@163.com

性冷却服和局部性冷却服;再根据各种冷却服的冷却原理和冷却介质特点,又可将冷却服分为气体冷却服、液体冷却服和相变冷却服。

## 1 全身性冷却服

全身性冷却服主要应用于极端高热(极寒)环境或者有其他特殊要求的湿热(冷)环境中。在面对高温(极寒)条件时,一可避免高热(极寒)环境对皮肤的伤害,二可使身体保持凉爽(防寒),同时还可具备防辐射、防毒气、抗压、供氧等防护功能。

### 1.1 全身性气体冷却服

气体冷却服主要利用自然状态的空气或者压缩空气或者经制冷设备产生的冷空气,通过管道或服装夹层送入体表空间,以蒸发和对流换热的方式对人体降温,一般设计成气密型。整套服装由冷却鞋、冷却衣和冷却裤组成。根据冷却方式不同,全身性气冷服可分为蒸发式通风服和对流式冷却服。蒸发式通风服主要依赖汗液从表皮蒸发带走热量;对流式冷却服则主要利用体表与冷空气之间的温差传热方式带走热量。如:

英国的MK<sub>1</sub>和MK<sub>2</sub>以及美国的MA-3型蒸发式全身通风服<sup>[6]</sup>,其冷却效果好,但先决条件是人体要受热、出汗。长时间穿着由于内表面湿润和可能会造成过度失水而使人体感到不适。

乌克兰基辅国立工艺设计大学研制出的对流式通风服<sup>[7]</sup>,其通过专用制冷装置产生的冷气改善衣内微环境,工作人员穿着它能在温度150℃或红外辐射高达25kW/m<sup>2</sup>的环境中持续工作30min。该种对流式冷却服无需体温升高及明显出汗,与蒸发式通风服相比,减轻了人体热应激程度,增强了热舒适性。但其需配备制冷装置,存在重量较大的缺点。

杨兆生等人发明了保护冶炼工人的高温防护服<sup>[8]</sup>,该防护服在防护靴底设有一个微型压缩制冷装置,通过工人行走对微型压缩制冷装置做功产生冷空气,冷却人体。由于该防护服的微型压缩制冷装置较小,且需要工人不停的走动对压缩机做功,存在制冷量小、且易造成脚部疲劳的缺点。

### 1.2 全身性液体冷却服

液冷服是利用设置在服装内部管束内的低温液体循环流动吸收人体热量,实现对衣内微环境的降温,避免人体遭受高温侵害。一般由服装主体、微型制冷系统及液体载冷剂循环管路组成。微型制冷系统生产出低温载冷剂液体,经水泵压入布置在液冷服内部的循环管路,输送到服装的各个部位,吸收服装内部的热量(人体散发的热量);升了温的载冷剂液体再返回制冷压缩装置降温到设计温度,循环往复。全身性液冷服的冷却效果好、可靠性高,被广泛应用于航空航天领域。如:

1962年Burton和Collie为英国皇家空军制作的液体冷却服,1964年前苏联研制了“鹞”型、“隼”型和“海鹰”型半硬式登月服,1965年美国研制了A5L,A6L,A7L,A7LB这4种型号航天服<sup>[3]</sup>,这些冷却服普遍存在重量较大的缺点,主要原因之一是由于冷却服内遍布的液管、冷媒。之后,美国又研制了用醋酸乙烯冷却管和高导热材料制作的轻质液冷服<sup>[9]</sup>。明尼苏达州大学设计了一款液体冷却/加温两用液冷服,通过将液冷服内的冷却管道只分布在人体散热较大的区域,以达到轻便、高效的效果<sup>[10]</sup>。E·W·霍奇森<sup>[11]</sup>设计了一款由服装、膜蒸发器、化学吸收器组成的液冷服,其通过化学吸收器、辐射器和膜蒸发器进行热(冷)的获取和传输。

