

DOI: 10.13475/j.fzxb.20180306107

应急救援类防护服装发展现状与趋势

张海棠, 王宏付, 柯莹

(江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122)

摘要 为提升应急救援类防护服装的功能及舒适性能和优化设计提供基础数据和科学依据,从应急救援防护服的面料选择、服装结构设计以及主要测试方法3个方面,阐述了应急救援类防护服装的发展现状。归纳总结出应急救援类防护服装设计的基本流程为确定应用需求、明确重点防护对象、设计初始方案、初始设计方案评价及确定最佳方案。指出目前应急救援防护服的研究瓶颈是功能兼顾困难、标准建立复杂以及舒适性评价精度控制难,预测了应急救援防护服在差别化高性能纤维、多功能智能化防护系统、更高的穿着舒适度以及健全规范的测试评价系统方面的发展趋势。

关键词 防护服; 应急救援; 结构设计; 舒适性能

中图分类号: TS 941.71 文献标志码: A

Current situation and trend of protective clothing for emergency rescue

ZHANG Haitang, WANG Hongfu, KE Ying

(School of Textiles and Clothing, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract In order to provide basic data and scientific basis for improving the function and comfort performance of emergency rescue protective clothing and optimum design of products, the development status of emergency rescue protective clothing was expounded from fabric selection, clothing structure design and main test methods. The basic designing processes of the rescue protective clothing were summarized, i.e., identifying application requirements, identifying key protection objects, designing the initial scheme and determining the best solution. The research bottleneck of the present rescue protective clothing in difficult combination of different functions, complex standards, and poor control on the accuracy of comfort evaluation was presented. It was predicted that the difference and high performance fibers, multi-functional and smart protecting system, better wearing comfort, and a complete and standard evaluating system would be the developing trends.

Keywords protective clothing; emergency rescue; pattern design; comfort performance

防护服装是一类能够在特殊环境下,保护穿着者不受外界有害因素伤害的特殊服装^[1-2],是世界各国用以保障人民生命安全,提升军事力量、竞争与利用各资源,提高科技能力等的关键装备。防护服装的种类非常庞杂。根据防护服的用途可分为工业用、军用、医疗用、生活用和公共事业用等几大类,各用途下的防护服又可按照防护对象进行细分,例如抗菌服、阻燃服、防弹服和隔热服等^[3-4]。本文主要论述应用于公共事业的应急救援防护服装。此类服

装需求量大,应用场景多,如地震、矿塌、大型交通事故等灾变现场。应急救援防护服装作为对救援人员的直接防护装备,其功能设计与结构设计成为影响救援效率以及防护能力的重要因素。

目前国内外对应急救援防护服的研究并不多。大多研究集中在特殊功能的开发与研究上,尤其是新型面料的应用,对于服装材料湿阻、热阻等性能及着装舒适性的研究报道也很多^[5-7]。在应急救援类防护服装的功能设计方面,研究者多关注极端情况

收稿日期: 2018-03-19 修回日期: 2018-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51506076); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51735B)

第一作者: 张海棠(1995—),女,硕士生。主要研究方向为服装舒适性。

通信作者: 柯莹(1987—),女,副教授,博士。主要研究方向为功能服装设计开发与评价。E-mail: keying@jiangnan.edu.cn。

的个案分析,很少涉及应用广泛的一般防护服。另外,国内对应急救援防护服的分类及评价标准没有国外全面和具体。美国早在 1992 年就发布了 NFPA 1999: 2003《紧急医疗事故现场防护服标准》,该标准对应急人员防护服装的设计要求、性能要求以及测试方法作出了明确规定。国际标准化组织 ISO 有关防护服的标准也已在 2013 年更新,而国内对防护服的相关规定不仅在发表时间上落后,而且更新不及时,在我国 GB/T 20097—2006《防护服一般要求》中对防护服的检测条款中才开始考虑人类工效学原则^[8-9]。本文将主要针对国内外应急救援防护服设计的一般模式进行文献研究,以救援防护服研究的典型案例为基础,从面料选择、结构设计和测试方法 3 个方面,整理出

