

文章编号: 0253-9721(2008)05-0084-05

消防服用织物的阻燃性能及其 TPP 值

李红燕, 张渭源

(东华大学 服装学院, 上海 200051)

摘要 研究了消防服用多层织物系统的阻燃性能及其 TPP 值。将耐高温阻燃的 Nomex、Kermel 和芳腈纶织物与 PTFE、TPU 和三维阻燃间隔织物组合, 模拟消防服的层次构成, 通过垂直燃烧试验测试分析外层织物的阻燃性能, 通过 TPP 试验测试分析多层织物系统的综合热防护性能。研究得出: 热防护性最好的织物组合是芳腈纶、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布, 其综合热防护性能 TPP 值为 51.9; 最适宜用于消防服的织物组合是 Nomex III A、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布, 其综合热防护性能 TPP 值达到 50.7; 将三维阻燃间隔织物用于消防服结构组成, 可取得较好的整体热防护效果且可减轻消防员热负荷。

关键词 热防护; 阻燃; Nomex III A 织物; Kermel 织物; 芳腈纶织物; 消防服

中图分类号: TS 106.6 文献标识码: A

Flame-retardant performance and TPP value of fabrics for fire-fighting suits

LI Hongyan, ZHANG Weiyuan

(Fashion Institute, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract The integrated thermal protective performance of the multi-fabric system used for fire-fighting suits is researched in this article. Multi-fabric systems were composed by simulating the fire-fighting suits with fabrics including Nomex, Kermel, PSA, PTFE, TPU and three-dimensional spacing flame-retardant fabric. Outer fabric's flame-retardant performance is tested by vertical flammability test, the integrated thermal protective performance of the multi-fabric systems is tested by TPP test. The experiments reveal that the best thermal protective performance fabric system consists of PSA, three-dimensional spacing flame-retardant fabric and flame-retardant cotton fabric, which TPP value is 51.9; the most appropriate fabric system for the fire-fighting suit consists of Nomex III A fabric, three-dimensional spacing flame-retardant fabric and flame-retardant cotton fabric, which TPP value is 50.7; three-dimensional spacing flame-retardant fabric can be used in fire-fighting suit structure and will achieve better overall protective effect and reduce firemen's thermal load.

Key words thermal protective; flame-retardant; Nomex III A fabric; Kermel fabric; PSA fabric; fire-fighting suit

消防服是一种特殊的功能性服装, 其作用是保护消防员在火场环境中免受高温伤害, 一般由外层、防水透气层、隔热层和舒适层构成^[1]。本文对新型消防服用多层织物系统在高温下的综合热防护性能进行了研究, 并和传统消防服的综合热防护性能进行了比较, 讨论消防服的层次结构及材料对整体热防护性能的影响, 为研制耐高温阻燃性能更强的消防服提供一定的借鉴。

1 试验部分

1.1 材料

进行 15 组模拟消防服真实结构的多层织物组合试验, 试样组合编号为 1~15。外层面料为 A1、B1、C1; 防水透气层面料为 A2、B2; 隔热层面料为 A3、B3、C3; 舒适层面料为 D。各组面料参数如表 1 所示。

表 1 各层面料结构参数

Tab.1 Each layer fabric structural parameter

面料编号	商品名	成分	织物组织	面密度/ (g·m ⁻²)	厚度/ mm	纱线线密 度/tex	织物密度/(根·(10 cm) ⁻¹)	
							经向	纬向
A1	Nomex III A 面料	95% Nomex, 3% Kevlar, 2% carbon antistatic	平纹	210	0.612	50	130	187
B1	Kermel 面料	100% Kermel	斜纹	210	0.532	45	125	197
C1	芳腈纶面料	100% 芳腈纶	平纹	250	0.630	60	165	180
A2	PTFE 面料	聚四氟乙烯	平纹贴膜	150	0.260			
B2	TPU 面料	热塑性聚氨酯	平纹贴膜	220	0.310			
A3	Nomex 隔热毡	100% Nomex	针刺非织造布	220	2.826			
B3	Kermel 隔热毡	100% Kermel	针刺非织造布	210	2.714			
C3	三维阻燃间隔织物	聚酯/粘胶/Nomex 混纺纱和 100% 芳腈加捻纱	经编双层结构	220	3.682			
D	阻燃棉织物	阻燃棉	平纹	220	0.600	62.5	126	187

