

多灾害环境下热防护服装防护性能研究进展

卢业虎^{1,2}, 王丽君¹

(1. 苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215006; 2. 南通纺织丝绸产业技术研究院, 江苏 南通 226300)

摘要:热防护服具有减缓热传递、减少穿着者皮肤损伤的作用。为提高应急救援人员的工作效率,保障他们的生命安全,开发性能优良的热防护服刻不容缓。通过总结近几年多灾害环境下热防护服的研究进展,概括热防护服的产品标准和测试标准,从灾害因子、服装因子和人体因子3方面分析影响服装防护性能的因素,预测热防护服防护性能研究的发展趋势。分析表明:热防护材料的性能测试标准相对比较成熟,而服装整体性能的测试体系仍不完善;热防护服的防护性能取决于灾害因子、服装因子和人体因子的单一和交互作用;服装热湿传递模拟从一维单层干态模型逐步发展到三维单层CFD模型。

关键词:热灾害;防护性能;热防护服;空气层;热湿传递

中图分类号:TS 941.731.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2020)01-0031-09

Research Progress on Protective Performance of Thermal Protective Clothing in Multiple Hazardous Environments

LU Yehu^{1,2}, WANG Lijun¹

(1. College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Nantong Textile and Silk Industrial Technology Research Institute, Nantong 226300, China)

Abstract: Thermal protective clothing can slow down the heat transfer and reduce skin damage of the wearers. The development of thermal protective clothing with good performance is of great significance for emergency rescuers to improve work efficiency and ensure their life safety. In this study, the research progress in this area was summarized, the product standards and testing standards for thermal protective clothing were gathered. The factors affecting clothing protective performance were analyzed from three aspects, including hazards factor, clothing factor and human factor, and research progress of heat and moisture transfer model for thermal protective clothing was discussed. Finally, the development trend of the protective performance of thermal protective clothing was predicted. The results show that the test standards for flame retardant materials are relatively sufficient, whereas the test systems for full scale garments are still weak. The thermal protective performance of protective clothing depends on hazards factor, clothing factor, human factor and their interactions. In addition, the simulation of heat and moisture transfer are developed from 1D single layer model for dry fabric to 3D CFD clothing model.

Key words: thermal hazards, thermal protective performance, thermal protective clothing, air gap, heat and mass transfer

战场、消防、应急救援和石油化工等从业人员常遭受各种潜在的热灾害,包括强烈的火焰、辐射、高温气体、熔融金属液滴、蒸汽、高温液体飞溅物、化学液体、易燃物体燃烧产生的浓烟和有毒气体等。消防员和应急救援人员在进行灭火救援时身体和心理遭到极大考验。性能优良的热防护服可

收稿日期:2019-11-15; 修订日期:2020-01-17。

基金项目:苏州市重点产业技术创新项目(SYG201812);南通市科技计划项目(JC2018039);中国纺织工业联合会科技指导性项目(2019020)。

作者简介:卢业虎(1986—),男,副教授,硕士生导师。主要研究方向为智能服装、防护服装研发与工效学评价。

Email: yhlu@suda.edu.cn

以保障应急救援人员的生命安全,提高救援效率。行业内相关研究人员已从各个方面对热防护服的防护性能展开研究,并制定了热防护服相关标准。文中总结了近几年多灾害环境下热防护服的研究进展,概括了热防护服的产品标准和测试标准,从灾害因子、服装因子和人体因子 3 方面分析了影响服装防护性能的因素,讨论了防护服装的热湿传递模型,预测了热防护服研究的发展趋势。

1 热灾害

1.1 火焰

火焰是消防、石油、石化或航空航天行业工人可能遇到的火灾危险之一。常规火灾救援中,火焰温度在 400 ℃ 左右,而在工业火灾中,火焰温度可达 800 ~ 2 500 ℃。消防员暴露在火焰中的时间通常很短(3 ~ 5 s),但高温和对流热对人体危害程度相对较高,易造成人体伤亡。

1.2 热辐射

灭火救援时,一般建筑物火灾引起的热辐射通常在 5 ~ 10 kW/m²,当发生炼油厂、化工厂、钢铁厂等工业火灾或森林火灾时,热辐射的强度可达到 200 kW/m²^[1],且辐射面积广。热辐射除了作用在人体外表,还对人体深部组织有影响。此类火灾相对湿度较低,易形成干态环境,从而导致起火物品温度高、燃烧猛烈。该类火场灭火救援作战时间一般为 6 ~ 8 h,甚至需要连续作战 24 h,长时间高温作业易造成消防员身体严重疲劳^[2]。

1.3 高温液体

高温液体灾害可能发生在家庭住宅、工业用地等区域。一般热水的温度可以达到 85 ℃ 左右,接触人体时有一定的压力,并且会立即形成烫伤。同时,喷射出的热水流所具有的压力会压缩服装内部空气层,降低服装隔热性能,造成皮肤的潜在烫伤。除热水外,食用油、石油等液体在工业加工过程中温度远高于 100 ℃,碰到皮肤后会形成更严重烫伤^[3]。此外,油状液体的黏度较大,接触服装后在服装表面停留的时间更长,会持续向内部皮肤传递热量,加大了皮肤烫伤的可能性。