应急救援防护服设计与测试的一般规律,总结目前救援防护服的研究瓶颈,并展望其未来的发展趋势,为此类防护服装的优化设计提供一定的基础数据和科学依据。

1 应急救援防护服面料

灾变现场的环境是十分复杂的,救援人员需要应对的危险因素有很多,针对不同危险类别,各国都制定了相关防护服的选用标准,在我国 GB/T 11651—2008《个人防护装备选用规范》中,也有针对各事故类型的防护装备选用规则。表 1 示出灾变现场常见的危险因素,以及不同危险因素下防护面料的选择。

表 1 不同危险因素下的面料或纤维选择

Tab.1 Selection of fabrics or fibers for different hazard factors

危险因素	面料性能要求	面料或纤维选择
火患	耐高温、阻燃	多采用耐洗阻燃织物,如经阻燃剂整理过的纯棉布、化纤混纺布或用耐高温、阻燃纤维如诺梅克斯(Nomex)、芳腈纶等制成的织物。
水患	防水、透湿	多为涂层面料:超薄型橡胶涂覆织物、防水透湿涂覆织物;或通过据水整理的天然纤维或化学纤维混纺织物;目前应用广泛的美国研制的戈尔特斯(Gore-Tex)织物。
漏电	防静电	一般在纤维内部添加导电物质或抗静电剂或在纺织时加入导电纤维或超细金属丝等来取得防静电效果。如棉/涂碳黑粒子混纺面料掺杂矿物颗粒,耐光性、热稳定性好,且功能持久,耐水洗。
有毒化学物质	耐腐蚀	纯毛紧密织物
	防毒	多为隔绝型防毒织物和吸附型防毒织物。采用微胶囊技术和以聚烯烃、聚酯等惰性聚合物为原料的微孔中空纤维制成的解毒型防毒织物以及以 TYVEK(特卫强)织物。

1.1 救援防护服面料结构

1.1.1 多层面料结构

目前救援防护服的面料设计大多采用复合面料,将混纺面料、薄膜材料、功能纤维彼此复合成新型面料,新型面料趋于 3 层结构,外层阻燃、耐磨、耐腐蚀,中层防水、透湿、防化,内层则为亲肤面料,即舒适区^[10-11]。伏磊等^[12]利用涤纶网眼基布、芳纶类纤网、阻燃黏胶纤维水刺布、聚四氟乙烯(PTFE)微孔膜等基材将传统多层救援服面料设计为双层,合并舒适层、隔热层和防水透气层。曾晓明等^[13]发明了双层复合结构的新型救援服面料,外层阻燃拒水防静电,经纬纱采用 2 上 1 下的斜纹结构,内层为粘胶吸湿阻燃面层,经纬纱采用 1 上 1 下的平纹结构。

以上研究表明,救援防护服越来越薄型化的趋势,薄型化的救援防护服不仅有效地保护救援人员的人身安全,而且减轻了防护服自身重量对救援人员所造成的生理负担。

1.1.2 单层面料结构

单层面料的应急救援防护服,为众多社会志愿者所穿着。针对这类非专业救援队伍,他们穿着的

救援防护服在面料上只需做到防水、透湿、耐磨抗撕、防静电、尺寸稳定等一般要求,通过混纺、后整理方法实现^[14]。

常用的单层面料是涤纶/棉(T/C, 65/35)防静电面料和 CVC(涤棉混纺面料,棉比例更高)防静电面料,表 2 中对比了 2 种面料的性能特点,这 2 种面料都是导电丝、涤纶和棉混纺,只是涤、棉的含量不同。CVC 由于棉的含量更多,因而具备的棉的性能较为突出,弹性和吸湿性能都优于 T/C,手感也比 T/C 面料更加柔软,但因 CVC 的价格比 T/C 稍贵,因此在单层面料的应急救援防护服中采用 T/C 作为主面料的比较多。

