

消防员灭火防护服减层结构及其热防护性能评价

刘亚光

上海伊贝纳纺织品有限公司, 上海 201514

摘要:介绍了消防员灭火防护服减层结构的实现方式,运用国内外不同的热防护性能评价方法,对标准4层组合面料及3层、2层减层结构组合面料进行评价,并采用热人仪测试不同组合面料制成的灭火防护服的防护效果。结果表明,3层和2层减层结构组合面料能达到标准4层组合面料的性能,满足消防员灭火防护服要求,符合轻质化发展趋势。

关键词:消防员灭火防护服;减层结构;热防护性能值(TPP);热防护性能评估(TPE);热传递指数(HTI);热辐射传导指数(RHTI)

中图分类号:TS 941.73

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)03-0044-06

Layer reduction structure and thermal protection performance evaluation of fire fighting protective clothing for firemen

Liu Yaguang

IBENA Shanghai Technical Textiles Co., Ltd., Shanghai 201514, China

Abstract: The realization of layer reduction structure of fire fighting protective clothing for firemen was introduced. The standard 4-layer composite fabric, and the reduction layer structure composite fabrics with 3-layer and 2-layer were evaluated by using different evaluation methods of thermal protection performance at home and abroad, and protective effect of fire fighting protective clothing made of different composite fabrics was tested by thermoman. The results showed that the performance of the reduction layer structure composite fabrics with 3-layer and 2-layer could reach that of standard 4-layer composite fabric, meet the requirements of fire fighting protective clothing, and in line with the development trend of lightweight.

Keywords: fire fighting protective clothing for firemen; layer reduction structure; thermal protective performance(TPP); thermal performance estimate(TPE); heat transfer index(HTI); radiant heat transfer index(RHTI)

灭火防护服是消防员基础的安全防护装备,其设计要兼具防护功能和服用性能。长期以来,标准4层结构的灭火防护服虽提供了优异的安全防护功能,但服用性能不佳,主要体现在组合厚重、灵巧性

不足等方面。因此,服用性能的改善如服装轻质化、灵巧化等,成为了灭火防护服近年研发的热点。2016年国家十三五重点研发计划项目“灾害环境下人体损伤机理研究与救援防护技术装备研发及应用

收稿日期:2023-11-21

作者简介:刘亚光,男,1985年生,研发工程师,主要从事于消防、工业阻燃防护面料的开发与研究

示范”提出,要开发轻质、高效的消防员灭火防护服。随后,各面料厂商相继开发出多种类型的 3 层结构的灭火防护服用组合面料。2022 年,上海伊贝纳等面料厂商又陆续设计并推出了 2 层结构的灭火防护服用组合面料。组合层数的减少不仅降低了组合面料的面密度,还提高了服装穿着的灵巧性。

本文将介绍几款减层结构消防员灭火防护服用 3D 结构面料,并基于 2 层和 3 层组合结构面料及相应的灭火防护服进行热防护性能评价,分析各组合面料减质增效后性能,为消防员提供更佳的安全防护装备,并进一步为产品轻质化开发指明方向。

1 减层结构消防员灭火防护服用 3D 结构面料

面料隔热性能的提升是减层结构消防员灭火防护服研发的关键。通常,隔热性能是随着面料面密度及厚度的增加而提高的^[1-4],但面料面密度的提升不利于实现服装的减质增效。因此,相关消防从业者一直致力于设计具有高隔热效率的面料,以开发轻质高效的灭火防护服用组合面料。

面料隔热效率反映了单位面积质量的面料或面料组合的热防护性能。面料隔热效率的提升可通过增加灭火防护服厚度,设计 3D 结构的外层面料、舒适层面料和防水透气层面料来实现^[5]。后文将罗列一些常见灭火防护服用 3D 结构面料。

1.1 3D 结构外层面料

图 1 和图 2 分别为 3D 结构的菱形格双层组织面料和蜂巢格双层组织面料,适用于灭火防护服用组合面料的外层。其表层可采用间位芳纶材料,里层可采用对位芳纶材料。这种双层组织的面料能在表里层之间形成空气层,厚度大于单层面料,不仅自身隔热性好,而且能在高温、火焰灼烧条件下迅速膨胀,达到良好的隔热效果。

1.2 3D 结构舒适层面料

图 3 和图 4 分别为 3D 结构的凸起管状面料和蜂巢格面料,适用于灭火防护服用组合面料的舒适层。这种面料在控制面密度的基础上,通过引入空气层,增加舒适层厚度,提高隔热效果。

