

# 热防护服装发展现状及趋势

李俊<sup>1,2</sup>, 管曼好<sup>1</sup>

(1. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051; 2. 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:**从阻燃纤维、热防护织物和热防护服装3个方面对热防护服装的构成进行阐述, 讨论热防护服装性能的主要测评和研究方法, 包括织物和服装的热防护性能、织物和服装的热生理性能以及服装的工效性能。根据热防护服装的研究现状, 指出热防护服装的未来发展方向, 主要涉及热防护材料开发、热防护服装综合性能的开发与测评、热防护服装智能化设计及热防护服装开发与测评标准的发展。

**关键词:**热防护服; 热防护性能; 热生理性能; 工效性能; 阻燃材料

**中图分类号:**TS 941.731.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2020)01-0021-10

## Development Status and Trends of Thermal Protective Clothing

LI Jun<sup>1,2</sup>, GUAN Manhao<sup>1</sup>

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

**Abstract:** This paper described the thermal protective clothing from the three aspects of flame retardant fiber, thermal protective fabric and thermal protective clothing. It discussed the main evaluation and research methods of thermal protective clothing performance, including clothing and fabric thermal protective performance, clothing and fabric thermo-physiological effect, and clothing ergonomic performance. According to the research status of thermal protective clothing, the future development directions of thermal protective clothing were discussed, mainly involving the development of thermal protective materials, the development and evaluation of comprehensive performance of thermal protective clothing, the intelligent design of thermal protective clothing, and standards of the development and evaluation of thermal protective clothing.

**Key words:** thermal protective clothing, thermal protective performance, thermo-physiological effect, ergonomic properties, flame retardant materials

应急救援人员和军队士兵在执行任务时往往会受到火焰、辐射、高温液体、高温蒸汽、熔融金属液滴、有害化学液体和毒气等伤害。为保护作业个体的安全, 需穿着特定的功能防护服装, 佩戴特定装备。热防护服装作为功能防护服装的重要类别, 是在极端热环境下和应急救援中保障作业人员生命安全及有效执行任务的关键装备。热防护服装泛指在火灾、高温工业场所等热危害环境下保护人体皮肤免受烧伤的服装, 主要用来减缓环境向人体皮肤传递热量的速度, 延缓皮肤产生烧伤的时间。

热防护服装一般具有防火、隔热、耐磨、耐折、阻燃、反辐射热等特性, 广泛应用于作战、反恐、消防、应急救援等场合以及石油化工、冶金、天然气、食品加工等行业。

## 1 热防护服装构成

### 1.1 阻燃纤维

热防护服装纤维的主要特征之一是具有高阻燃性<sup>[1-3]</sup>。纤维的阻燃性可用燃烧所需最小含氧量, 即极限氧指数(limiting oxygen index, LOI)表达。

收稿日期: 2019-11-20; 修订日期: 2019-12-20。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2232020G-08)。

作者简介: 李俊(1970—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为服装舒适性与功能防护服装等。Email: lijun@dhu.edu.cn

如果纤维的极限氧指数大于21%,则该纤维称为阻燃纤维。根据纤维阻燃特性的形成方法,阻燃纤维可分为常规阻燃纤维和本质阻燃纤维<sup>[2,4]</sup>。常规阻燃纤维是在纤维制造过程中,利用共聚、共混、皮芯复合纺丝或接枝共聚等改性方法,将阻燃剂加入到普通纤维中,以提高纤维阻燃性能<sup>[4]</sup>。常规阻燃纤维原材料易得、生产简便且成本较低。但长期来看,尤其在重复洗涤后,常规阻燃纤维阻燃性不稳定,且在燃烧过程中会释放有毒气体<sup>[2]</sup>。本质阻燃纤维是通过在合成纤维高聚物分子链中引入苯环或者芳杂环来提高纤维热裂解温度,增强合纤高聚物大分子本身的热稳定性能<sup>[5]</sup>,具有较好的高温稳定性和不易发生熔融滴落等优点。本质阻燃纤维适用于建筑火灾救援的热防护服装。由于常规阻燃纤维的极限氧指数(28.4%~35%)大多显著低于本质阻燃纤维的极限氧指数(32%~98%)<sup>[2]</sup>,且无法自动熄灭,因此常规阻燃纤维不适用于高强度火灾环境,而通常用于野火救援或交通救援热防护服装中。

### 1.2 热防护织物

热防护服装可分为单层热防护服装、双层热防护服装和多层热防护服装。单层热防护服装由单层阻燃隔热材料构成。多层热防护服装在不同的国家有不同标准,美国建筑物火灾灭火防护服装标准 NFPA 1971—2018 规定其由外到内包括最外层、防水透气层和隔热层;中国国家行业标准消防员灭火防护服 GA 10—2014 规定其由外到内包括最外层、防水透气层、隔热层和舒适层。多层热防护服装最外层织物通常为机织织物,由于其直接接触火焰等热灾害环境,因此需具备阻燃隔热、高温稳定和无熔融滴落等性能,此外也需具备足够的抗切割、撕裂、刺穿和耐磨性能,并具备相应的色牢度等<sup>[6-7]</sup>。防水透气层既要防止高温液体、高温气体和蒸汽等穿透防护层,也要允许人体的汗气通过服装系统排至环境中,以保证人体的热平衡<sup>[7]</sup>。隔热层主要用于减缓环境向人体热传递的速度,同时保证汗液及时散发到体外,防止热蓄积的产生<sup>[7]</sup>。

