

# 消防服装防护性能研究进展

牛丽,钱晓明\*,张文欢

(天津工业大学 纺织学院,天津 300387)

**摘要:**消防防护服装作为进入火场保护消防员生命安全的重要装备,防护性能得到不断的改进。从材料、结构等方面优化热防护性能及在消防服装内部设置微小气候降温装置以降低热应力两个方面进行阐述,并对消防服的防护性能进行评价。

**关键词:**消防服;热防护;降温;热应激

**中图分类号:**TS 941.73

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-0356(2016)11-0005-04

气候变暖,安全隐患的发生率也随之上升,应对复杂多变的火灾现场,消防人员需面对热、火焰、及瞬时高温,增加了工作的危险性,导致效率低下。目前,在中国知网上分别以消防服、热防护、热应激作为关键字进行搜索,结果见图1,可以发现,针对消防防护服装系统中热防护性能以及热应激的关注越来越多,这对维护消防员生命安全有重大意义。消防防护服装系统是一个由不同服装组合而成的多层结构体系(以下简称为消防防护服装),这个系统包括外层、防水透气层、隔热层和舒适层。材料层间配置的不同,引起人体—服装—环境之间热传递关系的不同,以致消防防护服装具有不同的热防护效果。

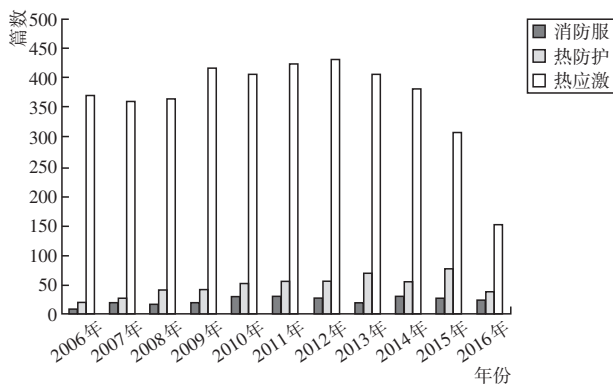


图1 中国知网搜索结果

消防防护服装阻止外部热量进入,也避免人体与防护服之间的微气候温度过高,人体核心温度上升到危险水平而导致的呕吐、中暑、昏厥等热损伤。所有这些症状的发生,严重影响着救援工作的效率及消防员的

的生命安全。

## 1 研究现状

根据热流量强度、空气温度和消防员承受时间的不同,火场环境一般分为3种,即普通环境、危险环境和紧急环境<sup>[1-2]</sup>。普通和危险环境温度通常小于300℃,极限热辐射为1 kW/m<sup>2</sup>,消防员能够承受的时间为60~1 500 s;紧急环境属于“闪火环境”,温度大于300℃,热流量为10~20 kW/m<sup>2</sup>,能够承受的时间小于60 s<sup>[3]</sup>。在危险和紧急环境中,消防员承受更多热辐射,受到更多的热损伤。

由于消防服的层间结构,在GA10-2014标准中规定各层均需要阻燃、防水,穿着此种厚重、多层、透气性较差的防护服装,进入火场进行长时间、高强度的救援工作时,大量出汗,带来较大的热应力,散热量不足,最终导致消防员身体热平衡失调,威胁人身安全。目前,为适应人体热应激生理反应,消防防护服的热防护性能研究主要集中在两个方面:一是在材料、结构等方面进行优化,确保热防护性能,增加消防服整体的隔热性能并且减轻重量;二是在消防服内部,设置主动降温装置即微小气候降温装置,降低热应力,提高热防护性,延长消防员工作时间。

### 1.1 提高隔热性,减轻重量负荷,改善消防防护服装的热防护性

对于灭火救援活动中,往往最严重的并不是直接的火焰烧伤,而是防护服装内的高温灼伤皮肤。消防员进入火场的温度一般为60~1 100℃,辐射热为115~200 kW/m<sup>2</sup>·s<sup>[4]</sup>。目前,使用燃烧假人可更加真实地模拟不同环境下,消防员的损伤状况。依托出汗暖体假人研究消防服装材料组合与设计特征对热传递的影响,结果表明消防服结构设计变化对服装热阻影响

