

消防服织物辐射热防护性能影响因素研究

吕欢 张希文 田桓荣 郭晶 徐炎炎

陕西元丰新材料科技有限公司, 陕西 西安 710025

摘要:采用辐射热传递指数(RHTI)表征织物防护性能,系统探究纤维原料配比、织物结构参数及轧光后整理工艺对消防服织物辐射热防护性能的影响机制。结果表明:聚酰亚胺(PI)纤维与芳纶1313混纺可显著提升织物辐射热阻隔能力;同等面密度下,双层织物辐射热防护性能优于单层织物,表里层密度比2.0:1.0时防护性能最优;最优轧光工艺为温度170℃、压力0.8 MPa、速度25 m/min,该工艺参数能够改善织物表面平整度,提升红外辐射反射效率。研究表明,可在不增加织物面密度的前提下实现辐射热防护性能提升,研究结果可为轻量化高性能消防服面料研发提供理论依据与技术支撑。

关键词:消防服织物;辐射热防护;辐射热传递指数;纤维原料;织物层数;织物组织;表里层密度比;轧光

中图分类号:TS156

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)08-0040-07

Study on influencing factors of radiant heat protection performance of firefighting garment fabrics

Lü Huan, Zhang Xiwen, Tian Huanrong, Guo Jing, Xu Yanyan

Shaanxi Yuanfeng Prosafe Co., Ltd., Xi'an 710025, Shaanxi, China

Abstract: The protective performance of fabrics was characterized by radiant heat transfer index (RHTI). The influence mechanisms of fiber material blending ratio, fabric structural parameters and calendering finishing process on the radiant heat protection performance of firefighting garment fabrics were systematically investigated. The results showed that the radiant heat protection performance of fabrics could be significantly enhanced by the blending of polyimide (PI) fibers and aramid 1313 fibers. Under the same areal density, superior protective performance was exhibited by double-layer fabrics compared with single-layer fabrics, and the optimal inner-outer layer density ratio was determined to be 2.0:1.0. The optimal calendering parameters were determined to be a temperature of 170℃, a pressure of 0.8 MPa and a speed of 25 m/min, by which fabric surface smoothness was improved and infrared radiation reflectivity was enhanced. The study demonstrated that enhanced radiant heat protection performance could be achieved without increasing fabric areal density, providing a theoretical basis and technical support for the development of lightweight, high-performance firefighting garment fabrics.

收稿日期:2026-04-07

作者简介:吕欢,女,1994年生,工程师,主要研究方向为功能性纺织品的研究与应用,370895377@qq.com

Keywords: firefighting garment fabric; radiant heat protection; radiant heat transfer index; fiber material; number of fabric layer; fabric weave; inner-outer layer density ratio; calendering

消防服作为消防员在高温火场环境中执行救援任务的核心防护装备,其辐射热防护性能直接关系到救援人员的生命安全。在野外火场环境中灭火时,热传递以辐射热为主,占总热传递的 80%,主要通过长波段可见光及近红外光形式传播,对流热与传导热占比相对较低^[1]。因此,强化织物对辐射热的阻隔与反射能力,是优化消防服防护性能的核心突破口。

目前,行业内主要采用金属铝复合织物或在织物表面涂覆反射型材料等方式提升辐射热反射效率,但此类面料存在透气透湿性差、穿着舒适性欠佳等问题,易加重消防员生理负担,影响救援效率^[2]。国内学者虽在消防服面料阻燃性、力学性能等方面开展了大量研究,但针对辐射热防护性能的系统性研究相对匮乏^[3-5]。

基于此,本研究从纤维原料配比、织物结构设计及后整理工艺 3 个维度开展试验,系统分析各因素对织物辐射热防护性能的影响规律,揭示其内在作用机制,旨在开发兼具辐射热防护性与舒适性的消防服面料,为高性能个体防护装备的升级提供技术支持。

