

# 涂层方式对芳纶阻燃性能的影响

刘经吉<sup>1</sup> 刘萍<sup>2</sup> 张薄<sup>2</sup>

1. 杭州点润化工有限公司, 浙江 杭州 311241;
2. 重庆科技学院 安全工程学院, 四川 重庆 401331

**摘要:** 先将聚磷酸铵 (APP)、三聚氰胺 (MEL)、季戊四醇 (PER)、热塑性聚氨酯 (TPU) 弹性体、铝银浆 (AIU) 组成质量配比不同的 4 种膨胀型阻燃聚氨酯银浆 (IFR/TPU/AIU) 溶液, 再将 4 种溶液分别以直接涂层方式和发泡涂层方式涂覆于芳纶织物表面, 探究 2 种涂层方式对芳纶织物阻燃性能的影响。锥形量热测试和垂直燃烧测试等结果显示: 阻燃性能最好的 IFR/TPU/AIU 溶液配方为  $m(\text{APP}) : m(\text{MEL}) : m(\text{PER}) : m(\text{TPU}) : m(\text{AIU}) = 12 : 6 : 2 : 16 : 20$ ; 与未涂覆的芳纶织物相比, 试样 ZT-3 和试样 FP-3 的热释放速率峰值、总释放热分别降低了 74.3%、9.9% 和 76.9%、10.2%, 残炭率分别为 7.4% 和 7.5%。涂覆芳纶织物的纬向阻燃性能优于经向阻燃性能, 直接涂层芳纶织物的阻燃性能优于发泡涂层芳纶织物的阻燃性能。

**关键词:** 芳纶织物; 直接涂层; 发泡涂层; 阻燃性能; 热释放速率峰值; 总释放热; 残炭率

中图分类号: TQ 314. 24

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)01-0038-09

## Effect of coating methods on flame retardant properties of aramid fiber

Liu Jingji<sup>1</sup>, Liu Ping<sup>2</sup>, Zhang Bo<sup>2</sup>

1. Hangzhou Dianrun Chemical Co., Ltd., Hangzhou 311241, Zhejiang, China;
2. College of Safety Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, Sichuan, China

**Abstract:** Firstly, ammonium polyphosphate (APP), melamine (MEL), pentaerythritol (PER), thermoplastic polyurethane (TPU) elastomer and aluminium silver paste (AIU) were used to form four kinds of intumescent flame retardant polyurethane silver paste (IFR/TPU/AIU) solutions with different mass ratios, and then the four solutions were coated on the surface of aramid fabrics by the direct coating method and the foam coating method to investigate the influence of two coating methods on the flame retardant properties of aramid fabrics. The results of cone calorimetry test and vertical combustion test showed that the best IFR/TPU/AIU solution formulation for flame retardancy was  $m(\text{APP}) : m(\text{MEL}) : m(\text{PER}) : m(\text{TPU}) : m(\text{AIU}) = 12 : 6 : 2 : 16 : 20$ . Compared with the uncoated aramid fabric, the peak rate of heat release and the total heat release of ZT-3 and FP-3 were reduced by 74.3%, 9.9% and 76.9%, 10.2%, respectively, and the residual carbon rates of

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN201901516)

作者简介: 刘经吉, 男, 1984 年生, 工程师, 主要从事阻燃材料的技术研究工作

通信作者: 张薄, zhangbo@cqust.edu.cn

them were 7.4% and 7.5%, respectively. The flame retardant properties of coated aramid fabrics in the weft direction was better than that in the warp direction, and the flame retardant properties of directly coated aramid fabrics was better than that of foam coated aramid fabrics.

**Keywords:** aramid fabric; direct coating; foam coating; flame retardant property; peak rate of heat release; total heat release; residual carbon rate

涂层是利用涂覆或黏合的方式将高分子材料引入织物表面,使织物具有阻燃、防辐射、绝缘等独特功能的。纺织品常用的表面改性方法包括循环浸渍填料法、逐层自组装法和溶胶-凝胶法等<sup>[1-6]</sup>,但 these 整理方法会消耗大量的水、有机溶剂及能源,且废液的排放或回收也是许多工厂面临的一大挑战,废弃阻燃剂已被认为是生态系统的潜在污染物<sup>[7]</sup>。发泡涂层整理得到的效果与循环浸渍法、逐层自组装法、溶胶-凝胶法等整理得到的效果相差不大<sup>[8-10]</sup>,但前者更环保,更节约资源。直接涂层具有成膜致密、牢度好、工艺简单等优点,其也已成为涂层整理中覆盖面最广的方法之一。