1.2 救援防护服面料成分

作为一种综合性能优异的新型纤维,芳纶类纤维在救援防护服中的应用越来越多,但芳纶的疏水性较强,其制品透湿能力差。Wang 等^[15]提出可通过复合亲水性强的材料,如阻燃粘胶纤维等,利用毛细效应加强其吸水能力,从而达到排湿效果。目前救援防护服的面料设计要求已经转变为在保证防护能力的前提下提高面料的舒适性,相变材料等新型纤维材料的出现一定程度上解决了救援防护服防护

表 2 2 种应急救援防护服常用单层面料性能比较

Tab.2 Performance comparison of single layer fabric used in two kinds of emergency rescue suits

面料	干、湿情况下的弹性	干、湿情况下的耐磨性	吸湿性	尺寸稳定性	油污吸附能力	易洗、快干	抗皱性	手感
T/C 65/35 防静电面料	一般	较好	一般	好	易吸附油污	较好	较好	刺拉感
CVC 防静电面料	较好	一般	较好	较好	易吸附油污	一般	一般	柔软

能力与舒适性之间的矛盾,为救援防护服的材料选择及智能化发展提供更广阔的思路。

1.3 救援防护服面料的辨识度

复杂的救援环境除了对救援服装的面料有着较高要求,还要求救援服装在黑暗或光线昏暗的环境下具有很好的辨识度^[16]。按照国际惯例,通常会在救援人员穿着的防护服装上附着反光材料。反光材料除了要有良好的反光性能,也要具有阻燃性能和耐热性能,欧洲标准 EN 469—2007《消防防护服—战斗防护服性能要求》中规定反光带必须具有阻燃性能,在高温条件下不能熔化、碳化、脱落和滴流。目前市场多采用 3M 高亮阻燃反光材料,在防护服的胸部、手臂、腿侧等部位附着。

在我国,常用的反光材料有 2 种:玻璃微珠和高光泽度晶格。由于二者的反射原理不同,如图 1 所示,因此在性能上有所差异。晶格是有多个抛面的微棱镜结构,类似钻石原理,因此反光效能和广角性能都远远高于玻璃微珠。同时其拥有较长的使用寿命,因此是救援服反光部位的首选材料。由于晶格的价格比玻璃微珠高,因此其目前使用率低于玻璃微珠。

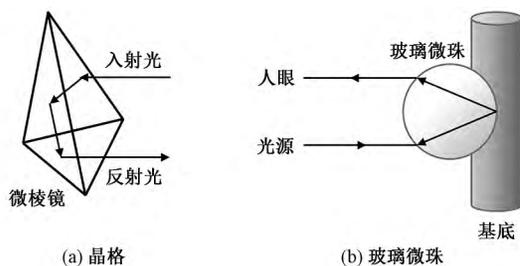


图 1 晶格与玻璃微珠的反光原理

Fig.1 Reflection principle of lattice and glass microsphere.

(a) Lattice; (b) Glass microsphere

2 应急救援防护服结构设计

应急救援防护服的结构设计是影响防护服舒适性的重要因素^[17]。在进行结构设计时,一般会从款式结构、开口设计、部位设计、整体结构这 4 个方面考虑。

2.1 款式结构

一般救援防护服的款式有 2 种,即上、下装式与

连体(帽)式。款式需要根据应用环境来进行选择,如水域救援防护服一般采用连体式结构,在裁剪时会选择一体式裁剪,减少面料分割和接缝;而在地震救援防护服的设计上,通常会采用上、下装结构,便于躯干弯曲等大幅度动作^[18]。

HAVENITH 等^[19]指出款式结构和放松量会直接影响穿着者与服装之间间隙,衣下间隙又影响着服装热阻,从而决定穿着舒适程度。放松量同时也是为修正尺寸,形成各类防护服的最佳功能尺寸,从而适应不同的救援动作,让防护服达到最舒适效果。在救援防护服的结构设计中,褶裥、分割、松紧及拉链的合理运用可以大大提高活动自由度和舒适度。

