

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170903705

消防服外层织物热防护性与舒适性综合评价

翟胜男^{1,2}, 陈太球³, 蒋春燕³, 傅佳佳^{1,2}, 王鸿博^{1,2}

(1. 江南大学 江苏省功能纺织品工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122; 3. 圣华盾防护科技股份有限公司, 江苏 无锡 214413)

摘要 为保证消防服具有良好的热防护性能和较好的热湿舒适性能, 选取7种消防服外层织物为研究对象, 测试了织物热防护性能及舒适性能相关指标, 分析了织物原料及性能参数等因素对热防护性能与舒适性能的影响, 并阐述其影响规律; 采用模糊综合评判的方法综合评价织物热防护性能与舒适性能。结果表明: 织物的热防护性能与其原料组成、织物厚度及紧度相关, 舒适性能主要与织物密度、紧度以及织物厚度、面密度有关; 在测试的7种织物中芳纶防静电防护织物的综合性能最佳, 而腈纶/棉混纺防护织物的性能较差。

关键词 消防服织物; 热防护性能; 热湿舒适性; 模糊综合评判

中图分类号: TS 156 文献标志码: A

Comprehensive evaluation on thermal protection and comfort of outer fabrics of firefighter protective clothing

ZHAI Shengnan^{1,2}, CHEN Taiqiu³, JIANG Chunyan³, FU Jiajia^{1,2}, WANG Hongbo^{1,2}

(1. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Functional Textiles, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. Swoto Protection Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214413, China)

Abstract In order to ensure both thermal protection performance and thermal wet comfort performance of the firefighter protective clothing, 7 kinds of outer fabrics for firefighter protective clothing were selected for the study. Each single index of thermal protective performance and comfortable performance related indicators of the fabrics were tested, and the influences of factors such as fabric material and performance parameters on thermal protection performance and comfort performance were analyzed, and its influence law was expounded. A fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the thermal protection performance and comfort performance of the fabrics. The results show that the thermal protection performance of the fabric is related to the composition, thickness and compactness of the fabric, and the comfort performance is mainly related to the fabric density and compactness as well as thickness and gram weight of the fabric. Among the seven kinds of fabrics tested, aramid anti-static fabric is the best in comprehensive performance, while the performance of acrylic fiber/cotton blended protective fabric is the poorest.

Keywords firefighter protective clothing fabric; thermal protection performance; thermal-wet comfort; fuzzy comprehensive evaluation

消防服是消防人员在进行灭火作业时所穿着的具有防护功能的一类服装, 具有较高的阻燃和热防护性能, 避免消防人员在灭火作业过程中受

到烧伤和烫伤等危害。目前, 国内消防服依据《消防员灭火防护服》标准裁制: 消防类服装由4层材料构成, 分别为阻燃外层、防水透气层、隔热层及

收稿日期: 2017-09-18 修回日期: 2018-02-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0309100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP51622A); 江苏省产学研前瞻性研究项目(BY2016221-23); 江苏省先进纺织工程技术中心立项课题(XJFZ/2015/1)

第一作者简介: 翟胜男(1993—), 女, 硕士生。主要研究方向为功能纺织品。

通信作者: 王鸿博, E-mail: wxwanghb@163.com。

舒适层。其中,外层织物直接与火焰接触,须具备较高的阻燃和耐高温性能,因而常使用高性能阻燃纤维织造,如芳纶纤维等^[1-2];防水透气层可阻止水向隔热层渗透,同时又可排出水蒸气和人体产生的汗液和湿气,提高服装舒适性;隔热层起到隔绝高温高热的作用;舒适层则直接与人体接触,具备舒适性及热防护性能。这4层结构的存在虽有效地提高了服装的热防护性能,但同时也会阻碍人体热量和汗液的排出,易造成人体热应激反应,威胁消防人员生命安全^[3-6]。

有很多学者从事织物参数对热防护性能影响的研究: Sun等^[7-8]指出单层织物成分对防护性能起着决定性作用,织物的厚度、面密度等也会对其产生影响;李俊等^[9-12]则在此基础上又进一步对消防服各层材料性能进行研究,推导防护性或舒适性的最佳结构。但目前对于兼顾服装热防护性和舒适性方面的研究还较少,本文则基于此对外层织物的热防

护性和舒适性进行研究,定性地描述织物参数对二者的影响,此外采用模糊综合评判法对织物的综合性能进行评价,得出评价最优的织物,以期为消防服装外层织物综合性能的研究提供参考。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