张薄等<sup>[11]</sup>采用直接涂层方式将普通型、高效型和环保型阻燃剂分别涂覆在不同织物的表面,并通过改变刮涂次数控制涂覆量,探究了各类阻燃剂涂覆量对织物阻燃性能的影响。魏亮等<sup>[12]</sup>将由热塑性聚氨酯、铝粉、黏合剂等组成的混合溶液直接涂层到织物表面,发现涂层织物具有高反射率特性,可以阻挡辐射热通量和对流热通量,且涂层织物的损毁长度比未整理芳纶织物的短,热防护性能优异。魏保

良等<sup>[13]</sup>采用发泡涂层的方式,将石墨烯涂覆到织物上,再利用黏合剂浸泡处理,开发出适用于电焊行业的防护服。其研究结果显示,当石墨烯质量分数为 2% 时,防护服的防护效果最佳。徐瑾等<sup>[14]</sup>分别采用直接涂层方式与发泡涂层方式,将高效阻燃胶 TF-687HS 涂覆于丙纶织物表面,发现涂层方式对阻燃性能有一定的影响,但影响不大;对手感和透气性能影响较大,直接涂层丙纶织物手感偏硬、透气性能较差,而发泡涂层丙纶织物手感柔软且透气性能良好。

基于此,本文采用环保、节能的直接涂层方式和发泡涂层方式,将 4 种配比的膨胀型阻燃聚氨酯银浆溶液涂覆于芳纶织物表面,探究 2 种涂层方式对芳纶织物阻燃性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 材料与仪器

芳纶织物,100%对位芳纶,面密度为 170 g/m<sup>2</sup>,平纹,江苏凯盾新材料有限公司生产。试验试剂如表 1 所示。试验仪器如表 2 所示。

表 1 试验试剂

Tab. 1 Test reagents

| 化学品              | 规格        | 生产厂商           |
|------------------|-----------|----------------|
| 聚磷酸铵 (APP)       | 纯度 99%    | 上海麦克林生化科技有限公司  |
| 三聚氰胺 (MEL)       | 纯度 99%    | 上海麦克林生化科技有限公司  |
| 季戊四醇 (PER)       | 纯度 98%    | 上海源叶生物科技有限公司   |
| 热塑性聚氨酯 (TPU) 弹性体 | 粉末粒径 8 μm | 衡水博宇工程橡塑贸易有限公司 |
| 铝银浆 (AIU)        | 粉末粒径 6 μm | 深圳威彩翔实业有限公司    |
| N,N-二甲基甲酰胺 (DMF) | 纯度 99.5%  | 上海麦克林生化科技有限公司  |
| 乙酸丁酯 (BA)        | 纯度 99.5%  | 上海麦克林生化科技有限公司  |
| 木质素 (LI)         | 纯度 96%    | 上海源叶生物科技有限公司   |
| 硅烷偶联剂 KH550      | 纯度 98%    | 上海源叶生物科技有限公司   |
| 发泡剂              | 纯度 95%    | 浙江传化股份有限公司     |

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 阻燃涂层溶液的组成

以 APP 为酸源、PER 为炭源、MEL 为气源构成

膨胀型阻燃 (IFR) 体系,再以 TPU 为胶黏剂、以铝银浆 (AIU) 为填料,以 N,N-二甲基甲酰胺 (DMF)、乙酸丁酯 (BA) 分别为 TPU 和 AIU 的溶剂,以硅烷偶

联剂 KH550 和木质素(LI)为改性剂,配制膨胀型阻燃聚氨酯银浆(IFR/TPU/AIU)溶液,具体配方如

表 2 试验仪器

Tab. 2 Test instruments

| 仪器                | 型号           | 生产厂家               |
|-------------------|--------------|--------------------|
| 电动搅拌器             | D2010W       | 上海梅颖仪器仪表制造有限公司     |
| 电子天平              | YP30001      | 上海佑科仪器仪表有限公司       |
| 旋转黏度计             | NDJ-1        | 赛多利斯公司             |
| Mathis 涂层机        | CH-8156      | 瑞士 Wemer Mathis 公司 |
| Rapid 定型机         | R-3          | 瑞比染色试机有限公司         |
| 锥形量热仪             | FTT 00007    | 英国 FTT 公司          |
| 织物阻燃性能测试仪         | YG(B)815D-1  | 温州大荣纺织仪器有限公司       |
| 傅里叶红外光谱(FTIR)仪    | Nicolet 6700 | 美国热电公司             |
| 场发射扫描电子显微镜(FESEM) | S-3700N      | 日本日立公司             |

