

消防服多重功能的研究进展综述

邱浩^{1,2}, 王云仪^{*1,2,3}

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 东华大学 功能防护服装研究中心, 上海 200051; 3. 东华大学 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

摘要:消防服是消防队员作业时保障人身安全的重要装备。分析了消防服材料的相关研究如各层织物的性能改进和新型功能材料的研发应用。在服装层面,通过增大服装型号、尺寸,减小热收缩增加织物系统各层间的空气层以及服装衣下空气层厚度,增强服装热防护性能;总结细部结构优化措施,并介绍智能配件在消防领域的应用。从织物性能评价和服装整体性能评价两方面阐述了消防服性能评价手段,TPP,RPP,SET是当前评价织物热防护性能的常用标准手段,燃烧假人则可以客观全面评估服装整体热防护性能,采用客观测试与主观测评相结合的方式可对消防服的舒适工效性能进行综合评价。

关键词:消防服;热防护性能;舒适工效性能;评价手段

中图分类号:TS 941.731.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2017)01-0011-06

Review on the Multi-Functions of Firefighting Clothing

QIU Hao^{1,2}, WANG Yunyi^{*1,2,3}

(1. College of Fashion and Design, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Key Laboratory of Modern Fashion Design and Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Thermal protective performance is important for firefighters. In this paper, researches about fire fighting clothing were reviewed, e. g. the improving of performance and the developing of new functional materials. In the aspect of clothing, to improving the thermal protective property of clothing the thickness of air layer between each layer of fabric was increased by increasing the size of clothing and reducing the thermal shrinkage. The optimization measures on detail and intelligent equipments were introduced. Evaluation methods for the performance of firefighter's protective clothing were stated from fabric and clothing. TPP, RPP and SET were commonly used on evaluating the thermal protective performance of fabrics at present, while flame manikin was used to assess thermal protective performance of the garments. Generally, comfort and ergonomics property of clothing could be evaluated by combining objective tests and subjective assessments.

Key words: firefighter protective clothing, thermal protective performance, comfort and ergonomics property, evaluation methods

消防服是保护消防员在进行消防灭火作业及其他救援作业中身体免受伤害的重要装备之一。热防护性能优良的消防服不仅可以使消防员身体免受热伤害,还可以保证其消防救援效率、缓解生理压力^[1]。针对消防服的防护性能、舒适性能及工效性能等多重要求的不断提高,整体综合性能的优

化设计成为近年来业界持续深入研究的动力。消防服多重功能的开发及评价研究涉及的学科范围广泛,既有基本材料性能的改进提升、多层织物之间的配伍优化以及新型功能材料的应用,也有服装整体性能的研究开发和功能结构的细化设计,同时,织物和服装两个层面的相应性能评价方法也得

收稿日期:2016-09-26; 修订日期:2016-11-18。

作者简介:邱浩(1992—),男,硕士研究生。

*通信作者:王云仪(1972—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为服装舒适性与功能设计。Email:wangyunyi@dhu.edu.cn

到关注和研究,用以预测各种新成果、新方案投入实际使用后的功能状态。

1 材料及相关研究

消防服装目前均采用多层织物组合结构,美国 NFPA 1971 建筑物火灾用灭火防护服标准^[2]采用 3 层织物组合,我国 GA 10—2002 标准^[3]规定,消防服由外向内依次采用外层、防水透气层、隔热层和舒适层 4 层织物组合。消防服装各层面料在阻隔外界热危害、促进内热散失等整体功能需求中发挥着各自不同的作用。此外,广义上的消防服包括头盔、面罩、手套、消防靴、呼吸器等消防附件装备,这些附件与服装组合在一起,为消防人员提供全方位的热防护。