1.4 蒸汽

消防员在高温环境消防作业时,由于消防水枪或环境中的水分受热蒸发形成蒸汽,造成皮肤蒸汽烫伤。高压蒸汽广泛应用于工业领域,可一旦发生泄漏则危害极大,如海军和能源部门的从业人员或因高压蒸汽管道泄漏而暴露在蒸汽灾害环境下。

通常蒸汽压力高达 100 ~ 4 000 kPa,温度为 100 ~ 300 ℃。此外,高压蒸汽环境下,防护服可能会被高压蒸汽压缩,从而传递至人体皮肤的热量增加^[4]。消防员所处的火场在高温环境中,高温蒸汽和高温液态水环境占 60% ~ 70%,这是导致消防员烧伤的主要因素,而由火焰产生的烧伤仅占 20% 左右^[5]。

1.5 电弧

电弧是高压电器在短路或介质被击穿情况下的瞬时放电,会产生巨大的热量和热冲击,电弧产生的能量可高达 8 ~ 60 MW。电弧灾害的特点是持续时间短,但所携带的能量极高。短时间的高能量聚集会对周围的人造成致命伤害。一般普通火灾事故中产生的对流热和辐射热能量各占 50%,而在电弧灾害下,辐射热产生的能量占 90%,即使没有火焰也会造成严重的危害。

2 热防护服标准

2.1 服装产品标准

中国现行的防护服标准主要有消防服标准 GB 8965.1—2009 和 GA 10—2014、抗熔融金属飞溅物标准 GB/T 17599—1998、劳动和劳动安全行业标准 LD 58—1994、电力行业防电弧服标准 DL/T 320—2010 等。

美国国家防火协会(National Fire Protection Association)制定有消防服标准 NFPA 1971 和 NFPA 1977;美国材料与试验协会(American Society for Testing Materials)制定有耐热和阻燃防护服标准 ASTM F 2302;欧盟技术委员会(CEN/TC)制定有关于消防服、防护服和高温工作服的标准 EN 469, EN 470 和 EN 531;防护服国际标准主要包括 ISO 11611, ISO 11612, ISO 11613 等。

2.2 服装性能测试标准

2.2.1 服装面料性能测试标准 火焰和热辐射灾害条件下,阻燃服装材料测试标准为 ASTM F 2702;热辐射灾害条件下,服装材料热辐射性能测试和性能评估的标准包括 ISO 6942, EN ISO 6942, ASTM F 1939 和 ASTM F 2703;高温热接触灾害条件下的测试标准为 ASTM F 1060;高温液体飞溅时织物热传递性能的测试标准为 ASTM F 2701;测量熔融金属飞溅物对织物性能影响的测试标准包括 ISO 9185, EN 348, EN 373, GB/T 17599—1998;面料电弧火焰性能的测试标准有 ASTM F 1959 和 ASTM F 1506。为了评价消防服在热暴露和冷却阶段能量传输和储存对人体产生的危害,美国制定有 ASTM F 2731

标准,目前该标准已被 TPP 等相关性能测试设备采用。

2.2.2 服装整体性能测试标准 为了评价服装整体防护性能,在模拟火焰燃烧热灾害的条件下,美国制定假人测量服装隔热性能的方法 ASTM F 1291、燃烧假人测试标准 ASTM F 1930 和工业人员防火服标准 NFPA 2112。国际标准化组织也制定有消防服假人测试标准 ISO 13506-1,ISO 13506-2,防护服限制火焰蔓延的试验方法 ISO 15025,阻燃隔热服装暴露于火焰和辐射热时热传递的测定方法 ISO 17492,防护服防熔融金属飞溅物性能测试方法 ISO 9150 和防电弧的假人测试标准 ASTM F 1958。

3 影响防护性能的因素

3.1 热灾害因子

BEHNKE W P^[6] 和 CROWN E M 等^[7] 早期研究了服装材料在高温火焰下燃烧的性能,并逐渐引入人体模型仪器对服装整体防火性能进行测试。ROSSI R M 等^[8]、王敏等^[9]、WANG Y Y 等^[10] 利用假人测试火焰对防护服性能的影响,并进行热流量分布情况预测和烧伤预测。

SONG G W 等^[11] 研究了 6.3 ~ 8.3 kW/m² 低热辐射条件下,织物系统的热防护性能。付明等^[12] 研究了不同辐射强度对防护服性能的影响。结果表明,随着热辐射强度的增加,尤其在其超过 5 kW/m² 时,服装总热阻减小,外层、防水层和隔热层的热阻减小,而舒适层的热阻先增大后减小。HUMMEL A 等^[13]、李莎莎^[14] 对辐射热条件下服装防护性能的测试方法进行研究,比较了不同测试设备和测试方法的差异。ASTM F 1930 中已经确定了评估暴露于火焰和辐射热环境下防护服整体防护性能的方法,认为暴露于火焰和辐射热环境时,防护服中约 40% ~ 60% 的能量会释放到人体皮肤上,显著降低其热防护性能。

