

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017070160505

消防服的老化及其寿命评估研究进展

谭欣欣^{1,2}, 崔志英^{1,2}

(1. 东华大学 海派时尚设计及价值创造协同创新中心, 上海 200051; 2. 东华大学 服装与艺术设计学院, 上海 200051)

摘要: 综述了国内外消防服常用材料芳纶纤维及其织物在热辐射、水分、紫外辐射、机械力作用、化学试剂等外界环境因素作用下其形貌、结构和性能3个方面的老化研究进展,以及现有的消防服剩余寿命评估方法,指出需同时考虑多种复合环境因素对老化影响的复杂性,挖掘更深层次的微观寿命特征。从微观结构着手,结合消防服面料的老化机制研究寻找更为有效的剩余寿命表征参数,从而得出非破坏性准确预测消防服剩余使用寿命是未来消防服研究的方向。

关键词: 消防服; 老化; 寿命评估; 微观结构

中图分类号: TS 941.731 文献标志码: A

Research progress on aging and life prediction for firefighter clothing

TAN Xinxin^{1,2}, CUI Zhiying^{1,2}

(1. Shanghai Style Fashion Design & Value Creation Collaborative Innovation Center, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. College of Fashion and Art Design, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: The progress of aging research on the morphology, structure and properties of aramid fibers and fabrics, which are common materials for fire service at home and abroad, under the influence of external environmental factors such as heat radiation, moisture, ultraviolet radiation, mechanical force and chemical reagents, as well as the existing methods for assessing the remaining life of fire service suits, were classified and reviewed. Pointing out that taking into account the complexity of the impact of multiple environmental factors on aging, mining deeper micro-life characteristics, starting from the microstructure, combining with the research on the aging mechanism of firefighting clothing fabrics in order to characterize the effective residual life and the non-destructive prediction of the remaining service life of the fire service is the development direction of future fire service research.

Keywords: firefighters clothing; aging; life prediction; microscopic structure

我国消防人员众多,消防装备作为必须消耗品,其需求量很大。经过对消防队调研得知目前我国消防服报废机制模糊,主要依靠手感、色差等经验方法判断,可靠性低,威胁着消防员的人身安全。同时,由于消防服材料为高性能纤维,成本较高,盲目报废会浪费国家资源,也造成环境污染。使用寿命是消防服一个非常关键与重要的指标,对其进行评估尤为重要。如果未达到消防服的寿命期限而提前报废

会造成资源浪费,而超期使用则会给消防员的生命安全及消防任务的可靠性带来严重的隐患。因此,对消防服进行老化程度诊断对于消防员安全保障、提高资源利用率有着重要意义。消防服的外层直接暴露在极端环境条件下,相对于其他各层更易受到外界环境因素的影响,是出现老化问题的主要部分,因此本文主要针对消防服常用外层织物及纤维进行研究。

1 芳纶纤维老化理论

消防队员没有特定的工作环境,日常救援工作是在各种环境中进行:从较低热辐射强度的暴露环境到相对罕见的极端热暴露环境。除此之外通常还涉及到湿度、紫外辐射、机械力作用、化学试剂,甚至

收稿日期:2017-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51303023);上海市浦江人才计划(16PJC002)

第一作者简介:谭欣欣,硕士生,研究方向为服装舒适性与功能性。通信作者:崔志英, E-mail: cuizy@dhu.edu.cn。

毒气烟雾。常用消防服外层面料芳纶纤维在这些环境因素作用下会发生一系列老化,主要体现在形貌变化、结构变化和性能变化 3 个方面。

1.1 形貌变化

外界因素造成消防服老化直接表现在纤维表面。Parimala 等^[1]研究了 Kevlar-49 在热氧化环境中 0.5 ~ 260.0 h 后纤维表面形貌的变化,发现材料受热氧化作用后,其纤维表面生成孔洞,局部变薄。Jain 等^[2]研究了热老化对 Nomex 纤维的残余效应,发现受热后纤维表面出现纵向开口、孔洞、材料沉积等现象。刘君杰^[3]选取 Kevlar、Nomex 等纤维进行光热老化实验,探讨纤维表面特征:随着光照时间的延长,Kevlar 纤维断头形貌发生较大变化,分散状的原纤化劈裂非常严重,纤维皮层原纤有明显的脱落,树状原纤化劈裂破坏特征非常明显;而 Nomex 纤维则不同,仍然表现出脆性断裂的形貌;经过长时间的光照,2 种高性能纤维表面会产生大量的缺陷,引起较大应力集中的表面缺陷是导致纤维力学指标下降的最主要因素,同时纤维内部也会产生缺陷。

