

消防服用面料阻燃性及热防护性综合评价

王鸿博^{1,2}, 马晶婧^{1,2}, 董维锋^{1,2}, 喻爽^{1,2}, 黄丹青^{1,2}, 陈文婷^{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. 江南大学 生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:选取市场上常用的4种消防服用外层面料为研究对象,分别通过垂直燃烧和热防护性能实验,分析了外层面料的阻燃性能和热防护性能等,并在此基础上综合评价了4种消防服用面料的综合性能,包括面料的阻燃性能、热防护性能和透气性能,找出综合性能最佳的面料。结果表明:4种面料中4[#]阻燃黏胶面料的阻燃性能最好,2[#]阻燃棉面料的热防护性能最好。此外,通过综合评价得出4[#]面料的综合性能最好,最适宜做消防服的外层面料。

关键词:消防服;热防护性能;阻燃性能;垂直燃烧;综合评价

中图分类号: TS 156 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2019)02-0102-04

Comprehensive Evaluation of Flame Retardancy and Thermal Protection of Fire-Fighting Fabrics

WANG Hongbo^{1,2}, MA Jingjing^{1,2}, DONG Weifeng^{1,2},
YU Shuang^{1,2}, HUANG Danqing^{1,2}, CHEN Wenting^{1,2}

(1. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Functional Textiles, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. Key Laboratory of Eco-Textile, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In this paper, 4 kinds of outer layer fabrics of firefighter's protective clothing commonly used in the market were selected. The flame retardant property and thermal protection performance of these fabrics were analyzed by vertical combustion and the thermal protection performance test, etc. Based on above analysis, a comprehensive evaluation was processed to compare the comprehensive performance of the fabrics, including flame retardancy, thermal protection and air permeability. The best suit one for fire-fighting fabric was obtained. The results showed that the flame retardant property of the 4th kind of fabric was the best, and the thermal protection performance of the 2nd kind of fabric was best. In addition, the comprehensive performance of the 4th kind of fabric was the best.

Key words: fire-fighting fabri, thermal protection property, flame-retardant property, vertical combustion, comprehensive evaluation

消防服是集阻燃、隔热、防水、透湿于一体的多功能热防护服装^[1-4],其面料由外向内依次是阻燃外层、防水透气层、隔热层和舒适层^[5]。一方面,消防服可以阻碍外界热量向人体传递、减少皮肤烧伤,起到热防护的作用,保护消防人员的生命安全;另一方面,它的4层结构阻碍了液体和气体向外及时传递,限制了服装的导汗散热能力,极易出现高

温高湿的服装微环境^[6],影响人体的舒适感,导致人体热应激反应,甚至引起烧伤或猝死,严重威胁消防人员的生命安全。

消防服的热防护性能和舒适性能往往是相互牵制的。热防护服的性能受织物厚度、面密度、经纬密度等多种因素的影响^[7]。LEE Y M^[8]、王秀娟^[9]、李红燕等^[10]研究发现影响织物防护性能的首

收稿日期:2018-02-14; 修订日期:2018-06-13。

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802806);江南大学国家级大学生创新创业训练计划项目(201710295038)。

作者简介:王鸿博(1986—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为功能纺织材料及防护材料。Email:wxwanghb@163.com

要因素是织物的厚度,其次是面密度、体积密度、透气性等。面料越厚重,体积密度越大,所含纤维越多,热量越不易透过织物,二级烧伤时间越长,织物热防护性能越好,但其舒适性能则越差;此外,织物透气率、导热性与热防护性能具有显著的负相关关系,且良好的透气性有助于提高织物的舒适性。因此开发实现热防护性能和热湿舒适性能协调平衡的新型面料,已成为广大学者的研究焦点。

文中选用 4 种市场上常用的消防服用外层面料作为研究对象,分别对其阻燃性能、热防护性能等进行对比研究,并探讨厚度、面密度等基本参数对织物热防护的影响规律,分析影响织物热防护性能的因素。在此基础上,综合评价面料的热防护性与阻燃、透气等性能,从而找出兼具优良热防护性能与阻燃、透气等性能的最佳工艺,为进一步研制出热防护性更高效、穿着性更舒适的消防服奠定基础。

表 1 织物参数
Tab.1 Fabric parameters

样品 编号	样品 颜色	纤维 种类	组织 结构	厚度/ mm	断裂强度(cN/dtex)		密度/(根/dm)		透气率/ (mm/s)	面密度/ (g/m ²)
					经纱	纬纱	经向	纬向		
1	纯黑色	阻燃涤纶	平纹	0.48	1251.4	1251.6	63.5	63.0	0.746	288
2	大灰白	阻燃棉	平纹	0.81	1249.7	1251.3	69.0	53.0	0.458	362
3	小灰白	改性腈纶	平纹	0.91	1251.5	1057.8	53.5	72.5	31.870	323
4	灰黄色	阻燃黏胶	平纹	0.47	1101.4	857.7	86.5	103.5	0.372	309