高温液体同样是影响防护服性能的关键因素之一。ACKERMAN M 等^[15] 发现液体种类会影响织物的防护性能。NEAL T^[16] 将菜籽油加热至 148 ℃,评价热防护面料的防护性能。LU Y H 等^[17] 发现暴露在同样的高温液体条件下时,钻井冷却液和蒸馏水产生的烧伤比菜籽油更严重。液体的热扩散性能、湿传递的速率和传递的总量是影响织物热防护性能的重要因素。管曼好等^[18] 研究了热水的水温、侵入角度、侵入高度对织物热防护性能的影响。

行业内还没有统一的测试标准来评估蒸汽暴

露环境下服装的性能。SATI R 等^[19] 使用圆筒实验装置模拟高压蒸汽暴露环境,蒸汽喷射压力和喷射距离会影响防护材料的蒸汽防护性能。MANDAL S 等^[20] 研究了火焰、热辐射、高温热接触、热水和蒸汽 5 种热源下面料的热防护性能,结果表明:在火焰和热辐射环境下,面料系统的热防护性能主要受面料发射率、吸收率和热阻的影响;在高温热接触时,面料的抗压缩性能是影响热防护性能的主要因素;当热源为热水或蒸汽时,热水和蒸汽流压强影响面料的热防护性能,面料的抗压缩性也对热防护性能有较大影响。

3.2 服装因子

目前国内外针对热防护服面料基本性能对其防护性能的影响进行了大量研究,取得了一定的研究成果。SHALEV I 等^[21-22] 研究得出,纤维比热容和面料质量、密度、组织结构、导热系数影响火焰暴露环境下面料系统的热防护性能,强对流环境下的织物厚度可延缓二级烧伤时间。考虑到人穿着服装后面料会发生形变,XIE Y C 等^[23] 使用 TPP 测试仪和手持式扫描仪,在闪火条件下研究面料形变对热防护性能的影响。研究表明,面料形变影响其透气性,面料的接触面积和隔热性能影响其 TPP 值。防护服在接触火焰时,服装表面会发生一定的收缩形变,导致服装内部空气层厚度减小,从而影响热防护性能。此外,若人体直接接触发生收缩形变的面料,皮肤会受到灼伤。翟丽娜等^[24]、李俊等^[25]、LI X H 等^[26] 研究了防护服装在闪火条件下发生的形变,并对人体在火焰危害下的烧伤程度进行预测。李小辉等^[27] 基于织物热防护性能测试,提出了服装防护性能的评价方法。

SUN G 等^[28] 发现在辐射热暴露环境下,消防服防护外层的材料、厚度、质量等因素会影响其热传递性能。KUTLU B 等^[29] 通过分析单层、双层、3 层面料的热防护性能,得出厚度和面密度是影响单层织物热防护性能的主要因素。对于单层织物而言,洗涤导致面料收缩,提高了面料的面密度,其热防护性能降低;但对于多层织物而言,洗涤可导致其热防护性能提高。李红燕等^[30]、崔志英^[31] 分析了消防服面料的阻燃性和 TPP 值,结果表明,相比于面密度,面料厚度对热防护性能的影响更显著。织物厚度与 TPP 值之间呈正相关,透气性与 TPP 值之间呈负相关关系。ROSSI R M 等^[32]、LU Y H 等^[33] 研究表明,随着热暴露时间的增加,防护服面料的抗撕裂强度、耐水性、抗拉伸强度等机械性能都有所下降。WANG L J 等^[34] 研究显示,织物热防护性

能随着洗涤和摩擦次数的增加先增强后减弱,织物的面密度与热防护性能之间存在一定的正相关关系。

作者^[35]研究了高温液体环境下热防护服装的热湿传递性能,进行皮肤烧伤预测,并研发了针对织物的新型高温液体飞溅物防护性能测试仪器。为探索液体冲击时影响织物渗透性能的因素,作者从多个方面(液体种类、液体温度、液体冲击角度、织物特征和面料配伍等)展开研究,构建了喷淋假人测试系统,分析了织物基本性能、服装设计特征和服装尺码等因素对服装热湿传递和皮肤烧伤分布的影响。LU Y H 等^[36]研究显示,暴露在高温液体环境下时,防护服面料的面密度对半透性服装的热防护性能有一定影响,但不显著。CHEN S 等^[37]用喷淋假人测试系统评价防护服装的高温液体防护性能,表明总烧伤和总吸收能量与织物质量呈负线性相关,与织物密度也呈负线性相关。

陈思等^[38]从灾害因子、服装因子和人体因子3个维度总结了高温液体和蒸汽防护性能的最新研究进展。ROSSI R 等^[39]研究表明,织物的蒸汽渗透性是影响蒸汽防护性能的最重要特性。DESRUELLE A V 等^[40]在 80 ℃ 饱和蒸汽环境舱内,用铜人测评了防护服装的防护性能,结果表明:织物测试和服装测试的结果一致;不透气织物和服装的蒸汽防护性能较好;服装面料越厚,其防护性能越好。ACKERMAN M Y 等^[41]指出织物防护性能受厚度、密度和透气性等多种因素的影响。此外,防护性能与面料的厚度和透气性分别呈正相关和负相关关系,防水透气膜的位置影响其防护性能^[24]。