按正交试验设计原则,取外层、防水透气层、隔热层 3 因子间所有水平的组合,以便考察各种组合对整体热防护性能的影响,试验安排如表 2 所示。第 5、10 和 15 组面料组合中用 1 层三维阻燃间隔织物代替传统消防服结构中的防水透气层和隔热层,其余各组模拟传统消防服的 4 层结构,依次为外层、防水透气层、隔热层和舒适层。15 组面料组合的舒适层均采用普通阻燃棉布。

表 2 试验安排表

Tab.2 Test arrangement

实验编号	外层	防水透气层	隔热层	舒适层
1	A1	A2	A3	D
2	A1	B2	A3	D
3	A1	A2	B3	D
4	A1	B2	B3	D
5	A1		C3	D
6	B1	A2	A3	D
7	B1	B2	A3	D
8	B1	A2	B3	D
9	B1	B2	B3	D
10	B1		C3	D
11	C1	A2	A3	D
12	C1	B2	A3	D
13	C1	A2	B3	D
14	C1	B2	B3	D
15	C1		C3	D

1.2 测试方法

1.2.1 垂直燃烧试验

利用垂直燃烧法测试纺织品的阻燃性能。采用 LFY-601 国家标准垂直燃烧仪,按 GBT 5455—1997 规定的试验方法,测定阻燃织物的损毁长度、续燃时间和阴燃时间。将试样裁成 300 mm × 80 mm,测试前将其在温度(20 ± 2) °C,相对湿度(65 ± 2)% 的环境中平衡放置 8 ~ 24 h,然后放入密封器内。测试时

将燃烧仪内火焰高度调至(40 ± 2) mm,试样放入试样夹中,垂直悬挂于试验箱中,用点火器点燃试样,12 s后,点火器复位,用续燃计计算试样续燃时间和阴燃时间,阴燃结束后,取出试样,测量其损毁长度^[2]。用垂直燃烧法测试外层织物阻燃性能。对 3 种外层面料,各准备 3 块试样,每种面料做 3 次燃烧试验,取其平均值。在做外层织物阻燃性能试验前,按 GB 8965—1998 附录 A 的方法将面料在涡轮式洗衣机里洗涤 5 次。

1.2.2 TPP 试验

TPP 试验是热辐射和热对流混合作用防护性能试验,主要测试织物的综合热防护能力。其测试方法是将试样水平放置在特定的热源上面,在规定距离内,热源以 2 种不同的传热形式——热对流和热辐射出现,而置于试样另一侧的铜片热流计则测量试样背面的温度。测试时要求火焰与试样直接接触,到达织物表面的热流量达到 84 kW/m²。铜片热流计测量温度并得到升温曲线,将其与 Stoll 标准曲线比较可得到二度烧伤所需时间 t_2 ,从而可得 TPP 值。

$$TPP = t_2 \cdot q \quad (1)$$

式中: $q = 2.0 \times 4.187 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,为规定辐射热流量; t_2 为引起二度烧伤所需要的时间, s。

TPP 值越大,表示织物的热防护性能越好,已得到了 ASTM-ISO 及 NFPA 的认可^[3]。

采用美国 CSI 公司的 TPP-206 热防护性能测试仪,按 NFPA1976 标准进行测试,试样尺寸为 152 mm × 152 mm。对各组试验的单层面料和多层试样的组合进行 TPP 试验。总热流量为(83 ± 4) kW/m²,燃烧时间根据经验设为 30 ~ 65 s(TPP 试验仪器的最大燃烧时间为 65 s)。