2.2 开口设计

救援防护服的开口设计,会增加衣内空气对流,利于衣内水汽散发,提高服装透湿指数^[20],从而提高舒适性。开口设计包括针对领口、袖口、下摆、裤脚口等自然开口形式和针对胸部、背部、侧腰部、腋下等部位非自然开口形式 2 个方面。在腋下、侧腰部等部位做一些开口设计,可更加有效地促进人体热量散失以及运动时的热湿平衡。开口设计可以是侧缝开口、袖底缝开口等接缝开口形式,也可以是透气面料(网孔面料)与主体面料在易出汗部位(腋下等)的拼接形式。

2.3 工作需求设计

在救援过程中,救援人员会有抬手、下蹲、弯腰等很多大幅度动作,当人体在做此类大幅度动作时,要求服装相关部位有更大的宽松度以满足动作需要,防护服在结构设计时要根据不同的动作对服装上的相应部位做合适改动,综合考虑如何使服装最大化适应这些动作^[21]。如针对弯腰、下蹲动作,通常在服装背部、裤膝关节处做褶裥设计。褶裥类型的选择需要根据大量实验结果来确定,以增大穿着者最大的运动范围。

Mullet^[22]比较了不同袖型结构(装袖、连袖、插肩袖和腋下插角连袖)上装对人体运动的影响。实验通过不同方位、不同角度的抬臂动作,测量服装在袖口、下摆侧部、下摆后中等部位产生的滑移量。结果表明,连袖在袖口处产生的滑移量大于其他袖型,而装袖、插角连袖在下摆侧部处的滑移量大于连袖,

这说明不同的结构会使服装对人体运动的应变能力不同。

2.4 整体结构设计

应急救援防护服在确定最终的结构设计方案前,一定要回归整体,再次审视并进行优化设计。一般从人体—服装—环境系统分析,了解救援人员所处的环境以及救援任务,分析他们对防护服的性能要求,根据不同要求,综合改进并优化防护服的结构。例如在地震、工矿企业爆炸的救援现场,建筑废墟中有很多尖锐物体,救援人员在救援过程中又会有很多跪地动作,膝盖部位很易磨损,因而在防护裤装的设计中,可在膝盖部位加缝双层耐磨面料,以延长防护服的使用寿命^[23]。

3 应急救援防护服的测试方法和原则

3.1 应急救援防护服的测试方法

3.1.1 评价方法

防护服在实际使用前会进行性能和舒适性测试与评估,以保证穿着者的安全与穿着舒适度。防护服的测评过程很复杂,包括基本面料、结构设计、生理卫生、防护功能等方面的评价。

UMBACH 等^[24]提出防护服性能评价的 5 种方法,如图 2 所示。在防护服研究设计的不同阶段可采用其中一种或多种方法结合。5 种评价方法分别为织物“皮肤”模型上的物理学试验、利用暖体假人的生物物理学分析、环境舱内人体穿着试验、小规模有限现场试验和大规模现场试验。在应急救援防护服的性能评价中,可结合实际救援环境,对救援服进行针对性的性能测试和综合评价。

织物测试一般要求对不同用途所要求指标进行测试检验。在测试救援防护服整体热湿性能时,通常利用暖体假人来对服装的隔热与透湿性能进行评价^[25]。环境舱中的人体穿着实验,会模拟救援环境时的温湿度,结合主观问卷调查,对人体体温、心率等其他指标进行测量,来评价救援服的舒适性。

3.1.2 工效性评价及反光带测试

在防护服的舒适性评价中,越来越多的学者提出工效性评价的重要性。Camenzid 等^[26]认为,防护服的裁剪、设计及其他附加功能需要进行穿着试验来测试。针对应急救援的防护服工效性能评价方法,广义上包括技术评估(人类工效学性能:尺寸、结构、易用性、兼容性)、生理评估(对环境压力的忍受限度)和大规模试穿评估(问卷形