1.3 3D 结构防水透气层面料

图 5 和图 6 为 3D 结构的硅胶点/芳纶水刺毡/聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料及芳纶凸起水刺毡/

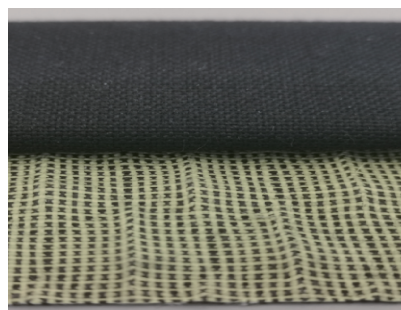


图 1 菱形格双层组织面料

Fig. 1 Diamond lattice double weave fabric



图 2 蜂巢格双层组织面料

Fig. 2 Honeycomb double weave fabric

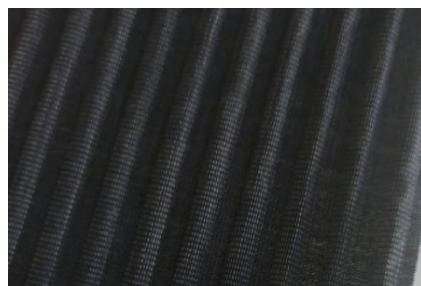


图 3 凸起管状面料

Fig. 3 Raised tubular lining

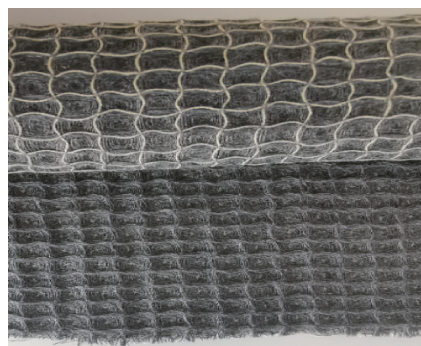


图 4 蜂巢格面料

Fig. 4 Honeycomb lining

PTFE 复合材料,适用于灭火防护服用组合面料的防水透气层。其中,芳纶凸起水刺毡/PTFE 复合材料尚未实现国产化。



图5 硅胶点/芳纶水刺毡/PTFE 复合材料
Fig. 5 Silicone spots/Aramid felt/PTFE composite material



图6 芳纶凸起水刺毡/PTFE 复合材料
Fig. 6 Aramid raised felt/PTFE composite

2 消防员灭火防护服的减层结构设计

市场上常见的标准 4 层消防员灭火防护服(试样 A)由外层($200 \pm 10 \text{ g/m}^2$)、防水透气层($110 \pm 5.5 \text{ g/m}^2$)、隔热层($70 \pm 3.5 \text{ g/m}^2$)、舒适层($120 \pm 6 \text{ g/m}^2$)组成。灭火防护服的减层结构设计通常是

利用 3D 结构面料来减少组合层数的。

2.1 3 层组合结构

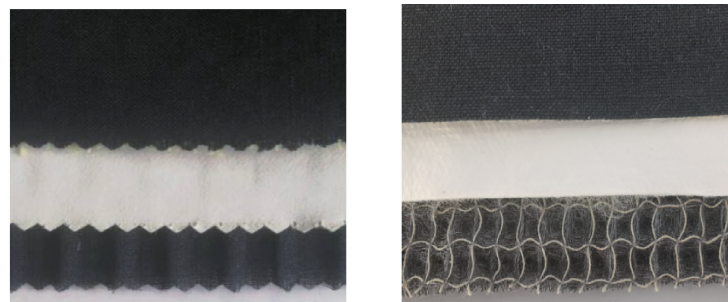
去除标准 4 层组合结构中的隔热层,将其中 1 层选择上述 3D 结构面料代替,即得 Base 3 层组合结构,如图 7 所示;将其中 2 层选择上述 3D 结构面料,即得 Plus 3 层组合结构,如图 8 所示。



a) 试样B(外层采用菱形格双层组织面料)
b) 试样C(防水透气层采用硅胶点/芳纶水刺毡/PTFE复合面料)
c) 试样D(舒适层采用凸起管状面料)

图7 Base 3 层组合结构

Fig. 7 Base 3-layer composite structure



a) 试样E(外层采用菱形格双层组织面料,舒适层采用凸起管状面料)
b) 试样F(外层采用蜂巢格双层组织面料,舒适层采用蜂巢格面料)

