

文章编号:0253-9721(2013)03-0154-07

# 燃烧假人在火场热防护服装研究中的应用

王 敏<sup>1 2 3</sup>, 李 俊<sup>1 2 3</sup>, 李小辉<sup>1 2 3</sup>

(1. 东华大学 服装·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. 现代服装设计与技术教育部重点实验室(东华大学), 上海 200051)

**摘 要** 热防护性是个体防护服装的重要功能。燃烧假人作为国际公认的定量评估防护装备阻燃性能的专用设备, 在服装热防护研究中发挥着重要作用。通过对国内外相关研究成果的回顾, 介绍了燃烧假人的热防护测评原理、发展历史及我国首个具有国际领先水平的燃烧假人—“东华火人”的创新特征, 重点从不同火场状况的模拟、阻燃面料的评测与选择、服装款式结构对防护性能的影响以及阻燃防护服热传递机制研究等 4 个方面探讨了燃烧假人在服装热防护研究领域中的应用进展, 最后对燃烧假人的应用前景进行了预测分析。

**关键词** 燃烧假人; 东华火人; 热防护研究; 防护服装

中图分类号: TS 941. 17 文献标志码: A

## Application of flame manikin in thermal protective clothing research

WANG Min<sup>1 2 3</sup>, LI Jun<sup>1 2 3</sup>, LI Xiaohui<sup>1 2 3</sup>

(1. Fashion·Art Design Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Protective Clothing Research Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 3. Key Laboratory of Clothing Design & Technology (Donghua University), Ministry of Education, Shanghai 200051, China)

**Abstract** Thermal protective performance is an important function of personal protective clothing. As the worldwide accepted special instrument to quantitatively evaluate the flame retardant property of protective equipments, flame manikin plays an important role in clothing thermal protection research. By reviewing the research achievements both at home and abroad, this paper introduced the working principle and development history of testing and evaluating the thermal protective effect of a flame manikin, as well as the characteristic and innovation of Donghua flame testing manikin, the first of this kind in China, which is leading the world advanced level. It investigated the application progress of flame manikin in clothing thermal protection research mainly from four aspects, that is, simulation of different fire conditions, evaluation and selection of flame retardant fabrics, the effect of garment style and structure on thermal protective performance, and the heat transfer mechanism research on flame retardant protective clothing. And finally, the application prospect of flame manikin was predicted.

**Key words** flame manikin; Donghua flame testing manikin; thermal protection research; protective clothing

在消防救援、工业生产、军事战场等环境中, 人们可能会突然遭遇燃烧的烈火, 需要穿着阻燃隔热防护服以避免人体受到各种热伤害<sup>[1]</sup>。性能优异

的热防护服, 不仅可以更好地加强人体的热防护, 还有利于作业者把握战机, 高效作业, 开展救援工作<sup>[2]</sup>。当前, 世界各国都非常重视阻燃耐热防护装

收稿日期: 2012-02-07 修回日期: 2012-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106022); 上海市教委科研创新项目(12ZZ068); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0321); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(11D10715)