1 试验部分

1.1 试验材料

为明确纤维原料对织物辐射热防护性能的影响,选取芳纶 1313(泰和新材集团股份有限公司生产)、芳纶 1414(泰和新材集团股份有限公司生产)、聚酰亚胺(PI 纤维)(江苏奥神新材料股份有限公司生产)、腈氯纶(日本 Kaneka 公司生产)、阻燃黏胶纤维(奥地利兰精公司生产)等为原料,并设计 9 组不同纤维配比的织物,9 组织物包含单层与双层结构。

为探究织物组织对织物辐射热防护性能的影响,设计 4 组基础组织(平纹、2/1 斜纹、3/1 斜纹、五枚三飞经面缎纹)的单层织物,且 4 组单层织物的原料配比、纱线线密度及经纬向密度一致,以排除无关变量干扰。

为分析双层织物表里层密度比对织物辐射热防护性能的影响,设计 4 组不同表里层密度比的双层织物。4 组双层织物的原料配比、纱线线密度及经

纬向密度一致,且织物的表层统一采用 2/1 斜纹组织,里层统一采用平纹组织。

所有织物均采用相同织造设备制备,确保测试结果的科学性与可比性。

1.2 测试方法与设备

1.2.1 辐射热防护性能测试

参照 ISO 6942:2022 *Protective clothing—protection against heat and fire—method of test: evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat*,采用公司自研 FSR-I 型辐射热防护性能测试仪(图 1)进行测试,设备精度符合 ISO 6942:2022 标准要求。辐射热传递指数(radiant heat transfer index, RHTI)用于评估材料的热防护性能。测试时,将织物置于由 6 根碳化硅(SiC)加热棒组成的辐射热源下,热通量设定为 21 kW/m²,使用铜量热传感器记录织物未暴露面温度变化,测量温度上升 12 ℃ 和 24 ℃ 所需时间,分别用 RHTI 12 和 RHTI 24 表示^[6],本文以 RHTI 24 为核心评价指标。

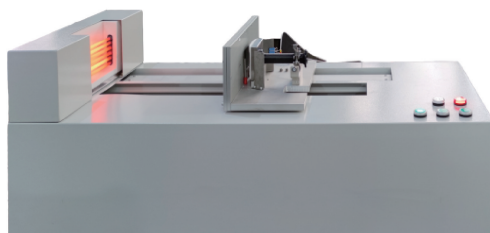


图 1 辐射热防护性能测试仪

Fig. 1 Radiant heat protection performance tester

1.2.2 基础性能测试

参照 GB/T 4669—2008《纺织品 机织物 单位长度质量和单位面积质量的测定》,采用精度为 0.01 g 的电子天平测试织物质量后计算其面密度。参照 GB/T 3820—2016《纺织品和纺织制品厚度的测定》,使用 YG141N 型数字式织物厚度仪测试织物厚度。织物厚度与面料蓬松度、隔热空间相关,热防护面料需保持合理厚度,过薄可能会削弱隔热性能,过厚则会影响穿着的适配性。

参照 GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第 1 部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》,采用 YG026HB 型电子织物强力机测试

织物轧光前后的经向断裂强力,并计算强力保留率,以表征轧光工艺对面料力学性能的损伤程度。强力保留率数值越高,表示纤维结构的完整性越好,越有助于保障面料的耐用性和使用寿命。强力保留率按照式(1)计算。

$$S = \frac{F_2}{F_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为强力保留率,%; F_2 为轧光处理后织物经向断裂强力,N; F_1 为轧光处理前织物经向断裂强力,N。

2 结果与讨论

2.1 纤维原料对织物辐射热防护性能的影响

纤维原料的耐高温性和阻燃性是决定织物辐射

热防护性能的基础^[7]。表1为不同纤维原料织物辐射热防护性能测试结果,含腈氯纶的1[#]织物和含阻燃黏胶纤维的2[#]织物,RHTI 24分别为11.0 s和10.4 s,表现出较弱的辐射热防护能力。含芳纶的3[#]、4[#]、5[#]织物,RHTI 24均不低于11.5 s,且随着芳纶1414占比的增加,织物的RHTI 24呈上升趋势。具有双层结构的7[#]、8[#]、9[#]织物中,对比7[#]和8[#]织物可以发现,芳纶1414更有助于提升织物的辐射热防护性能。对比8[#]和9[#]织物可以发现,9[#]织物中芳纶1313对辐射热防护性能的提升作用弱于芳纶1414,在里层加入聚酰亚胺纤维后,9[#]织物的辐射热防护性能优于里层为纯芳纶1414的8[#]织物,这表明聚酰亚胺纤维对织物辐射热防护性能的提升效果优于芳纶1414。