图8 Plus 3 层组合结构

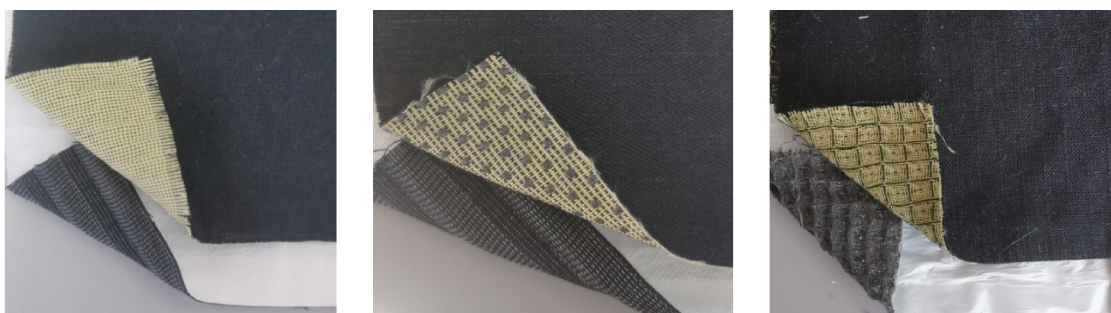
Fig. 8 Plus 3-layer composite structure

2.2 2 层组合结构

2 层组合结构面料是由 3D 结构外层与防水透

气舒适层组合而成的,其中防水透气舒适层面料由 3D 结构舒适层与 PTFE 膜复合而成,兼具舒适层与

防水透气层的功能。图 9 展示了几种目前市售的 2 层组合结构面料。



a) 试样G (外层采用菱形格双层组织面料, 防水透气舒适层为凸起管状面料复合PTFE膜)
b) 试样H (外层采用菱形格双层组织面料, 同时反面设计了凸点结构, 防水透气舒适层为凸起管状面料复合PTFE膜)
c) 试样I (外层采用蜂巢格双层组织面料, 防水透气舒适层采用蜂巢格面料复合PTFE膜)

图 9 2 层组合结构

Fig. 9 2-layer composite structure

3 热防护性能评价

热防护性能是评定灭火防护服防护性能优劣的指标。其评价方法有参照 NFPA 1971 和 XF 10 标准规定的热防护性能值 (thermal protective performance, TPP) 评价法, 以及参照 EN 469 标准规定的热传递指数 (heat transfer index, HTI) 评价法和热辐射传导指数 (radiant heat transfer index, RHTI) 评价法。且随着热防护理论的应用与积累, 近期又提出了热防护性能评估 (thermal performance estimate, TPE) 评价法。

本文将分别对标准 4 层组合结构面料和上述减层组合结构面料进行 TPP、TPE、HTI 和 RHTI 测试, 再利用热人仪对测试结果进行验证。组合结构面料试样的基本信息归纳于表 1。

3.1 TPP

当灭火防护服用组合面料暴露于总热通量为 $(84 \pm 2) \text{ kW/m}^2$ 的对流热源和辐射热源中时, 透过面料引起人体皮肤二度灼伤的时间与总热通量的乘积, 即为 TPP。TPP 越高, 表明组合面料的热防护性能越好。图 10 为试样 A~试样 I 的 TPP 测试结果。

从图 10 可知: 2 层与 3 层结构组合面料的 TPP 均大于 $1\ 170.40 \text{ kW} \cdot \text{s/m}^2$, 符合 XF 10—2014《消防员灭火防护服》中对热防护性能的要求。可见, 在组合面料中, 3D 结构面料能形成空气层, 增加组合面料厚度, 提升组合面料的隔热性能。其中, 试样 C 中硅胶点虽然也增加了组合面料的厚度, 但 TPP 相

对较低, 原因与其不能像 3D 外层和 3D 舒适层一样将热量集聚并锁在表里层间有关, 且硅胶点使得面料质量增加较多, 这不利于轻质化的实现。

3.2 TPE

TPE 评价法是基于 TPP 评价法而演进的。在测试组合面料热防护性能的过程中, 聚集在表里层之间的大量热气会向内层或外层两个方向传递。TPP 从本质上是材料传热性能的反映, 但未考虑热暴露后试样中蓄积的热能会向内继续传递给穿着者。如果此时未能及时脱掉服装, 很可能造成快速灼伤。TPE 则考虑了热暴露后试样中蓄积的热能, 预测造成二度烧伤的能量, 其值用传热反应曲线与 Stoll 曲线相切 (或近似相切) 时的暴露时间与总热通量的乘积表示, 反映了灭火防护服实际的热防护效果。图 11 为试样 A~试样 I 的 TPE 测试结果。