Guillaume 等^[4]研究了经过不同表面处理的 2 种芳纶纤维在碱性环境中的老化情况。材料经老化实验后通过扫描电子显微镜(SEM)分析得出:表面处理似乎限制了 Technora 纤维在 pH 值为 11 的碱性环境中体积的下降和表面退化。而 Twaron 纤维表面处理程度更高,限制其表面退化和体积的下降,使该纤维的耐久性能在 pH 值为 11 和 9 的碱性环境中只受到轻微的影响。

1.2 结构变化

纤维的结构变化直接导致其性能的好坏。Jain 等^[2]研究了热老化对 Twaron 纤维的残余效应,等温老化的纤维的 X 射线数据显示其晶格发生变化,结晶度下降,等温老化还导致质量损失。对 Twaron 的数据进一步研究发现热诱导效应被温度和累计曝光时间控制。类似的,彭涛^[5]也做过这方面研究,在不同温度下制备出不同老化程度的芳纶 III 试样,并对其结构分析,得出:随着温度的升高和热氧老化时间的延长,芳纶 III 的强度保留率降低,纤维聚集态结构发生重排,老化纤维断裂方式从劈裂断裂发展为脆性断裂;而芳纶 III 的化学结构并未发生明显变化。

Gu^[6]对芳纶纤维的耐紫外线性能进行了研究,发现芳纶纤维在紫外辐射后,紫外波段的能量使波长分别为 340 和 306 nm 的酰胺键中的—C—O—和—N—H—键发生断裂,导致力学性能有明显的下降。同样,历世能^[7]模拟 PPTA(对位芳纶)纤维在短时间内的 UV 老化实验,研究了不同 UV 辐射时

间对 PPTA 纤维结构的影响,得出:UV 老化后纤维表面刻蚀、光诱发酰胺键断裂与氧化,以及末端基团的分离,导致 PPTA 纤维力学性能下降,且 UV 辐射主要造成 PPTA 纤维的皮层结构老化。

Arrieta 等^[8]对 Kevlar(R)-PBI 混纺织物的水解和光化学老化行为进行了研究,衰减全反射红外光谱分析光化学老化样品显示 Kevlar 纤维的酰胺键断裂伴随着光氧化反应。断裂强力曲线的重叠部分表明在恒定温度下,随着辐照度增大,光解物产生了“屏幕效应”,说明恒温下断裂强力不受相对湿度变化的影响,水分的吸收不是降解动力学速度控制的关键因素。衰减全反射红外光谱分析揭示了新的吸收带的出现是因为在湿度发生改变后酰胺键水解过程中羧基的产生。—COOH 键的相对强度不随暴露时间而变化,表明在降解过程中除了水解之外还有竞争复合反应发生。

刘君杰^[3]选取 Kevlar、Nomex 等纤维进行光热老化实验,发现 Kevlar 纤维在低温范围内出现了一个明显的次级转变峰,定义为 γ 松弛,相应于纤维无定形态部分次级玻璃化转变。这个低温转变与 Kevlar 纤维主链上的 C—C 键运动有关。热处理对其动态热力学性能的影响没有明显规律。Kevlar 纤维在 300 °C 之前的断裂强力保持率是非常高的,达到 70% 左右,而 Nomex 纤维在光照处理 200 h 以后,其断裂强力和断裂伸长保持率只有未经过光照处理原样的 20% ~ 30%。

1.3 性能变化

热老化是芳纶纤维最主要的老化形式之一,Hoschke^[9]根据消防员的热负荷将火场环境分为 3 类:常规环境(相当于炎热的夏天)、危险环境(燃烧的建筑物外消防员正常工作环境)、紧急环境(接近火或接触火的环境)。目前相关研究中,热防护服装的老化研究主要集中在高强度的人工加速老化,针对自然老化的研究较少。