收稿日期:2016-09-22;修回日期:2016-09-27

作者简介:牛丽(1991-),女,山东淄博人,在读硕士研究生,主要从事服装功能性及舒适性研究。

\*通信作者:钱晓明(1964-),男,博士,教授,E-mail:qxm@tjpu.edu.cn。

较大,而服装材料本身的特性也决定了湿阻的大小<sup>[5]</sup>,所以,消防服装热防护性能的优化既要考虑到结构,也要重视材料。

### 1.1.1 结构优化

消防防护服装多层织物系统的综合性能,取决于各层织物不同的配伍方式。李俊等<sup>[6]</sup>通过两步法选择织物的基本性能及不同组合方式,首先按消防标准查询各层织物的单项基本性能;对符合要求的各组织物按正交表设计组合配伍方案,形成最佳性能的多层织物组合。结果表明,隔热层+舒适层对整体的热防护性能、隔热性能影响最大,优化各层织物的组合方式,对热防护性能有明显的改善。

王棋生等<sup>[7]</sup>研究了相变材料包间隙大小对热防护性能的影响。实验中采取热平板仪模拟环境温度,使用8个探头对服装相变层和间隙处表面温度测试,结果表明,高温环境的温度越低,且材料包之间的间隙量越小时,热缓冲效果越好。相变材料包排列布局上的改变,也对隔热性能有大的影响。

李红燕等<sup>[8]</sup>研究了6种耐高温阻燃织物之间不同的面料组合,使得热防护性能最大化。实验模拟消防服的层次结构,采用垂直燃烧试验以及TPP试验测试,结果表明消防服采用Nomex III A、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布的配伍方式,TPP值可以达到50.7,从而获得较好的综合热防护性能,并在一定程度上减轻了消防员的热损伤。

### 1.1.2 材料优化

消防防护服装的隔热性主要通过增加隔热层材料厚度改善,国内外消防防护服装各层常用材料见表1<sup>[5]</sup>。过厚的消防服阻碍了消防员活动的灵活性,选择质轻且高效的隔热材料成为消防防护服装研发的重点。

表1 消防防护服装各层常用材料

名称	国内消防服用材料	国外消防服用材料
外层	Keval、PBI纤维	芳纶1313
隔热层	间位芳纶/对位芳纶水刺毡	Nomex纤维、Kevlar-Nk-Air纤维
防水透气层	聚四氟乙烯薄膜(PTEE)	聚四氟乙烯薄膜(PTEE)
舒适层	天然棉布、芳纶阻燃黏胶混合面料	Nomex/Viscose FR、wickable

20世纪80年代,美国航天事业研发的PBO纤维,凭借自身优良的阻燃性能和柔软性,很快应用在消防防护服装的研究中。随后,拥有良好绝缘性能和稳定化学性能的Kynol纤维,也迅速被应用。20世纪90

年代,德国的BASF公司生产的Basofil纤维依托良好的耐火性和防护性能被广泛使用。

近年来,据统计,全球气凝胶市场规模年复合增长率36.4%,而国内气凝胶市场的年复合增长率高达61.1%<sup>[9]</sup>。气凝胶材料凭借纳米孔隙结构、极低导热率和低密度的优良特性,作为世界上最轻的固体材料,已经成为消防服隔热层的主导材料,不仅减轻了消防防护服装的重量,也大大降低了使用时的工作损耗。

任乾乾等<sup>[10]</sup>通过对比了耐高温纤维玄武岩纤维、碳纤维、E玻纤、S玻纤、芳纶、岩棉的各种性能,最终选择玻璃纤维二氧化硅气凝胶毡作为隔热层。其热防护性能大于60,并且可以经受450℃高温火焰燃烧50s。结果说明,气凝胶作为隔热层材料,在热防护性方面有明显提高,可以抵御进入火场的瞬时高温。

张兴娟等<sup>[11]</sup>对比两种不同材料的隔热层的防护性,以获得消防服装的热防护性能。经热防护性能测试,传统Kevlar R隔热纤维作为隔热层消防服试样的综合导热系数为0.196 W/m·K,而SiO<sub>2</sub>气凝胶材料作为隔热层的新型消防服试样的综合导热系数为0.057 W/m·K,是传统材料的1/4左右。测试结果表明新型消防服在保证隔热性能的同时,材质更加轻薄,使用更加高效。

Abu Shai等<sup>[12]</sup>在气凝胶中加入相变材料革新消防服隔热层。实验中使用孔状结构的气凝胶粒子对靠近环境一侧的隔热层表面进行涂层;另外,使用相变材料和气凝胶的混合物粉末对靠近皮肤的一侧涂层。传统气凝胶阻止了热流量的进入,与相变材料进行混合以后不仅显示了优异的热防护性,延长感受到痛觉的时间,同时改善了消防服的穿着舒适性能,也给消防员提供了更多危险反应时间。