表 3 IFR/TPU/AIU 溶液配方

Tab. 3 IFR/TPU/AIU solution formulation

单位:g

| 配方编号 | APP | MEL | PER | TPU | AIU | DMF | BA | KH550 | LI |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|----|
| 1    | 8   | 6   | 2   | 16  | 15  | 60  | 50 | 8     | 5  |
| 2    | 10  | 10  | 2   | 10  | 20  | 60  | 50 | 8     | 5  |
| 3    | 12  | 6   | 2   | 16  | 20  | 60  | 50 | 8     | 5  |
| 4    | 10  | 10  | 3   | 16  | 20  | 60  | 50 | 8     | 5  |

采用直接涂层方式和发泡涂层方式将 4 种复配的 IFR/TPU/AIU 溶液分别涂覆于芳纶织物表面,得到 8 种涂覆芳纶织物,分别编号 ZT-1、ZT-2、ZT-3、ZT-4 和 FP-1、FP-2、FP-3、FP-4,其中 ZT 和 FP 分别表示直接涂层方式和发泡涂层方式。对涂覆芳纶织物及未涂覆的芳纶织物(即对照样)进行形貌、成分及阻燃性能分析,具体包括场发射扫描电子显微镜观测、傅里叶红外光谱测试、锥形量热测试和垂直燃烧测试等。

### 1.2.2 织物阻燃整理

直接涂层工艺流程:调浆(增稠、搅拌)→直接涂层→烘干→ZT 芳纶织物。工艺参数为涂层厚度 150  $\mu\text{m}$ ,刮涂 3 次,烘干温度 170  $^{\circ}\text{C}$ ,烘干时间 180 s。

发泡涂层工艺流程:调浆(增稠、搅拌)→发泡涂层→烘干→FP 芳纶织物。工艺参数为涂层刀距 50 mm,发泡比 1:2,烘干温度 100~150  $^{\circ}\text{C}$ (分段升温),烘干时间 180 s,定型温度 150  $^{\circ}\text{C}$ ,定型时间 50 s。

## 1.3 测试

### 1.3.1 形貌分析

利用场发射扫描电子显微镜进行形貌分析,设置电压为 5 kV,放大 80 倍。

### 1.3.2 成分分析

利用傅里叶红外光谱仪进行成分分析,设置光谱范围为 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 16。

### 1.3.3 锥形量热测试

参照 ISO 5660-1 标准,利用锥形量热仪进行测试,设置辐射热通量为 50  $\text{kW}/\text{m}^2$ 。

### 1.3.4 垂直燃烧测试

参照 GB/T 5455—2014 标准进行垂直燃烧测试,设置火焰高度为(40 $\pm$ 2)mm,燃烧时间为 12 s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 形貌测试

以对照样、ZT-2 和 FP-2 试样为例,所得场发射扫描电子显微镜照片如图 1 所示。

从图 1a)可以清晰地观察到,对照样中芳纶纤维全部裸露,交织结构明显且有规律。从图 1b)和图 1c)可以看出,由 IFR/TPU/AIU 溶液形成的阻燃涂层覆盖在芳纶织物表面,纤维间间隙减小。相较于 FP-2 试样,ZT-2 试样表面的部分区域存在轻微