1.1 材料性能改进

消防服装外层直接与火焰接触,应具备优良的防火阻燃性能。国外常选用聚苯并咪唑(PBI)作为消防服外层面料,PBI 具有优良的耐热、阻燃及热稳定性,但透气性和耐光性较差。间位芳纶(Nomex)具有良好的阻燃耐热性,被我国消防服广泛使用,然而,其热稳定性较 PBI 类织物差,因此,国内有学者尝试在 Nomex 织物中加入阻燃粘胶,以改善该类织物的热稳定性。此外,王肖杰^[4]研究了聚酰亚胺纤维制做消防服阻燃外层面料的可行性,结果表明,该面料阻燃性能与热防护性能高于 GA 10—2014 标准指标要求,其力学性能、色牢度等方面也符合标准要求。

防水透气层用于防止外部水渗透服装内部,同时促进人体内部的热量散失。常用的防水透气膜有 PTFE,PU,PVDF 多微孔膜等。PTFE 微孔膜具有良好的防水透气和耐高温性能,新一代国产 PTFE 微孔膜,具有自动抗油脂性能,缓解了以往消防服多次使用后防水透气性能严重下降问题,与美国 eVent 面料性能相比,新一代 PTFE 膜在防水、透气、抗油与耐用性上已达到先进水平。此外,利用静电纺丝技术对聚偏氟乙烯进行处理,制备的 PVDF 膜,能保证该多微孔膜良好的热稳定性^[5]。

隔热层能够有效阻隔外部向人体的热传导和热辐射,国内已有相关学者将消防服的隔热层与舒适层合并,减少服装的约束性,并将高吸水性材料附加在这种结构上,可保持皮肤干燥,改善着装的舒适性,减少体内热蓄积^[6]。在隔热层材料上增加反辐射涂层,也可有效提高服装的隔热性能^[7]。

除服装外,消防设备所用的材料也应具备优良的防火隔热性能。暴露在高温环境下的呼吸器,可

能发生热降解或熔化。A Putorti 等^[8]建立一种新的测试方法,对自给式呼吸器的热防护性能进行研究;采用阻燃橡胶和隔热材料制成的消防靴,可实现防火、隔热的功能^[9];在头盔帽壳材料上,采用聚醚酰亚胺代替国内消防头盔普遍使用的聚碳酸酯,可提升其耐高温性能^[10]。

1.2 多层织物配伍

消防服装多层织物系统的热防护性能,除了受各层织物的单独性能影响之外,各层织物间的组合和配伍方式也起着较大的影响。Keiser C 等^[11]在研究防护服湿传递性能时发现,服装的含湿量不仅与单层面料性能有关,还依赖于相邻面料的性能。在火场高温湿热环境下,消防人员会遭受高温液体与蒸汽的危害,Desruelle A V^[12]发现,织物暴露在高温蒸汽环境下,添加聚乙烯薄膜的防水织物较单独的防水织物热流量明显降低,并且聚乙烯薄膜置于防水织物前端较置于其后端热流量低。

为实现消防服多层织物系统最佳性能配伍和最优综合性能,可采用两步法:首先,通过试验评测外层、防水透气层、隔热层和舒适层常用织物的基本性能;其次,对各合格织物按正交表设计的方式进行配伍组合,采用极差分析法确定最优配伍方案^[13]。

1.3 新型功能材料应用

随着一些高性能新型纤维材料的研发,如相变材料、形状记忆材料、气凝胶等,为消防服的材料选择及智能化发展提供了更广阔的空间和思路。

相变材料在物理性状转变的过程中,会向周围环境吸收或释放热量,这种特性可用于缓解热环境中人体的热应激,也能缓解大量人体产热而导致人体承热负荷,理论上可以从一定程度上解决消防服热防护性和着装舒适性之间的矛盾。有研究表明,在隔热层正面涂上相变材料可使多层织物系统热防护性能最优^[14]。

形状记忆材料最早被 D. Congalton^[15]应用于热防护服装,利用其记忆效应,当达到临界温度时,该材料便会立即恢复成预先设计好的形状,增大空气层,又由于空气导热系数小的特性,从而提高织物的热防护性能。

气凝胶作为一种密度小、导热系数低、隔热性能好的固体材料,逐渐被用于消防领域。相关学者致力于新型 SiO₂ 气凝胶隔热材料制备,利用 SiO₂ 气凝胶与高强度的硬硅钙石形成复合材料。由于材料内部气体分子运动受到限制,该复合材料导热系数明显降低,优化了热防护性能^[16]。