## 1.2 降低热应力,延长消防员工作时间

消防员在超重工作负荷和极端的环境条件下,导致生理代谢热过大,人体蒸散发热量不足,受到较大的热应力影响,从而影响单兵作战的效率,也产生一系列的热疾病。因此,消防设计服在考虑隔热防护性能的同时,也要考虑降低热应力,延长工作时间。国内外的研究人员已经做了很多研究,将降温体系应用于消防服中,变被动为主动,成为降低热应激的主要举措。

微气候冷却系统(Microclimate Cooling System, MCS)可分为将预冷气体或是液体通过管道网络,以传导和对流的方式进行个体散热的主动冷却系统(气冷降温装置、液冷降温装置)和由冷却包进行降温的被动

冷却系统(相变材料包降温装置)两类。

### 1.2.1 主动冷却服

主动冷却服是通过冷却源循环供应,吸收人体多余的热量。主要包括通过环境空气或压缩空气进行冷却的气冷服(Air Cooling Garment)和通过冷却液在换热管路中循环进行降温的液冷服(Liquid Cooling Garment)。

2015年,Meredith McQuerry等<sup>[13]</sup>讨论了5套消防服不同的通风设计带来的总热量消耗,并对增大散热量进行优化。实验在4种不同的环境下进行,均降低了消防员在执行任务时受到的热应力,主动通风设计比被动设计带走了更多的热量,提高了环境汗液蒸发量,穿着更加舒适。

1962年,Farnborough皇家空军基地使用40根编织在棉质内衣中的细塑料管制成了第1件液冷服(见图2),冷却水流经脚踝、腕部沿四肢和躯干返回,降低了士兵的新陈代谢热。



图2 第1件液冷服

2014年,Lennart P.J.Teunissen等<sup>[14]</sup>评估了冷水分布和冷却冰袋两种冷却系统的冷却效果。结果表明,由管道型背心、背包和泵组成内侧密封袋里的2个装有冰的瓶子与背包相连,冷水循环的液冷系统冷却效果更好,时间更久;冷却冰袋背心刚开始冷却效果好,但随着时间的推移冷却效果下降。目前,将液冷服的冷却原理更多的应用于消防服还在实验中。

虽然低温液体或冷却气体便于获得,可以长时间制冷,但是,气冷或液冷装置的冷源使用导管连接,并在外部需要动力供应。因而,消防员的行动范围受到限制,在灭火救援中造成不便。

### 1.2.2 被动冷却服

被动冷却服装即不能主动连续提供冷却源的服装,常被设计成为便携背心的样式,将相变材料(Phase Change Material Cooling, PCM)降温袋预先放置在冷环境中蓄冷,使用时取出,装进背心的口袋,相变材料的温度低于人体温度,不断吸收人体多余热量,保持消防员的舒适。当能量放尽,需重新蓄冷并更换储冷剂。相变材料分有机材料、无机材料和共晶体材料,常见的是盐化合物、石蜡、脂肪酸等。

Gao等<sup>[15]</sup>、Chou等<sup>[16]</sup>分别对比了受试者在高温负荷下外穿消防服内穿与未穿降温背心时的热应激状况,指出穿着装有相变材料的降温背心能有效对受试者的皮肤温度、核心温度进行降温。

Bennett等<sup>[17]</sup>对比了背心中不同个数降温带的降温状况。结果表明使用6个降温袋的降温效果比4个降温袋的效果更好。数量越多效果越好的同时,也带来较大的身体负荷,重量影响了消防员的活动能力。

Chinmei Chou等<sup>[18]</sup>依据测试者的生理和心理感受对应用于消防服的冰袋和相变材料包的冷却效率进行对比,实验者经过4段50min的运动测试,测量了直肠温度、平均皮肤温度、身体重量损失和试验者的主观感受,结果表明相变材料包凭借更大的冷却面积,更高的融化温度,和更柔软贴身的感受等优于冰袋的冷却效果。并且相变温度20℃的PCM效率更佳,有效地降低了穿着消防服的生理负荷。

相变材料包方便携带,易使用;但是冷却时间较短,当材料内部的蓄冷量释放完毕之后,需放入冷环境中重新蓄冷,对于工作在紧急热环境中的消防员来说,每一次打开防护服就是对生命的一次威胁。因此,相变材料包的冷却背心发展也存在着一一定的限制。