由图 11 可知, Base 3 层组合中基于 3D 外层的试样 B 的 TPE 高于试样 C 和试样 D 的, 这是由于蓄积在 3D 外层的热量向外传递多于向内传递, 因此热防护性能相对更佳。

3.3 HTI

HTI 利用组合面料暴露于热通量为 $(80 \pm 2) \text{ kW/m}^2$ 的火焰中引起人体二度灼伤的时间值 (单位: s) 来表征。测试过程为, 水平放置的试样被限制移动, 并受到置于其下方的燃气燃烧器火焰 [入射热通量 $(80 \pm 2) \text{ kW/m}^2$] 的影响; 接着, 利用试样上方及与试样接触的小型铜量热计测量通过试样的热量; 记录温度从室温 $(23 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ 升高 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ 所需的时间, 即分别对应 HTI_{12} 值和

表 1 组合结构面料试样的基本信息

Tab. 1 Basic information of combination structure fabrics

组合结构	试样编号	组合面料结构	描述	各层面密度/ (g·m ⁻²)	组合面料面 密度/(g·m ⁻²)	
标准 4 层	A	外层	单层芳纶斜纹格子布,100%芳纶 IIIA	200±10	500±25	
		防水透气层	芳纶水刺毡(70 g/m ²)复合 PTFE 膜	110±5.5		
		隔热层	芳纶水刺毡	70±3.5		
		舒适层	芳纶/阻燃黏胶混纺面料	120±6		
Base 3 层	B	3D 外层	菱形格双层组织面料	230±11.5	475±23.75	
		防水透气层	芳纶水刺毡(90 g/m ²)复合 PTFE 膜	125±6.25		
	舒适层	芳纶/阻燃黏胶混纺面料	120±6			
	外层	单层芳纶斜纹格子布,100%芳纶 IIIA	210±10.5			
C	3D 防水透气层	硅胶点/芳纶水刺毡/PTFE 复合面料	190±9.5	520±26		
	舒适层	芳纶/阻燃黏胶混纺面料	120±6			
D	外层	单层芳纶斜纹格子布,100%芳纶 IIIA	220±11	480±24		
	防水透气层	芳纶水刺毡(90 g/m ²)复合 PTFE 膜	125±6.25			
Plus 3 层	E	3D 舒适层	凸起管状面料	135±6.75	490±24.5	
		3D 外层	菱形格双层组织面料	230±11.5		
		防水透气层	芳纶水刺毡(90 g/m ²)复合 PTFE 膜	125±6.25		
	F	3D 外层	蜂巢格双层组织面料	236±11.8		526±26.3
		防水透气层	芳纶水刺毡(120 g/m ²)复合 PTFE 膜	155±7.75		
		3D 舒适层	蜂巢格面料	135±6.75		
2 层	G	3D 外层	菱形格双层组织面料	270±13.5	450±22.5	
		3D 防水透气舒适层	凸起管状面料复合 PTFE 膜	180±9		
	H	3D 外层	菱形格双层组织面料,里层滴塑凸点	290±14		470±23
		3D 防水透气舒适层	凸起管状面料复合 PTFE 膜	180±9		
I	3D 外层	蜂巢格双层组织面料	255±12.75	470±23.5		
	3D 防水透气舒适层	蜂巢格面料复合 PTFE 膜	215±10.75			

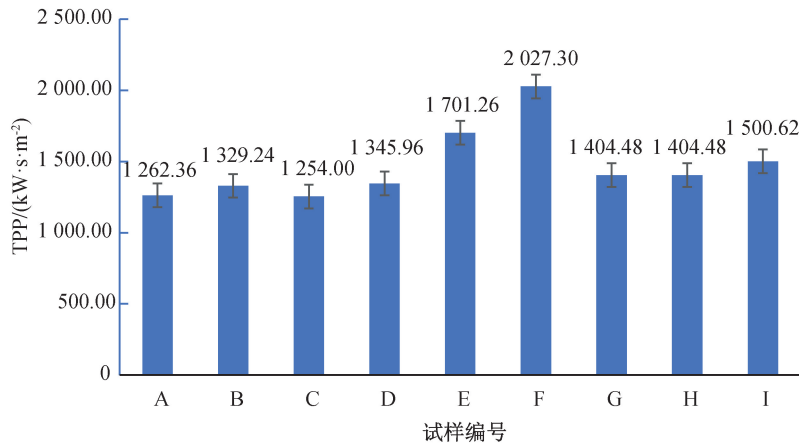


图 10 试样 A~试样 I 的 TPP 测试结果
Fig. 10 TPP test results of sample A to sample I

HTI₂₄ 值^[6]。

由表 2 可知,2 层与 3 层组合面料均符合标准 EN 469 中的 2 级防护性能要求,即 HTI₂₄ 值 ≥ 13.0、HTI₂₄ 值-HTI₁₂ 值 ≥ 4.0。