3.3 人体因子

3.3.1 衣下空气层 苏云等^[42]对消防服衣下空气层热传递机制进行综述,显示服装与人体间的空气层对热防护服装的热湿传递性能具有重要作用。赖军等^[43]从衣下空气层的厚度与位置、影响因素、测量方法3方面综述了消防服衣下空气层的研究方法及最新进展。LEE Y J 等^[44]研究显示,衣下空气层体积随平均衣下空气层厚度的增加呈线性增大,且与服装的放松量有关。王敏等^[45]利用三维扫描技术测量燃烧假人衣下空气层的分布,表明即使是相同的服装,每次穿着后衣下空气层分布也存在较大差异。大量研究表明,平均衣下空气层的厚度对热防护服的火焰防护性能具有明显促进作用^[46-49]。CROWN E M 等^[46]得出,在服装完整性可控的基础上,宽松的服装存在较大的空气层,因此比紧身服装具有更好的防护性能。GHAZY A^[50]建

立了防护服内部新型空气层,研究了影响空气层内热传递并由此影响衣服防护性能的不同因素。

LU Y H 等^[51]研究了高温液体环境下衣下空气层对织物热湿传递性能的影响,得出加入衣下空气层可以显著降低从半透性织物传递至皮肤的能量。SU Y 等^[52]研究了热湿暴露情况下空气层厚度对防护性能的影响,认为较大的空气层厚度会明显降低热传递速率。此外,陈思等^[38]认为防护服的热湿传递因服装与皮肤间不均匀空气层分布的变化而改变,而这一结论对探索服装蒸汽防护性能具有重要影响。

3.3.2 人体出汗 热防护服的性能可能会受内部水分(身体出汗产生)和外部水分影响,水分会增加服装的热导率和热容^[53],从而影响服装隔热性能。SU Y 等^[54]总结了人体出汗对服装防护性能影响的测试方法。LEE Y M 等^[55]研究显示,热辐射强度对湿态单层防护服的热防护有影响,在 21 kW/m² 辐射下,水分对热防护有积极的影响,而在 84 kW/m² 的辐射下则相反。ZHANG H 等^[56]使用热防护性能测试仪研究了水分对热防护性能的影响,表明当水的质量分数为 15% 时,水分对热防护性能的抑制作用最大。BARKER R L 等^[57]认为,一定量的水分可以改善织物的防护性能,水的质量分数为 15% ~ 20% 的面料在 6.3 kW/m² 的低辐射下会引起烧伤。HE J Z 等^[58]认为防护服内、外部水分的增加都会减少皮肤的热吸收,从而在蒸汽暴露时延迟因服装材料蓄热导致人体皮肤烧伤的时间。外部水分对从防护服传递到皮肤的热量没有产生显著影响,而内部水分则会增加热量排放。LAWSON L K 等^[59]认为,在火焰暴露环境下,外部水分降低了服装的导热性能,从而提高了防护性能,而内部水分则降低了热防护性能;在低辐射热暴露环境下,内部水分同样增加了服装的防护性能。LU Y H 等^[60]模拟人体出汗时的水分含量、位置与衣下空气层产生的交互作用对防护性能的影响。WANG Y Y 等^[48]研究了空气层厚度、位置和水分对防护服热防护性能的影响,当空气层远离热源时,水分的增加降低了空气层厚度增大对热防护性能的积极影响。LI J 等^[49]研究了衣下微环境相对湿度与衣下空气层交互作用对防护性能的影响,结果表明,增加微环境中的相对湿度能显著提高不同厚度空气层织物的热防护性能。

3.3.3 人体动作 人体动作会影响空气层在人体各部位的分布,同时也会影响面料结构,最终导致防护服防护性能发生变化。GHAZY A 等^[61]研究在

辐射强度 83 kW/m^2 环境下暴露 10 s 后,空气层动态变化对织物传热的影响。XIN L S 等^[62]采用带有动态空气层制造系统的新型改良 TPP 测试设备,研究人体运动对暴露于闪火的织物传热的影响,结果显示,与没有空气层相比,变化范围为 $0\sim 25\text{ mm}$ 的动态空气层显著改善了织物的热防护性能。人体运动导致防护服面料发生形变,尤其是关节处会使面料产生不同程度的拉伸。LI J 等^[63]对防护服面料采用不同程度的拉伸来模拟身体运动过程中对服装面料产生的形变,并以不同的空气层进行测试,结果表明,面料变形后透气性显著降低,但是厚度变化较小。织物形变对不同空气层下面料系统的热防护性能具有复杂影响。

4 热湿传递模型研究

4.1 服装面料热湿传递模型

针对单层防护面料的热湿传递,TORVI D A^[64]利用有限元方法建立了单火焰 TPP 实验热传递模型。KUKUCK S 等^[65]模拟了对流和辐射能量各占 50% 条件下的 TPP 实验,并建立相应模型。

MELL W E 等^[66]、SPANGLER K B^[67]分别建立了辐射热流下多层面料间的传热模型,同时 MELL W E 等^[66]建立了多层面料层与层之间的反射模型。CHITRPHIROMSRI P^[68]、SONG G W 等^[69]结合 Gibson 模型和 Torvi 模型,建立了明火热源下多层面料的火-面料-空气层-皮肤系统热湿传递模型。SAWCYN C M J 等^[70]在长时间低强度辐射热流暴露环境下,对湿态多层热防护材料的热湿传递过程进行数字化模拟。PRASAD K 等^[71]局部改进对流模型,并建立了二维辐射传热模型。