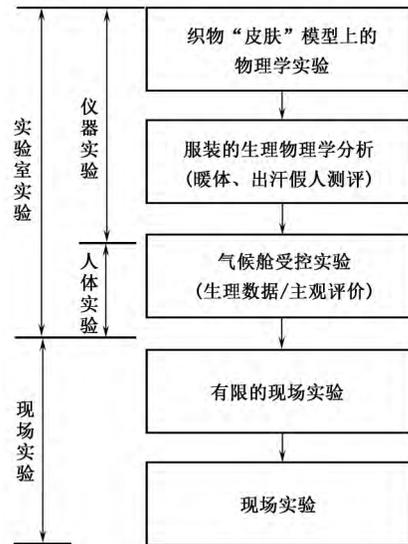


图 2 应急救援防护服性能评价 5 种分析方法
Fig.2 Five methods of analysis for performance evaluation of emergency rescue protective clothing

式,收集穿着者主观感受)^[27]等。从狭义上来说,就是指评价服装是否满足人体活动的力学需求。评价内容包含关节活动范围、操作灵活性和服装压力等方面^[28-29]。将问卷形式的主观评价结果与相关测量的客观数据相结合,对防护服装整体工效性进行评价。

对于反光带的性能测评,相关标准如 EN 471—2003《专用高能见度警示服装测试方法及要求》中,对反光材料的测试方法有详细说明。Havenith^[30]提出在全黑的情况下用汽车前灯模拟集聚光源,以司机视角观察 100 m 目标物体,在规定时间内,将服装上的发光材料产生光圈描绘成图像,再用专业控制仪表进行分析、评估。

3.2 应急救援防护服的设计原则

沈润娥^[31]在 1995 年提出了防护服安全、适用、美观、大方的设计原则。贾司光等^[32]提出,从安全、舒适、工效和耐受限度这 4 个方面衡量“人—机—环境”系统的效能。对于防护服的设计而言,安全、防护是首要的,但防护功能的提高会在一定程度上影响舒适性,这就需要找到最优平衡方案来处理防护和舒适、功能性、外观等各要求之间的矛盾^[33]。这些设计理论完全适用于应急救援防护服的设计。

应急救援防护服多功能趋势越来越明显,设计者应该首先分析救援防护服的应用环境,总结危害因素,确定重点防护对象,再针对性进行面料选择和结构设计。面对各功能间的矛盾点,要综合考虑应用环境、市场价格等因素,选择最佳折中方案,图 3 示出一般的救援防护服设计流程。