表1 不同纤维原料织物辐射热防护性能测试结果

Tab. 1 Test results of radiant heat protection performance for fabrics made of different fiber raw materials

序号	纤维种类及配比	层结构	织物组织	面密度/(g·m ⁻²)	表里层密度比	RHTI 24/s
1 [#]	腈氯纶/芳纶 1313/芳纶 1414(60/20/20)	单层	平纹	200	—	11.0
2 [#]	阻燃黏胶纤维/芳纶 1313/芳纶 1414(50/40/10)	单层	平纹	200	—	10.4
3 [#]	芳纶 1313/芳纶 1414(75/25)	单层	平纹	200	—	13.6
4 [#]	芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)	单层	平纹	200	—	11.8
5 [#]	纯芳纶 1313	单层	平纹	200	—	11.5
6 [#]	芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)	单层	平纹	230	—	12.4
7 [#]	表层:芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)	双层	平纹	230	1.5:1.0	13.6
	里层:芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)					
8 [#]	表层:芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)	双层	平纹	230	1.5:1.0	14.1
	里层:纯芳纶 1414					
9 [#]	表层:芳纶 1313/芳纶 1414(95/5)	双层	平纹	230	1.5:1.0	14.4
	里层:聚酰亚胺纤维/芳纶 1313(50/50)					

RHTI 24 数值之间的差异可直观反映辐射热防护性能的优劣,其本质上是不同纤维分子骨架耐热性与高温聚集态演变的协同作用。腈氯纶、阻燃黏胶纤维分子主链含大量弱键,在21 kW/m²辐射热通量的持续热作用下易发生断链、热分解,纤维基体出现孔洞与熔融收缩,织物整体阻隔结构失效,辐射热可直接穿透织物;纯芳纶依靠芳香环骨架具备基础耐热能力,但分子链规整度有限,红外光吸收占比偏高。而PI纤维分子由刚性酰亚胺环与芳香环交替共轭构成,C=O、C—N化学键键能远高于普通阻燃纤维,高温辐射下不易发生分子链断裂;同时液晶纺丝形成高结晶有序结构,一方面对近红外辐射产生多重散射与镜面反射,减少热量吸收,另一方面

紧密堆砌的结晶区降低纤维自身导热系数。当PI纤维与芳纶1313混纺时,两相纤维形成复合耐热体系,PI纤维作为反射相削弱红外入射能量,芳纶1313作为连续相维持织物结构完整性,因此9[#]织物辐射热防护性能最优。

2.2 织物结构对织物辐射热防护性能的影响

2.2.1 织物层数

织物结构可改变热量传递路径与空气层分布,对辐射热防护性能起到决定性作用。对比表1中单层的6[#]织物与双层的7[#]织物的测试结果发现,6[#]织物的RHTI 24为12.4 s,7[#]织物的RHTI 24为13.6 s,表明双层织物的辐射热防护水平显著优于单层织物。

双层结构的优势主要源于两方面:一是双层结构内部形成的静止空气腔,空气的导热系数约为 $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,远低于纤维材料,可显著阻止热传导;二是双层织物与单层织物的厚度存在一定差异,6#织物厚度为 0.696 mm ,7#织物厚度为 0.725 mm ,双层结构整体厚度更大,可进一步延长辐射热传递路径,协同提升防护效果。