我国学者和工程技术人员也根据不同行业特点,积极开展液冷服的研究。如:张万欣等人通过对暖体假人各部位散热量比例分析(头颈部25%,躯干部30%,臂部20%,腿部25%),设计出供宇航员使用的全身多管路直通式液冷服<sup>[12]</sup>。岳丰田等人针对矿山高温环境发明了一种由外保温层、制冷层、内保温层组成的矿用全身性冷却服<sup>[13]</sup>,在制冷层上设有装冰口袋和冰水管路。冷却过程为:首先在装冰口袋内装入一定量的冰块,冰的融化带走人体部分热量,随后冰水流入管道进入人体其它部位,带走其他部位的热量,最后冰水由裤脚排出。邓金龙<sup>[14]</sup>等人分析了现有消防服的优缺点,提出了将消防水用于人体降温的构想,该型冷却服利用消防水的压力将部分水压入冷却服内的冷却管内,带走人体热量。此构想比较巧妙,但实践时难度较大。一是要对所有的水枪重新进行改装;二是人员活动范围受水枪的限制。

### 1.3 全身性相变冷却服

相变冷却服是通过储存在冷却服内的相变材料的状态改变(即产生相变)吸收人体热量,实现对人体

的降温<sup>[15]</sup>。根据冷却服使用相变储冷材料和储冷方式的不同,又可分为传统相变冷却服和新型相变冷却服。传统相变冷却服主要使用无机、有机及其混合物的相变材料,将其封装在冷却服的口袋里。新型相变冷却服则利用微胶囊技术将相变材料制作成微型胶囊,并将微胶囊内嵌到服装面料中<sup>[16]</sup>。如:

1995年Bennett等人在海军消防员6个口袋中放入凝胶进行降温研究<sup>[17]</sup>。Chuansi Gao等人以十水硫酸钠及其添加物为相变材料制作出供消防员使用的冷却服<sup>[18]</sup>,全身分布有21个口袋,服装总重22kg。Lennart等人使用丙烯酸树脂高吸水性聚合物作为相变材料制作出供消防员使用的冷却服<sup>[19]</sup>。聂百胜、丁敬芝等人设计了2款以高分子吸水树脂为蓄冷材料的矿用相变冷却服<sup>[20,21]</sup>,聂百胜设计的服装内部使用压缩氮气或二氧化碳,丁敬芝则使用压缩空气,通过改变压缩气体的充入量控制热量散失。桂林冰王科技发展有限公司的秦长春利用蓝冰(一种高分子水凝胶,热容量为水的2.3倍)研制出供消防员使用的“蓝冰降温避火服”<sup>[22]</sup>,该服装以传统消防服为基础,以蓝冰为内胆放置在服装夹层内,防火的同时对人体进行高效降温。

传统相变降温服具有设计简单、成本较低等优点,但缺点也较突出。如:重量较大,增加了工作人员负重,影响劳动生产效率;材料相变温度较低,容易出现过冷现象,对人体造成伤害;冷却服内壁容易产生冷凝水导致人体不适;持续使用时间短。因此,寻找制冷效果好且对人体伤害小的相变材料一直是研究重点。

为此,有研究者提出利用微胶囊技术将相变材料制作成微型胶囊,再将微胶囊编织到服装面料中,再用这种微胶囊相变纺织品面料制作相变冷却服<sup>[23]</sup>。这种相变服可根据环境温度的变化,使服装内部的微胶囊发生可逆相变变化,在一定温度范围内实现温度的调节,从而在内部形成温度适宜的微气候区,改善人体热舒适性<sup>[24]</sup>。新型相变冷却服不仅可以对人体降温,还可以保暖,发展前景良好。如:20世纪末美国的TRDC公司利用微胶囊研制具有调温功能的智能服装<sup>[25,26]</sup>,将直径3~100 μm的相变微胶囊密封入服装,经过后期改进,该型服装可以维持服装内的温度在26℃左右3h。美国Triangle公司研制出将直径15~40 μm的微胶囊编织到纺织物中的调温服<sup>[27]</sup>。