作者简介: 王敏(1984—), 女, 博士生。主要研究方向为服装舒适性及功能。李俊, 通信作者, E-mail: lijun@dhu.edu.cn。

备的研究,而相关测试方法和标准的研究又是进行高性能热防护服及装备研究的基础<sup>[3]</sup>。

在服装热防护性能测评中,常用的小规模面料测试法虽然能够评估面料的热防护性能,但很多学者认为防护服的效能不仅依赖于每层面料的性能,还应该依赖于服装的裁剪、设计以及其他附加功能。因此对防护服性能的测试不能仅仅停留在面料等局部性能的测试上,还需要对服装整体性能进行测试与评估<sup>[4-5]</sup>。燃烧假人作为生物人的替身,在服装整体热防护性能测试中发挥着重要作用。文献[6]指出,燃烧假人系统虽然复杂、精密和昂贵,但是却有很多优点和有用特性。最突出的特点是快速、精确、标准化,可重复地模拟整个人体热交换。文献[7]指出,TPP测试和燃烧假人测试虽然是2种不同的测试方法,但是这2种方法得出的数据对于反映服装的防护性能具有很强的相关性。由于燃烧假人系统的复杂性,国内外拥有燃烧假人的机构很少,相关的文献也不多见。本文就燃烧假人的测试原理,发展历史与现状,国内外研究机构和学者利用燃烧假人所开展的研究进行全面综述,并对燃烧假人的应用前景进行预测分析,以期对利用燃烧假人进行防护服装功能设计提供参考。

## 1 燃烧假人的测试原理

燃烧假人系统由燃烧假人本体和燃烧环境模

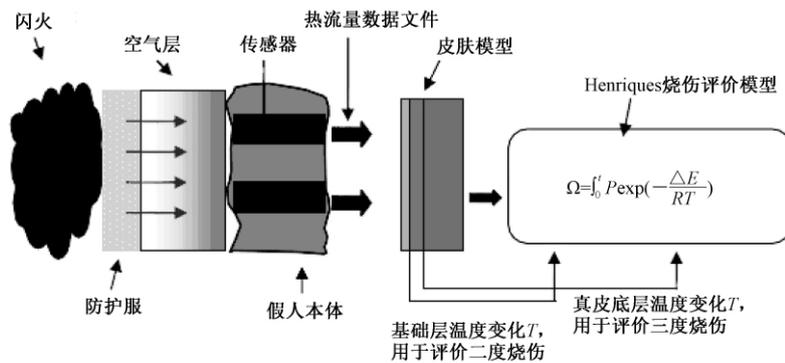


图1 燃烧假人测试系统热传递及烧伤评估模型

Fig.1 Heat transfer and burn degree evaluation model of fire manikin system

## 2 燃烧假人的发展历史与现状

### 2.1 国外发展概况

20世纪40年代,Baker和Smith设计出用于比较衬衫燃烧速度的第1个燃烧假人,但该假人表面

拟实验室构成。通过在燃烧环境模拟实验室中自动控制火焰分布与热流量大小,模拟闪火等火场环境,利用燃烧假人穿着被测服装,再现人体穿着服装的燃烧过程,客观定量评价服装整体热防护性能,预测突发火灾条件下服装对人体提供的保护程度。燃烧假人系统是一个非常复杂系统,它综合运用了生物传热分析技术、材料改性技术、人机工程制造技术、传感器技术、燃烧工程和自动控制技术等多种技术,是集理论、技术、工艺、设备于一体的系统工程。

利用燃烧假人评测烧伤度的过程和原理如图1<sup>[8]</sup>所示。在燃烧假人系统中,假人表面皮肤块被分为100份以上,并在每份上安装传感器。燃烧过程中,燃烧器向假人喷出火焰,热流通过服装及衣下空气层传递到假人表面,温度传感器采集温度,并将这些温度信息转换成相应的热流信息,利用皮肤生物传热模型,如Pennes模型<sup>[9]</sup>、生物热传递热波模型(TWMBT)<sup>[10]</sup>等就可以获得皮肤基础层和真皮底层在整个燃烧过程包括喷火结束后一定时间内的温度变化信息,根据Henriques烧伤积分模型<sup>[11]</sup>,判断皮肤的烧伤度。假人表面每个传感器测定的数据代表所在皮肤块的热力学状态,研究时只需针对每个皮肤块求解,评估其烧伤度,就可得到假人整体的烧伤范围,以体现服装的整体热防护性能。

没有传感器,只能用于定性研究<sup>[12]</sup>。1962年,美国海军首次使用仪器化的燃烧假人进行服装阻燃测试,该假人表面安装了热流传感器和熔点指示器,实现假人测试法定性和定量相结合的重大突破<sup>[13]</sup>。1972年,杜邦公司改进了假人的测试设备和记录系统,并将其命名为Thermo-man<sup>[8]</sup>。该假人身高