2.2.2 织物组织

织物组织可改变织物表面反光特性与织物孔隙形态,影响辐射热防护效果。本研究设计了 4 组典型的单层织物,原料均为配比 60/40 的芳纶 1313 与聚酰亚胺纤维 60/40,纱线线密度均为 $21.1 \text{ tex}\times 2$,经纱密度均为 $285 \text{ 根}/(10 \text{ cm})$,纬纱密度均为 $198 \text{ 根}/(10 \text{ cm})$ 。

测试结果见表 2,2/1 斜纹织物的 RHTI 24 最大。4 组织物纱线线密度、经纱密度和纬纱密度完全一致,理论总紧度与孔隙率无明显差异,织物的辐射热防护性能由表层反光连续性与厚度方向孔隙贯通性共同决定。平纹织物交织点最多,纱线反复屈曲造成表面凹凸不平,红外辐射发生漫反射,大量热能被织物吸收;3/1 斜纹织物、五枚三飞经面缎纹织物浮长线过长,交织点数量大幅下降,纱线间形成斜向、纵向连续贯通的孔隙,辐射热可沿孔隙通道快速传导至织物背面;2/1 斜纹织物浮长线适中,表层形成连续平整反光区域,大幅提升红外反射效率,同时保留充足交织点切断长距离贯通孔隙,阻断热量直通路径,故其 RHTI 24 指标优于其余组织织物。

表 2 不同组织织物的辐射热防护性能测试结果

织物组织	热通量/ $(\text{kW}\cdot\text{m}^{-2})$	RHTI 24/s
平纹	21.0 ± 0.5	14.2
2/1 斜纹	21.0 ± 0.5	15.1
3/1 斜纹	21.0 ± 0.5	14.7
五枚三飞经面缎纹	21.0 ± 0.5	14.4

2.2.3 表里层密度比

为探究双层织物表里层密度比对织物辐射热防护性能的影响,设计 4 组表里层密度比(表 3)进行织造并测试,原料均为配比 60/40 的芳纶 1313 与聚酰亚胺纤维 60/40,纱线线密度均为 $11.2 \text{ tex}\times 2$ 。设计双层织物的表层织物组织为 2/1 斜纹,借助斜纹

纹路的反光效应增加织物对红外光线的反射;设计里层织物组织为平纹,以提升里层织物紧度,延缓热量传递。测试织物的辐射热防护性能时校准热通量为 $(21.0\pm 0.5) \text{ kW}/\text{m}^2$,测试结果如图 2 所示。

表 3 表里层密度比设计

表里层密度比	经纱密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]		纬纱密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]	
	表层	里层	表层	里层
1.0:1.0	220.0	220.0	212.5	212.5
1.5:1.0	264.0	176.0	255.0	170.0
2.0:1.0	293.0	147.0	283.0	142.0
2.5:1.0	314.0	126.0	303.5	121.5

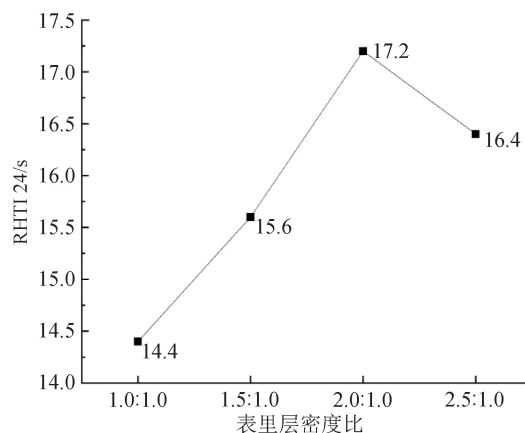


图 2 表里层密度比对织物辐射热防护性能的影响
Fig.2 Influence of inner-outer layer density ratio on radiant heat protection performance of fabrics