我国在微胶囊相变调温服研究上起步较晚,20世纪90年代才开始初步的研究工作。1993年天津工业大学以聚对苯二甲酸乙二醇酯-聚乙二醇嵌段共聚物、脂肪族聚酯、聚乙二醇和聚丁二醇为原料,利用熔融复合纺丝技术制得具有温度调节功能的纤维<sup>[28]</sup>。由天津工业大学功能纤维研究所常规的高分子、聚合物为基材,采用熔融共混、熔融芯/鞘复合或溶液纺丝工艺研制的调温服,经中国人民解放军特种防护服装质量检测中心检测,在热环境下具有3℃的降温功效<sup>[29]</sup>。

综上所述,由于全身性冷却服多面向航空航天、军事、消防等极端特殊环境使用,防护要求高、穿着时间短。因此,普遍存在结构复杂、重量大的缺点,不适合劳动强度大、活动范围大、污染严重的工作环境使用。

## 2 局部性冷却服

相关研究表明<sup>[30]</sup>,工人高强度工作时,人体各个部位的出汗、散热强度是不同的,上身躯干的散热量较其他部位大得多。如文献[31]报道,躯干背部肩胛骨以下、脊柱两侧、臀部以上部位,是人体出汗最强部位;躯干前面自胸大肌之间延伸至下部脐部的部位和前颈部出汗也较多;出汗较少部位在上臂前、后部、大腿前部等区域。人体各部分显热换热的热流相对比例和致冷效率分别为:头颈部12.5%,30.3%;躯干29.8%,23.9%;上肢17.8%,21.6%;下肢39.9%,24.2%。热流相对值以下肢最高,其次为躯干和上肢,最小为头颈部。而致冷效率则以头颈部最高,躯干次之。因此,在非极端湿热环境中可只穿着具有降温功能的上衣或背心等局部冷却服。

### 2.1 局部性气体冷却服

局部性气体冷却服主要是将低温气体送向身体特定部位,以达到高效降温的目的。如:

美国陆军开发的“拦截者”风冷式战术背心,通过电动换气扇促进空气在防护服和皮肤之间流动,实现制冷和辅助排汗的效果;美国海军航空兵开发的“制冷盔甲”背心,采用空气调节器将低温空气输入飞行服内的导管,实现人体降温<sup>[32]</sup>。

以色列Rabintex公司研制了一款内设两个微型风扇的军用气冷服<sup>[33]</sup>,每个风扇供风量为180 L/min,电池可维持12h,冷却服总重1.2kg。日本Kuehofuku公司推出了可供建筑、消防等行业人员使用的“空调

夹克”、“空调裤”,在空调夹克(空调裤)内设有2个微型风扇和一个锂电池,电池可使用11 h,风扇的最大吸风量可达20L/s.上述2种气冷服的制冷效果良好,但拆卸、清洗困难,不利于重复使用.日本的市谷弘司<sup>[34]</sup>针对该缺点进行改进,发明了方便拆卸和安装微型风扇的气冷服.服装内的电器部件全部放置在左右两边的固定带上,清洗时可将所有电器元件拆卸下来.

陈宁、马砺等人设计的矿用气动涡旋管降温服<sup>[35-37]</sup>,其利用0.7~0.8 MPa的压缩空气进入涡旋管制冷器后产生10℃左右的冷空气沿输气管进入服装内部,再沿细塑料软管上的微型孔进入衣内微空间,吸收人体散热.但存在以下不足:供气连接管限制矿工的活动范围;涡流管噪声较高;涡流管制冷的同时产生高温热气流,恶化了工作环境;涡流管制冷器增加了工人负重.

曾彦彰等人研制了微型风扇阵列冷却服<sup>[38]</sup>,存在风扇不可拆卸、清洗困难、实用性较差的问题.唐士君等人<sup>[39]</sup>针对上述缺点,发明了方便清洗的气冷服,包括衣服本体、微型风扇和相关组件,衣服前后两面下摆处设有2组开口,用于装卸风扇,同时设有气流导向布,实现气流均匀分布.但风扇分布部位少,导致降温面积减小,影响了降温效果.