在实际穿着中,消防服的舒适层紧贴人体,因此为了模拟人体出汗情况,各组面料燃烧前将舒适层放入水中完全浸湿。对 15 组试样,各做 3 次 TPP 测试,取 3 次结果的平均值。由于多层面料的最外层直接接触热源,舒适层与铜片热流计紧密贴合,各层面料间基本无空气层,所以,试验未考虑织物层间空气层对整体热防护性的影响。

2 结果与分析

2.1 阻燃性能

考虑到织物经纬向燃烧性能的一致性,本文只对外层织物的经向进行了测试。外层织物垂直燃烧情况见表 3。

表 3 外层织物垂直燃烧结果

Tab.3 Outer layer fabric's vertical flammability

面料编号	损毁长度/mm	阴燃时间/s	续燃时间/s	燃烧特征
A1	38	0.6	0	收缩较小,炭化,烟刺鼻,炭化层结实,无破洞,无熔融、滴落。
B1	42	1.0	0	收缩适中,炭化,烟刺鼻,炭化层较结实,无破洞,无熔融、滴落。
C1	33	0.4	0	收缩极小,炭化,烟刺鼻,炭化层无破洞但脆化现象明显,无熔融、滴落。

从表 3 可以看出,这 3 种外层面料都不续燃,损毁长度均 < 100 mm,其中,损毁长度最大的是 B1 (Kermel 面料),损毁长度最小的是 C1 (芳腈纶面料),居中的是 A1 (Nomex III A 面料); 3 种面料的阴燃时间依次为芳腈纶面料 < Nomex III A 面料 < Kermel 面料,且芳腈纶面料燃烧后收缩最小,这表明芳腈纶面料的阻燃性能比 Kermel 和 Nomex III A 面料都好。但在燃烧过程中,芳腈纶面料的脆化现象较严重,所以不适宜直接做消防服的外层; Nomex III A 面料的炭化层最结实,强度大,无破洞,最适宜做消防服外层; 综合来看, Kermel 面料的阻燃性能略低于另 2 种织物。这 3 种织物的阻燃性能均符合 GA10—2002 对消防服外层织物的规定。

织物阻燃机制复杂,可考虑将芳腈纶纤维与其他纤维混纺,改善其燃烧脆化现象,这将是消防服用较理想的外层面料。

2.2 TPP 值

TPP 试验结果见表 4。可以看出,各组试样的综合 TPP 值集中在 40~50 之间,最高的 TPP 值达到了 51.9,最低的 TPP 值也达到了 43.2,符合 GA10—2002

规定的阻燃消防服的 TPP 值 ≥ 28 的标准。隔热层的 TPP 值在各层面料中最大,可见,隔热层对多层织物的综合热防护性能起到了重要作用。三维阻燃间隔织物的 TPP 值高于 Nomex 毡和 Kermel 毡,且透湿性能良好^[4-6],若用此种织物替代传统消防服的防水透气层和隔热层,同样能达到很好的综合热防护效果,且三维阻燃间隔织物的质量轻于传统消防服中防水透气层和隔热层组合的质量。国产芳腈纶织物与国外高性能阻燃纤维织物相比,其热防护性能相当于 Nomex III A 织物,优于 Kermel 织物。热防护性能最好的多层织物组合是芳腈纶、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布。

表 4 各层面料及面料组合的 TPP 值

Tab.4 TPP value of different layer and combinational layer fabric's

实验编号	外层	防水透气层	隔热层	舒适层	面料组合
1	13.0	9.5	16.8	8	48.1
2	13.0	13.4	16.8	8	50.4
3	13.0	9.5	15.2	8	47.0
4	13.0	13.4	15.2	8	44.7
5	13.0		28.0	8	50.7
6	11.5	9.5	16.8	8	46.0
7	11.5	13.4	16.8	8	43.2
8	11.5	9.5	15.2	8	46.8
9	11.5	13.4	15.2	8	44.6
10	11.5		28.0	8	48.5
11	12.8	9.5	16.8	8	47.6
12	12.8	13.4	16.8	8	46.5
13	12.8	9.5	15.2	8	46.6
14	12.8	13.4	15.2	8	44.1
15	12.8		28.0	8	51.9