185 cm, 身体表面装有 122 个热流传感器, 实验用多个丁烷气体燃烧器模拟各种突发燃烧火焰, 用计算机控制实验过程, 记录实验数据, 统计分析实验结果。报告受到二度烧伤和三度烧伤的人体表面积占人体总表面积的百分比<sup>[14]</sup>。

随后, 基于 Thermo-man 的工作原理, 各个国家研究机构开发的燃烧假人也相继问世, 如美国北卡罗来纳州立大学纺织服装研究中心的 Pyroman (如图 2 所示) 以及加拿大阿尔伯塔大学研制的假人。Pyroman 表面装有 122 个传感器, 周围安装了 8 个燃烧器<sup>[8]</sup>。阿尔伯塔大学的燃烧假人表面装有 110 个热流传感器, 周围安装了 6 个燃烧器<sup>[15]</sup>。实验均采用丙烷气体, 燃烧器点燃后, 丙烷气体所产生的火焰可将假人完全吞没, 计算机控制实验过程, 获取数据, 给出烧伤报告<sup>[8, 15]</sup>。除此之外, 英国、瑞士、韩国、日本等国也相继研制出燃烧假人测试装置<sup>[16]</sup>。

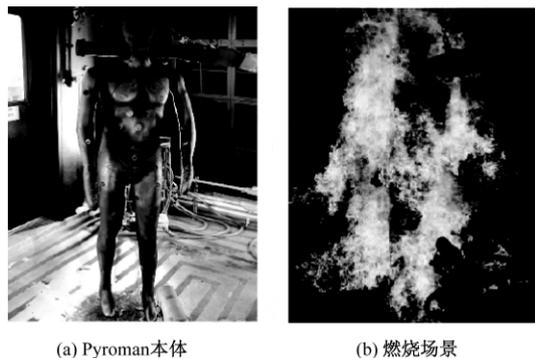


图 2 Pyroman 及其燃烧场景  
Fig. 2 Pyroman (a) and burning scenario (b)

除了全身燃烧假人, 杜邦公司还开发了 Thermo-leg, 其性质与 Thermo-man 类似, 腿部机械装置可动, 并以 3 ~ 4 m/s 速度模拟人体跑步。在 Thermo-leg 的周围有 4 个丙烷燃烧器, 可以喷出 84 kW/m<sup>2</sup> 的闪火。该装置可用来评价动态下服装的局部防护性能<sup>[17]</sup>。

## 2.2 国内发展概况

国内关于燃烧假人的研究起步较晚。上海消防科学研究所曾试制了类似的燃烧假人, 但是由于实验装置油盘火受环境影响较大、热通量不稳定、热接触面积不确定、热辐射屏功率不足、数据采集控制系统软硬件升级等问题, 导致在测试精确度和结果重复性方面存在缺陷<sup>[18-19]</sup>。另外解放军相关机构也有类似研究<sup>[16, 20]</sup>。2011 年, 东华大学建成了具有国际领先水平的燃烧假人系统——“东华火人”, 如图 3 所示。

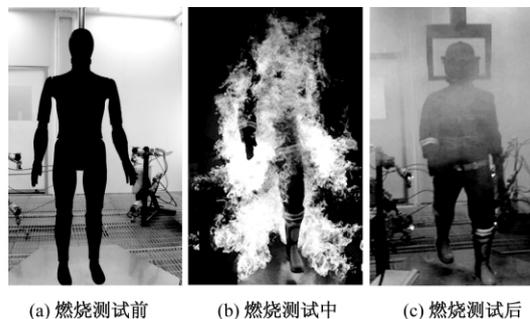


图 3 “东华火人”测试系统  
Fig. 3 Donghua flame testing manikin system.  
(a) Before burning test; (b) During burning test;  
(c) After burning test