### 1.3 热防护服装

根据环境热危害类型,可将热防护服装分为单层阻燃防护服、多层灭火防护服、热辐射防护服、高温液体防护服及高温蒸汽防护服等若干类。此外为应对热危害,也有研究人员对智能降温防护服进行开发。

阻燃、灭火防护服是热防护服装中最常见的类型。单层阻燃防护服主要用于有潜在明火危险的施工环境,要求服装面料具有良好的阻燃性能和高

温隔热性能。多层灭火防护服主要用于火灾救援场所,主要作用是隔绝或减少环境向人体的热量传递,从而使人体处于可承受的温度变化范围内,为解救受困人员提供足够时间。

热辐射防护服通常采用表面镀铝且具有高反射率的织物,但镀铝织物不适用于存在明火的热灾害环境,而适用于作业人员与火灾相隔一定距离的热辐射环境。多层灭火防护服在热辐射环境中也同样适用,目前针对热辐射环境的研究也主要针对这类防护服装展开。

高温液体和蒸汽易穿透服装并释放大量热量,从而造成皮肤损伤,因此减小液体和蒸汽穿透力是高温液体和蒸汽防护的主要要求之一。同时,在高温液体和蒸汽暴露过程中,热防护面料会吸收大量液体,而这些液体在冷却阶段也会不断向皮肤释放热量,因此降低液体吸收和传递能力也是此类热防护服装必须具备的条件<sup>[7]</sup>。

## 2 热防护服装研究现状

现阶段,热防护服装的主要研究方向之一是热防护服装与其织物的性能评价,以及性能所涉及相应机制的探索。性能评价主要涉及热防护性能评价、热生理性能评价及工效性能评价。

### 2.1 热防护性能

热防护性能是指服装或织物阻止环境热量向人体进行传递的性能。热防护性能包括阻燃性能和热传递性能,其中热传递性能为通常狭义所指的热防护性能,其测评主要以皮肤烧伤为生理基础,通常由热暴露环境下皮肤产生二级烧伤的时间进行表征,皮肤达到二级烧伤所需时间越长,热防护服装或织物的热防护性能越好。当前对热防护服装或织物的性能测评和研究主要针对热防护性能。

对材料热防护性能的评价主要针对明火和辐射条件,包括对流辐射混合热暴露、辐射热暴露以及冷却阶段压缩等条件下的热防护性能评价。近年来,随着热防护性能测评设备的进一步开发,对热防护性能的评价也拓展至高温液体和高温蒸汽等热暴露环境下<sup>[8-10]</sup>。相比针对明火、辐射等较为成熟的织物热防护性能评价体系,针对高温液体和高温蒸汽等热暴露下的织物热防护性能评价标准和研究较少。高温液体热防护性能测评标准有 ASTM F2701-08<sup>[11]</sup>,高温蒸汽热防护性能测评尚未出台相关标准。服装热防护性能的研究环境主要为闪火环境<sup>[12-14]</sup>,部分研究涉及高温液体喷溅环境<sup>[15-16]</sup>。

常用的对流和辐射热暴露下热防护服装和织物热防护性能测评标准见表 1<sup>[17-26]</sup>。由于在实际热危害环境中,热防护服装所面临的热暴露情况十分复杂,单一实验不能模拟实际影响热防护服装热防

护性能的全部因素。在现阶段的热防护性能测评方法中,环境因素只考虑特定热源的影响,测试时对热源性质和强度进行模拟,通过热流传感器计量特定热暴露下到达人体皮肤的热流量。

表 1 热防护服装对流、辐射热暴露下热防护性能测评标准

Tab. 1 Evaluation standards for thermal protective performance of thermal protective clothing under convective and radiant heat exposure

测试对象	标准号	标准名	热暴露类型	热流密度/ (kW/m <sup>2</sup> )	评价指标
织 物	ASTM F2700—08	持续热暴露下服用阻燃织物非稳态热传递评估标准测试方法	50% 辐射热、 50% 对流热	84 ± 2	热传递性能
	ASTM F1939—2015	持续热暴露下服用阻燃织物辐射热阻标准测试方法	辐射热	84 ± 2, 21 ± 2	辐射热阻
	ASTM F2731—2018	消防服装系统热传递及热蓄积标准测试方法	辐射热	8. 5 ± 0. 5	测试时间, 烧伤程度
	ASTM F2703—08	考虑皮肤烧伤下服用阻燃织物非稳态热传递评估标准测试方法	50% 辐射热、 50% 对流热	84 ± 2	热性能评估
	ASTM F2702—2015	考虑皮肤烧伤下服用阻燃织物辐射热性能标准测试方法	辐射热	84 ± 2, 21 ± 2	辐射热性能
	ISO 9151—2016	隔热防火防护服——火焰暴露下热传递评估	对流热	80	热传递指标
	ISO 6942—2002	防护服——隔热防火——辐射热暴露下材料和材料系统评估方法	辐射热	5 ~ 80	热传递因子
服 装	ISO 17492—2003	防热、火服装——火焰和辐射热暴露下热传递评估	50% 辐射热、 50% 对流热	80 ± 2	热临界指标, 热传递指标
	ASTM F1930—2018	使用假人评估阻燃服装防火性能标准测试方法	对流热	84 ± 4. 2	预测 2/3 级烧伤 百分比、总烧伤 百分比等
	ISO 13506— 1—2017	隔热防火防护服——第一部分:完整服装测试方法——使用假人测量传递能量	对流热	84 ± 4. 2	总传递能量、能量 传递系数等