3.4 RHTI

RHTI 利用组合面料暴露于热通量为 (40 ± 2) kW/m² 的辐射热中引起人体二度灼伤的时间值 (单位:s) 来表征。测试过程中样品被支撑在独立

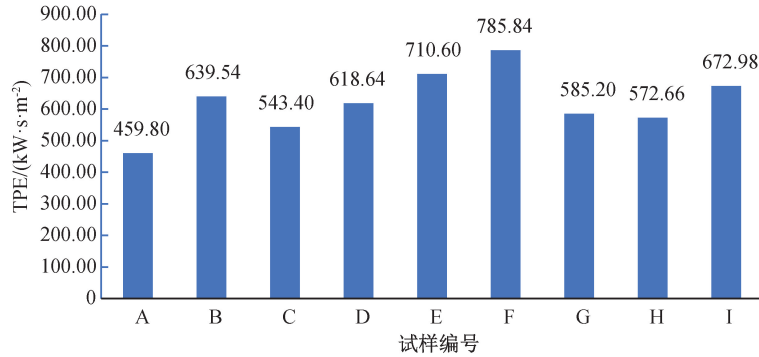


图 11 试样 A~试样 I 的 TPE 测试结果
Fig. 11 TPE test results of sample A to sample I

表 2 试样 A~试样 I 的 HTI 测试结果

Tab. 2 HTI test results of sample A to sample I

项目	试样编号								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
HTI ₂₄ 值	15.3	17.0	14.4	15.1	19.1	22.3	17.3	17.5	18.6
HTI ₂₄ 值-HTI ₁₂ 值	5.3	4.9	4.1	4.9	6.1	6.9	5.2	5.3	5.5

表 3 试样 A~试样 I 的 RHTI 测试结果

Tab. 3 RHTI test results of sample A to sample I

项目	试样编号								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
RHTI ₂₄ 值	21.4	19.5	18.1	18.6	21.3	23.1	18.5	18.8	19.6
RHTI ₂₄ 值-RHTI ₁₂ 值	6.6	6.9	5.0	5.0	6.3	7.7	5.1	5.1	5.3

的框架上,并暴露于特定水平的辐射热中,记录温度从室温(23±5)℃升高 12℃和 24℃的时间,即分别对应 RHTI₁₂ 值和 RHTI₂₄ 值^[7]。

由表 3 可知,2 层与 3 层组合面料均符合标准 EN 469 中 2 级防护性能要求,即 RHTI₂₄ 值≥18.0, RHTI₂₄ 值-RHTI₁₂ 值≥4.0。

3.5 热人仪测试

热人仪用于测试灭火防护服在轰燃环境下的热防护性能。测试时,暴露的总热通量为(84±2) kW/m²,

暴露时间为(8.0±0.1) s,采集时间为 60 s,采集频率为 10 次/s,燃烧器数量 12 个,传感器数量 122 个。烧伤面积的分析 and 计算按 ISO 13506.2 标准规定的方法进行。测试结果见表 4。

由表 4 可知,Base 3 层组合面料中基于 3D 外层试样 B 的总烧伤面积占比小于试样 C 和试样 D 的,图 10 中由 TPP 值高于 1 379.4 kW·s/m² 的组合面料即试样 E~试样 I 制备的灭火防护服,其烧伤面积占比差异不大,均能提供稳定的热保护能力。

表 4 试样 A~试样 I 制备的灭火防护服的热人仪测试结果

Tab. 4 Thermoman test results of fire fighting protective clothing made of sample A to sample I

项目	灭火防护服								
	试样 A	试样 B	试样 C	试样 D	试样 E	试样 F	试样 G	试样 H	试样 I
二度烧伤面积占比/%	13.31	10.66	15.10	11.36	8.78	8.03	10.13	10.22	10.04
三度烧伤面积占比/%	1.63	0.82	1.76	1.23	0.75	0.70	0.74	0.73	0.71
总烧伤面积占比/%	14.94	11.48	16.86	12.59	9.53	8.73	10.87	10.95	10.75

4 结论

根据 TPP、TPE、HTI、RHTI 和热人仪测试结果,

3 层与 2 层组合结构面料的热防护性能均满足对应标准要求,均可替代标准 4 层组合面料,用于消防员灭火防护服的开发。减层结构有利于提升服装的灵巧性,符合服用性能减质增效的开发趋势。