2.3 TPP 试验结果分析

1) 第 15 组织物组合是芳腈纶、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布,该组合的 TPP 值最高,达到了 51.9。第 5 组织物组合是 Nomex III A、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布,该组合的 TPP 值仅次于第 15 组,达到了 50.7。Stoll & Chinanta 曲线是 Stoll 和 Chinanta 2 位研究者在大量动物皮肤烧伤试验基础上,将动物皮肤达到二级烧伤所需时间转换成铜片热流计温度上升值,绘制出的皮肤二级烧伤时间与铜片热流计温度上升值之间关系的曲线。织物燃烧曲线与 Stoll & Chinanta 曲线交点的横坐标即为达到二级烧伤时间^[7]。图 1 示出了第 5 组和第 15 组织物组合的 TPP 曲线。可以看出,第 15 组织物达到二级烧伤时间为 25.8 s,第 5 组织物达到二级烧伤时间为 25.2 s。虽然仅相差 0.7 s,但对火场中的消防员

来说意义重大。因为火场中的情况危急,即使是 0.4~0.5 s 的延迟,也足以保护消防员,增加消防员逃离火场的几率。

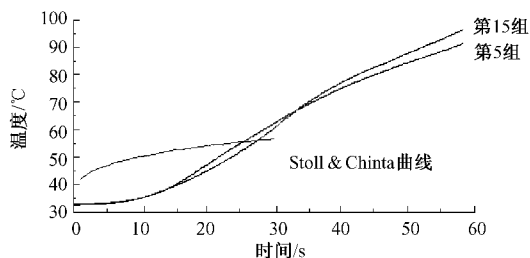


图1 第5组和第15组织物组合的 TPP 曲线

Fig.1 TPP curve of group 5 and group 15

2) 第15组和第5组织物组合均是采用三维阻燃间隔织物代替传统防水透气层和隔热层,取得了较好的热防护效果,这主要与三维阻燃间隔织物的结构和成分有关。

从结构上看三维阻燃间隔织物是一种经编双层结构织物,由2块单独的织物构成,这2块织物结构紧密,织物间用加捻的芳纶纱(间隔纱)连接,保证了织物两面间具有充分的间隔层,从而保持空气在服装与人体间形成一个微气候,可以阻止湿气在皮肤表面积聚,对湿气有很好的缓冲作用,提供了良好的隔热效果和穿着舒适性。

从三维阻燃间隔织物的纤维成分上看,上下层织物选用优化的混纺纤维,其成分为聚酯、粘胶及阻燃的 Nomex 纤维,本身就是高性能阻燃纤维,双层织物中间用间隔纱相连,间隔纱采用 100% 芳纶加捻纱。有关资料^[6]表明,间隔织物所采用材料均满足 EN469 标准中对消防服外层原料规定的阻燃标准,所以三维阻燃间隔织物既能透气透湿又具有良好的热防护性。

消防服的穿着舒适性和热防护性同等重要。当前消防服主要采用4层结构,材料选取高密度材料。多层结构及高密度材料的使用将增加服装质量,增加消防员负荷,加大消防员的体力支出。且多层结构(尤其是防水透气层的设置)阻碍了热量的有效散发。芬兰研究机构对此进行了试验验证^[8],结果表明:进行相同的消防活动后,穿着设有防水透气膜消防服的消防员的皮肤温度、出汗量远远高于穿着无防水透气膜消防服的消防员,不利于消防员生理热散失,大量的生理热迅速堆积在消防服内部,产生的热应激将对消防员的身心造成潜在伤害。因此,若用热防护性、透气性好且质量轻的三维阻燃间隔织物代替传统消防服中的防水透气层和隔热层,将最

大限度地减轻消防服带给人体的额外负担。

3) 防水透气层采用热塑性聚氨酯(TPU)的组合,其综合 TPP 值低于采用 PTFE 的组合。这与2种膜的结构有关。PTFE 与 TPU 均是防水透气材料,但由于膜结构不同,透湿机制不同^[9]。