**2.1.1 织物热防护性能** 织物热防护性能包括织物阻燃性能和热传递性能。目前研究的热传递性能主要针对热暴露阶段织物对环境热量的隔热性能,部分研究开始关注织物储存的热量在热暴露停止后冷却阶段向皮肤进行释放的性能,称为蓄热性能。

1) 阻燃性能。阻燃性能是保证良好热防护性能的基础,阻燃性能好的织物在热环境中不易发生自身燃烧,可以避免织物从保护层转变为伤害源。常用的阻燃性能测试方法包括垂直燃烧法、45° 倾斜法和极限氧指数法。这 3 种测试方法虽然可以

评价织物的阻燃能力,但是用于服用织物热防护性能评价时,具有难以评价多层织物系统以及未考虑人体烧伤的局限性。

2) 隔热性能。当织物具有相似的阻燃性能时,隔热性能好的织物可以更有效地阻止或减缓热对流、热辐射和热传导的热量传递。19 世纪 70 年代,有学者基于 Stoll 人体皮肤二级烧伤的烧伤准则,提出使用热防护性能(thermal protective performance, TPP)测试装置测试织物的热传递性能<sup>[27]</sup>。基于 TPP 测试方法,ASTM 及 ISO 等标准机构制定了一系列不同热暴露环境下的织物热防护性能测试方

法。但这类评测方法仅考虑织物在热暴露阶段的隔热性能,而未将冷却阶段织物可能释放的热量考虑在内<sup>[28]</sup>。

3)蓄热性能。在热暴露阶段热防护织物内若蓄积了大量热量,在其离开热源的一段时间内,会继续向人体释放其内部蓄积的能量,从而造成烧伤。基于对热暴露结束后冷却阶段织物热蓄积因素的考量,ASTM 机构制定了 ASTM F2703—2008<sup>[20]</sup>和 ASTM F2702—2015<sup>[21]</sup>标准,对涵盖冷却阶段的织物热防护性能进行评估。

基于已有测评标准,国内外学者针对影响织物热防护性能的因素开展了大量实验研究,并对织物热湿传递过程建立数学模型,借助模型对织物热湿传递过程的影响因素进行参数化研究,其影响因素包括热源的性质和强度、水分、纤维的类型和成分、织物的性质(结构参数、热物性等)和变形以及空气层等<sup>[29-33]</sup>。研究中对环境因素的考量,由单一危害因素防护逐渐向多种危害因素综合防护转变。例如,由只考虑对流暴露,到综合评估对流、辐射、传导、蒸汽、高温液体暴露等不同条件下影响织物热防护性能的因素<sup>[34]</sup>;由研究单次危险环境暴露,到分析不同环境的重复暴露对防护服使用寿命的影响<sup>[35-36]</sup>。

**2.1.2 服装热防护性能** 20 世纪 60 年代,美国空军研究所开发了第一个男性燃烧假人以进行烧伤评估<sup>[37]</sup>。20 世纪 80—90 年代,燃烧假人系统陆续在多个研究机构建立,如美国明尼苏达大学<sup>[38]</sup>、加拿大阿尔伯特大学<sup>[39]</sup>和美国北卡州立大学<sup>[40]</sup>。随后,美国伍斯特理工学院<sup>[41]</sup>、瑞士联邦材料科学与技术研究所<sup>[42]</sup>等研究机构也对燃烧假人测试系统进行了研究,部分燃烧假人系统如图 1 所示。另外,东华大学也利用燃烧假人“东华火人”对动态人体的热防护服装热防护性能开展测评工作<sup>[28]</sup>。东华大学燃烧假人系统如图 2 所示。

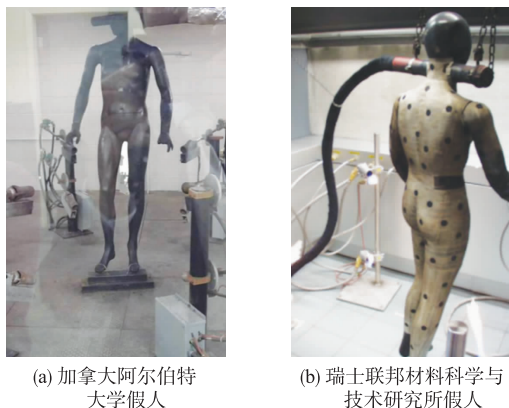


图 1 国外燃烧假人系统

Fig. 1 Foreign flame test manikin system



图 2 东华大学燃烧假人系统

Fig. 2 Flame test manikin system at Donghua University

随着燃烧假人测试系统的建立,ASTM 和 ISO 机构分别制定了 ASTM F1930—2018<sup>[25]</sup>和 ISO 13506-1—2017<sup>[26]</sup>标准,统一规范使用燃烧假人测评服装热防护性能的方法。测评方法包括烧伤预测百分比、烧伤预测分布图及总传递能量值等。

现阶段基于燃烧假人系统的服装热防护性能研究主要针对单层热防护服装,包括单层热防护材料性能、服装尺寸、衣下空气层(包含热收缩后)及燃烧性状与服装热防护性能的关系等<sup>[43-46]</sup>。此外,有研究人员对织物和服装的热防护性能进行了综合研究,基于平板测试和燃烧假人测试,提出最大衰减因子作为定量评估热防护性能的指标,使得平板测试和燃烧假人测试的结果可用同一指标进行比较<sup>[47]</sup>。

## 2.2 热生理性能

热防护服装在提供热、机械等防护的同时,会对使用者施加额外的热应力。受高温环境、高强度工作和厚重服装等因素的影响,人体会产生大量代谢热量。若热防护服装对人体的热量散失产生阻碍,那么热量会蓄积在人体内,使人体产生核心体温升高等热应激反应,甚至导致个体休克、死亡。在消防员致死事故中,由于核心体温升高引发心血管病变所导致的死亡率最高<sup>[48-49]</sup>。