图 2 测试结果表明,随着表里层密度比由 1.0:1.0 增大至 2.0:1.0,RHTI 24 从 14.4 s 逐步提升至 17.2 s,当表里层密度比进一步增大至 2.5:1.0 时,RHTI 24 反而下降至 16.4 s,总体上呈现先升后降的变化趋势。表里层密度比对辐射热源的传播路径(图 3)具有双重制衡效应,当比值低于 2.0:1.0 时,表层纱线排布疏松,红外辐射大量穿透表层抵达内部空气层;当比值提升至 2.0:1.0 时,表层纱线排布紧密,镜面反射效果最大化,里层适度松散形成稳定静止空气隔热层,反射阻隔与空气隔热协同发挥作用;当比值升至 2.5:1.0 时,里层结构过于松散,空气层厚度过大产生内部对流换热,加速热量纵向传递,最终辐射热防护性能出现衰减。

2.3 后整理对辐射热防护性能的影响

织物表面粗糙度直接影响红外辐射的反射效

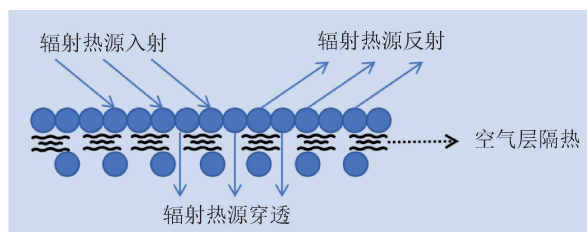


图3 双层织物中辐射热源的传播路径
Fig. 3 Propagation paths of radiant heat source in double-layer fabric

率。光滑表面可使红外辐射集中反射,减少吸收与透射;粗糙表面易产生二次反射,伴随多次吸收与透射,防护性能降低。轧光工艺通过高温高压作用改善织物表面平整度,减少毛羽,使纱线排列更为紧凑,进而提升红外反射效率。采用单因素变量法探究轧光温度、压力及速度对织物性能的影响,选用4#织物探究后整理对织物辐射热防护性能的影响,厚度为0.696 mm,进行辐射热防护性能测试时校准热通量为 $(21.0 \pm 0.5) \text{ kW/m}^2$ 。

2.3.1 轧光温度对织物性能的影响

当轧光压力与轧光速度分别为0.8 MPa和25 m/min时,轧光温度对织物性能的影响如图4~图6所示。随着轧光温度从130℃升至190℃, RHTI 24从12.2 s增至13.2 s,表明温度升高可促进纤维分子链段塑性滑移,纱线表面毛羽倒伏、纱线屈曲程度下降,光滑表面实现定向镜面反射,可减少红外吸收;经向断裂强力保留率从96.5%缓慢下降至94.2%,表明高温会在一定程度上加剧纤维内部的结构损伤,导致力学性能有衰减,但整体下降幅度较小,纤维在该温度范围内仍能保持较好的结构完整性;织物厚度则从0.690 mm逐渐降至0.685 mm,呈现出轻微减小的趋势,这是由于温度升高使纤维软化,在压力作用下织物受到一定程度的压缩,但厚度变化幅度不大,仍能维持热防护面料所需的基本蓬松度与隔热空间。综合各项指标,170℃为试验范围内的较优工艺参数,该温度下RHTI 24提升显著,强力保留率仍处于较高水平,热防护与力学性能达成较优平衡。

2.3.2 轧光压力对织物性能的影响

当轧光温度与速度分别为150℃和25 m/min时,轧光压力对织物性能的影响如图7~图9所示。随着轧光压力从0.6 MPa增大至0.8 MPa, RHTI 24

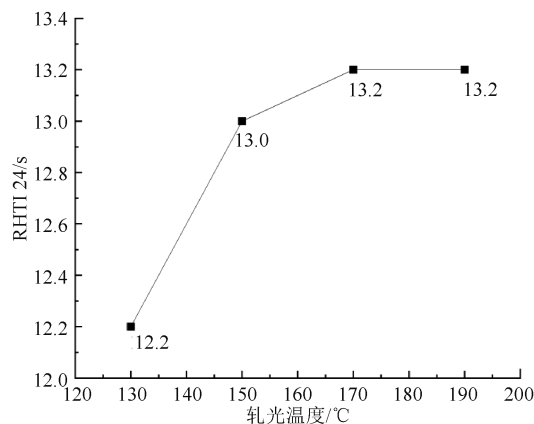


图4 轧光温度对织物辐射热防护性能的影响
Fig. 4 Influence of calendering temperature on radiant heat protection performance of fabrics