消防服从单层织物的研究到多层织物系统的配伍、优化,已发展为相关学科交叉的研究。而新型功能材料通过自身的特性,对传统服用材料进行革新,使消防服装热防护性能得到提升,为今后的发展提供新的研究方向。

2 服装设计优化的手段及作用

在热防护领域,服装的舒适性与防护性难以平衡。为了加强服装热防护性能,采用厚重的材料增大热阻,却使穿着人员活动受限,加重了服装内部热应力以及人体生理负荷。当前消防服装整体和细部的设计基本围绕这一问题展开。

2.1 整体设计优化

消防服装的热防护性能不仅来自于服装材料本身,织物系统各层间的空气层以及服装衣下空气层均在热防护中起着至关重要的作用,有学者利用空气层传热模型评价服装热防护性能。研究表明,服装的规格尺寸及合体性设计均对服装整体热防护性能造成影响^[17]。服装宽松度的改变会导致衣下空气层性状产生变化,而空气层对消防服热防护性能具有显著的促进作用,但经实验后发现,服装尺码的增大虽然能够改善热防护性,但作用并不明显,可见服装规格尺寸的增减所导致的衣下空气层改变是一个复杂的过程,其间还涉及到材料物理机械性能的作用;而增加服装层数、局部部位重叠等设计特征的变化,能够显著增强服装的热防护性能^[18]。

大多数阻燃面料在火焰作用下会产生强烈的收缩,导致衣下空气层急剧减小且面料贴紧皮肤,加快传热速率,加深热伤害,这从另一个角度对服装的整体设计提出了要求。有学者开始关注织物及服装的热收缩与其热防护性能的关系并尝试了多种不同的热收缩测量和表征手段,采用三维人体扫描仪捕捉着装状态下假人闪火暴露前后的三维影像,分别从服装表面面积、体积和假人与服装间空气层厚度等方面对服装的热收缩进行表征^[19]。相关研究表明,服装热收缩与服装暴露环境、织物性能、服装尺寸和人体姿势有关,在高温闪火环境下,热流量与空气层厚度是服装产生收缩形变的重要因素,手臂、腿部、背部相应服装部位防护性较差,烧伤严重;胸部、臀部相应服装部位热收缩明显。空气层厚度与服装尺码呈正相关,因此,合理调节消防服袖长、裤长及胸围、臀围尺寸,能够改善服装收缩形变,提升服装的热防护性能^[20]。

2.2 细部结构优化

基于防护服装功能设计模式^[21],消防服结构优

化的目的主要包括加强防护性能和提升工效性能两方面。表 1 总结了针对消防服加强防护性能的一系列结构优化手段。例如,在肩部、肘部、膝部增加面料层数;在领部、手臂、腋下、下摆等部位减少皮肤热暴露;背部增加褶裥以增大空气层厚度等。表 2 总结了能够提升工效性能的设计手段。例如,肩部、臀部、裆部、腿部通过结构优化,可提高人体动作灵活性,减小生理负荷;袖口设置内罗纹、腰部增加腰托,防止水倒灌,改善舒适性;改进袖口、脚口等易磨损部位的材质,提高服装耐用性等。

表 1 消防服装结构加强防护性优化措施
Tab.1 Structural optimization for firefighter's protective clothing (strengthening protection)

品 类	部 位	优化方案	作 用
上衣	领部	设置翻折式直立衣领	防止火焰等进入消防服内部
	肩部	增加垫肩	增强防护
	肘部	加缝双层消防材料	增强防护
	手臂	增加袖长,并使袖中线前偏	满足手臂上抬袖口滑移量,补足袖长
	腋下	增加袖窿深和插片宽度	减少衣摆上抬量
	背部	增加褶裥	增大空气层厚度
裤子	下摆	增加防风防火墙	防止明火从下摆处烧伤皮肤
	膝部	加缝双层消防材料	增强防护