相较于世界各国的其他燃烧假人, “东华火人”除满足 ASTM F1930—2000 《用假人评估轰然条件下服装阻燃性能的测试方法》及 ISO 13506—2008 《隔热防火服全套服装的试验方法 用燃烧假人预测烧伤》外, 还具有下列独特特征和领先技术<sup>[21]</sup>:

- 1) 假人本体模拟中国标准男性体型特征, 可以研究服装构成和造型规格的影响;
- 2) 假人颈、肩、肘、腕、髋、膝、踝等关节模拟人体相应部位的活动范畴, 可调节并保持站、坐、跑、匍匐等动作和姿势, 以研究人体姿势对服装防护性能的作用;
- 3) 除在假人本体躯干外, 同时在手、足、头等各个身体部位表面均匀设置 135 个高温传感器, 可对服装以及呼吸装置、头盔、手套和防护靴等热防护装备的热防护性能进行单独或组合测试;
- 4) 在模拟火场条件下, 可以不同的速度自动控制假人实施着装动态模拟实验, 研究运动对人体烧伤防护的影响。

## 3 燃烧假人在热防护服研究中的应用

几十年来, 各国学者利用燃烧假人在服装热防护方面开展了一系列研究, 包括对不同火场状况的模拟、阻燃面料的评测与选择、服装款式结构对防护性能的影响以及防护服热传递机制分析等。

### 3.1 不同火场状况的模拟

与小规模面料测试方法相比, 假人测试的优点之一在于它能更加真实地模拟各种火场状况, 包括不同的火焰大小和人体活动水平等。根据 ASTM F1930—2000 和 ISO 13506—2008, 燃烧假人测试装置一般模拟热源热能为 84 kW/m<sup>2</sup>。实际上根据特定的研究目的, 还可以模拟不同的火场环境。

Joel<sup>[17]</sup>提出并不是所有阻燃防护服都要承受 $84\text{ kW/m}^2$ 的热流,多数情况下,着装者可能只是在火焰周围工作,辐射才是最主要的热传递方式。对于海军日常工作环境来讲,按照能够承受 Thermo-man 测试的标准来设计服装是不经济甚至是不实际的。因此他改进了假人测试装置,并设计滑动装置来模拟舰船上发生的一般火场环境。假人可以静止在燃烧室门口也可以一定速度穿过火焰,以分别测试辐射和对流条件下服装的热防护能力。

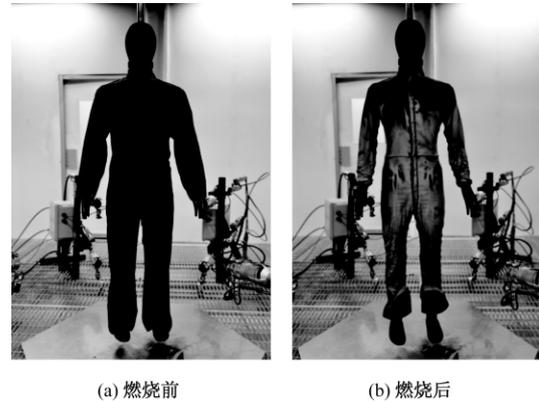
Andrew<sup>[22]</sup>对文献[17]的悬吊装置进行了改进,使得假人可以佩戴帽子和呼吸装置,并通过设置假人穿越火场的速度来获得与 Thermo-man 特定燃烧时间情况下相同的热流量。第1次模拟了动态条件下整体防护服性能测试,使得测试条件与实际更加接近。