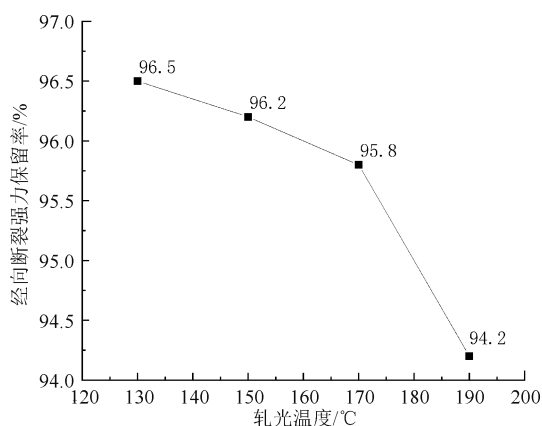


图5 轧光温度对经向断裂强力保留率的影响
Fig. 5 Influence of calendering temperature on retention rate of warp tensile breaking strength

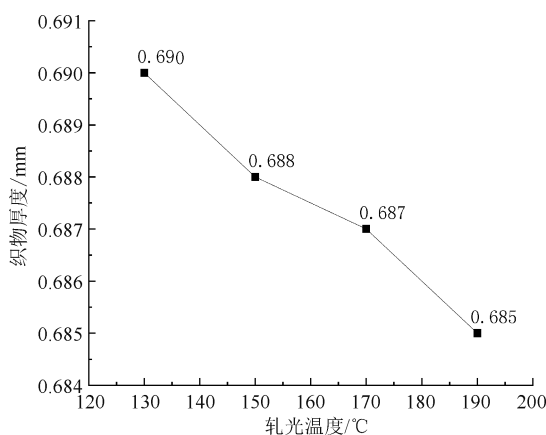


图6 轧光温度对织物厚度的影响
Fig. 6 Influence of calendering temperature on fabric thickness

从12.4 s升至13.0 s,这是由于压力增大可压实纱线间隙,进一步降低表面粗糙度,但压力高于

0.8 MPa 会过度压缩织物厚度,减少内部隔热空气层体积,削弱传热阻隔能力。随着轧光压力从 0.6 MPa 增大至 1.2 MPa,经向断裂强力保留率从 96.9%持续降低至 93.5%,表明随着压力增大,纤维所受的力学损伤逐渐加剧,纤维分子间的结合力被破坏,从而导致强力保留率逐步下降;织物厚度从 0.694 mm 逐渐减小至 0.685 mm,表明压力的增加使织物受到更为明显的压缩作用,蓬松度有所降低。由此表明,0.8 MPa 的轧光压力可在提升热防护性的同时维持较高强力,为试验范围内的优选工艺参数。

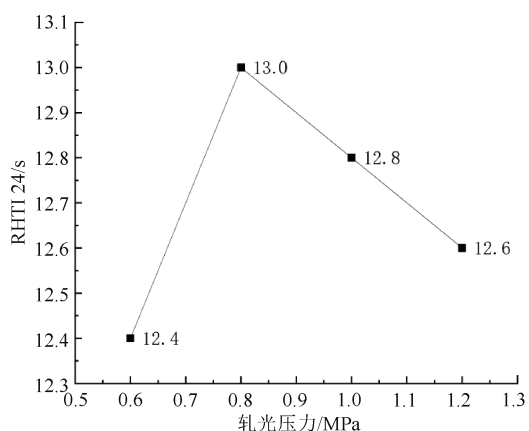


图 7 轧光压力对织物辐射热防护性能的影响
Fig. 7 Influence of calendering pressure on radiant heat protection performance of fabrics