材料: 消防服外层织物,由江苏圣华盾防护科技股份有限公司提供。

仪器: #403-14型热防护性能测试仪(美国Thermetrics公司); YG141型织物厚度仪、电子天平、YG461E-III型全自动透气量仪、YG601-II型电脑式织物透湿量仪(宁波纺织仪器厂)。

1.2 实验方法

在标准温湿度条件下,测试了7种消防服外层织物的参数,结果如表1所示。

表1 织物参数

Tab.1 fabric parameters

试样编号	试样名称	纤维原料及含量	组织	厚度/mm	面密度/(g·m ⁻²)	总紧度/%	线密度/tex		密度/(根·(10 cm) ⁻¹)	
							经纱	纬纱	经向	纬向
1#	芳纶混纺防护织物	93% 间位芳纶 + 5% 对位芳纶 + 2% 抗静电纤维	平纹	0.60	250	85.86	53.33	48.00	163	153
2#	芳纶/粘胶防护织物	50% 芳纶 + 50% 阻燃粘胶	平纹	0.54	250	86.30	42.00	39.67	197	177
3#	腈纶/棉混纺防护织物	60% 腈纶 + 38% 棉 + 2% 抗静电纤维	斜纹	0.53	250	98.24	52.00	50.33	247	207
4#	全棉阻燃防护织物	100% 阻燃棉纤维	斜纹	0.66	310	100.00	52.80	51.25	283	177
5#	芳纶阻燃防护织物	100% 芳纶纤维	斜纹	0.52	203	100.00	32.00	18.80	347	303
6#	芳纶阻燃防护织物	100% 芳纶纤维	平纹	0.43	182	96.35	35.20	38.17	250	237
7#	芳纶防静电防护织物	2% 防静电纤维 + 98% 芳纶纤维	平纹	0.51	220	93.44	42.00	41.60	213	210

1.2.1 织物热防护性能测试

1.2.1.1 测试仪器及原理 热防护性能测试仪器如图1所示。该仪器的测试装置包括: 组合对流辐射热源(对流热源6、辐射热源7)、试样3及传感器支撑结构4、用于暴露控制的隔热盖板5、铜量热传感器1、铜量热传感器组件2和数据采集/分析系统等。此外,仪器还设有自动化装置,控制试样暴露及远离热源;同时设有循环水冷装置。

该仪器设有双重热源,即1个辐射热源和2个对流热源,模拟火场环境中辐射热和对流热。对流热源为2个呈一定角度安装的火焰发生装置,对称放置在样品下方,通过连接丙烷气筒产生火焰;辐射热源由9个水平排列的红外石英灯管(500 W, 240 V 交流电)组成。在样品上方放置一温度传感器组件模拟服装与人体皮肤的接触,通过该组件测试样品温度变化,经过数据采

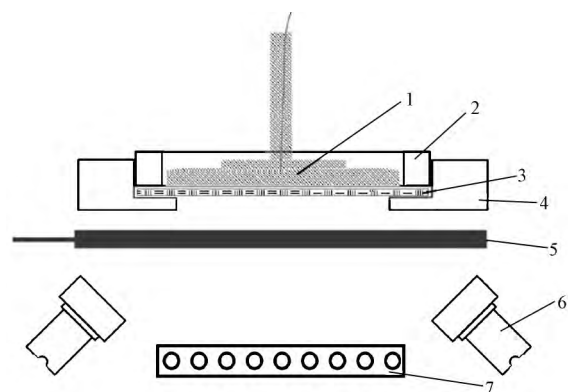


图1 热防护测试仪的示意图

Fig.1 Schematic of thermal protection tester

集/分析系统记录描绘试样的温度变化曲线,并将该曲线与Stoll标准曲线相比较(两曲线的交点所对应横坐标的数值即为达到二级烧伤的时间 $t(s)$)。

1.2.1.2 测试方法 根据 GA10—2014《消防员灭火防护服》规定:测试样品数量至少 3 块,尺寸为(150±2) mm×(150±2) mm(不含接缝部位),实验总热流量设定为(83±2) kW/m,热暴露时间设定为 30 s。测试前样品需在温度为(20±2)℃、相对湿度为(65±4)%的恒温恒湿箱中调湿处理 24 h。在取出后 3 min 内进行测试^[10]。通过下式计算样品的热防护系数。

$$TPP = tq$$

式中:TPP 为热防护系数,kW·s/m²;q 为暴露热通量 kW/m²;t 为二级烧伤的时间 s。

TPP 值越大,达到二级烧伤时间 t 越长,织物热防护性能越好;反之,则越差。

1.2.2 透湿率测试

依据 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分:吸湿法》,使用电脑式织物透湿仪测定织物的透湿性能。测试条件:温度为 38℃,相对湿度为 90%,每种织物不同部位各取 3 块,通过下