资料显示,水蒸气分子的直径为 0.000 4 μm,而雨水中直径最小的轻雾的直径为 20 μm。PTFE 膜上有许多微孔,它们的孔隙直径在水蒸气分子直径和雨水分子直径之间,因此可以让气态的水自由通过,而液态的水则被牢牢挡在一边,以达到透气效果。

TPU 薄膜属无孔亲水性薄膜。由于薄膜本身没有孔隙,防水效果很好,但从透气性的原理看,它和 PTFE 有本质上的不同。TPU 的透湿主要通过其亲水特性来实现,依靠衣服内外温差把汗水冷凝在衣服面料的内表面,然后通过 TPU 内部的微孔把水吸收完,同时利用 TPU 本身的海绵特性渗透到面料的外表面,再通过外表面与空气接触,把水分蒸发出去,从而实现透湿的功能。

PTFE 与 TPU 的另一个区别是前者为一种薄膜,在做成服装面料的时候,用特殊的黏合剂把它黏合在面料上;而 TPU 面料采用涂层工艺,是在熔融状态下,直接涂在面料上,不用任何的黏合剂。

由于 PTFE 防水透湿效果优于 TPU,当含有水分的多层织物燃烧时,含 TPU 的组合导湿效果劣于含 PTFE 的组合,大量水分聚集在含 TPU 的组合织物内部,导致含 TPU 的组合传热速率高于含 PTFE 的组合,隔热效果下降,因而在湿态情况下,含 TPU 的组合热防护性低于含 PTFE 的组合。由此可见,防护服内的水分在很大程度上改变防护服的防护性能。

3 结论

1) 垂直燃烧试验的结果表明:芳纶织物的阻燃性优于 Nomex III A 和 Kermel 织物,但燃烧后表面脆化现象较严重,所以不适宜直接做消防服外层;Nomex III A 织物的损毁长度虽略大于芳纶,但炭化层结实,无破洞,适宜做消防服外层;Kermel 织物损毁长度比芳纶和 Nomex III A 织物都大,但燃烧后也无破洞,也可用于做消防服外层。

2) TPP 试验结果表明:芳纶织物的综合热防护性能与 Nomex III A 织物相当,略优于 Kermel 织物。多层织物组合中,芳纶、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布组合的 TPP 值最大,但由于芳纶不适宜做消防服外层,综合考虑,最适宜的消防服多层织物组合

是 Nomex III A 织物、三维阻燃间隔织物和阻燃棉布,其综合 TPP 值达到 50.7。

3) 三维阻燃间隔织物的热防护性和透湿性都较好,且质量轻于传统消防服中的防水透气层和隔热层之和,可考虑将其用于消防服设计中,减轻消防员的负担。

4) 隔热层在消防服的整体热防护中起到了重要作用。

FZXB

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵书经. 纺织材料实验教程[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1991: 461 - 465.
- [3] 朱方龙. 热防护服隔热防护性能测试方法及皮肤烧

伤度评价准则[J]. 中国个体防护装备, 2006(6): 26 - 31.

- [4] 蒋高明, 李大俊. 经编间隔织物的结构与性能[J]. 江南大学学报, 2003(4): 395 - 398.
- [5] 陈振洲. 产业用经编间隔织物编织技术研讨[J]. 纺织学报, 1999, 20(5): 43 - 45.
- [6] 张明俊, 周罗庆. 间隔机织物的生产和性能[J]. 上海纺织科技, 2006, 34(7): 52 - 53.
- [7] 朱方龙, 张渭源. 新型防护织物热辐射系数测试仪[J]. 纺织学报, 2006, 27(5): 34 - 37.
- [8] 杨建忠, 王新艳. 医用防护服织物的结构与透湿量[J]. 纺织学报, 2006, 27(3): 11 - 14.
- [9] Finn J T, Sagar A J G, Mukhopadhyay S K. Effects of imposing a temperature gradient on moisture vapor transfer through water resistant breathable fabrics [J]. *Tex Res J*, 2000, 70(5): 460.