### 3.2 阻燃面料的评测与选择

TPP 等小规模测试中,由于面料完全固定,因此无法反映其在测试过程中的动态反应,如热收缩。而燃烧假人测试中,服装自然穿着于人体上,可以观察到燃烧过程中面料的动态变化。文献[8]中,用 Nomex 面料制作的服装在4s的闪火后衣下空气层平均收缩50%,而在腿部收缩近90%;文献[23]“东华火人”测试中,观察到 Nomex 面料制作的服装从第3s开始发生剧烈收缩(如图4所示)。因此燃烧假人可以为面料的测评提供更多参考信息。另外,在 TTP、RPP 测试中,面料都是水平放置,而服装着于人体身上,是垂直的状态,因此热传递的方向不同。Crown 等<sup>[24]</sup>设计了圆筒仪来模拟服装穿着的状态,并将其与不同测试方法(ASTM, CGSB 和 ISO)进行对比,发现圆筒法测试中,面料显示的防护性能比水平放置差。因此利用燃烧假人评价面料的防护性能更为客观和实际。

在利用燃烧假人进行面料评测的研究中, Behnke 等<sup>[25]</sup>比较了静止假人和活动的 Thermo-leg 测试系统。Thermo-leg 可以通过模拟跑步运动来模拟真实情况下受害者逃离火灾现场的情景,以测试动态条件下面料的防护性能。结果表明,在长时间动态接触火焰的情况下保持服装的强度和完整性比防护性更重要。研究中 Nomex III A 和 Kevlar100 性能比 FR cotton 和 FR wool 要好。

Dale 等<sup>[26]</sup>比较了阻燃面料在不同热流条件下的防护性能。发现本身阻燃的面料,如 Nomex<sup>®</sup> III A 以及 Kevlar 和 PBI 的混纺织物,烧伤面积百分比随着热流的增加而稳定增加,而棉阻燃整理织物,在热



(a) 燃烧前 (b) 燃烧后

图4 燃烧前后服装外观对比图

Fig. 4 Garment outer shape comparison. (a) Before burning; (b) After burning

流增加到 $5.97 \sim 8.36\text{ cal/cm}^2$ 时,烧伤面积激增,原因是棉阻燃整理织物的热分解温度比较低。

Rossi 等<sup>[27]</sup>利用假人研究了多种天然和合成纤维的燃烧蔓延速度(FRP)与达到二度烧伤时间的关系。发现 FRP 最大的织物达到二度烧伤的时间最短,而对于一些合成纤维,即使 FRP 较低达到二度烧伤的时间也比较短,这可能与面料的热传递性能有关。

### 3.3 服装款式结构对防护性能的影响

除了面料本身的阻燃耐热性能,服装款式结构对防护性能也有重要影响。空气层影响热传递速度,进而影响达到二度烧伤的时间和面积,而不同的服装款式结构决定了衣下空气层不同的分布状态。

Kim 等<sup>[28]</sup>对穿着前后的假人进行三维扫描,将衣下间隙的分布量化,通过燃烧假人实验分析烧伤度与衣下间隙的关系。研究表明,衣下间隙的分布状态对服装的防护性能具有一定的影响,肩部、胸部等间隙量小的部位更容易引起烧伤。

Song<sup>[29]</sup>也用三维人体扫描仪测量了不同号型防火服的衣下空气层分布,建立了烧伤模型与空气层之间的关系,并用数值模型预测得到最佳空气层厚度为 $7 \sim 8\text{ mm}$ ,超过这个值,空气层中出现对流,防护性能不再随空气层的增加而增加。

Tannie 等<sup>[30-31]</sup>研究了女式防护服和男式防护服防护程度的差异。发现女式服装下背处空气层厚度虽然很大,却没有提高防护性能,主要因为对流的影响。并且由于该部位的隆起,造成了热量在臀部的聚集,臀部烧伤严重。而男款服装由于腰部采用单层面料设计,腰部烧伤严重。

因此服装的款式结构对其防护性能有重要影

响。通过燃烧假人再现人体在火场中的实际穿着状况,对于阻燃防护装备的结构与款式设计具有重要意义。

### 3.4 阻燃防护服热传递机制分析

通过燃烧假人模拟不同燃烧条件,传感器监测人体皮肤表面温度和热流量的变化,获得不同的边界条件,可以为阻燃装备热传递机理研究提供重要的研究手段。

Song<sup>[8]</sup>建立了一个闪火中单层服装热传递的数值模型,研究了面料的热物理性能、闪火环境特征、面料的收缩和合体因子、服装初始温度和测试环境对热防护性能预测结果的影响,并用 Pyroman 进行验证实验。