式计算透湿量。

$$WVT = \frac{24\Delta m}{St}$$

式中:WVT 为织物的透湿量,g/(m²·d);S 为织物测试面积,m²;t 为测试时间 h;Δm 为同一实验组合体 2 次称量质量之差 g。

1.2.3 透气性测试

依据 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》,在实验前将待测试样进行预调湿:温度为(20±2)℃,相对湿度为(65±2)%。使用全自动透气量仪测定试样透气率,测试压差为 100 Pa;测试面积为 20 或 30 cm²,测试次数要求同一试样不同部位重复测量至少 10 次,取平均值。

2 实验结果与讨论

表 2 示出了 7 种消防服织物热防护性能及舒适性能测试值。

表 2 织物热防护性能及舒适性能

Tab.2 Thermal protection and comfort properties of fabric

试样编号	织物热防护性能			织物舒适性能		
	H ₁₂ / (kW·m ⁻²)	H ₂₄ / (kW·m ⁻²)	二级烧伤 时间/s	TPP 值 / (kW·s·m ⁻²)	透气率 / (mm·s ⁻¹)	透湿量 / (g·(m ² ·d) ⁻¹)
1 [#]	575.102	849.228	8.271	695.001	66.68	583.09
2 [#]	491.100	679.092	6.596	554.217	66.83	446.41
3 [#]	469.361	694.008	6.378	536.300	59.93	512.41
4 [#]	415.866	553.289	5.250	441.105	61.31	855.41
5 [#]	531.664	786.540	7.412	622.830	163.70	759.79
6 [#]	483.328	715.668	6.762	568.157	211.50	992.61
7 [#]	573.474	839.929	8.072	678.297	139.73	683.39

注:H₁₂、H₂₄分别为温度升高 12℃和 24℃时试样吸收的热量值。

2.1 织物热防护性能影响因素分析

2.1.1 纤维种类对热防护性能的影响

由表 2 可看出,7 种试样 TPP 值按从大到小排列顺序为 1[#]>7[#]>5[#]>6[#]>2[#]>3[#]>4[#]。其中,不含芳纶纤维的试样 4[#]、3[#]达到二级烧伤时间最短,TPP 值最小,说明这 2 种试样的热防护性能最差。含芳纶纤维的试样 1[#]、7[#]、5[#]、6[#]及 2[#]的 TPP 值大于 4[#]和 3[#],说明这几组织物热防护性能较好。

由试样纤维组成分析造成这种现象的原因可能是:织物 4[#]和 3[#]所含纤维(阻燃棉、腈/棉混纺)为阻燃后整理纤维,暴露于火焰时极易燃烧,达到二级烧伤时间较短,TPP 值较低,织物热防护性能较差;织物 1[#]、7[#]、5[#]、6[#]及 2[#]所含的芳纶纤维因其自身特殊的苯环结构,阻燃性和耐热性能良好^[2],暴露于火焰时不易燃烧,TPP 值较大,织物热防护性能较高。

由以上分析可以看出:纤维的种类对织物的热防

护性能有很大影响,纤维阻燃和耐热性能越高,TPP 值越高,织物的热防护性能越好,特别是本质阻燃的纤维织物热防护性能要优于后整理阻燃的纤维织物。

2.1.2 纤维含量对热防护性能的影响

含有芳纶纤维的试样 1[#]、2[#]、5[#]、6[#]和 7[#],其中 1[#]、5[#]、6[#]和 7[#]芳纶纤维含量均在 98%左右。芳纶纤维含量估算为:1[#](245 g/m²)>7[#](215 g/m²)>5[#](199 g/m²)>6[#](178 g/m²)>2[#](125 g/m²),这与织物 TPP 值变化相同。芳纶纤维含量越高,织物热防护性能越好。

与此类似,试样 3[#]含有棉纤维约 95 g/m²,小于试样 4[#]所含的 310 g/m²,而 TPP 值为 3[#]>4[#]。说明阻燃棉纤维的含量越少,织物热防护性能越高。

由以上分析可以得到,纤维含量对织物热防护性能同样有很大影响:阻燃和耐热性能好的纤维含量越多,越有利于提高织物热防护性能;阻燃和耐热

性能差的纤维含量越少,越有利于提高织物热防护性能。

2.1.3 组织参数对热防护性能的影响

在纤维原料相近(如1[#]、5[#]、6[#]、7[#])情况下,随着织物厚度和面密度的增大,TPP值相应增大,织物的热防护性能提高。

此外,织物的热防护性能还与总紧度有关。由表2可知,织物总紧度为6[#] < 5[#] < 7[#] < 1[#],织物TPP值相应减小。由此可知,随着织物总紧度的增大,TPP值相应增大,织物热防护性能提高。