Yue 等^[10]对处于大气和真空 2 种环境中的 Kevlar-29 纤维进行热老化实验,结果表明:在大气环境中,纤维的拉伸强度和拉伸应变随着温度的升高而降低。当温度恒定时,拉伸强度和拉伸应变不随加热时间而变化。杨氏模量不受热处理的影响。在真空中,热处理对纤维的拉伸性能没有任何影响。刘震等^[12]对天然橡胶 NR 和 PPTA 纤维热空气老化后力学性能变化进行了研究,发现 PPTA 纤维的力学性能保持率远大于 NR。

刘晓燕等^[12]总结概括了国内外芳纶纤维的热、光老化研究现状,尤其指出紫外辐射相较于其他因素对纤维老化作用更明显,应加强其耐光性方面的

研究,探索相应的防护改进措施。

张楚旋等^[13]在温度80℃和相对湿度85%的湿热环境中进行老化实验,研究芳纶Ⅱ和芳纶Ⅲ(杂环芳纶)湿热老化对拉伸强度的影响,试样老化2500h后测试Kevlar、Armos和F-12纤维的吸湿性能、拉伸强度、断裂伸长率以及弹性模量,结果表明:经湿热老化实验,3种芳纶的性能均略有下降。

Derombise等^[14]在碱性环境基础上加入水分因素研究Twaron1000纤维在不同湿、碱性环境(海水、去离子水,pH值为9和11)中的老化行为。利用傅里叶变换红外光谱仪和黏度测量法测试其水解以及拉伸性能,结果表明,纤维的抗拉强度随着老化时间呈指数变化,而模量保持不变。

目前研究多集中在热老化对芳纶纤维的影响,且对纤维各项性能变化分析得出的结论也较为一致。但纤维老化的因素不够丰富,缺乏摩擦、洗涤、烟尘等因素对芳纶纤维的影响,而且针对纤维内部结构变化的研究不够清楚,还需要系统深入的对芳纶纤维的老化降解机制和性能做出进一步的分析。

2 消防服用织物老化研究现状

众所周知,消防服的使用环境十分复杂,在热、光、湿、紫外线、应力等环境因素的综合影响下,消防服面料非常容易受到损伤,尤其是其阻燃外层面料。自然老化研究耗时长且因素不可控,重复性低,Jorg^[15]通过人工老化实验证实了通过改变温度来缩短测试时间的可行性,为老化研究提供了有效途径。

2.1 热老化作用

20世纪70年代早期,Perkins^[16]研究了低热辐射作用下单层织物的热传递方式,并进行了不同热强度下的热重分析,研究表明,在低热辐射下,织物面密度影响服装的热防护性能。Song等^[17]研究了暴露于热流量为6.3~8.3kW/m²下的织物系统的热防护性能,发现在热辐射结束后,储存在服装系统中的热量仍可造成皮肤烧伤,且会显著降低服装的热防护性能。杨海燕^[18]针对热辐射对消防服用织物热防护性和耐久性进行了研究,选取NomexⅢA和国产芳纶作为外层织物,测试织物表面温度、断裂强力、撕破强力和断裂伸长率等各项基本物理性能的变化。得出:NomexⅢA隔热性比国产芳纶更好,热辐射强度为6.5kW/m²时,织物的强力保持率较高,且TPP(热防护性能)值增大;热辐射强度为9.7kW/m²时,织物断裂强力及撕破强力随热辐射时间增加而显著下降,断裂伸长率也下降。

Andrey^[19]提出一种模拟在强热流下消防服热湿传递模型,目的是研究热湿耦合作用对热防护性

能的影响,模型能计算并表示出当纤维暴露在高强热流下以及冷却时的温度与含水率分布。该研究还预测了消防员在强热流下达到二度及三度烧伤的时间,并建立了完整的“火—织物—空气层—皮肤”系统模型。