## 2.2 局部性液体冷却服

局部性液体冷却服与全身性液体冷却服的工作原理相似.局部性液体冷却服多由冷却帽和冷却背心组成.如:

1994年到1998年间,美国Natick陆军士兵中心先后研发出单兵个体微气候制冷系统和高级轻量微气候制冷系统,均通过管道内的循环水带走热量,由锂电池提供电源.随后该中心又研发出了适用战斗直升机飞行员的空中勇士微气候冷却服(MCG),配套使用Foster-Miller公司研制的微气候制冷机(MCU)<sup>[40]</sup>.美国还研制出一种特种高效军用液冷服<sup>[41]</sup>,服装内置数块输液片,由细小管道将输液片串联起来.穿着时,微型泵将冷却液输到服装内冷却系统,冷却人体后回流到微型制冷器,循环往复.

国内对液冷服的研究也开始于军事领域.1980年我国开始直升机液体冷却头盔的研制,1982年开始便携式局部液冷服系统(YL-IA型)的研制,1985年和1986年“远望号”远洋测量船乘员试穿执行任务,均取得了良好的效果.该冷却服使用水作冷却剂,通电后微型泵将冷却水输入液冷服,以对流和传导的方式进行降温,携带人体代谢废热的循环水回流到致冷装置中冷却<sup>[42]</sup>.深圳德升公司研制了一款单兵降温服,开启电源后,水泵将冰袋中的冰水注入背心的塑料管中循环制冷,并通过热敏传导控制系统实现恒温控制,不会导致人体冻伤,同时系统可提供饮用冰水<sup>[43]</sup>.

在民用领域,林伟华等人发明了体表蒸发式液体降温服<sup>[44]</sup>,降温服由一小型储液罐和分布在服装内的输液软管组成,软管上有若干小孔.使用时将储液罐内液体压出,通过管道散布在人体表面,冷却液在体表蒸发吸热、降温.

## 2.3 局部性相变冷却服

由于相变冷却服是将相变储冷材料置于服装内部,增加了服装重量.为减少负重,一般情况下先考虑使用局部性相变冷却服.如:

Yifan Yang等人利用真空干燥冷却剂制作了一件冷却服<sup>[45]</sup>,其冷却核心主要是氯化锂水合物,冷却效率为373.3 W/m<sup>2</sup>.梁国志等人以高分子化合物聚乙烯醇为基本原料,以硼砂溶液为胶凝剂,添加冰点降温助剂等,以此配制成的凝胶状蓄冷剂制作了供矿工使用的降温服<sup>[46-48]</sup>,服装重1.2~1.5 kg,使用时间4~5 h.朱颖心等人设计了以氯化钠、氯化钾、氯化钙和水的混合物作为相变材料的降温服<sup>[49,50]</sup>,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.王云仪等人以凝胶为蓄能降温材料,以钢铁工人为研究对象,研制了局部性相变冷却服<sup>[51]</sup>,该冷却服在前后设有6个放置降温材料的口袋,服装重1.884 kg,可持续工作90 min.

综上所述,局部性冷却服只对人体散热较大的部位进行冷却,提高了降温效率,减少了工人负重,且结构相对简单、成本较低,逐渐应用到非军事、航天以外的领域.但仍然存在连续工作时间短、重量较重、难清洗、不适合在污染严重环境穿着的缺点.

## 3 结论与展望

虽然各行各业均根据行业和工作环境特点开展了适合本行业使用冷却服的研究,并取得了可喜成绩.