表 2 消防服装结构提升工效性优化措施
Tab.2 Structural optimization for firefighter's protective clothing (enhancing ergonomics property)

品 类	部 位	优化方案	作 用
上衣	肩部	增加活褶	提高灵活性
	袖口	设置内罗纹袖口	防止外部水流入袖中,提高耐久性
裤子	腰部	增加腰托	防止水进入腰部
	臀部	减少臀围	提高灵活性
	裆部	增加三角片	提高灵活性
	腿部	减少裤腿围度	提高灵活性
	脚口	改进材质	提高耐久性

2.3 智能配件引入

消防装备集功能、智能、效率于一身,智能化技术对消防服的性能提升具有很大的促进。热传感器可用于对消防服热防护性能进行检测分析,目前在消防领域使用较常见,通常具有方便轻巧、重复性好、测量精确及采集迅速等特点。绝热铜片传感器与嵌入式热电偶等与其他传感器相比,性能最佳,但与其他传感器一样都具有长时间暴露于高热流条件下易受损的缺陷,有待于改进^[22]。在火场高

温高危环境下,可通过在消防服中设置便携式传感器,检测消防员生理参数(心跳速率,体温,血氧饱和度等),分析健康状态;同时,利用该系统检测空气温度等火场环境,提前预警,保障消防人员的生命安全^[23-24]。红外辐射热传感器用以检测火源温度,并设置嵌入式传感器实时监测火场温湿度,通过智能消防服系统进行信息采集和数据处理、传输,用以指挥调度消防人员^[25]。

3 性能评价手段

消防服装性能评价可分为织物性能测评和服装整体性能评价两方面。织物性能测评具有成本

低、操作简便、重复性高等优点,然而,研究仅停留在面料局部,反映的信息有限;服装性能评价能够研究服装整体性能,实际应用价值明显,但实验的成本高,可重复性差。

3.1 织物性能评价

阻燃材料的热防护性能通常根据人体皮肤到达二度烧伤所需的时间评价,传统采用水平和垂直燃烧法、极限氧指数法、烟密度法等测量织物的阻燃性能,当前普遍采用热防护性能法(Thermal protective performance, TPP),以及辐射热防护性能法(Radiant protective performance, RPP)和热蓄积测试法(Stored energy tester, SET)等。TPP 法、RPP 法和 SET 法的相关测试方法见表 3。

表 3 TPP、RPP 及 SET 测试方法总结
Tab.3 Summary of TPP, RPP and SET test

测试方法	TPP 法	RPP 法	SET 法
测试标准	ASTM F2700—2008	ASTM F1939—2008	ASTM F2731—2011
测试条件	织物暴露于热辐射和热对流环境下	织物暴露于热辐射条件下	织物处于低辐射环境中的热蓄积
测试仪器	热防护性能测试仪	辐射热防护测试仪	热蓄积测试仪
测试指标	$TPP = Q \times T$ 式中:TPP 为热防护性能值(J/cm^2); Q 为总热流量 [$J/(cm^2 \cdot s)$]; T 为到达二度烧伤的时间(s)。	$RPP = Q \times T$ 式中:RPP 为热辐射防护性能值(cal/cm^2); Q 为辐射热流量 [$cal/(cm^2 \cdot s)$]; T 为到达二度烧伤的时间(s)。	皮肤到达二度烧伤的时间(迭代法)或简单描述是否导致皮肤烧伤(固定热暴露时间法)

TPP 法、RPP 法及 SET 法作为国内外常用的消防服热防护性能测试方法,被研究者利用以测试织物的阻燃性能和热蓄积,探索影响织物热防护性能的因素,实现多层织物最佳性能配伍,这几种方法将织物热防护性以人体皮肤到达二度烧伤时间度量,与人体生理相关联。

3.2 服装整体性能评价

3.2.1 热防护性 燃烧假人是当前公认能够客观全面评估服装整体热防护性能的专用设备,测试标准主要有美国 ASTM F1930—12^[26] 和 ISO 13506.3—2008 标准^[27]。利用燃烧假人模拟消防服在实际火场中的穿着状况,对服装的整体热防护性能进行评价。