2.2 织物舒适性能影响因素分析

2.2.1 织物参数对透湿性的影响

从表2看出,试样6[#]的透湿性能最好,3[#]的透湿性能最差。为找出影响织物透湿性的主要因素,采用灰色关联度分析法,通过随机性的时间序列找到关联性,从而寻找系统中各因素的主要关系,进而找到主要影响因素,步骤如下。

1) 确定分析数列。设因变量数据构成参考序列,自变量数据构成比较序列:

$$X_i(k) = [X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(m)]$$

$$Y_i(k) = [Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(m)]$$

式中: $Y_i(k)$ 为参考序列; $X_i(k)$ 为比较序列; m 为序列长度; k 为关联时刻。

2) 初始序列初值化处理。对比较序列和参考序列进行初值化处理。

$$X'_i(k) = \frac{X_i(k)}{X_i(1)}; Y'_i(k) = \frac{Y_i(k)}{Y_i(1)}$$

3) 计算差序列。差序列是指计算每个点上参考序列和比较序列差的绝对值。

$$\Delta_{0i}(k) = |Y'_i(k) - X'_i(k)|$$

$$\Delta_{\max} = \max |Y'_i(k) - X'_i(k)|$$

$$\Delta_{\min} = \min |Y'_i(k) - X'_i(k)|$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 为差序列; Δ_{\max} 为差序列极大值; Δ_{\min} 为差序列极小值。

4) 计算关联系数。关联系数是指比较序列与参考序列在同一时刻的关联程度。

$$\varepsilon_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta_{\max}}$$

式中: ρ 为分辨系数,一般取0.5。

5) 计算关联度。

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varepsilon_{0i}(k)$$

设置目标值 Y_1 为透湿量, X_1 为厚度, X_2 为面密度, X_3 为经向密度, X_4 为纬向密度, X_5 为总紧度。

经计算所得各项结构参数关联度为:

$$\gamma_{11} = 0.658, \gamma_{12} = 0.610, \gamma_{13} = 0.642,$$

$$\gamma_{14} = 0.640, \gamma_{15} = 0.729$$

由此可看出,织物的紧度对透湿性能影响最为显著,其次为厚度、经纬密度及面密度。

2.2.2 织物参数对透气性的影响

与分析织物参数对织物透湿性能影响相类似,通过灰色关联度法计算得到织物透气率与各项参数的关联度:

$$\gamma_{21} = 0.564, \gamma_{22} = 0.543, \gamma_{23} = 0.701,$$

$$\gamma_{24} = 0.737, \gamma_{25} = 0.716$$

由此可看出,织物经纬密度及紧度对织物透气性有显著影响,其次为织物的面密度、厚度。结合生产实际可以得出,紧密程度以及厚度越小的织物,结构越疏松,透气性能越好。

2.3 综合评价织物热防护与舒适性

在分析热防护和舒适性能影响因素后,运用分层评价模式,从织物TPP值(安全 S_i)、透湿量(服用 C_i)、透气率(舒适 D_i) 3个方面对消防服外层织物综合性能进行评价,并计算得到质量评价综合指数(Q_i)^[11],选出综合性能最优的织物。

将3项指标值做归一化处理,即将单项参数与该项参数所有样本之和求比值,结果如表3所示,表中数据作为评价分指数使用。

表3 测试数据处理结果

Tab.3 Test data processing results

试样编号	TPP值 (S_i)	透湿量 (C_i)	透气率 (D_i)	综合指数 (Q_i)
1 [#]	0.170	0.121	0.087	0.137
2 [#]	0.135	0.092	0.087	0.114
3 [#]	0.131	0.106	0.078	0.111
4 [#]	0.108	0.177	0.080	0.110
5 [#]	0.152	0.157	0.213	0.171
6 [#]	0.139	0.205	0.275	0.190
7 [#]	0.166	0.141	0.182	0.167

质量评价综合指数 Q_i 由3个分指数加权计算得到,其值越大,织物综合质量越好。

$$Q_i = u_1 D_i + u_2 S_i + u_3 C_i$$

式中: u_1 、 u_2 、 u_3 这3个权重值的设定由实验室专业人员根据经验赋值,其中 $u_1 = 0.30$, $u_2 = 0.55$, $u_3 = 0.15$ ^[13]。

由表3可看出,7种织物中,芳纶防静电防护织物(试样6[#])的评价综合指数 Q_i 最高,说明织物综合热防护与热湿舒适性能最好;全棉阻燃织物(试样4[#])的评价综合指数 Q_i 最低,综合性能最差。