服装对人体热生理表现的影响较复杂,影响因素包括服装热湿传递特征、服装质量和服装体积等。因此,热防护服装在达到热防护性能的同时,也需满足人体热生理性能的要求。参照国际标准 ISO 11092—2014 对服装热生理性能的定义,文中所讨论的热防护服装的热生理性能为热量和水分由人体通过服装向环境散失的能力。现阶段,对热防护服装热生理性能的研究一般包括对热防护织物和服装的热生理性能评估,即对织物或服装在常

规环境下热湿传递性能进行表征,如热阻、湿阻和总热量散失,并研究影响热生理性能的因素。热防护织物及服装热生理性能测评的常用标准见表 2。受标准所采用的环境条件等因素限制,表 2 标准中的指标可能不能合理反映出火场等高温环境下热防护服装的热湿传递性能及其所引起的人体热生

理反应<sup>[50-52]</sup>。因此有学者对标准条件下测得的织物、服装热生理性能指标对高温环境下人体生理热应激的预测能力进行研究<sup>[53]</sup>。此外,针对热防护个体在热环境中可能存在的热应激反应,也有研究人员提出了多种减少热应激的手段,并对相应手段进行评估<sup>[54-58]</sup>。

表 2 热防护服装热生理性能测评标准

Tab. 2 Evaluation standards for thermal physiological performance of thermal protective clothing

测试对象	标准号	标准名	环境温度	评价指标
织 物	ASTM F1868—2017	使用出汗热平板测试服装材料热湿阻的标准方法	热阻:20±0.5℃; 湿阻:35±0.5℃	热阻,湿阻, 总散热量
	ISO 11092—2014	纺织品——生理效应——稳态下热湿阻测量(出汗热平板测试)	热阻:20℃; 湿阻:35℃	热阻,湿阻
	ASTM F1291—2016	使用加热假人测试服装热阻的标准方法	23℃	热阻
服 装	ASTM F2370—2016	使用出汗假人测试服装湿阻的标准方法	35±0.5℃	湿阻
	ISO 9920—2007	热环境工效——服装热湿阻评估	热阻:比皮肤平均 温度低 12℃以上; 湿阻:参考 ASTM F2370—2016	热阻,湿阻

**2.2.1 织物热生理性能** 织物热生理性能的客观评测指标主要包括织物的热阻和湿阻等,一般通过出汗热平板测量获得。织物热阻指织物将人体的干态热量(较高温度)以传导、对流和辐射的方式向环境(较低温度)进行传递时的阻力。织物的湿阻指织物将水蒸气由人体表面(饱和水蒸气压)向环境(较低水蒸气压)进行传递时的阻力。

以往学者的研究主要是测量织物在标准环境下的热阻、湿阻、透气性和水蒸气渗透率等指标,以表征织物热湿传递等性能,并研究纤维类型、织物结构和基本参数(如厚度、面密度)、材料老化等因素对织物热湿传递性能的影响<sup>[59-63]</sup>。也有研究人员利用人体-服装-环境模拟器研究热防护服装多层织物系统在不同温度和相对湿度环境下的热湿传递<sup>[64]</sup>。

**2.2.2 服装热生理性能** 服装热生理性能的客观评测指标包括服装的热阻和湿阻,两者定义与织物热阻和湿阻的定义相同,通常采用暖体假人进行测

评获得。GAO C 等<sup>[65]</sup>采用瑞典隆德大学假人 Tore、香港理工大学假人 Walter 和美国西北公司假人 Newton 等不同类型的暖体假人,对防护服装在标准环境下的热阻和湿阻进行测评,分析不同假人测试结果之间的差异。考虑到实际作业环境下,作业人员会受到热辐射暴露的影响,欧盟 ThermProtect 项目通过在气候舱内设置辐射热源模拟热辐射暴露,利用暖体假人对单层、双层和多层防护服的热传递进行测量,分析了服装阻值、反射率和内衣润湿等因素对热传递的影响<sup>[50]</sup>。WANG Y 等<sup>[66]</sup>通过人体实验评估了内外服装组合对消防服热湿舒适等级的影响,对常规环境下(28℃和 15℃)着装人体心肺指标、衣下微环境的温度和相对湿度以及主观感觉进行评估,分析了不同材质内衣对服装总体舒适性能的影响。此外,张向辉等<sup>[67]</sup>指出可通过优化热防护服装的结构设计来有效促进人体的热湿平衡,提高着装舒适性。常见暖体假人系统如图 3 所示<sup>[68-69]</sup>。