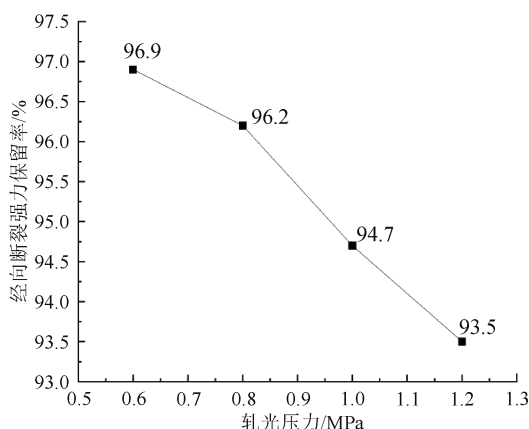


图 8 轧光压力对经向断裂强力保留率的影响
Fig. 8 Influence of calendering pressure on retention rate of warp tensile breaking strength

2.3.3 轧光速度对织物性能的影响

当轧光温度和压力分别为 150 ℃ 和 0.8 MPa 时,轧光速度对织物性能的影响如图 10~图 12 所示。随

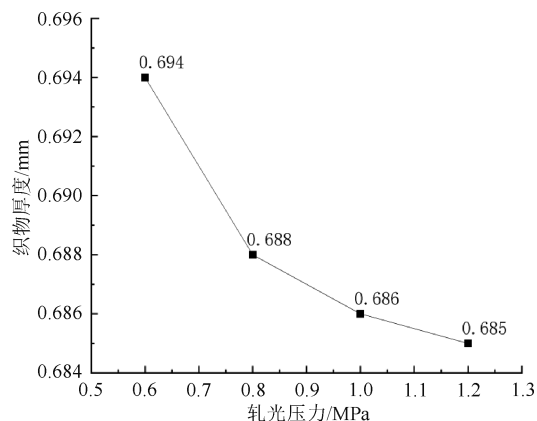


图 9 轧光压力对织物厚度的影响
Fig. 9 Influence of calendering pressure on fabric thickness

着轧光速度从 20 m/min 逐步提升至 35 m/min, RHTI 24 呈现出先上升后下降的变化态势,这是因为轧光速度适中时,织物与轧辊表面能够充分接触,并受到均匀的热压作用,纤维结构得以有效定型,表面致密性良好,可使织物维持较高的热防护性能,轧光速度过快会缩短织物与热辊接触时间,纤维无法充分软化定型,织物表面致密化效果不足,反射效率下降;经向断裂强力保留率呈现先下降后上升的趋势,这可能是因为轧光速度较大时,纤维受到热压作用的时间减少,力学性能损伤程度逐渐减轻;织物厚度从 0.684 mm 逐渐增加至 0.693 mm,这是因为速度加快使得织物在压力作用下的压缩时间缩短,面料蓬松度恢复更为充分,厚度略有增加。综合考虑热防护性能、经向断裂强力保留率及织物厚度,25 m/min 为较优轧光速度,该速度下织物受热压作用充分且均匀,可在维持较高 RHTI 24 的同时兼顾力学性能与厚度。

3 结论

本研究通过系统试验与机制分析,探究了消防服织物辐射热防护性能的关键影响因素及其优化机制,主要结论如下:

(1) 纤维原料是影响辐射热防护性能的核心要素。腈氯纶、阻燃黏胶等纤维耐热性能偏弱,其辐射热防护水平普遍偏低;芳纶具备良好耐热特性,将芳纶 1313 与 PI 纤维混纺后,依托 PI 纤维独特分子结构与聚集态结构产生协同防护效应,能够进一步显著提升织物的辐射热防护性能。

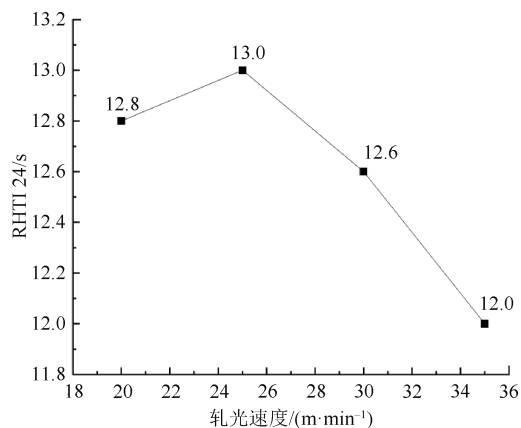


图 10 轧光速度对织物辐射热防护性能的影响

Fig. 10 Influence of calendering speed on radiant heat protection performance of fabrics