1.2.2 面料阻燃性能测试 根据 GB/T 5455—1997,使用织物阻燃性能测试仪对 4 种消防服外层面料进行垂直燃烧实验测定,探究面料的阻燃性能。

实验步骤如下所示:打开箱门将尺寸为 80 mm × 300 mm 的外层面料放入试样框夹中,将框夹垂直悬挂于箱中央。关门设置点火时间为 12 s,按住点火开关,待火焰点燃后合理调整火焰高度。按“始动”按钮后,燃烧器移动至试样悬挂位置,12 s 后燃烧停止并复位,续燃自动计时,观察试样至无续燃时,按续燃停止按钮,则阴燃自动计时,待无阴燃时按“阴燃停止”按钮,阴燃计数停止。多次实验,测量织物损毁长度和质量损失率,结果取其平均值。

1.2.3 面料透气性能测试 依据 GB/T 5453—1997,利用自动织物透气性仪进行透气性测试,测试前选取无拉伸、折痕与疵点的 4 种外层面料各 1 块(足够大),进行预调湿处理,温度为 20 ℃,在相对湿度 65 % 的标准大气压环境中达到平衡,耗时大于 24 h。

其中 1[#]、2[#] 和 4[#] 面料的实验条件为:口径 0.8 cm,压差 100 Pa,测试面积 20 cm²。3[#] 小灰白面料的实验条件为:口径 1.2 cm,压差 100 Pa,测试面

1 实 验

1.1 材料

1.1.1 实验样品 4 种消防服用外层面料,编号分别为 1[#](纯黑色),2[#](大灰白),3[#](小灰白),4[#](灰黄色),均由江苏圣华盾防护科技股份有限公司提供。

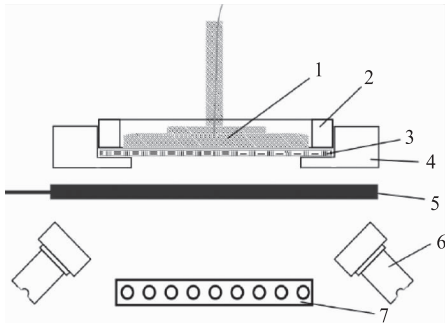
1.1.2 实验仪器 #403-14 型热防护性能测试仪,美国 Thermetrics 公司制造;YG141 型织物厚度仪、HD026N + 型电子织物强力仪、Y511 型织物密度镜、YG416E-Ⅱ型自动织物透气性仪、EL303 型电子天平、YG815 型垂直法织物阻燃性能测试仪,均由宁波纺织仪器厂制造。

1.2 实验方法

1.2.1 面料基本性能测试 在标准的温湿度条件下,分别测试 4 种消防服用外层面料的基本性能参数,如织物的厚度、面密度等,测试结果见表 1。

积 20 cm²。分别对 4 块外层面料进行 5 次实验测试,记录数据,取其平均值,结果见表 1。

1.2.4 面料热防护性能原理 热防护性能测试真实模拟火场环境中热辐射和热对流的混合效果,TPP 值为评价消防服热防护性能的综合指标,常用于建筑火灾领域等紧急情况下的测试^[12]。热防护性能测试装置如图 1 所示。



注:1 铜片热流计;2 试样固定器组件;3 试样;4 传感器支撑结构;5 用于暴露控制的隔热遮板;6 对流热源;7 辐射热源。

图 1 TPP 测试装置
Fig.1 TPP testing equipment

图 1 中仪器设有自动化装置,控制试样暴露及远离热源;同时设有循环水冷装置降低温度。该仪器设有双重热源,即一个辐射热源和两个对流热源,模拟火场环境中辐射热和对流热。对流热源为两个呈一定安装角度的火焰发生装置,对称放置在样品下方,通过连接丙烷气筒发生火焰;辐射热源由 9 个水平排列的红外石英灯管(500 W,240 VAC)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,模拟人体皮肤表面温度变化。通过数据采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 。

1.2.5 面料热防护测试方法 根据 GA 10—2014《消防员灭火防护服》标准规定:测试时,样品尺寸为 $(150 \pm 2) \text{ mm} \times (150 \pm 2) \text{ mm}$ (不含接缝部位),