但目前世界各国研制出的冷却服或多或少存在着一些不足和难以解决的问题,突出的问题表现在:

1) 全身性冷却服普遍存在结构复杂、成本高、重量大、连续工作时间短、拆洗困难等缺点,并不适用于劳动强度大、污染严重的行业。

2) 局部性冷却服虽然相对于全身性冷却服结构简单、成本较低、重量减轻,且逐渐应用于民用领域,但依然存在连续工作时间短、难清洗等问题。

3) 由于冷媒或蓄冷材料温度较低,一方面对人体产生过冷伤害,一方面在冷却服内层产生冷凝水,将服装里层粘附于体表,造成人体不适。

4) 对于矿用冷却服,拆洗困难的缺点更为突出。因为井下工作空间狭窄、粉尘浓度高、污染物遍布,工人劳动强度大、工作时间长(多在6~8 h以上)、出汗量大,冷却服更易被污染物及汗渍所污染。

成本高、难拆洗是由于结构复杂造成的;重量大、连续工作时间短是由于制冷装置、蓄电池容量及蓄冷材料蓄冷性能造成的;对人体过冷伤害、穿着不适是由于目前的冷却服还不能对冷却温度实现有效控制。因此,开发制冷能力大、蓄电池续航能力强、蓄冷材料蓄冷量大、温度可控、结构简单、价格便宜、易拆洗的冷却服将是各行业今后努力的方向。

### 参考文献:

- [1] Konrad J K, Buettner. Thermal stress in the modern aircraft[R]. Los Angeles: Frontiers of Man Controlled Flight, 1953.
- [2] Sarah A N. Water cooled garments: a review[J]. Space Life Science, 1970, 2(3): 335 - 360.
- [3] 管春磊, 李猛, 陈景山. 美俄新型登月航天服技术研究进展[J]. 载人航天, 2010, 16(2): 45 - 51.
- [4] 欧阳骅, 任兆生. 从苏-27一体化防护服看抗过载措施[J]. 国际航空, 1999(2): 58.
- [5] 任兆生, 石立勇, 王琼, 等. 飞行员高空代偿服和 FTF-2 通风服通风散热性能评价[J]. 解放军医学杂志, 2004, 29(10): 847 - 849.
- [6] 刘长明, 房瑞华. 通风服[J]. 中国个体防护装备, 1994(3): 10 - 14.
- [7] 佚名. 乌克兰新研制开发气体冷却“防热服”[J]. 化纤与纺织技术, 2010(2): 8.
- [8] 杨兆生, 杨艺明. 高温防护服: 中国, 101926522A[P]. 2010. 12. 29.
- [9] Bue G, Trevino L. Thermal analysis of lightweight liquid cooling garments using highly conductive materials[J]. SAE International, 2005: 425 - 433.
- [10] Koscheyev V, Leon G, Aitor C, et al. Comparison of shortened and standard liquid cooling garments to provide physiological and subject comfort during EVA[J]. SAE International, 2004, 113(1): 557 - 563.
- [11] E W 霍奇森. 个人热调节系统: 中国, 103303502A[P]. 2013. 09. 18.
- [12] 张万欣, 陈景山, 李潭秋, 等. 暖体假人设计评价液冷服中的应用研究[R]. 北京: 中国航空学会 2000 年环控暨人机工效学术交流会, 2000.
- [13] 岳丰田, 张琳郁, 记河. 矿用个体冷却防护服: 中国, 202375078U[P]. 2012. 08. 15.
- [14] 邓全龙, 邓钦. 关于“冷却式消防员灭火服”的研究[J]. 消防技术与产品信息, 2014(9): 25 - 26.
- [15] 盛伟, 郑海坤. 人体降温服在矿井热环境中的应用综述[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(12): 95 - 101.
- [16] 唐新军. 微胶囊技术在防护服装中的应用[J]. 山东纺织科技, 2014, 55(1): 37 - 39.
- [17] 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.
- [18] Gao C, Kuklane K, Holmer I. Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment[J]. European Journal of Applied Physiology, 2011, 111(6): 1207 - 1216.
- [19] 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.
- [20] 聂百胜, 祥春, 孟筠青, 等. 高分子蓄冷材料矿井降温服: 中国, 103549674A[P]. 2014. 02. 05.
- [21] 丁敬芝, 余刚, 王晓云. 热矿井降温服: 中国, 102113714A[P]. 2011. 07. 06.
- [22] 董明元. 神奇软甲: “蓝冰降温避火服”[J]. 中国纤检, 2013(22): 48 - 49.
- [23] 寿晨燕. 相变微胶囊的制备及其在纺织上的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2008.
- [24] 宋文庆, 李毅, 邢建伟, 等. PCM 微胶囊改善纺织品的温度调节性能研究[R]. 北京: 第五届功能性纺织品及纳米技术研讨会, 2005.