Matej 等<sup>[32]</sup>建立了一个热传递模型并提供了一种计算逆热传导的有效算法,基于假人燃烧表面传感器所获得的温度数据,利用所提供的算法程序得到皮肤的热流量,进而得到烧伤度的分布。他们还研究了皮肤各层的参数和厚度对烧伤积分计算结果的影响<sup>[33]</sup>。基于燃烧实验中假人表面传感器采集的温度数据,通过改变皮肤的参数,包括导热系数、热容、各层厚度,得到不同参数条件下的烧伤积分。结果发现,真皮层的参数变化决定了最后的烧伤分布。

## 4 燃烧假人的应用前景及展望

### 4.1 假人测试系统的改进

1) 进一步改进传感器,更加接近真实皮肤的性质。在燃烧假人本体设计中,传感器的选用是一个重要的部分。目前使用的传感器主要有铜片传感器和皮肤模拟传感器,但二者都有不足之处。铜片传感器的吸热速度与皮肤有所不同,皮肤的温度上升要比铜片传感器快;而皮肤模拟传感器的密度、热容、散热系数与皮肤都有一定差距<sup>[17]</sup>。因此改进传感器,使之更接近皮肤的热吸收能力,对于提高燃烧假人测试的精确性具有重要意义。

2) 燃烧假人与出汗假人相结合,全面客观评测防护服。目前的测试条件下,无论是 TPP 测试装置还是燃烧假人测试系统都不能模拟水汽传递。而研究表明,水汽对于防护性能具有重要影响,是不可忽略的因素<sup>[34-35]</sup>。消防员在灭火过程中服装经常被淋湿,而消防员本身也会出汗。如果能将燃烧假人改进,可以模拟出汗状态,即实现燃烧假人与出汗假人的完美结合,就可以为防护服的整体测试,无论是

防护性能测试还是舒适性能测试提供更客观的测试结果。

3) 燃烧假人的智能化研究,更加真实模拟救火情况。国际上现有的燃烧假人大部分都不能活动。而活动水平的不同必定影响防护性能的测试结果,因此对热防护性能的评价和研究不能局限于静止状态下的情况。如果给假人装上智能系统,使其像真人一样地活动,就能更加真实地模拟消防员实际救火情况,更加客观全面地评测消防服。

4) 真实再现各种火场状况,拓宽阻燃防护服的研究领域。现行燃烧假人系统只能模拟常规火场环境,但火场中除了火,还有可能有水、烟气、毒,改进燃烧假人测试系统,使其既可以模拟火,又能模拟水、毒、烟气的火场环境,可以拓宽阻燃防护服的研究领域。

### 4.2 应用领域的拓宽

燃烧假人测试技术是国际公认的客观评价服装整体热防护性能的最优技术,作为服装科学与燃烧工程学、生物物理学等交叉的国际前沿尖端科技,科学价值重大。未来其应用领域主要有以下几点:

1) 测试和分析服装。利用燃烧假人测试系统,可以开展各种消防服、军服等防护装备阻燃性能测评及影响因素研究。缩短阻燃新材料与装备研究周期,提高研究水平,促进个体防护装备的发展。

2) 研究人体。利用燃烧假人测试系统,创造真实的火焰-服装-皮肤的环境条件,监测燃烧过程中假人皮肤热流和温度变化,对于进一步进行人体皮肤组织烧伤分析的生物物理学研究提供了有效的数据基础。

3) 安全防护。除了消防服,普通的服装也需要一定的阻燃性能。燃烧假人不仅可以用在军用防护服测试,在民用方面对于推进热防护织物、服装等装备研发,防护火灾和热辐射等危险环境对人体造成的热伤害,也具有重要研究意义。 FZXB