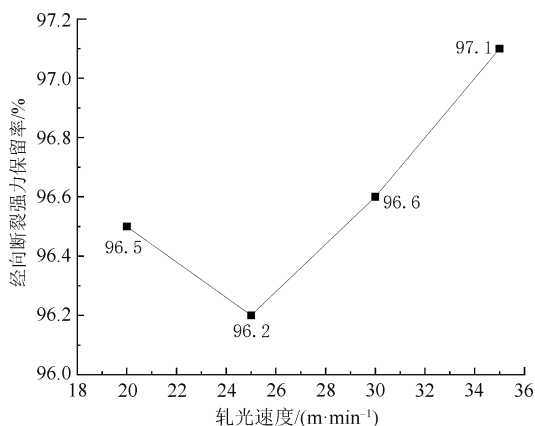


图 11 轧光速度对经向断裂强力保留率的影响

Fig. 11 Influence of calendering speed on retention rate of warp tensile breaking strength

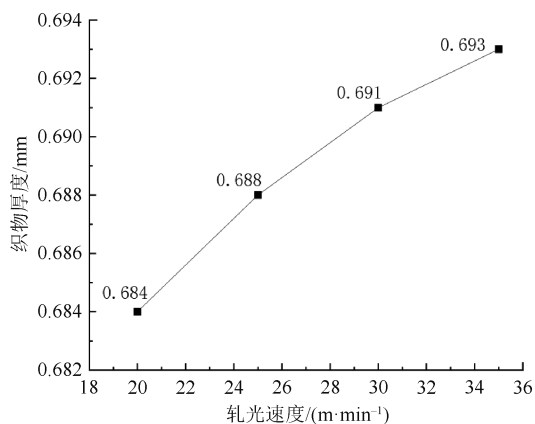


图 12 轧光速度对织物厚度的影响

Fig. 12 Influence of calendering speed on fabric thickness

(2) 双层织物的辐射热防护性能优于单层织物,最优表里层密度比为 2.0:1.0。该结构依靠致密表层抑制热量穿透,并与内部静止空气层的热阻隔作用形成协同效应,在不增加织物面密度的前提下显著提升了织物的辐射热防护性能。

(3) 轧光后整理能够有效改善织物辐射热防护性能。在温度、压力、运行速度三因素耦合作用下,170℃、0.8 MPa、25 m/min 为最优工艺参数;该参数组合可最大限度提升织物红外反射能力,同时将织物厚度衰减与经向断裂强力保留率控制在合理范围。

本研究得到的纤维配比方案、织物结构设计与轧光后整理工艺参数,可为轻量化高性能消防防护面料的开发提供理论依据与技术支撑,对个体热防护装备优化具有一定的工程参考价值。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 林建波,殷海波,曹永强. 消防员隔热防护服的抗辐射热渗透性能[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(2): 241-243.
- [2] 刘生广,陈国梁,蒋秋冉. 液态硅橡胶涂覆尼龙 66 复合材料的耐热性研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(12): 31-39.
- [3] 刘国熠,刘元军,赵晓明. 消防避火服外层织物辐射热防护效能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(22): 116-120.
- [4] 张巍. 消防员防护服用高性能纤维材料选择与优化策略[J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(9): 172-174.
- [5] 张希文,刘海,吕欢,等. 高辐射热下高性能纤维阻燃织物的热防护性能研究[J]. 毛纺科技, 2024, 52(11): 14-19.
- [6] 张希文,樊争科,郭晶,等. 森林消防员防火服的研究进展[J]. 合成纤维, 2025, 54(11): 33-36.
- [7] 朱超俊. 消防服外层用阻燃织物的防护性能探讨[J]. 产业用纺织品, 2016, 34(9): 23-24.