## 2 消防服防护性能发展趋势

### 2.1 多种冷却方式组合,提高冷却效率

Yehu Lu等<sup>[19]</sup>将相变材料包与微型小风扇结合,借用假暖体对比测试4种消防服装。研究得出,冷却中相变材料包随着时间的推移,皮肤表面湿度增加,冷却效果下降;此时,微型小风扇开始通过蒸发进行冷却,降低人体与消防服间的热蓄积量。两种冷却方式组合,相互弥补,达到冷却性能的最大值,提高了消防员的工作效率。这样的方式既节约能源又可将各种冷却方式的效能发挥到最大,在未来有很大的发展潜力。但是怎样根据火场环境选取不同的组合方式还有待于进一步研究。

## 2.2 对传统的冷却服进行优化

消防防护服装内部加入冷却装置,可以明显的降低人体的核心温度,由于液冷服的冷却效果显著,有效的带走了人体大量的代谢热,散热量平均达到 2617 kJ。通过调整冷却液进口温度或液体流速,避免消防员进入火场之后,温度的瞬时改变,产生过冷现象和热应激反应。液冷服换热管路的排布决定了冷却的效果,将液冷服与消防服进行组合,在日后研究中对排管密度与提高消防服的热防护性能的影响进行系统的讨论。

## 2.3 提高消防防护服装的穿着舒适性

消防防护服装的不同结构需要与火灾不同的形态进行选择,才能够及时适应各种大规模火灾的救援。符合人体工效学的消防防护服装不仅可以更好地保护消防员作战时的安全,也可以提高工作效率,穿着舒适透气,防止产生热疾病,这对于关注消防员和消防服未来的发展很重要。

## 2.4 消防防护服装与冷却服装进行配套使用

在不同温度、湿度环境中长时间作业,热量主要是以辐射渗透为主,根据热体产生的热量不同,以及热量散发的难易程度,选择不同的冷却服装与消防防护服装进行配套组合使用,能够更好地降低消防员的生理热应激。

## 3 结语

消防防护服装作为消防员应对火场的个人防护装备,在保证热防护性能的同时,降低热应激,维护消防员的生命安全方面也有重要的现实意义。从消防服层间配置、隔热材料、冷却装置等方面对消防防护服装进行分析,维持人体核心温度的恒定,完善降温装置对今后消防服的发展具有推动作用。

### 参考文献:

[1] Hoschke B. Standards and specifications for firefighters clothing[J]. Fire Safety Journal, 1981, 4(2): 125-137.

[2] Doster J A, Roberts G V. Measurements of the firefighting environment: summary report[J]. Fire Engineers Journal, 1995, 55(178): 30-34.

[3] Abbott N J, Schulman S. Protection from the fire: non-flammable fabrics and coating[J]. Journal of Coated Fabrics, 1976, (6): 48-64.

[4] 徐强. 防火服的设计因素分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2010, (5): 135-137.

[5] Li J, Barker R L, Deaton A S. Evaluating the effects of material component and design feature on heat transfer in

firefighter turnout clothing by a sweating manikin[J]. Textile Research Journal, 2007, 77(2): 59-66.

[6] 李俊, 王云仪, 张向辉, 等. 消防服多层织物系统的组合构成与性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(4): 410-415.

[7] 王棋生, 何艳, 孙玉钗. 相变高温防护服的热防护影响因素分析[J]. 现代丝绸科学与技术, 2016, 31(1): 16-18.

[8] 李红燕, 张渭源. 消防服用织物的阻燃性能及其 TPP 值[J]. 纺织学报, 2008, 29(5): 84-88.

[9] 《粘结》杂志社. 新型气凝胶年复合增长率 60% 备受关注[J]. 粘接, 2016, (6): 22.

[10] 任乾乾, 林兰天, 郑慧琴. 采用二氧化硅气凝胶的防火隔热组合面料研究[J]. 上海纺织科技, 2011, 39(12): 53-55.

[11] 张兴娟, 吴洪飞, 孔祥明. 新型组合式消防服热防护性能分析[J]. 中国个体防护装备, 2013, (6): 20-24.

[12] Shaid A, Wang L, Padhye R. The thermal protection and comfort properties of aerogel and PCM-coated fabric for firefighter garment [J]. Journal of Industrial Textiles, 2015, 45(4).