1974 年, Tickner G 等^[28] 采用假人系统对热防护服进行评价,这种燃烧假人系统安装有 124 个传感器,并配置了计算机采集系统和数据还原系统,可对短期烧伤和长期热疲劳进行评估测量。发展至今,燃烧假人已应用在多个领域。利用燃烧假人测试实验前后防火服各部位的收缩形变量,分析服装结构对热防护性能所产生的影响,并提出整体设计和细部结构优化措施;对闪火条件下,影响服装

热收缩因素进行探究,尝试不同的热收缩测量和表征手段^[19-20,29]。Hummel A 等^[30] 开发了一种新型假人手部防火测试系统,该系统用于测试热防护服手套暴露在火焰下的防火性能,并对手部二级烧伤和三级烧伤的程度和分布进行预测,为热防护服的研究提供了科学的数据基础。有学者基于台架试验和假人试验,提出用最大衰减因子 MAF (Maximum attenuation factor) 评价热暴露过程中服装的热防护性能,弥补了现行测试标准的不足^[31]。

此外,应用燃烧假人可模拟不同消防环境,建立织物和服装的热传递模型^[32-33]。随着应用领域的拓宽,燃烧假人也逐渐暴露出不足。人体姿势对热收缩具有显著影响,但假人在燃烧时处于静止状态,不能真实模拟人体;并且火场环境除火外,还有高温液体、蒸汽等给工作人员带来伤害,燃烧假人系统也很难再现火场真实环境,因此,该系统今后还亟待改进。

3.2.2 舒适工效性 厚重的消防服往往会影响人体肢体活动的灵活性,尤其是在作业过程中,在服装的防护功能和人体的运动产热共同作用下,会对作业人员的生理造成较大的影响,出现包括心率加

速、排汗量上升,严重时产生头昏、热痉挛等生理平衡失控现象,从而降低消防人员的作业效率。因此,需采取有效手段对消防服舒适性和工效性进行改进,以确保消防服实际使用中的安全和高效。

目前,国内外普遍采用5级评价系统对服装及其织物性能进行测评^[34]。针对服装舒适性能和工效性能的测评,常采用客观测试与主观测评相结合的方式,实验的对象通常包括假人和真人两种类型。暖体假人、出汗假人等作为服装舒适性能客观测试设备,模型与参数的设置是实验的关键因素。实验环境下,假人穿着所需测试的服装,利用体温调节系统,测试服装的热阻与湿阻等参数及人体生理指标;通过人体着装实验,主观评测服装穿着舒适性及肢体灵活性,实验过程中,受试者完成指定的动作,填写相关问卷,并采用仪器记录受试者的生理数据,通过问卷和实验生理数据及假人等设备的测试结果对服装材料与结构的合理性进行评价,以提出相关部位的优化措施,提高肢体灵活性,减少生理负荷^[35]。传统使用角度计测量人体肢体活动范围(Range of motion, ROM),但可靠性存在一定局限^[36]。随着技术发展,三维动作捕捉仪可通过对试验对象的肢体运动进行捕捉,全面科学地评价服装工效性能。

4 结 语

文中从当前消防服多功能发展的趋势出发,围绕消防服的防护性能、工效性能以及舒适性能,从材料和服装两个层面,分析了当前的研究现状与进展,以期为后续的进一步研究提供参考。

1) 消防服装各层织物的基本性能及不同组合方式决定了其综合性能的优劣。众多学者致力于消防服外层、防水透气层、隔热层和附件装备材料性能的改进;综合各层织物基本性能,采用两步法实现多层织物最优配伍;相变材料、形状记忆材料和气凝胶等高性能新型纤维材料的研发也极大地改良了传统消防材料。

2) 服装性能研究从整体出发,设计优化包括服装规格、尺码、热收缩等方面,从衣下空气层角度说明,适当调整服装尺码可有效增大空气层厚度、改善服装收缩形变,局部部位堆叠同样能提高热防护性能;结构优化分为防护性能优化和舒适工效性能优化两方面,根据防护服装功能设计模式,对服装各部位提出优化措施;消防服智能配件的应用可实时检测人体和环境参数,保障消防队员的生命安全。