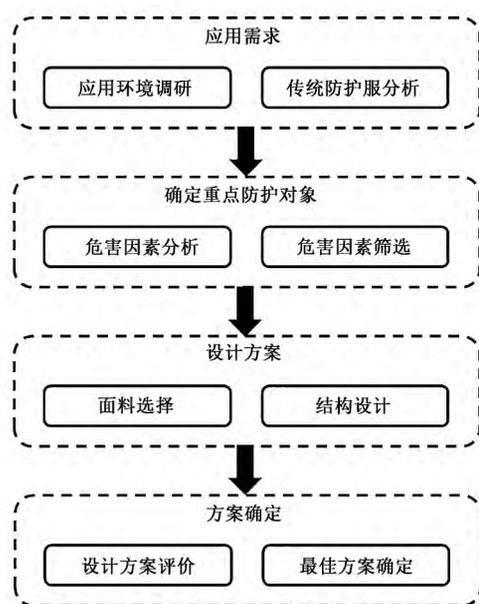


图 3 一般救援防护服设计流程

Fig.3 Design process of general rescue protective clothing

4 应急救援防护服的发展瓶颈和趋势

目前,国内救援防护服品种繁多,在设计上注重救援防护服的专业性和适用性,但各类救援防护服在专业性能上重复交叉,综合功能单一,难以做到兼顾。此外,一般救援现场的救援队伍纷杂,各救援组织穿着的救援防护服各异,标识不明显,使得救援现场凌乱,降低救援效率,但建立救援防护服的统一标准需要考虑的因素很多,所以目前国内仍未有相关国家标准。在救援防护服的舒适性评价方面,国内已经开始逐渐采用计算机模拟方法分析“人体-服装-环境”系统之间的热湿传递、评价人体舒适感,但由于“人体-服装-环境”间的热湿交换过程复杂,计算机模拟的精确度还难以控制^[34]。

应急救援防护服应用广泛,需求量大,在未来的发展趋势主要有以下几个方面。

1) 差别化、高性能化纤维。随着对救援防护服研究的深入,加工工艺和加工材料不断地更新和完善,一些高性能纤维材料不断涌现^[35]。中空纤维、超细纤维、PBI 纤维、“形状记忆”材料、远红外陶瓷纤维和高强纤维等纤维原料的开发应用,将为未来应急救援防护服的设计开发带来更多灵感。

2) 多功能、智能化救援防护服。应急救援防护服的设计开发将更加系统,再加上功能兼容技术的成熟,救援防护服的设计将趋向于集多种防护

功能于一体^[35]。从高性能纤维与复合、涂层等特种加工工艺的结合,以 PTFE 织物为代表的复合层压技术中,也能看到未来防护服多功能的影子。相变材料、纳米技术和微电子技术等在防护服上的应用,使其变得智能化。例如在应急救援防护服中加入微电子系统,可实时地反馈穿着者所处的环境状况,实现自我调节。

3) 更高地穿着舒适度。强化细节设计,从细微处体现救援防护服的实用价值和高性价比。从面料设计与结构设计上,提高穿着舒适度。如选择性透过膜复合材料、相变材料等在救援防护服上应用,减轻防护服重量,提高透气透湿性能,调节温度。

4) 规范的测试系统和评价标准。建立完善的救援防护服测试系统,利用计算机模拟技术提高防护服测试效率^[36]。规范救援防护服的分类及使用,确立救援防护服的等级和性能评价标准,都是间接提高救援效率,保障救援人员安全的有效手段。

5 结束语

目前应急救援防护服的设计在追求多功能的基础上,越来越重视舒适性能。在面料选择上倾向薄型面料,新型纤维材料的应用也越来越普遍;结构设计方面注重局部细节,从防护性能和舒适工效性能两方面入手进行结构优化;关于性能测试评价,从织物到服装整体全面评估应急救援防护服的防护性能和舒适性能,将主观问卷与客观测量数据结合,进行工效性评价。

我国应急救援防护服装在近几年越来越受到重视,虽然和发达国家相比,还存在着一些差距,但也取得了一定的进展。未来更加智能、多功能、舒适、安全的救援防护服装必将真正地保护抢险救援人员自身安全,提高救援效率,保障每个生命的存在价值。

FZXB

参考文献:

- [1] 李俊,管文静,韦鸿发. 功能防护服装的性能评价及其应用与发展[J]. 中国个体防护装备, 2005(6): 22-25.
LI Jun, GUAN Wenjing, WEI Hongfa. Performance evaluation and its application and development of functional protective clothing [J]. China Personal Protective Equipment, 2005(6): 22-25.
- [2] 吕海燕. 个体防护装备在应急救援处置中的作用[J]. 中国个体防护装备, 2009(3): 5-6.