结合上述分析得出:在织造消防类织物时,原料优选本质阻燃纤维且纤维的阻燃性及耐热性能要好,如芳纶纤维,该类纤维在织物中含量越多越有利于提高热防护性能。此外,为同时保证服装

舒适性能,在参数方面,要对织物厚度、密度、紧度等进行合理选择。具体参数选择还有待于进一步实验研究。

3 结 论

1) 通过对织物热防护性能分析发现,织物的热防护性能主要取决于纤维原料、织物的厚度、面密度以及紧度等。织物的厚度越大,紧度越大,热防护性就越好;反之,则越差。

2) 通过对织物舒适性能分析发现,织物的舒适性与织物紧密度及厚度、面密度有关,紧密度及厚度、面密度越小的织物,透气性能越好。

3) 通过对织物综合性能分析发现:7 种织物中,芳纶防静电防护织物综合性能最好;全棉阻燃织物综合性能最差。

FZXB

参考文献:

[1] 何维 钱晓明,王俊南. 消防服外层织物的研究现状[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(7): 80 - 83.
HE Wei, QIAN Xiaoming, WANG Junnan, et al. Research status of outer fabrics of fire protection clothes [J]. Cotton Textile Technology, 2015, 43(7): 80 - 83.

[2] 王新威 胡祖明,刘兆峰. 芳香族耐高温纤维及主要品种性能[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 51 - 56.
WANG Xinwei, HU Zuming, LIU Zhaofeng. Properties of aromatic high temperature resistant fibers and main varieties. [J]. Materials Review, 2007, 21(5): 51 - 56.

[3] 苗勇 李俊. 减少热蓄积的消防服开发及其性能评价[J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 111 - 115.
MIAO Yong, LI Jun. Development and performance evaluation of fire protection clothes for reducing heat accumulation [J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(1): 111 - 115.

[4] 王肖杰,卜佳仙,傅婷,等. 聚酰亚胺纤维灭火防护服外层面料的设计开发[J]. 上海纺织科技, 2016, 44(9): 11 - 13.
WANG Xiaojie, BU Jiaxian, FU Ting, et al. Design and development of outer fabric of polyimide fiber fire extinguishing protective clothing [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2016, 44(9): 11 - 13.

[5] 李红燕. 单层织物湿态热防护性能测试与分析[J].

纺织学报, 2009, 30(12): 95 - 98.
LI Hongyan. Measurement and analysis of wet thermal protection properties of single layer fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2009, 30(12): 95 - 98.

[6] HUANG Dongmei, YANG Hua, QI Zhengkun, et al. Questionnaire on firefighters' protective clothing in China [J]. Fire Technology, 2012, 48(2): 255 - 268.

[7] BARKER R L, LEE Y M. Analyzing the transient thermophysical properties of heat-resistant fabrics in TPP exposures [J]. Textile Research Journal, 1987, 57(6): 331 - 338.

[8] SUN G. Clothing air gap layers and thermal protective performance in single layer garment [J]. Journal of Industrial Textiles, 2007, 36(3): 193 - 205.

[9] 苏云 李俊. 火灾环境下防水透气层对消防服热湿防护性能的影响[J]. 纺织学报, 2017, 38(2): 152 - 158.
SU Yun, LI Jun. Effect of waterproof and breathable layer on thermal and moisture protection of fire fighting clothes under fire condition [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(2): 152 - 158.

[10] 杨柳 杨建忠,李龙. 消防服用多层织物的热防护性能[J]. 合成纤维, 2014, 49(19): 28 - 30.
YANG Liu, YANG Jianzhong, LI Long. Thermal protection performance of fire fighting multilayer fabric [J]. Synthetic Fiber in China, 2014, 49(19): 28 - 30.

[11] 朱方龙 樊建彬,冯倩倩,等. 相变材料在消防服中的应用及可行性分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(8): 124 - 132.
ZHU Fanglong, FAN Jianbin, FENG Qianqian, et al. Application and feasibility analysis of phase change materials in fire protection clothing [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(8): 124 - 132.

[12] 李利君,宋国文,李睿,等. 消防员防护服面料的舒适性[J]. 纺织学报, 2017, 38(3): 122 - 125.
LI Lijun, SONG Guowen, LI Rui, et al. Comfort of fireman's protective fabrics [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(3): 122 - 125.

[13] 殷祥刚,管小卫,陈蕾,等. 阻燃防护服产品质量评价指标模型[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(12): 1736 - 1738.
YIN Xianggang, GUAN Xiaowei, CHEN Lei, et al. Model of quality evaluation index for fire retardant protective clothing [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(12): 1736 - 1738.