2.2 光老化作用

孟瑾^[20]研究了日晒对消防服织物性能的影响,以芳纶和NomexⅢA为实验对象,研究不同辐照度、辐照时间对其物理性能、表面外观性能、热学性能和力学性能的影响。结果表明,日晒后织物经纬密度均增加,织物收缩,厚度增加,面密度减小;形成色差;表面抗湿性能均下降了1级;TPP增加,热防护性能提高;撕破强力总体上呈现下降趋势。

2.3 湿热老化作用

Barker等^[21]研究暴露于6.3kW/m²热流量下,消防服织物吸收的水分对其热防护性能的影响,并讨论了不同透湿性能的织物所含水汽对预测二度烧伤的影响以及总热损失。结果表明:在实验条件下,添加水分相对较少时(占整体消防服质量的15%~20%),水汽对热防护性能的负面影响最大。曹娟等^[22]研究了湿态下消防服用织物的热防护性能,选用3种常见消防服多层结构面料,暴露在强度为15.4kW/m²的热辐射下,通过皮肤烧伤模型预测二度烧伤时间,比较不同面料吸湿后热防护性能的变化。得出:隔热舒适层较厚的织物在含水率为45.9%时,二度烧伤时间达到了最小值,隔热舒适层相对较薄的2种织物在含水率分别为20.0%和24.2%时,二度烧伤时间也达到了最小值。随着织物含水率继续增大,二度烧伤时间呈上升趋势。

2.4 光湿及光热老化作用

马春杰^[23]选取4种不同外层织物与PTFE(聚四氟乙烯)膜、隔热毡和阻燃粘胶组合成消防服,设计光湿复合和光热复合老化实验。得出:随着光照时间及润湿度增加,织物表面色彩变深,撕破强力和断裂强力减小,热防护性能变好,且不同成分织物存在差异性;光热老化对织物色差值影响显著,随着光照时间及热辐射时间的增加,撕破强力和断裂强力均减小,外层织物及组合层的TPP值增大。最后,建立光、湿、热3种环境因素交互作用下消防服色彩与力学性能的关系模型。结果表明,各模型均表现出较高的拟合度,其预测误差均值在2.0%~7.2%范围内。

2.5 热与摩擦老化作用

2015年,韩伦^[24]通过使用改造后的TPP热防护性能测试仪和自主发明的热防护织物模拟损伤摩

擦器对芳纶 III A、芳纶 982、芳纶与阻燃粘胶混纺织物和 Kevlar-PBI 4 种主流消防服用织物进行实验室损伤模拟,研究热辐射和摩擦对其厚度、空气层、面密度、透气性、透湿性和结晶度的影响,从而得出热防护性、拉伸强力和撕破强力的变化趋势。

从国内外相关研究可知,众多学者从外界环境因素以及织物类型方面来分析对消防服各项性能的影响,但多局限在 1 种因素或少数 2 种复合因素。而消防服作为功能性服装,需要满足多种性能需要以应对火场的复杂环境,因此,需要拓展所研究的老化因素种类及复杂程度,更加科学地、充分地描述消防服在实际使用环境中的阻燃性、热防护性、力学性能的退化历程及其老化机制。

3 消防服寿命预测方法进展

消防服老化的评定包括定性评定和定量评定。不同消防服材料之间耐老化性能的比较为定性评定,而对消防服进行使用寿命预测则为定量评定。由于消防服恶劣的使用环境条件,对其性能可靠性要求很高,因此,消防服的定量评定已成为消防服老化研究的一个重要部分。

3.1 水蒸气透过率预测方法

EI 等^[25]选取 e-PTFE/Nomex 防水透气层作为研究对象,老化实验设置为 190~320 °C 范围内的 5 个温度,然后进行拉伸性能、梯形撕裂强力以及防水透气层的水蒸气透过率变化测试。该材料性能的改变与 Nomex 纤维降解有关。在 220 °C 以下,水蒸气透过率随时间增加而下降,而温度高于 220 °C 时水蒸气透过率大于未老化试样的水蒸气透过率,这与水蒸气透过率相关的 2 种现象有关:即 e-PTFE 层压板的气孔闭合和裂缝与孔洞的产生;因此,利用防水透气层的老化可预测防护服寿命。