- LÜ Haiyan. The impact of personal protective equipment in the emergency rescue [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2009(3): 5-6.
- [3] 崔淼. 浅谈防护服装的现状和对策[J]. *中国纤检*, 2014(20): 76-77.
- CUI Miao. Introduction to the status quo and countermeasures of protective clothing [J]. *China Fiber Inspection*, 2014(20): 76-77.
- [4] 张婷婷, 张明明. 3 种常见防护服的测试方法及质量验收[J]. *现代职业安全*, 2017(3): 22-24.
- ZHANG Tingting, ZHANG Mingming. Test method and quality acceptance of 3 kinds of common protective clothing [J]. *Modern occupational safety*, 2017(3): 22-24.
- [5] HEJAZI S M, KADIVAR N, SAJJAD A. Analytical assessment of woven fabrics under vertical stabbing: the role of protective clothing [J]. *Forensic Science International*, 2016(259): 224-233.
- [6] ANTONIO M, RAIMUNDO A, ANTONIO R. Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front [J]. *Fire Safety Journal* 2009(44): 514-521.
- [7] ANTONIN H, ZDENEK K. The physiological properties of smart textiles and moisture transport through clothing fabric [C]//FAN Jintu. Development in International Thermal Manikin and Modeling Meeting. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006: 355-362.
- [8] 赵阳, 姜秀慧. 《防护服一般要求》修订初探[J]. *中国安全生产科学技术*, 2013(6): 170-173.
- ZHAO Yang, JIANG Xiuhui. Discussion on modifying of technical requirements for standard of protective clothing general requirements [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2013(6): 170-173.
- [9] 刘何清, 刘天宇, 高黎颖, 等. 国内外防护服的发展与对比[J]. *矿业工程研究*, 2016(3): 71-76.
- LIU Heqing, LIU Tianyu, GAO Liying, et al. Development and contrast of domestic and overseas protective garments [J]. *Research on Mining Engineering*, 2016(3): 71-76.
- [10] 林裕卫, 段胜伟, 吴耀根, 等. 新型改性 TPE 阻燃型无孔防水透湿阻隔薄膜在生化、阻燃及多功能防护服上的应用[J]. *纺织导报*, 2017(Z1): 83-86.
- LIN Yuwei, DUAN Shengwei, WU Yaogen, et al. The application of a new modified and multi-functional non-porous TPE barrier film in biochemical, flame-retardant and multi-functional protective clothing [J]. *Textile Guide*, 2017(Z1): 83-86.
- [11] 罗道友, 朱笑初, 景肃, 等. 高性能热塑性聚酯弹性体(TPEE)的研究开发与应用[J]. *化工新型材料*, 2007, 35(3): 2-6.
- LUO Daoyou, ZHU Xiaochu, JING Su, et al. Research and application of high performance thermoplastic elastomer (TPEE) [J]. *New Chemical Materials for Chemical Industry*, 2007, 35(3): 2-6.
- [12] 伏磊, 黄晨. 薄型抢险救援服内层非织造材料的制备及性能[J]. *产业用纺织品*, 2017(5): 8-15.
- FU Lei, HUANG Chen. Preparation and properties of inner nonwovens for the thin type of emergency rescue garment [J]. *Technical Textiles*, 2017(5): 8-15.
- [13] 曾晓明, 肖振年. 一种多功能抢险救援服面料结构: 206416607 U[P]. 2017-08-18.
- ZENG Xiaoming, XIAO Zhennian. A multi-functional fabric structure for emergency rescue suit: 206416607 U[P]. 2017-08-18.
- [14] 张美进, 白建坤. 应对自然灾害国际救援制服标识意义与应用思考[J]. *中国个体防护装备*, 2012(4): 25-27.
- ZHANG Meijin, BAI Jiankun. Significance and application thoughts on international rescue uniform logo in response to natural disasters [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2012(4): 25-27.
- [15] WANG H X, WANG X G, LI T. Unidirectional water transfer effect from fabrics having a superhydrophobic-to-hydrophilic gradient [J]. *Journal of Nano-Science and Nanotechnology*, 2013(13): 839-842.
- [16] 支荣钊, 张强. 反光材料在警用救援服中的应用研究[J]. *中国个体防护装备*, 2016(2): 46-50.
- ZHI Rongchuan, ZHANG Qiang. Research on application of reflective materials in the police rescue clothing [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2016(2): 46-50.
- [17] RUCKMAN J E, MURRAY R, CHOI H S. Engineering of clothing systems for improved thermophysiological comfort: the effect of openings [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1999, 10(1): 37-52.
- [18] ADAMS P S, SLCUM A C, KEYSERLING W M. A model for protective clothing effects on performance [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1994, 6(4): 6-16.
- [19] HAVENITH G. Heat balance when wearing protective clothing [J]. *The Annual Occupational of Hygiene*, 1999, 43(5): 289-296.
- [20] 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.
- [21] 李毅. 服装舒适性与产品开发[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2002: 107.
- LI Yi. *Clothing Comfort and Development* [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2002: 107.
- [22] MULLEN K K. The effect of shoulder position on four sleeve/bodice structure [D]. Blacksburg: Virginia State University, 1991: 147-151.
- [23] 董鹏. 地震灾害应急救援人员的安全防护[J]. *中国*