#### 参考文献:

- [1] BARR D, GREGSON W, REILLY T. The thermal ergonomics of firefighting reviewed [J]. Applied Ergonomics, 2010, 41(1): 161-172.
- [2] BARKER R L. A Review of Gaps and Limitation in Test Methods for First Responder Protective Clothing and Equipment [R]. USA: North Carolina State University, 2005.
- [3] 邹振高,刘金文,卢延振. 美国阻燃防护服测试标准现状及发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2007(3):

- 35-38.
- ZOU Zhengao, LIU Jinwen, LU Yanzhen. The current situation and development tendency of American test standard for flame retardant protective clothing [J]. China Personal Protective Equipment, 2007(3): 35-38.
- [4] CAMENZIND M A, DALE D J, ROSSI R M. Manikin test for flame engulfment evaluation of protective clothing: historical review and development of a new ISO standard[J]. Fire and Materials, 2007(31): 285-295.
- [5] HAVENITH G, HEUS R. A test battery related to ergonomics of protective clothing [J]. Applied Ergonomics, 2004(35): 3-20.
- [6] HOLMER I. Thermal manikin history and applications[J]. Journal of Applied Physiology, 2004(92): 614-618.
- [7] BECHNKE W P. Predicting flash fire protection of clothing from laboratory tests using second-degree burn to rate performance [J]. Fire and Materials, 1984, 8(2): 57-63.
- [8] SONG G W. Modeling thermal protection outfit for fire exposures[D]. USA: North Carolina State University, 2002.
- [9] PENNES H H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm [J]. Journal of Applied Physiology, 1948(1): 93-122.
- [10] LIU J, CHEN X, XU L X. New thermal wave aspects on burn evaluation of skin subjected to instantaneous heating [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1999, 46(9): 1037-1043.
- [11] HENRIQUES F C. Studies in thermal injuries: V: the predictability and the significance of thermally induced rate processes leading to irreversible epidermal injury [J]. Archives of Pathology, 1947(43): 489-502.
- [12] NORTON M J T, KADOLPH S J, JOHNSON R F, et al. Design, construction, and use of Minnesota women, a thermal instrumented mannequin[J]. Textile Research Journal, 1985, 55: 5-12.
- [13] STOLL A M, CHIANTA M A. Heat transfer through fabrics as related to thermal injury [J]. Transactions of the New York Academy of Sciences, 1971, 33: 649-669.
- [14] 冯爱芬, 张永久. 用于检测服装隔热防火性能的假人系统[J]. 中国个体防护装备, 2004(2): 23-25.
- FENG Aifen, ZHANG Yongjiu. Manikin system used for testing the thermal protective performance of garment[J]. China Personal Protective Equipment, 2004(2): 23-25.
- [15] CROWN E M, DALE J D. Evaluation of flash fire protective clothing using an instrumented mannequin [R]. Canada: University of Alberta, 1992.
- [16] 蒋毅, 谌玉红, 陈强. “燃烧假人”测试方法中的燃烧系统设计研究[J]. 中国个体防护装备, 2007(5): 5-8.
- JANG Yi, SHEN Yuhong, CHEN Qiang. Research on the burning system design of fire manikin testing method[J]. China Personal Protective Equipment, 2007(5): 5-8.
- [17] JOEL E S. Development of an instrumented dynamic mannequin test to rate the thermal protection provided by protective clothing [D]. USA: Worcester Polytechnic Institute, 2004.
- [18] 公安部上海消防科学研究所. 消防员火场防护基本技术参数及热防护测试装置的研究[J]. 消防技术与产品信息, 1997(7): 36-37.
- Shanghai Fire Science Research Institute of Ministry of Public Security. Research on the basic technical parameters of thermal protection and testing equipment [J]. Fire Control Technology and Product Information, 1997(7): 36-37.
- [19] 曹永强. 国外消防员防护服装隔热性能研究前瞻[J]. 亚洲消防, 2006(5): 26-28.
- CAO Yangqiang. Foreign research on the thermal protective property of firefighter clothes [J]. Asia Fire Control, 2006(5): 26-28.
- [20] 蒋毅, 陈强, 谌玉红, 等. 燃烧假人法中闪火生成系统设计[J]. 纺织学报, 2009, 30(6): 122-125.
- JANG Yi, CHEN Qiang, SHEN Yuhong, et al. Design of the flash fire generation system of fire manikin [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(6): 122-125.
- [21] 王敏, 李小辉. 我国建成国际领先的服装燃烧假人系统“东华火人” [J]. 中国个体防护装备, 2011(5): 54-55.
- WANG Min, LI Xiaohui. China's newly established international leading fire manikin system: Donghua flame testing manikin [J]. China personal protective equipment, 2011(5): 54-55.
- [22] ANDREW D E. Thermal Manikin testing of fire fighter ensembles [D]. USA: Worcester Polytechnic Institute, 2006.
- [23] 翟丽娜. 燃烧试验对防火服形变性能的影响 [D]. 上海: 东华大学, 2012.
- ZAI Lina. The effect of burning test on the deformation of fire protective clothing [D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [24] CROWN E M, DALE J D, BITNER E. A comparative analysis of protocols for measuring heat transmission through flame resistant materials: capturing the effects of thermal shrinkage [J]. Fire Material, 2002(26): 207-213.