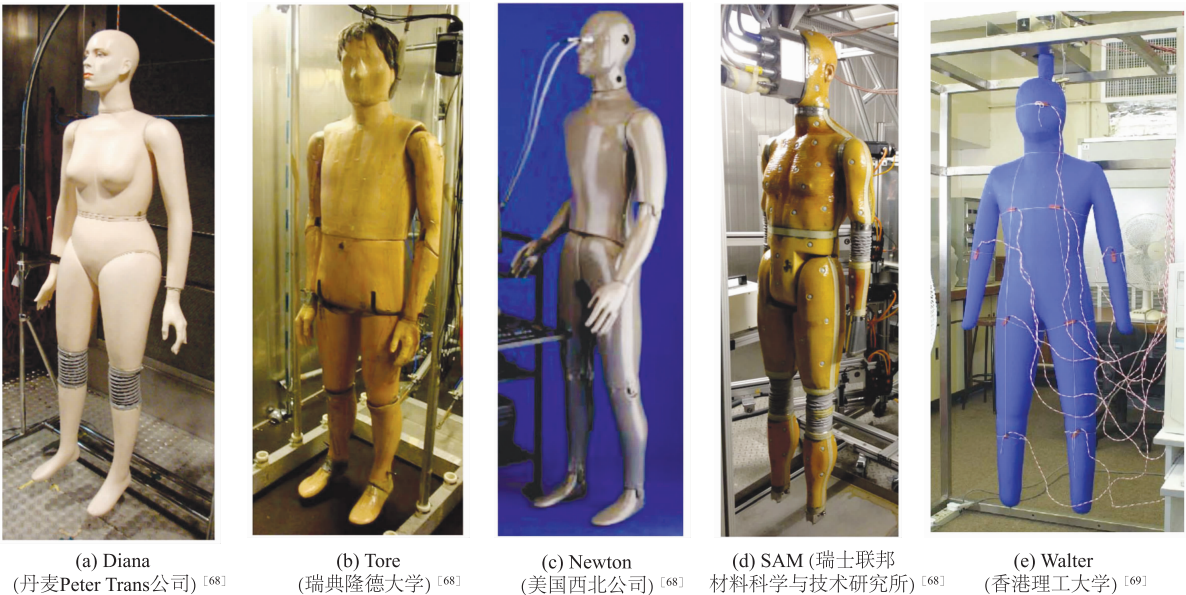


图 3 常用暖体假人系统

Fig. 3 Common thermal manikin systems

**2.2.3 冷却手段** 针对热防护个体在热环境下可能遇到的热应激问题,学者们对相应冷却手段进行了开发,并对其有效性进行了评估。开发的冷却手段包括相变降温背心<sup>[54]</sup>、通风服<sup>[55]</sup>、超吸水材料<sup>[56]</sup>、气凝胶涂层整理<sup>[57]</sup>以及风扇预冷却<sup>[58]</sup>等。

**2.3 工效性**

除热防护性能和热生理性能外,也应考虑热防护服装的人体工效学因素,如穿脱方便性、动作灵活性等。热防护服装可以对热、机械等多重危害提供防护,但服装的质量和体积可能会限制人体活动,增加肌肉应力<sup>[70-73]</sup>,从而增加人体能量消耗,并影响人的工作表现<sup>[74]</sup>。研究表明,在热防护服装、头盔、呼吸器和消防靴等热防护装备中,热防护服装是影响消防员能量消耗程度的重要因素之一<sup>[75]</sup>。

科研人员基于活动角 (range of motion, ROM)<sup>[70-73, 76]</sup>和动作捕捉仪<sup>[77-78]</sup>研究了热防护服装对人体活动性的影响。一些研究探讨了新型消防服<sup>[70]</sup>和局部服装设计特征<sup>[72]</sup>对人体活动性的影响。研究表明,可通过优化防护服装的结构设计增加动作活动范围,提高动作灵活性。但目前对于防护服装结构设计的研究尚缺乏系统的理论体系<sup>[67]</sup>。

**3 热防护服装发展趋势**

中国在高性能多功能热防护服装开发及产业化方面需提供基础理论支撑与集成设计新技术,要在高性能面料开发、服装构成设计、服装性能评价

等基本理论研究的基础上,进一步开展原创性的科学研究,建立高性能多功能热防护服装研发基础理论体系。此外,热防护服装的发展还要加强研究机构与产业界的密切合作,针对多重危害环境展开研究,尽快将高性能、智能型材料和现代高新技术结合应用于新型高性能热防护服装上。

**3.1 热防护纤维和面料高性能发展**

对位芳纶纤维、间位芳纶纤维、PBO 纤维、PBI 纤维等热防护耐高温阻燃纤维,一般作为航空航天、国防军事领域的战略物资进行研发,也被用于防护服装领域。近年来,碳纤维技术快速发展,已在航空航天、汽车、电力等领域广泛应用,未来可应用于个体防护领域<sup>[79]</sup>。此外,可研发新型结构的服装材料,提高材料热阻、通风性、液态水管理能力和抗压缩能力等;利用人工材料模拟自然界生物体的结构和性能,以获得具有特殊结构的高性能面料。

**3.2 热防护服装舒适性发展**

高性能热防护服装的研制应在满足热防护性能的基础上,提升热防护服装的舒适性,降低人体热应激反应。通过研发高过滤性和高透气性的多功能薄膜、进行相变材料的应用、发展静电纺纳米材料等方法,在确保热防护性的同时减轻人体热应激,是高性能热防护服装的主流发展方向。

**3.3 热防护服装多功能化集成发展**

面对多样化的灾害环境,防护服装的研发要集多种防护功能于一体。防护服装在生化防护的同时,需兼备阻燃性、抗静电性、抗核辐射等性能,以应对未来高技术战争、生化恐怖袭击、突发公共事

件等状况。这些技术难点的突破可带动整个防护服装行业的发展和技术革新。

### 3.4 热防护服装工效学设计与评价发展

目前热防护服装的性能评价体系中,对服装工效学的设计和评价鲜有涉及。传统的热防护服装较厚重,灵活性和舒适性差,影响着装者的工作效率。热防护服装的发展要以改善工效学性能为方向,既要最大限度地使穿着者躯干与肢体活动自如,减少牵制,又要尽可能使服装结构简化,减少臃肿,降低能量消耗。

### 3.5 热防护服装智能化设计发展

随着计算机模拟技术的发展,功能防护服装设计可实现模块化、智能化<sup>[12]</sup>。开发智能化的设计和评测系统能为智能设计和决策提供评判标准,实现服装的虚拟设计。例如,借鉴“材料基因组”计划模式,建立基于大数据的新型热防护服装研发创新模式。