- 个体防护装备, 2015(4): 51-53.
- DONG Peng. Safety Protection of emergency rescue personnel for earthquake disaster [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2015(4): 51-53.
- [24] UMBACH K H. Physiological tests and evaluation models for the optimization of the performance of protective clothing [C]//MEKJAVIC IB, BANISTER E W, MORRISON J B. *Developments in Environmental Ergonomics*. New York: IEEE Computer Society, 1988: 139-161.
- [25] LEE C, KIM I Y, WOOD A. Investigation and correlation of manikin and bench-scale fire testing of clothing systems [J]. *Fire and Materials*, 2002(26): 269-278.
- [26] 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.
- [27] BEHMANN F W, GOLDMAN R F, Bernhard K. *Handbook on Clothing* [M]. 2nd ed. [S.l.]: Research Study Group 7 on Bio-Medical Research Aspects of Military Protective Clothing, 2007: 16.
- [28] HUCK J. Protective clothing systems: a technique for evaluating restriction of wearer mobility [J]. *Applied Ergonomics*, 1988, 19(3): 185-190.
- [29] PARK K, ROSENGREN K S, HORN G P, et al. Effect of load carriage on gait due to firefighting air bottle configuration [J]. *Ergonomics*, 2010, 53: 882-891.
- [30] GEORGE H, RONALD H. A test battery related to ergonomics of protective clothing [J]. *Applied Ergonomics*, 2004(35): 3-20.
- [31] 沈润娥. 防护服的发展和改革 [J]. *中国劳动防护用品*, 1995(1): 15-17.
- SHEN Run'e. Development and reform of protective clothing [J]. *Labor Protection Articles in China*, 1995(1): 15-17.
- [32] 贾司光, 陈景山. 人体力学的生理基础及其在压力防护服设计中的应用 [J]. *航天医学与医学工程*, 1996(6): 436-440.
- JIA Siguang, CHEN Jingshan. The physiological basis of human mechanics and its application in the design of pressure protective clothing [J]. *Space medicine and medical engineering*, 1996(6): 436-440.
- [33] LOTENS W A. *Optimal Design Principles for Clothing Systems* [M]. Soesterbery: Institute of Perception, 1988: 75-79.
- [34] 胡淑蓉, 李俊. 防护服性能测评的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2011, 32(5): 148-154.
- HU Shurong, LI Jun. Progress in research of protective clothing performance test and evaluation [J]. *Journal of Textile Research*, 2011, 32(5): 148-154.
- [35] 郭晓芳, 李俊. 防护服的应用及发展趋势 [J]. *中国个体防护装备*, 2007(6): 16-19.
- GUO Xiaofang, LI Jun. Application and development trend of protective clothing [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2007(6): 16-19.
- [36] 周宏. 全球个体防护装备产业现状与发展趋势 [J]. *中国个体防护装备*, 2009(2): 5-8.
- ZHOU Hong. The current situation and development trend of the global individual protection equipment industry [J]. *China Personal Protective Equipment*, 2009(2): 5-8.