- [25] Bryant Y G, David C P. Fabric with research enhanced thermal properties; US, 5366801 [P]. 1994. 11. 22.
- [26] Jones E A, Using B W. Phase change materials in clothing [J]. Textile Research Journal, 2001, 71(6): 495 - 502.
- [27] Colvin D P. PECS - a new conception for cool micro - climate garments [C] // Industrial Fabrics Association International 2<sup>th</sup> International Conference on Safety & Protective Fabrics, North Carolina, USA, 2000.
- [28] 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.
- [29] 张兴祥. 耐高温相变材料微胶囊及熔纺高储热量储热调温纤维 [J]. 天津科技, 2010, 37(2): 19 - 21.
- [30] Hagino M, Hara J. Development of a method for predicting comfortable airflow in the passenger compartment [J]. SAE International, 1992: 1 - 10.
- [31] 郭新梅, 袁修干. 影响气冷式个体热防护装备制冷力的因素分析 [J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 276 - 280.
- [32] 韩增旺, 唐士君, 赖军. 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): 11 - 14.
- [33] Hadid A, Yanovich R, Erlich T, et al. Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing a ballistic vest [J]. European Journal of Applied Physiology, 2008, 104(2): 311 - 319.
- [34] 市谷弘司. 冷却服: 中国, 100393256C [P]. 2008. 6. 11.
- [35] 陈宁, 彭伟. 一种矿用气动降温服: 中国, 201451453U [P]. 2010. 05. 12.
- [36] 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.
- [37] 马砺, 张李荣, 李贝, 等. 矿井高温热害防治个体降温装置研究 [J]. 煤炭技术, 2014, 33(11): 278 - 281.
- [38] 曾彦彰, 邓中山, 刘静. 基于微型风扇整列系统的人体降温空调服 [J]. 纺织学报, 2007, 28(6): 100 - 105.
- [39] 唐士君, 翟红军, 罗鹏, 等. 一种风冷服: 中国专利, 202385772U [P]. 2012. 08. 22.
- [40] 朱铮, 刘长明. 一种优良的微气候冷却系统—飞行员和宇航员个体防护装备系列介绍 [J]. 中国个体防护装备, 2011(1): 54 - 56.
- [41] 金敬业. 新型防护液冷服的结构与性能研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2012.
- [42] 孟云余, 葛申然, 杜国杰, 等. 便携式局部液冷服系统 [J]. 航天医学与医学工程, 1988, 1(2): 122 - 126.
- [43] 杜志国. 浅谈单兵降温系统的研制与发展 [J]. 中国个体防护装备, 2007(6): 20 - 21.
- [44] 林伟华, 罗震威. 一种蒸发式降温服: 中国, 202536146U [P]. 2012. 11. 21.
- [45] 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): 18 - 24.
- [46] 孙文娟, 梁国志. 矿工降温服蓄冷材料的实验研究 [J]. 化学工程与装备, 2010(4): 36 - 39.
- [47] 张奋奋, 梁国志, 周梦颖, 等. 降温服在煤矿中的应用 [J]. 能源技术与管理, 2011(2): 114 - 115.
- [48] 周梦颖, 冯立品, 梁国志. 矿用降温服性能测试研究 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2012, 32(2): 29 - 34.
- [49] 关平, 周翔, 李俊, 等. 医用相变降温服人体热舒适性试验研究 [R]. 兰州: 全国暖通空调制冷 2004 年学术年会, 2004.
- [50] 朱颖心, 张寅平, 周翔, 等. 一种相变材料降温服: 中国, 2742791Y [P]. 2005. 11. 30.
- [51] 王云仪, 赵萌萌. 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.