随着可穿戴技术和智能纺织品的发展,在传统热防护服装上添加监测传感器,借助数据分析平台实时掌握灾害现场的情况,可指导应急救援人员有效开展工作。国内智能服装的研究现阶段集中于材料和电子工程方面,而材料和电子技术与服装的交互研究尚处于初期阶段,服装结构和舒适性的相关研究还未出现。现阶段市场上仍缺乏成熟的智能服装产品,原因包括学科交叉型研究少、研究成果尚不具备产业化要素等。

### 3.6 热防护服装标准发展

可按照热防护服装的不同等级设立相应标准,提出不同级别热防护服装的技术要求与相应的检测方法。同时,由于热防护服装的发展趋向多功能性,因此可建立热防护服装性能的综合测评平台和相应标准,测评着装者面临多重危害时服装的防护性能。此外,可建立大型防护性能检测实验室和相应标准,为防护服装的整体性能评价提供保障。

## 4 结 语

热防护服装的研究可涉及热防护用纤维、织物和服装 3 个层面,现阶段的主要研究方向之一是热防护织物和服装的性能测评和研究,包括织物和服装层面的热防护性能与热生理性能,以及服装层面的工效性能。目前的性能测评和研究仍主要集中于热防护性能,且主要针对对流和辐射热暴露环境,对其他热暴露环境的考量相对较少;对热生理性能和工效性能的有效测评及研究仍有待发展。

未来热防护服装可在材料高性能、服装热生理性能、工效性能及多功能集成、服装智能化设计、服装开发和测评标准等方面进一步发展。

### 参考文献:

[ 1 ] HORROCKS A R. Developments in flame retardants for heat and fire resistant textiles—the role of char formation and intumescence[J]. Polymer Degradation and Stability, 1996,54(6): 143-154.

[ 2 ] SONG G, MANDAL S, ROSSI R M. Thermal protective clothing for firefighters [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017:27-55.

[ 3 ] BAJAJ P. Fire-retardant materials[J]. Bulletin of Materials Science, 1992,15(1): 67-76.

[ 4 ] 邹振高,王西亭,施楣梧. 常规阻燃纤维的技术现状与发展趋势[J]. 纺织导报, 2006(3): 45-49.  
ZOU Zhengao, WANG Xiting, SHI Meiwu. The present and future of conventional flame-retardant fibers[J]. China Textile Leader, 2006(3): 45-49. (in Chinese)

[ 5 ] 陈沁,赵涛. 阻燃纤维及纺织品的研究进展[J]. 印染, 2015,41(5): 49-54.  
CHEN Qin, ZHAO Tao. Research development of flame retardant fibers and textiles [J]. Dyeing and Finishing, 2015,41(5): 49-54. (in Chinese)

[ 6 ] TORVI D A, HADJISOPHOCLEUS G V. Research in protective clothing for firefighters: state of the art and future directions[J]. Fire Technology, 1999,35(2): 111-130.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] LU Y, SONG G, ACKERMAN M Y, et al. A new protocol to characterize thermal protective performance of fabrics against hot liquid splash[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013,46(4): 37-45.

[ 9 ] MANDAL S, LU Y, WANG F, et al. Characterization of thermal protective clothing under hot water and pressurized steam exposure[J]. AATCC Journal of Research, 2014,1(5): 7-16.

[ 10 ] SU Y, LI J. Development of a test device to characterize thermal protective performance of fabrics against hot steam and thermal radiation [J]. Measurement Science and Technology, 2016,27(12): 12-27.

[ 11 ] Standard test method for evaluating heat transfer through materials for protective clothing upon contact with a hot liquid splash: ASTM F2701-08 [S/OL]. [ 2019-11-01 ]. <https://www.astm.org/standards/F2701.htm>.

[ 12 ] LEE C, KIM I Y, WOOD A. Investigation and correlation of manikin and bench-scale fire testing of clothing systems [J]. Fire Materials, 2002,26(6): 269-278.