[13] Mcquerry M, Denhartog E, Barker R. Ventilation of firefighter turnout gear: reducing heat stress and improving physiological comfort[A]. American Association of Textile Colorists & Chemists International Conference [C]. 2015.

[14] Teunissen L P J, Wang L C, Chou S N, et al. Evaluation of two cooling systems under a firefighter coverall[J]. Applied Ergonomics, 2014, 45(6): 1433.

[15] Gao C S, Kuklane K, Holmer I. Cooling effect of a PCM vest on a thermal manikin and on humans exposed to heat [A]. Igor B Mekjavic, Stelions N Kounalakis, Nigel A S Taylor. The 12th international Conference on Environmental Ergonomics. Slovenia: Jozef Stefan Institute Ljubljana [C]. 2007.

[16] Chou C, Tochihara Y, Kim T. Physiological and subjective responses to cooling devices on firefighting protective clothing[J]. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 2008, 104: 369-374.

[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: 322-328.

[18] Chou C, Tochihara Y, Kim T. Physiological and subjective responses to cooling devices on firefighting protective clothing[J]. Arbeitsphysiologie, 2008, 104(2): 369-374.

[19] 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]. Journal of Thermal Biology, 2015, 52(C): 137-146.

- [11] 柯勤飞, 靳向煜. 非织造学[M]. 上海: 东华大学出版社, 2010, 8.
- [12] Han Yong Jeon. Chemical resistance and transmissivity of nonwoven geotextiles in waste leachate solutions[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25: 176–180.
- [13] George R Koerner, Robert M Koerner. Puncture resistance of polyester (PET) and polypropylene (PP) needle-punched nonwoven geotextiles [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, 29: 360–362.
- [14] Natália de Souza Correia, Benedito de Souza Bueno. Effect of bituminous impregnation on nonwoven geotextiles tensile and permeability properties [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, 29: 92–101.
- [15] 何文君. 垃圾填埋场的设计与防渗处理技术研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [16] 郭志恒. 垃圾填埋场的设计与防渗处理技术研究[J]. *中小企业管理与科技(上旬刊)*, 2015, (3): 102–103.
- [17] 国家环境保护部. 2013 全国投运城镇污水处理设施清单 [EB/OL]. [http://zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201404/t20140415\\_270550.htm](http://zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201404/t20140415_270550.htm), 2014–05–10.
- [18] 康晓妮, 马文举, 马涛, 等. 320MW 机组锅炉加装低温省煤器的经济性研究[J]. *热力发电*, 2012, (5): 8–11.
- [19] 王宪军, 郭宁, 王同勋. 尾矿库的尾砂回采研究[J]. *江西建材*, 2016, (18): 221–222.

## Property and Application of Polypropylene Filament Nonwoven Geotextiles

HUANG Shun-wei, QIAN Xiao-ming, ZHOU Mi

(School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** The production technology status of polyester and polypropylene filament was introduced. The chemical resistance, mechanical properties, punctures resistance and performance of asphalt impregnated of polyester and polypropylene nonwoven geotextiles were comparative analyzed. The application prospect of polypropylene filament nonwoven geotextile was proposed.

**Key words:** polypropylene filament; geotextile; product property; application prospects

(上接第 8 页)

## Research Progress of Firefighting Uniform Protective Property

NIU Li, QIAN Xiao-ming\*, ZHANG Wen-huan

(College of Textiles, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Firefighting uniform was one of the great important apparatus to firemen. It can protect them from a variety of injuries in the fire scene as they were routinely exposed to heat and fire. The protective property was optimized from the materials and clothing structure. The microclimate cooling system was installed in firefighting uniform to decrease heat stress. The protective performance was evaluated.

**Key words:** firefighters' clothing; thermal protective; cooling; heat stress

(上接第 11 页)

## Developent Status of Foreign Air Jet Loom

HU Yu-cai

(Yancheng Industry Vocational Technology College, Yancheng 224000, China)

**Abstract:** The development of foreign new type air jet loom was introduced. The technical progress and performance characteristics of Japanese models represented by Toyota and Tsudakoma, and European model represented by Picanol's and Sulzer were detailed. The analysis results showed that Japanese models had advantages of simple operation, strong network function and high degree of automation, intelligence and other advantages, and European model had the advantages of high speed, the frame as a whole, high strength, firm structure and vibration of loom small.

**Key words:** the international exhibition of textile machinery; air jet loom; technology progress; performance characteristics