对同种外层面料需重复测试至少 3 次,实验织物表面的热流量设定在 $(83 \pm 2) \text{ kW/m}^2$,热暴露时间设定为 30 s。测试前需进行调湿处理:在温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(65 \pm 4)\%$ 的恒温恒湿箱中 24 h,拿出后 3 min 内进行测试。热防护性能表达式为

$$\alpha_{\text{TPP}} = t \times q$$

(1)

式中: α_{TPP} 为热防护系数,单位 $\text{kW} \cdot \text{s/m}^2$; q 为暴露热通量,单位 kW/m^2 ; t 为二度烧伤的时间,单位 s。

从式(1)可看出:热防护系数 α_{TPP} 越大,达到二级烧伤时间 t 越长,面料热防护性能越好;反之,则越差。

2 结果与讨论

2.1 面料阻燃性能

4 种外层面料垂直燃烧法的测试结果见表 2。

表 2 织物垂直燃烧法测试结果

Tab.2 Results of vertical combustion test of fabrics

样品 编号	阴燃 时间/s	续燃 时间/s	损毁 长度/mm	损毁 质量/g	质量 损失率/%	燃烧特征
1	0	0	81.8	0.285	10.08	收缩适中,炭化,烟刺鼻,炭化层不太结实,无破洞,无熔融、滴落
2	0	0	59.8	0.042	1.16	收缩较小,炭化,烟刺鼻,炭化层结实,无破洞,无熔融、滴落
3	0	0	65.3	0.048	1.49	收缩较小,炭化,烟刺鼻,炭化层结实,无破洞,无熔融、滴落
4	0	0	39.9	0.030	0.97	收缩较小,炭化,烟刺鼻,炭化层不结实,无破洞,无熔融、滴落

由表 2 可知,4 种外层面料都不阻燃及不续燃,损毁长度均小于 100 mm,符合 GA 10—1024,其中,损毁长度由大到小依次为 $1^\# > 3^\# > 2^\# > 4^\#$;此外,损毁质量和质量损失率均为: $1^\# > 3^\# > 2^\# > 4^\#$;且 $4^\#$ 面料燃烧后收缩较小。由此表明, $4^\#$ 面料的阻燃性能最佳, $2^\#$ 面料次之, $3^\#$ 面料较差, $1^\#$ 面料燃烧后收缩

较大,阻燃性能最差。
综上所述,这 4 种外层面料的阻燃性能均符合 GA 10—2014 对消防服外层织物的规定,其中较为理想的阻燃外层面料为 $4^\#$ 面料。

2.2 面料热防护性能

织物热防护性能测试结果如图 2 所示。

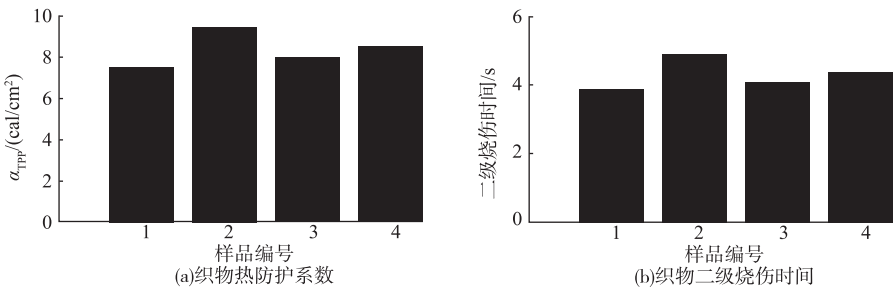


图 2 织物热防护性能

Fig.2 Thermal protection histogram of fabric

由图 2 可以看出,这 4 种外层面料的热防护性能 α_{TPP} : $2^\# > 4^\# > 3^\# > 1^\#$; 二级烧伤时间: $2^\# > 4^\# >$

$3^\# > 1^\#$, 其中,二级烧伤时间越长,织物热防护性能 α_{TPP} 越大,织物热防护性能越好。

综上,2[#]面料的二级烧伤时间最长,织物热防护性能 α_{TPP} 最大,织物热防护性能最好;4[#] 面料次之,3[#] 和 1[#] 面料热防护性能较差,其中 1[#] 面料的二级烧伤时间最短,织物热防护性能 α_{TPP} 最小,织物热防护性能最差。结合表 1 中对织物基本性能的测试发现面料的厚度和面密度对其热防护性能有重要影响:随着厚度和面密度的增大,热防护性能 TPP 值相应增大,面料的热防护性能提高。此外,面料的阻燃性能与其热防护性能也密切相关,其阻燃性能越好,面料相应的热防护性能越好。