SU Y 等^[72]提出了一种基于实验的多介质传热模型,研究带有空气层的多层防护服暴露于热辐射和热接触表面的热响应,并将织物传热模型整合到人类皮肤烧伤模型中,以预测皮肤烧伤的危害。SU Y 等^[73]还开发了一个数值模型,以了解蒸汽暴露期间防护服内部的热量传递。

4.2 服装系统热湿传递模型

SONG G W^[74]基于面料的热传递模型,建立了燃烧假人测试系统热传递模型,分析单层热防护服在闪火下的传热规律。JIANG Y Y 等^[75]基于 CFD 技术建立整体服装-皮肤热传递模型,以预测皮肤烧伤。TIAN M 等^[76]建立三维有限体积模型,利用先进的计算流体动力学技术,模拟火焰人体模型通过燃烧室时的瞬态传热,以织物为三维介质模拟所

接触的单层和多层服装,预测了衣服和皮肤各层的瞬时热通量和温度分布。TIAN M 等^[77]考虑到人体的真实形态,基于计算流体动力学开发三维传热模型,研究了气隙宽度、衣服厚度和辐射率对暴露在闪火中的整装人体模型热传递的影响。

5 热防护服装发展趋势研究

5.1 服装标准研究

国内外针对多灾害环境下防护服的产品标准和测试标准,多为小尺寸的服装材料样品性能测试标准^[27,35],其发展相对比较成熟,而利用假人系统进行整体性能测试的标准体系仍不完善,缺乏人体生理行为的综合模拟功能。此外,防护服装的蒸汽防护性能测试标准仍需建立。未来的标准将同步考察服装的耐热性、隔热性、舒适性、透气性、防水性等综合性能,使防护服的评价切实符合消防救援行动的需求。

5.2 影响服装防护性能的多因素交互作用

人们在实际的工作生活中会遭遇各种灾害,包括火焰灼烧、辐射暴露、液体喷溅、蒸汽喷射等,因此全面评价织物在不同灾害环境中的防护性能具有重要价值。同时,在多重灾害环境中,防护性能是否会受到不同灾害因子的交互影响还需要进一步探索。

防护服防护性能取决于多种因素,如织物面料成分、服装设计特征、空气层厚度和变化幅度、出汗量、热源种类和强度以及暴露时间等。在人体运动状态下,这些因素的影响情况还需进一步研究。

5.3 服装性能评价方法

服装热防护性能的测评方法在服装整体测试层面还有待发展,尤其是服装整体热防护性能的评价方法以及动态防护性能的评价技术仍需进一步研究。烧伤预测评价方法需进一步讨论其准确性及合理性,并且还需充分考虑皮肤内部热传递的规律。

5.4 热湿传递模型研究

随着计算机技术的发展,服装热湿传递模型研究取得了飞跃性进步,但在模型探索过程中所模拟的实验条件还比较理想化,实验室所模拟的热流量和湿度未能真实反映出实际火场中不断变化的环境。未来防护服热湿传递模型的研究重点是面料所储存热量在冷却阶段的热湿传递效果以及在动态条件下的防护效果,并且需同时探索蒸汽烧伤和二级烧伤机制,以及多层服装整体的热湿传递

机制。

6 结 语

热防护服装是产业用纺织品的重要研究方向。目前,从业人员遭受的热灾害环境由单一化向复杂化和多重化方向发展,这对热防护服提出了更高的要求,即需要兼顾热防护性和热湿舒适性。近年来,行业内相关研究人员已从标准化、热防护机理和热湿传递模拟等方面对热防护服展开了大量研究,并取得了突破。然而,热防护服装(尤其是高压蒸汽防护服装)的整体热防护性能测试和动态评价标准仍不完善,新型的智能化和轻质化热防护材料开发进度略显不足,针对多层热防护服装的三维热湿传递模拟仍未突破,还需进一步研究。

参考文献:

- [1] FOSTER J A,ROBERTS G V. Measurements of the firefighter environment[J]. Fire Engineers Journal, 1995, 55 (1) : 30-34.
- [2] 姚磊,田亮,张晓颖. 灭火救援现场消防员高温作业研究[J]. 消防科学与技术,2012,31(5):510-512.
YAO Lei,TIAN Liang,ZHANG Xiaoying. Study on high-temperature operation of firefighters in firefighting and rescue [J]. Fire Science and Technology, 2012, 31 (5) : 510-512. (in Chinese)
- [3] Safety and Health Assessment and Research for Prevention. Burn injury facts-scald burns in restaurant workers[R]. Olympia: Washington State Department of Labor and Industries,2009.
- [4] MANDAL S,LU Y H,WANG F M,et al. Characterization of thermal protective clothing under hot water and pressurized steam exposure [J]. AATCC Journal of Research, 2014 (5) : 7-16.
- [5] KAHN S A,PATEL J H,LENTZ C W,et al. Firefighter burn injuries: predictable patterns influenced by turnout gear[J]. Journal of Burn Care and Research, 2012, 33 (1) : 152-156.
- [6] BEHNKE 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.
- [7] CROWN E M,DALE J D. Evaluation of flash fire protective clothing using an instrumented mannequin[D]. Edmonton: University of Alberta,1992.
- [8] ROSSI R M,BRUGGMANN G,STÄMPFLI R. Comparison of flame spread of textiles and burn injury prediction with a manikin [J]. Fire and Materials, 2005, 29 (6) : 395-406.
- [9] 王敏,李俊,李小辉. 燃烧假人在火场热防护服装研究中的应用[J]. 纺织学报,2013,34(3):154-160.
WANG Min,LI Jun,LI Xiaohui. Application of flame manikin in thermal protective clothing research[J]. Journal of Textile Research,2013,34(3):154-160. (in Chinese)
- [10] WANG Y Y,WANG Z L,ZHANG X,et al. CFD simulation of naked flame manikin tests of fire proof garments[J]. Fire Safety Journal,2015(1):187-193.
- [11] SONG G W,PASKALUK S,SATI R,et al. Thermal protective performance of protective clothing used for low radiant heat protection [J]. Textile Research Journal, 2011, 81 (3) : 311-323.
- [12] 付明,翁文国,袁宏永. 低热辐射强度下防护服热防护性能的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014,54(6):719-723.
FU Ming,WENG Wenguo,YUAN Hongyong. Bench scale test of the thermal protective performance of protective clothing for low intensity thermal radiation[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54 (6) : 719-723. (in Chinese)
- [13] HUMMEL A,WASTON K,BAKER R. Comparisons of two test methods for evaluation the radiant protective performance of wildland firefighter protective clothing materials [C]//Performance of Protective Clothing and Equipment. San Antonio:Lowa State University,2016:178-194.
- [14] 李莎莎. 低辐射热环境下消防织物热防护性能测评方法对比研究[D]. 上海:东华大学,2017.
- [15] ACKERMAN M,SONG G W,GHOLAMREZA F,et al. Analyzing thermal protective clothing performance against the impact of small splashes of hot liquid[C]//The Ninth Symposium on Performance of Protective Clothing and Equipment:Emerging Issues and Technologies. Anaheim: ASTM Committee F23 on Personal Protective Clothing and Equipment, 2011.
- [16] NEAL T. Hot liquid test results on NASCO materials: ASTM work item WK6682[R]. Guilford:Neal Associates Ltd.,2006.
- [17] LU Y H,SONG G W,ACKERMAN M,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.
- [18] 管曼好,贾汪洋,吉洋,等. 热水侵入条件对织物防护性能的影响[J]. 纺织学报,2016,37(11):98-102.
GUAN Manhao,JIA Wangyang,JI Yang,et al. Thermal protective performances of fabric upon hot water splashes [J]. Journal of Textile Research,2016,37(11):98-102. (in Chinese)
- [19] SATI R,CROWN E M,ACKERMAN M,et al. Protection from steam at high pressures:development of a test device and protocol [J]. International Journal of Occupational