3.2 色彩预测方法

Rezazadeh 等^[26]选取未染色和染色 2 种外层面料与防水透气层和隔热层组成复合结构进行热老化实验。结果表明:外层面料经过单次热辐射和多次热辐射后拉伸强度和色彩均不同,且二者存在相关关系。在同一温度下多次暴露比单次暴露相同时间的破坏性低,因此,织物色彩可以作为非破坏性评估消防服外层面料老化程度的指标。多数学者只是针对防护服寿命预测的方式做出了假设,并未实现实际可行的预测模型。部分学者在此基础上进行大量研究,得出了老化程度可量化的预测模型。

3.3 BP 神经网络模型

崔志英^[27]将 BP 神经网络模型运用到消防服的热防护性能预测研究中,以外层、防水层和隔热层织

物的厚度、面密度、导热系数等 12 个物理指标作为输入参数,以多层组合织物的 TPP 值为输出参数,中间的隐含层神经元为 6 个,并经过试样的训练和验证,建立了消防服用多层组合织物的热防护性能预测模型,实际值与预测值的相关性系数为 0.962。

3.4 线性关系模型

杨海燕^[18]对热辐射作用下消防服色彩变化与强力保持率间的关系模型进行了研究。选取常见消防服用外层织物 Nomex III A 和国产芳纶进行不同热辐射强度(6.5、9.7、17.2 kW/m²)的老化实验,然后测试其力学性能变化绝对值与欧几里得距离 ΔE ,在 Lab 空间中的欧几里得距离 ΔE 计算公式见式(1),使用 Lab 中的 2 个颜色特征值(L_1^* , a_1^* , b_1^*)和(L_2^* , a_2^* , b_2^*)。

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

再计算出织物力学性能变化的绝对值 $|\Delta S|$,找出二者的相关系数并分析二者的回归关系,得到回归方程如下:

$$S' = S - (m\Delta E + n) \quad (2)$$

式中: S 为原始试样力学性能值; S' 为热辐射后试样力学性能值; m 为 ΔE 的偏回归系数; n 为常数项的偏回归系数。

通过式(2),可以建立基于 Matlab 软件的热辐射前后织物力学性能与颜色变化间关系的预测模型,从而非破坏性地评价消防服的生命周期。在此基础上,孟瑾^[22]对日晒作用下辐照条件与消防服色彩、撕破强力变化率间的关系模型进行了研究,建立了基于 Matlab 的辐照条件与色差、撕破强力变化率之间的预测模型。马春杰^[23]对光、湿、热 3 种环境因素交互作用下消防服色彩变化与强力保持率间的关系模型进行了研究,选取 4 种常见消防服外层织物与透气层、隔热层及舒适层组成复合结构,设计了光湿、光热复合老化实验,测试织物的表面色差、物理力学性能以及 TPP 值,最终建立了织物色彩变化与强力保持率之间的关系模型。

4 结束语

国内外针对消防服生命周期的研究起步均较晚,近些年来才开始开展消防服用织物老化检测技术的研究工作,到目前为止相关研究也不多。基于主观经验的寿命预测不能起到很好的作用,综合考虑现有的消防服人工加速老化实验以及寿命预测模型,可以得到以下几个指导原则:

① 现有老化模拟实验一般只考虑了单一因素或

2种因素对消防服用织物性能的影响,而消防服在实际穿着时接触的环境极为复杂,受到热辐射、水分、日晒、摩擦和化学品等多种因素共同作用,其老化机制和性能变化也更为复杂,因此,应同时考虑各种因素对老化影响的复杂性,试图从机制角度建立完善的老化机制模型。

②基于数据驱动的BP神经网络模型应当在机制描述不能实现的情况下,再辅助数据驱动的思想,从数据中挖掘规律。

③现有研究得出的消防服老化模型多以色彩变化为判断的指标较为主观,判断结果因人的感觉和经验不同,或织物本身的颜色、色牢度不同可能存在差异,并不能达到直观、准确的预估消防服的剩余寿命,及时给出报废提示。因此,有待结合机制深入研究寻找更为有效的寿命特征参数,从微观结构着手,实现非破坏性的在线快速预估方法。