[ 13 ] ZHANG M, SONG G. Instrumented flash fire manikin for

- maximizing protective clothing performance[J]. *Firefighters' Clothing Equipment: Performance, Protection and Comfort*, 2018(1):287.
- [14] WANG M, LI J. Thermal protection retention of fire protective clothing after repeated flash fire exposure[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 46(3):737-755.
- [15] LU Y, SONG G, LI J. Analysing performance of protective clothing upon hot liquid exposure using instrumented spray manikin[J]. *Annals of Work Exposures and Health*, 2013, 57(6):793-804.
- [16] LU Y, SONG G, WANG F. Performance study of protective clothing against hot water splashes: from bench scale test to instrumented manikin test[J]. *Annals of Work Exposures and Health*, 2014, 59(2):232-242.
- [17] Standard test method for unsteady-state heat transfer evaluation of flame resistant materials for clothing with continuous heating; ASTM F2700—2013[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F2700.htm>.
- [18] Standard test method for radiant heat resistance of flame resistant clothing materials with continuous heating; ASTM F1939—2015[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F1939.htm>.
- [19] Standard test method for measuring the transmitted and stored energy of firefighter protective clothing systems; ASTM F2731—2018[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F2731.htm>.
- [20] Standard test method for unsteady-state heat transfer evaluation of flame resistant materials for clothing with burn injury prediction; ASTM F2703—2013[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F2703.htm>.
- [21] Standard test method for radiant heat performance of flame resistant clothing materials with burn injury prediction; ASTM F2702—2015[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F2702.htm>.
- [22] Protective clothing against heat and flame—determination of heat transmission on exposure to flame; ISO 9151—2016[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.iso.org/standard/55326.html>.
- [23] Protective clothing—protection against heat and fire—method of test; evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat; ISO 6942—2002[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.iso.org/standard/26327.html>.
- [24] Clothing for protection against heat and flame—determination of heat transmission on exposure to both flame and radiant heat; ISO 17492—2003[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.iso.org/standard/30698.html>.
- [25] Standard test method for evaluation of flame-resistant clothing for protection against fire simulations using an instrumented manikin; ASTM F1930—2018[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.astm.org/standards/F1930.htm>.
- [26] Protective clothing against heat and flame—part 1: test method for complete garments—measurement of transferred energy using an instrumented manikin; ISO 13506—1—2017[S/OL]. [2019-11-01]. <https://www.iso.org/standard/63839.html>.
- [27] BEHNKE W P. Thermal protective performance test for clothing[J]. *Fire Technology*, 1977, 13(1):6-12.
- [28] 翟丽娜, 李俊. 服装热防护性能测评技术的发展过程及现状[J]. *纺织学报*, 2015, 36(7):162-168.
- ZHAI Lina, LI Jun. Development and current status on performance test and evaluation of thermal protective clothing[J]. *Journal of Textile Research*, 2015, 36(7):162-168. (in Chinese)
- [29] LEE Y M, BARKER R L. Thermal protective performance of heat-resistant fabrics in various high intensity heat exposures[J]. *Textile Research Journal*, 1987, 57(3):123-132.
- [30] LEE Y M, BARKER R L. Effect of moisture on the thermal protective performance of heat-resistant fabrics[J]. *Journal of Fire Sciences*, 1986, 4(5):315-331.
- [31] SHALEV I, BARKER R L. Analysis of heat transfer characteristics of fabrics in an open flame exposure[J]. *Textile Research Journal*, 1983, 53(8):475-482.
- [32] LI J, LI X, LU Y, et al. A new approach to characterize the effect of fabric deformation on thermal protective performance[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4):133-140.
- [33] LU Y, LI J, LI X, et al. The effect of air gaps in moist protective clothing on protection from heat and flame[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2013, 31(2):99-111.
- [34] MANDAL S, SONG G W, ACKERMAN M, et al. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures[J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83(10):1005-1019.
- [35] CUI Z Y, MA C J, LV N. Effects of heat treatment on the mechanical and thermal performance of fabric used in firefighter protective clothing[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2015, 23(2):74-78.
- [36] ROSSI R M, ZIMMERLI T. Breathability and protection aspects of moisture barriers used in fire fighters protective clothing after thermal aging[M]//STULL J, SCHWOPE A. Performance of protective clothing; 6th volume. West Conshohocken: ASTM International, 1997:238-247.
- [37] STOLL A M. Thermal protection capacity of aviator's textiles[J]. *Aerospace Medicine*, 1962(33):846-850.
- [38] NORTON M J T, KADOLPH S J, JOHNSON R F, et al. Design, construction, and use of Minnesota woman, a thermally instrumented mannequin[J]. *Textile Research Journal*, 1985, 55(1):5-12.
- [39] CROWN E M, DALE J D. Evaluation of flash fire protec-



- tive clothing using an instrumented mannequin[R]. Edmonton: University of Alberta, 1992.
- [40] BEHNKE W P, GESHURY A J, Barker R L. Thermo-man® and thermo-leg: large scale test methods for evaluating thermal protective performance, in performance of protective clothing[J]. ASTM International, 1992 (1): 266-280.
- [41] SIPE J E. Development of an instrumented dynamic mannequin test to rate the protection provided by protective clothing[D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2004.
- [42] ROSSI R M, BRUGGANN G, STAMPFLI R. Comparison of flame spread of textiles and burn injury prediction with a manikin [J]. Fire and Materials, 2005, 29 (6): 395-406.
- [43] HUANGFU X D, WANG M, LI J. Analyzing the combustion characters of fire protective clothing exposed to flash fire [J]. Advanced Materials Research, 2013 (7): 821-822.
- [44] MAH T, SONG G. 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.
- [45] MAH T, SONG G. 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.
- [46] SONG G. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment[J]. Journal of Industrial Textiles, 2007, 36(3): 193-205.
- [47] 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.
- [48] KUNADHARAJU K, SMITH T D, DeJoy D M. Line-of-duty deaths among US firefighters: an analysis of fatality investigations[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43 (3): 1171-1180.
- [49] LJUBICIC A, VARNAI V M, PETRINEC B, et al. Response to thermal and physical strain during flashover training in Croatian firefighters [J]. Applied Ergonomics, 2014, 45 (3): 544-549.
- [50] Brode P, Kuklane K, Candas V, et al. Heat gain from thermal radiation through protective clothing with different insulation, reflectivity and vapour permeability[J]. International Journal of Occupational Safety Ergonomics, 2010, 16 (2): 231-244.
- [51] GUAN M H, ANNAHEIM S, CAMENZIND M, et al. Moisture transfer of the clothing—human body system during continuous sweating under radiant heat [J]. Textile Research Journal, 2019, 89(21): 4537-4553.
- [52] GUAN M H, PSIKUTA A, CAMENZIND M, et al. Effect of perspired moisture and material properties on evaporative cooling and thermal protection of the clothed human body exposed to radiant heat [J]. Textile Research Journal, 2018, 89(18): 3663-3676.
- [53] KIM J H, POWELL J B, ROBERGE R J, et al. Evaluation of protective ensemble thermal characteristics through sweating hot plate, sweating thermal manikin, and human tests [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2014, 11(4): 259-267.
- [54] CARTER J M, RAYSON M P, WILKINSON D M, et al. Strategies to combat heat strain during and after firefighting [J]. Journal of Thermal Biology, 2007, 32(2): 109-116.
- [55] GLITZ K J, SEIBEL U, ROHDE U, et al. Reducing heat stress under thermal insulation in protective clothing: microclimate cooling by a "physiological" method[J]. Ergonomics, 2015, 58(8): 1461-1469.
- [56] HOUSHYAR S, PADHYE R, TROYNIKOV O, et al. Evaluation and improvement of thermo-physiological comfort properties of firefighters' protective clothing containing super absorbent materials[J]. The Journal of the Textile Institute, 2015(12): 1394-1402.
- [57] SHAID A, FERGUSON M, WANG L. Thermophysiological comfort analysis of aerogel nanoparticle incorporated fabric for fire fighter's protective clothing [J]. Chemical and Materials Engineering, 2014, 2(2): 37-43.
- [58] TOKIZAWA K, SAWADA S, OKA T, et al. Fan-precooling effect on heat strain while wearing protective clothing[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58 (9): 1919-1925.
- [59] YOO S, BARKER R L. Moisture management properties of heat-resistant workwear fabrics—effects of hydrophilic finishes and hygroscopic fiber blends[J]. Textile Research Journal, 2004, 74(11): 995-1000.
- [60] SUN G, YOO H S, ZHANG X S, et al. Radiant protective and transport properties of fabrics used by wildland firefighters [J]. Textile Research Journal, 2000, 70 (7): 567-573.
- [61] WANG Y, ZONG Y, LI J, et al. Evaluating the moisture transfer property of the multi-layered fabric system in firefighter turnout clothing[J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe, 2011, 19(6): 101-105.
- [62] RACHID E A, DOLEZ P, VU-KHANH T. Effect of thermal aging on the mechanical and barrier properties of an e-PTFE/Nomex® moisture membrane used in firefighters' protective suits[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011(5): 3101-3110.
- [63] ELAIDANI R, PHUONG N T, MALAJATI Y, et al. Photo-