- Safety and Ergonomics,2008,14(1):29-41.
- [20] MANDAL S,SONG G W,ACKERMAN M,et al. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures [J]. Textile Research Journal,2013(10):1005-1019.
- [21] 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.
- [22] SHALEV I,BARKER R L. Protective fabrics:a comparison of laboratory methods for evaluating thermal protective performance in convective/radiant exposures [J]. Textile Research Journal,1984,54(10):648-654.
- [23] XIE Y C,WANG M,LI J. An approach to characterize the thermal deformation of flame-resistant fabric exposed to flash fire [J]. Advanced Materials Research,2013(9):821-822.
- [24] 翟丽娜,李俊. 闪火条件下防火服装热收缩形变的数据挖掘[J]. 计算机系统应用,2014,23(10):132-137.
ZHAI Lina, LI Jun. Data mining of protective clothing shrinkage during flash fire [J]. Computer Systems and Applications,2014,23(10):132-137. (in Chinese)
- [25] 李俊,翟丽娜,王敏,等. 闪火中防护服装的形变及其影响因素[J]. 纺织学报,2014,35(1):95-101.
LI Jun,ZHAI Lina, WANG Min, et al. Shrinkage of fire-fighting suit during flash fire exposure[J]. Journal of Textile Research,2014,35(1):95-101. (in Chinese)
- [26] LI X H, LU Y H, ZHAI L N, et al. Analyzing thermal shrinkage of fire-protective clothing exposed to flash fire [J]. Fire Technology,2013,51(1):195-211.
- [27] 李小辉,管曼好,李俊. 防火服织物的服用热防护性能评价方法[J]. 纺织学报,2015,36(8):110-115.
LI Xiaohui, GUAN Manhao, LI Jun. Evaluation on thermal protective performance of fabric for firefighter protective clothing[J]. Journal of Textile Research,2015,36(8):110-115. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] KUTLU B, CIRELI A. Thermal analysis and performance properties of thermal protective clothing [J]. Fibres and Textiles in Eastern Europe,2005,13(3):58-62.
- [30] 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.
LI Hongyan,ZHANG Weiyan. Flame-retardant performance and TPP value of fabrics for fire-fighting suits[J]. Journal of Textile Research,2008,29(5):84-88. (in Chinese)
- [31] 崔志英. 消防服用织物热防护性能与服用性能的研究 [D]. 上海:东华大学,2009.
- [32] ROSSI R M,BOLLI W,STÄMPFLI R. Performance of fire-fighters' protective clothing after heat exposure[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2008,14(1):55-60.
- [33] LU Y H,WANG L J,GAO Q. Predicting tensile strength of fabrics used in firefighters' protective clothing after multiple radiation exposures [J]. Journal of the Textile Institute, 2018,109(3):338-344.
- [34] WANG L J, HE J Z, LU Y H, et al. Interaction effects of washing and abrasion on thermal protective performance of flame retardant fabrics [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics,2018(9):1-9.
- [35] 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.
- [36] LU Y H,SONG G W,LI J. Analysing performance of protective clothing upon hot liquid exposure using instrumented spray manikin [J]. Annals of Occupational Hygiene, 2013,57(6):793-804.
- [37] CHEN S,LU Y H,HE J Z,et al. Predicting the heat transfer through protective clothing under exposure to hot water spray [J]. International Journal of Thermal Sciences,2018(8):416-422.
- [38] 陈思,卢业虎,戴晓群,等. 高温液体及蒸汽防护服装防护性能研究进展[J]. 纺织学报,2018,39(5):149-154.
CHEN Si,LU Yehu,DAI Xiaqun,et al. Research progress of protection properties of protective clothing against steam and hot liquid spray [J]. Journal of Textile Research, 2018,39(5):149-154. (in Chinese)
- [39] ROSSI R,INDELICATO E,BOLLI W. Hot steam transfer through heat protective clothing layers [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics,2004,10(3):239-245.
- [40] 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.
- [41] ACKERMAN M Y,CROWN E M,DALE J D,et al. Development of a test apparatus/method and material specifications for protection from steam under pressure [R]. West Conshohocken: Performance of Protective Clothing and Equipment;9th Volume, Emerging Issues and Technologies, 2012:308-328.
- [42] 苏云,王云仪,李俊. 消防服衣下空气层热传递机制研究进展[J]. 纺织学报,2016,37(1):167-172.
SU Yun,WANG Yunyi,LI Jun. Research progress of heat transfer mechanism of air gap under firefighter protective clothing [J]. Journal of Textile Research,2016,37(1):167-172. (in Chinese)
- [43] 赖军,张梦莹,张华,等. 消防服衣下空气层的作用与测定方法研究进展[J]. 纺织学报,2017,38(6):151-156.
LAI Jun,ZHANG Mengying,ZHANG Hua,et al. Research

- progress on air gap entrapped in firefighters' protective clothing and its measurement methods[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(6): 151-156. (in Chinese)
- [44] LEE Y J, HONG K, HONG S A. 3D quantification of microclimate volume in layered clothing for the prediction of clothing insulation [J]. *Applied Ergonomics*, 2007, 38(3): 349-355.
- [45] 王敏, 李俊. 燃烧假人衣下空气层的三维现场扫描测量与表征[J]. *纺织学报*, 2019, 40(1): 114-119.
- WANG Min, LI Jun. Three-dimensional on-site scanning measurement and characterization of air gap entrapped between flame manikin and clothing[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(1): 114-119. (in Chinese)
- [46] CROWN E M, ACKERMAN M Y, DALE J D, et al. Design and evaluation of thermal protective flightsuits: part II: instrumented mannequin evaluation[J]. *Clothing and Textile Research Journal*, 1998, 16(2): 79-87.
- [47] SONG G W. Clothing air gap layers and thermal resistance performance in single layer garment [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2007, 36(3): 193-205.
- [48] WANG Y Y, LU Y H, LI J, et al. Effects of air gap entrapped in multilayer fabrics and moisture on thermal protective performance [J]. *Fibers and Polymers*, 2012, 13(5): 647-652.
- [49] LI J, LU Y H, LI X H. Effect of relative humidity coupled with air gap on heat transfer of flame-resistant fabrics exposed to flash fire[J]. *Textile Research Journal*, 2012, 83(12): 1235-1243.
- [50] GHAZY A. Numerical study of the air gap between fire-protective clothing and the skin [J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2014, 44(2): 257-274.
- [51] LU Y H, SONG G W, LI J. A novel approach for fit analysis of thermal protective clothing using three-dimensional body scanning [J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(6): 1439-1446.
- [52] SU Y, LI J, WANG Y Y. Effect of air gap thickness on thermal protection of firefighter's protective clothing against hot steam and thermal radiation [J]. *Fiber and Polymers*, 2017, 18(3): 582-589.
- [53] KEISER C, ROSSI R M. Temperature analysis for the prediction of steam formation and transfer in multilayer thermal protective clothing at low level thermal radiation [J]. *Textile Research Journal*, 2008, 78(11): 1025-1035.
- [54] SU Y, WANG Y Y, LI J. Evaluation method for thermal protection of firefighters' clothing in high-temperature and high-humidity condition [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2016, 28(4): 429-448.
- [55] 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.
- [56] ZHANG H, SONG G W, GU Y, et al. Effect of moisture content on thermal protective performance of fabric assemblies by a stored energy approach under flash exposure [J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(16): 1847-1861.
- [57] BARKER R L, GUERTH-SCHACHTER 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.
- [58] HE J Z, LU Y H, YANG J. Quantification of the energy storage caused dual performance of thermal protective clothing containing with moisture exposed to hot steam [J]. *Energy Science and Engineering*, 2019, 7(6): 2585-2595.
- [59] LAWSON L K, CROWN E M, ACKERMAN M Y, et al. Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters [J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2004, 10(3): 227-238.
- [60] LU Y H, LI J, LI X H, 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.
- [61] GHAZY A, BERGSTROM D J. Numerical simulation of the influence of fabric's motion on protective clothing performance during flash fire exposure [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2013, 49(6): 775-788.
- [62] XIN L S, LI X H, LI J. A new approach to evaluate the effect of body motion on heat transfer of thermal protective clothing during flash fire exposure [J]. *Fibers and Polymers*, 2014, 15(10): 2225-2231.
- [63] LI J, LI X H, LU Y H, et al. A new approach to characterize the effect of fabric deformation on thermal protective performance [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(4): 45601-45606.
- [64] TORVI D A. Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux conditions [D]. Edmonton: Edmonton University of Alberta, 1997.
- [65] KUKUCK S, PRASAD K. Thermal performance of fire fighters' protective clothing: 3. simulating a TPP test for single-layered fabrics [R]. Gaithersburg: Technical Report NISTIR 6993, National Institute of Standards and Technology, 2003: 1-11.
- [66] MELL W E, LAWSON J R. A heat transfer model for fire fighters protective clothing [J]. *Fire Technology*, 2000, 36(1): 39-68.
- [67] SPANGLER K B. Energy transport in firefighter protective clothing [D]. Maryland: University of Maryland, 2008: 1-112.
- [68] CHITRPHIROMSRI P. Modeling of thermal performance of fire-fighter protective clothing during the intense heat exposure [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2004.