参考文献:

- [1] PARIMALA H V, VIJAYAN K, Vijayan K. Effect of environmental exposures on the aramid fiber kevlar [J]. *J Mater Sci Lett*, 1993, 12(2): 99-101.
- [2] JAIN, ANJANA, VIJAYAN, et al. Thermally induced structural changes in Nomex fibers [J]. *Bulletin of Materials Science* 2002 25: 341-346.
- [3] 刘君杰. 几种高性能纤维热松弛及光热老化机制与性能表征[D]. 上海: 东华大学, 2005.
- [4] GUILLAUME Derombise, LAETITIA Vouyovitch Van Schoors, MARIE-Fleur Messo. Physicochemical properties of kevlar 49 fiber [J]. *Journal of Applied Polymer Science* 2010, 117: 888-898.
- [5] 彭涛, 蔡仁钦, 王凤德. 热氧老化对芳纶Ⅲ纤维结构与性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2011, 34(2): 247-251.
- [6] GU H. Ultraviolet treatment on high performance filaments [J]. *Materials and Design*, 2005, 26: 47-51.
- [7] 历世能. 芳纶纤维的老化及表面处理的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [8] CARLOS Arrieta, ERIC David, PATRICIA Dolez, et al. X-ray diffraction, Raman, and differential thermal analyses of the thermal aging of a Kevlar®-PBI blend fabric [J]. *Polymer Composites* 2011 32(3): 362.
- [9] HOSCHKE B. Standards and specifications firefighters clothing [J]. *Fire Safety Journal*, 1981, 4(2): 125-137.
- [10] YUE C Y, SUI G X, LOOI H C. Effects of heat treatment on the mechanical properties of Kevlar-29 fibre [J]. *Compos Sci Technol*, 2000 60: 421-427.
- [11] 刘震, 唐凯, 吴迪. 天然橡胶/对位芳纶纤维老化性能研究[J]. *弹性体*, 2005 26(3): 61-63.
- [12] 刘晓燕, 于伟东. 芳纶的热光老化降解研究[J]. *高科技纤维与应用* 2005 30(4): 31-35.
- [13] 张楚旋, 冯艳丽, 王宝生. 湿热老化对杂环芳纶拉伸性能影响研究[J]. *高科技纤维与应用* 2013 38(4): 25-28.
- [14] G Derombise, L Vouyovitch Van Schoors, P Davies. Degradation of aramid fibers under alkaline and neutral conditions: Relations between the chemical characteristics and mechanical properties [J]. *Journal of Applied Polymer Science* 2010, 116(5): 2504-2514.
- [15] JORG Boxhammer. Shorter test times for thermal- and radiation-induced aging of polymer materials: acceleration by increased and temperature in artificial weathering tests [J]. *Polymer Test*, 2001 20: 719.
- [16] PERKINS R. Insulative values of single-layer fabrics for thermal protective clothing [J]. *Textile Res J*, 1979, 49(4): 202.
- [17] SONG G, 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.
- [18] 杨海燕. 热辐射对消防服用织物热防护性能及耐久性的影响[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [19] ANDREY. Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure [J]. *Heat And mass Transfer*, 2005, 41(3): 206-215.
- [20] 孟瑾. 日晒对消防服用织物性能的影响[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [21] 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.
- [22] 曹娟. 含水率对消防服用织物热防护性能的影响[J]. *天津工业大学学报*. 2016, 35(1): 33-37.
- [23] 马春杰. 环境因素对消防服用织物性能的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [24] 韩伦. 消防服面料受到热辐射和摩擦损伤后的性能变化情况研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [25] El Aidani, Rachid, Dolez, et al. Effect of thermal aging on the mechanical and barrier properties of an e-PTFE/Nomex (R) moisture membrane used in firefighters' protective suits [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 121(5): 3101-3110.
- [26] MOEIN Rezazadeh, DAVID A. Torvi, Assessment of factors affecting the continuing performance of firefighters' protective clothing: a literature review [J]. *Fire Technology* 2011 4(3): 565.
- [27] 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, 2008.