3) 消防服装性能评价可分为织物性能评价和

服装整体性能评价。织物性能评价,传统采用垂直燃烧法、极限氧指数法等来测量织物的阻燃性能,当前用来评定织物综合热防护性能的常用标准手段有 TPP, RPP 及 SET, 通常以人体皮肤到达二度烧伤的时间为标准;服装整体评价,包括防护性和舒适工效性评价,其中,燃烧假人是客观全面评估服装整体热防护性能的专用设备,应用5级评价系统对服装及其织物舒适性能进行评价,常采用客观测试与主观测评相结合的方式测评服装的舒适工效性能。

参考文献:

- [1] BARKER R L. A review of gaps and limitation in test methods for first responder protective clothing and equipment [R]. Raleigh: North Carolina State University, 2005.
- [2] National Fire Protection Association. NFPA 1971 Standard on Protective Ensemble for Structural Fire Fighting: ISO 02169—7471 [S]. Geneva: An International Codes and Standards organization, 2000.
- [3] 全国消防标准化技术委员会第五分技术委员会. 消防员灭火防护服: GA 10—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [4] 王肖杰. 基于聚酰亚胺纤维灭火防护服外层面料的设计与开发 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [5] Gopal R, Kaur S, Ma Z, et al. Electrospun nanofibrous filtration membrane [J]. Journal of Membrane Science, 2006, 281(1): 581-586.
- [6] Houshyar S, Padhye R, Vijayan A, et al. The impact of super-absorbent materials on the thermo-physiological properties of textiles [J]. Textile Research Journal, 2014, 85(6): 601-608.
- [7] E. Vincent Zoby. Aeroheating design issues for reusable launch vehicles: a perspective [M]. America: Bibliogov, 2013.
- [8] A Putorti, A Mensch, N Bryner, et al. Thermal performance of self-contained breathing apparatus facepiece lenses exposed to radiant heat flux [D]. Commonwealth of Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2013.
- [9] 赵富森. 我国消防员个人防护装备产业和技术状况及未来发展方向 [J]. 中国个体防护装备, 2013(3): 12-16.
ZHAO Fusen. The trend and direction of Chinese fire fighters' personal protective equipment industry and technology position [J]. China Personal Protection Equipment, 2013(3): 12-16. (in Chinese)
- [10] 马皎皎. 新型消防头盔的研制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [11] Keiser C, Becker C, Rossi R M. Moisture transport and absorption in multilayer protective clothing fabrics [J]. Textile Research Journal, 2008, 78(7): 604-613.
- [12] Desruelle A V, Schmid B. The steam laboratory of the