- [69] SONG G W, CHITRPHIROMSRI P, DING D. Numerical simulations of heat and moisture transport in thermal protective clothing under flash fire conditions[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2008, 14(1):89-106.
- [70] SAWCYN C M J, TORVI D A. Improving heat transfer models of air gaps in bench top tests of thermal protective fabrics[J]. Textile Research Journal, 2009, 79(7):632-644.
- [71] PRASAD K, TWILLEY W, LAWSON J R. Thermal performance of fire fighters' protective clothing: numerical study of transient heat and water vapor transfer[R]. Gaithersburg: NISTIR 6681, National Institute of Standards and Technology, 2002:1-32.
- [72] SU Y, HE J Z, LI J. A model of heat transfer in firefighting protective clothing during compression after radiant heat exposure[J]. Journal of Industrial Textile, 2016, 47(8):2128-2152.
- [73] SU Y, LI R, SONG G W, et al. Modeling steam heat transfer in thermal protective clothing under hot steam exposure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018(5):818-829.
- [74] SONG G W. Modeling thermal protection outfits for fire exposures[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2002.
- [75] JIANG Y Y, YANAI E, NISHIMURA K, et al. An integrated numerical simulator for thermal performance assessments of firefighters' protective clothing[J]. Fire Safety Journal, 2010, 45(5):314-332.
- [76] TIAN M, WANG Z L, LI J. 3D numerical simulation of heat transfer through simplified protective clothing during fire exposure by CFD[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 93(1):314-321.
- [77] TIAN M, LI J. 3D heat transfer modeling and parametric study of a human body wearing thermal protective clothing exposed to flash fire[J]. Fire and Materials, 2018, 42(6):657-667. (责任编辑:沈天琦)

(上接第20页)

- [11] 程琼, 刘玮, 林兰天, 等. 碳纳米管柔性应变传感器在智能纺织品中的应用[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(5):474-479.
- CHENG Qiong, LIU Wei, LIN Lantian, et al. Application of carbon nanotubes flexible strain sensor in smart textiles[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(5):474-479. (in Chinese)
- [12] 胡水仙, 陈建华, 白子文. 热塑性弹性体(TPE)简述(上)[J]. 山西化工, 2014(3):39-43.
- HU Shuixian, CHEN Jianhua, BAI Ziwen. Brief on thermoplastic elastomer(TPE)(I)[J]. Shanxi Chemical Industry, 2014(3):39-43. (in Chinese)
- [13] 许杰. 基于银纳米线的柔性薄膜压力传感器的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2017:46-52.
- [14] WANG Z F, HUANG Y, SUN J F, et al. Polyurethane/cotton/carbon nanotubes core-spun yarn as high reliability stretchable strain sensor for human motion detection[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2016, 8(37):24837-24843.
- [15] PEGAN J D, ZHANG J, CHU M, et al. Skin-mountable stretch sensor for wearable health monitoring[J]. Nanoscale, 2016, 8(39):17295-17303.
- [16] 王旭, 付亚平. 迟滞误差对应变传感器精度影响的研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(4):102-104.
- WANG Xu, FU Yaping. Research of changing type sensor precision influence of stress of sluggish error[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(4):102-104. (in Chinese)
- [17] 杨君琦. 应变传感器的应变传递理论及传感特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [18] COSTA P, CARVALHO M F, CORREIA V, et al. Polymer nanocomposite-based strain sensors with tailored processability and improved device integration[J]. ACS Applied Nano Materials, 2018(5):3015-3025. (责任编辑:沈天琦)