- [25] BEHNKE W P , AMOTZ J G , BARKER R L. Thermo-man and thermo-leg: large scale test methods for evaluating thermal protective performance [ J ]. *Performance of Protective Clothing* , 1992 ( 4 ) : 266 - 280.
- [26] DALE J D , CROWN E M , ACKERMAN M Y , et al. Instrumented manikin evaluation of thermal protective clothing [ J ]. *Performance of Protective Clothing* , 1992 ( 4 ) : 717 - 733.
- [27] ROSSI R M , BRUGGMANN G , ROLF S. Comparison of flam spread of textiles and burn injury prediction with a manikin [ J ]. *Fire Material* , 2005 , 29 ( 6 ) : 395 - 406.
- [28] KIM I Y , LEE C , LI P , et al. Investigation of air gaps entrapped in protective clothing systems [ J ]. *Fire Material* , 2002 , 26 ( 3 ) : 121 - 126.
- [29] SONG G W. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [ J ]. *Journal of Industrial Textiles* , 2007 , 36 ( 3 ) : 193 - 205.
- [30] TANNIE M , SONG G W. Investigation of the contribution of garment design to thermal protection: part 1: characterizing air gaps using three-dimensional body scanning for women's protective clothing [ J ]. *Textile Research Journal* , 2010 , 80 ( 13 ) : 1317 - 1329.
- [31] TANNIE M , SONG G W. Investigation of the contribution of garment design to thermal protection: part 2: instrumented female mannequin flash-fire evaluation system [ J ]. *Textile Research Journal* , 2010 , 80 ( 14 ) : 1473 - 1487.
- [32] MATEJ Gasperin , DANI Juricic , BOJAN Musizza. A model-based approach to the evaluation of flame-protective garments [ J ]. *ISA Transactions* , 2008 , 47 ( 2 ) : 198 - 210.
- [33] MATEJ Gasperin , DANI Juricic. The uncertainty in burn prediction as a result of variable skin parameters: an experimental evaluation of burn-protective outfits [ J ]. *Burns* , 2009 , 35 ( 7 ) : 970 - 982.
- [34] WANG Y Y , ZONG Y J , LI J , et al. Evaluating the moisture transfer property of the multi-layered fabric system in firefighter turnout clothing [ J ]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* , 2011 , 19 ( 6 ) : 101 - 105.
- [35] BARKER R L , GUERTH-SCHACHER C , GRIMES R V , et al. Effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing in low-level radiant heat exposures [ J ]. *Textile Research Journal* , 2006 , 76 ( 1 ) : 27 - 31