- Institut de Médecine Navale du Service de Santé des Armées; a set of tools in the service of the French Navy [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, 92 (6): 630-635.
- [13] 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.
- LI Jun, WANG Yunyi, ZHANG Xianghui, et al. Properties and combination of multi-layered fabrics of firefighter protective clothing [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2008, 34(4): 410-415. (in Chinese)
- [14] 查思思. 相变材料在消防服用织物中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [15] Congalton D. Shape memory alloys for use in thermally activated clothing, protection against flame and heat [J]. *Fire and Materials*, 1999, 23(5): 223-226.
- [16] YANG H, NI W, CHEN D, et al. Mechanism of low thermal conductivity of xonotlite-silica aerogel nanoporous super insulation material [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing Mineral Metallurgy Material*, 2008, 15(5): 649-653.
- [17] Havenith G, Heus R. A test battery related to ergonomics of protective clothing [J]. *Applied Ergonomics*, 2004, 35 (1): 3-20.
- [18] 卢业虎. 高温液体环境下热防护服装热湿传递与皮肤烧伤预测[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [19] WANG M, LI X, LI J, et al. A new approach to quantify the thermal shrinkage of fire protective clothing after flash fire exposure [J]. *Textile Research Journal*, 2016, 86(6): 580-592.
- [20] LI X, LU Y, ZHAI L, et al. Analyzing thermal shrinkage of fire-protective clothing exposed to flash fire [J]. *Fire Technology*, 2013, 51(1): 195-211.
- [21] 辛丽莎, 李俊, 王云仪. 防护服装功能设计模式研究 [J]. *纺织学报*, 2011, 32(11): 119-125.
- XIN Lisha, LI Jun, WANG Yunyi. Research on functional design pattern of protective clothing [J]. *Journal of Textile Research*, 2011, 32(11): 119-125. (in Chinese)
- [22] 顾娟, 胡兆燕, 钱锋. 消防服热防护性能检测用热传感器的研究 [J]. *产业用纺织品*, 2007, 25(12): 41-44.
- GU Juan, HU Zhaoyan, QIAN Feng. Research of thermal sensors used in firefighter's clothing thermal protective performance test [J]. *Technical Textiles*, 2007, 25(12): 41-44. (in Chinese)
- [23] Curone D, Secco E L, Tognetti A, et al. Smart garments for emergency operators: the proeTEX project [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2010, 14(3): 694-701.
- [24] 卜宇. 基于传感器的消防员体征监测系统设计 [J]. *信息安全与技术*, 2016, 7(2): 46-48.
- BU Yu. A Wearable intelligent system for monitoring firefighter's physiological state based on embedded sensors [J]. *Information Security and Technology*, 2016, 7(2): 46-48. (in Chinese)
- [25] 李媛媛. 智能消防服系统信息获取与处理关键技术研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [26] Standard Test Method for Evaluation of Flame Resistant Clothing for Protection Against Flash Fire Simulations Using an Instrumented Manikin; ASTM F1930-12 [S/OL]. [2016-08-26]. <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORIC/F1930-12/.htm>
- [27] Protective Clothing Against Heat and Flame Test Method for Complete Garments Prediction of Bum Injury Using an Instrumented Manikin; ISO 13506. 3 [S/OL]. [2016-08-23]. <http://www.doc88.com/p-98334/7894375.html>
- [28] Tickner G, Bendler R. Thermo-man: super textile tester [J]. *Instruments and Control Systems*, 1974, 47(6): 39-42.
- [29] WANG M, LI X, LI J. Correlation of bench scale and manikin testing of fire protective clothing with thermal shrinkage effect considered [J]. *Fibers and Polymers*, 2015, 16(6): 1370-1377.
- [30] Hummel A, Barker R, Lyons K, et al. Development of instrumented manikin hands for characterizing the thermal protective performance of gloves in flash fire exposures [J]. *Fire Technology*, 2011, 47(3): 615-629.
- [31] HE J, WANG M, LI J. Determination of the thermal protective performance of clothing during bench-scale fire test and flame engulfment test: Evidence from a new index [J]. *Journal of Fire Sciences*, 2015, 33(3): 218-231.
- [32] Ellison A D. Thermal manikin testing of fire fighter ensembles [D]. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [33] SONG G. Modeling thermal protection outfits for fire exposures [D]. North Carolina: North Carolina State University, 2003.
- [34] UMBACH K H. Physiological tests and evaluation models for the optimization of the performance of protective clothing [C]//Mekjavic I B, Banister E W, Morrison J B. *Developments in Environmental Ergonomics*. New York: IEEE Computer Society, 1988: 139-161.
- [35] 田苗, 王云仪, 张向辉, 等. 高温防护服的舒适工效性评价与优化对策 [J]. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2013, 39(6): 754-759.
- TIAN Miao, WANG Yunyi, ZHANG Xianghui, et al. Comfort-ergonomics evaluation and optimization of thermal protective clothing [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2013, 39(6): 754-759. (in Chinese)
- [36] Gajdosik R L, Bohannon R W. Clinical measurement of range of motion. Review of goniometry emphasizing reliability and validity [J]. *Physical Therapy*, 1987, 67 (12): 1867-1872. (责任编辑: 卢杰, 邢宝妹)