- chemical aging of an e-PTFE/Nomex® membrane used in firefighter protective clothing [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013(7):1300-1310.
- [64] HE J Z, LI J, KIM E. Assessment of the heat and moisture transfer in a multilayer protective fabric system under various ambient conditions[J]. *Textile Research Journal*, 2015, 85(3):227-237.
- [65] GAO C, HOLMER I, FAN J, et al. The comparison of thermal properties of protective clothing using dry and sweating manikins[C]//Proceedings of the 3rd European conference on protective clothing (ECPC) and NOKO-BETEF, Gdynia; Protective Clothing (ECPC) and NOKO-BETEF, 2006:10-12.
- [66] WANG Y, ZHANG Z, LI J, et al. Effects of inner and outer clothing combinations on firefighter ensembles' thermal and moisture-related comfort levels[J]. *Journal of the Textile Institute*, 2013(5):530-540.
- [67] 张向辉, 王云仪, 李俊, 等. 防护服装结构设计对穿着舒适性的影响[J]. *纺织学报*, 2009, 30(6):138-144.
- ZHANG Xianghui, WANG Yunyi, LI Jun, et al. Effects of structure design on comfort of protective clothing[J]. *Journal of Textile Research*, 2009, 30(6):138-144. (in Chinese)
- [68] PSIKUTA A, KUKLANE K, BOGDAN A, et al. Opportunities and constraints of presently used thermal manikins for thermo-physiological simulation of the human body[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(3):435-446.
- [69] FAN J T, CHEN Y S. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(7):1115.
- [70] COCA A, ROBERGE R, SHEPHERD A, et al. Ergonomic comparison of a chem/bio prototype firefighter ensemble and a standard ensemble[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008(2):351-359.
- [71] HUCK J. Protective clothing systems: a technique for evaluating restriction of wearer mobility [J]. *Applied Ergonomics*, 1988, 19(3):185-190.
- [72] HUCK J. Restriction to movement in fire-fighter protective clothing: evaluation of alternative sleeves and liners[J]. *Applied Ergonomics*, 1991, 22(2):91-100.
- [73] COCA A, WILLIAMS W J, ROBERGE R J, et al. Effects of fire fighter protective ensembles on mobility and performance[J]. *Applied Ergonomics*, 2010, 41(4):636-641.
- [74] ADAMS P S, SLOCUM A C, KEYSERLING W M. A model for protective clothing effects on performances[J]. *International Journal of Clothing Science Technology*, 1994, 6(4):6-16.
- [75] TAYLOR N A S, LEWIS M C, NOTLEY S R, et al. A fractionation of the physiological burden of the personal protective equipment worn by firefighters [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012(8):2913-2921.
- [76] ADAMS P S, KEYSERLING W M. Three methods for measuring range of motion while wearing protective clothing: a comparative study[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1993, 12(3):177-191.
- [77] PARK H, KIM S, MORRIS K, et al. Effect of firefighters' personal protective equipment on gait[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 48(5):42-48.
- [78] PARK H, TREJO H, MILES M, et al. Impact of firefighter gear on lower body range of motion[J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015, 27(2):315-334.
- [79] 阎迪, 郝爱萍. 功能性防护服及新材料应用[J]. *棉纺织技术*, 2012, 40(2):65-68.
- YAN Di, HAO Aiping. Functional protective clothing and new material application[J]. *Cotton Textile Technology*, 2012, 40(2):65-68. (in Chinese)

(责任编辑:卢杰,沈天琦)