2.3 面料透气性能

织物的透气性是以透气率表示。透气率越大,织物透气性越好,反之,则越差。由表 1 可以看出,3[#] 面料的透气率最大,透气性能最好;1[#] 和 2[#] 次之;而 4[#] 面料的透气率最小,透气性能最差;但 1[#]、2[#] 和 4[#] 透气性能相差不大。这可能与面料本身的厚度、面密度等性能相关,面料厚度越厚,面密度越大,紧密程度越大,其相应的透气率减小,透气性能下降,舒适性变差。

2.4 面料综合性能评价

运用综合评价法对 4 种外层面料的阻燃性能 $f_1(x)$ 、热防护性能 $f_2(x)$ 和透气性能 $f_3(x)$ 进行综合评价。其中,面料的阻燃性能 $f_1(x)$ 、热防护性能 $f_2(x)$ 和透气性能 $f_3(x)$ 的数值越大,织物相应的阻燃性、热防护性及透气性越好,即织物综合性能 $f(x)$ 值越大,织物综合性能越好。面料综合性能表达式为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n W_i \times f_i(x) \tag{2}$$

式中: $f(x)$ 为综合性能值; $f_i(x)$ 为各项性能指标值; W_i 为 $f_i(x)$ 的加权因子。

其计算方法如下:假设已知某指标的变动范围

$$\alpha_i \leq f_i(x) \leq \beta_i,$$

令

$$\Delta f_i(x) = -(\alpha_i - \beta_i)/2,$$

则该项指标的加权因子为

$$W_i = 1/(\Delta f_i(x))^2,$$

其值的大小决定了目标函数的数量级重要程度。

经计算 $W_1 = 240.370$; $W_2 = 1.003$; $W_3 = 0.004$ 。由此推断,面料的性能指标重要程度为:阻燃性能 > 热防护性能 > 透气性能。面料综合性能计算结果见表 3。

由表 3 可知,4 种面料的综合性能值:4[#] > 2[#] > 3[#] > 1[#]。这表明在这 4 种外层面料中,4[#] 面料的热防护性能仅次于 2[#] 面料和透气性能一般,但其阻燃性能最好,面料综合性能最好;2[#] 面料的热防护性能

最好,但其阻燃性能和透气性能较差,面料综合性能次之;1[#] 和 3[#] 面料的综合性能较差,且 1[#] 面料的阻燃性能、热防护性能和透气性能均较差,面料相应的综合性能最差。

表 3 面料综合性能测试

Tab.3 Fabric comprehensive performance test

样品 编号	阻燃性 $f_1(x)$	热防护性 $f_2(x)$	透气性 $f_3(x)$	综合性 能值 $f(x)$
1	29.325	7.528	0.003	36.856
2	40.142	9.531	0.002	49.674
3	36.777	8.022	0.128	44.927
4	60.333	8.556	0.001	68.890

注:面料的阻燃性能用其损毁长度的倒数表示,其值越大,面料阻燃性能越好。

3 结 语

通过对 4 种外层面料的阻燃性能、热防护性能、透气性能等的研究发现:4[#] 面料的损毁长度最小,损毁质量和质量损失率也均为最小,其阻燃性能最好;2[#] 面料的二级烧伤时间最长, α_{TPP} 最大,其热防护性能最好;3[#] 面料的透气率最大,其透气性能最好。此外,通过综合性能评价发现这 4 种面料中,4[#] 面料的综合性能值最大,其综合性能最佳,在这 4 种面料中,最适宜做消防服的外层面料。

参考文献:

[1] RYAN C H. The effects of batting materials on the performance turnout thermal liners [D]. North Carolina: North Carolina State University, 2005.

[2] 刘旺,郑明远. 浅谈我国消防服的分类及发展 [J]. 山东纺织科技, 2014 (5): 49-52.

LIU Wang, ZHENG Mingyuan. Introduction to the classification and development of China 's fire suit [J]. Shandong Textile Science and Technology, 2014 (5): 49-52. (in Chinese)

[3] 张志源. 消防战斗服的发展概况 [J]. 消防技术与产品信息, 2003 (2): 66- 67.

ZHANG Zhiyuan. The development of the firefighting suit [J]. Fire Technique and Products Information, 2003 (2): 66- 67. (in Chinese)

[4] 徐兰娣,戴国定,杨晓华,等. 消防员防护装备用织物的热防护性能研究 [J]. 消防科学与技术, 2008, 27 (5): 339-343.

XU Landi, DAI Guoding, YANG Xiaohua, et al. Study on the thermal protection properties of firefighter's protective equipment [J]. Fire Science and Technology, 2008, 27 (5): 339-343. (in Chinese)