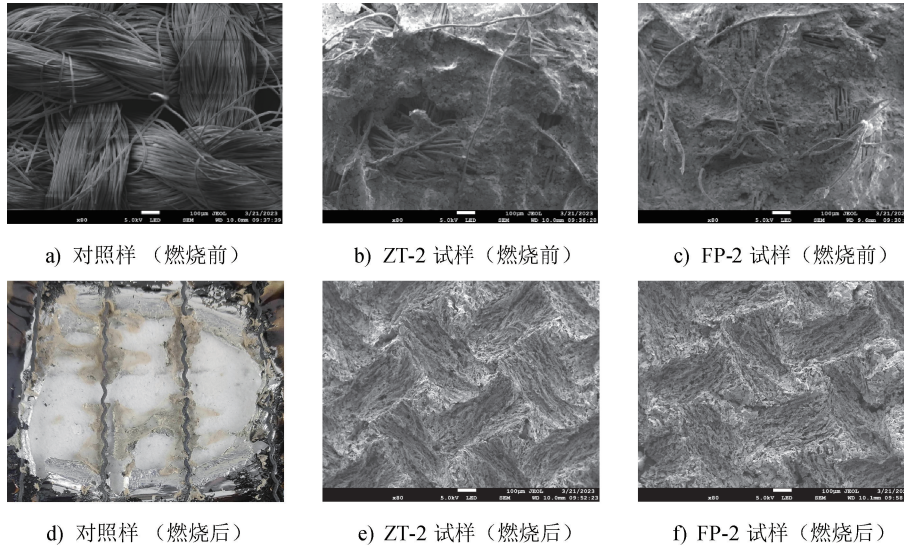


图 1 场发射扫描电子显微镜照片(放大 80 倍)

Fig. 1 FESEM photographs ( $\times 80$ )

的沉积堆聚现象,可见发泡涂层方法更能均匀地将 IFR/TPU/AIU 溶液涂覆于芳纶织物表面。

从图 1d)可以看出,经过  $50 \text{ kW/m}^2$  的热通量辐射后,对对照样只残留下被融化的白色物质,其残炭率几乎为零。从图 1e)和图 1f)中可以看到,ZT-2 试样和 FP-2 试样在经纬纱交织处存在微微的凸起,这是涂覆芳纶织物表面的阻燃涂层燃烧后形成的海绵状泡沫结构,涂层部分表现出明显的膨胀成炭特点。

## 2.2 傅里叶红外光谱测试

图 2 以对对照样和 FP-4 试样为例,展示了芳纶织物涂层整理前后的 FTIR 谱图。

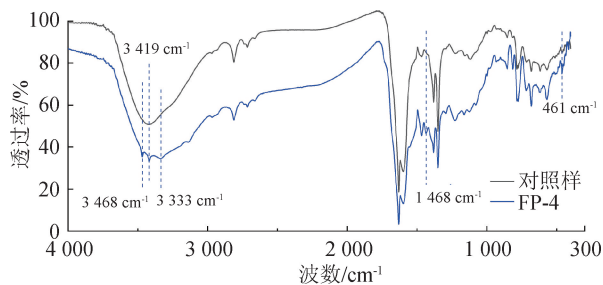


图 2 芳纶织物涂层整理前后的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of aramid fabric before and after coating finishing

从图 2 可以看出:

(1) 对照样中,  $3419 \text{ cm}^{-1}$  处是  $-\text{OH}$  和  $-\text{NH}$  缔合振动产生的宽峰,  $2812 \text{ cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}_2$  中  $-\text{CH}$  的反对称与对称拉伸峰,  $1631 \text{ cm}^{-1}$  处是酰胺 I 带中  $\text{C}=\text{O}$  的伸缩振动吸收峰,  $1599 \text{ cm}^{-1}$  处是

苯环骨架中  $\text{C}=\text{C}$  和酰胺 II 带中  $\text{N}-\text{H}$  的弯曲耦合振动吸收峰,  $1382 \text{ cm}^{-1}$  处是  $\text{N}-\text{C}=\text{O}$  的非对称伸缩振动吸收峰,  $1350 \text{ cm}^{-1}$  处是酰胺 III 带中  $\text{C}-\text{N}$  的伸缩振动吸收峰,  $1118 \text{ cm}^{-1}$  处是苯环中  $\text{C}-\text{H}$  的弯曲振动峰。  $\text{C}=\text{O}$ 、 $\text{N}-\text{H}$  和  $\text{C}-\text{N}$  形成的峰皆为对位芳纶织物的特征峰。  $784 \text{ cm}^{-1}$  处为苯环对位取代的 2 个相邻 H 的面外弯曲振动吸收峰,  $618 \text{ cm}^{-1}$  处是酰胺键  $\text{N}-\text{H}$  的面外弯曲振动峰。

(2) FP-4 试样中,新增的  $3468 \text{ cm}^{-1}$  和  $3333 \text{ cm}^{-1}$  处的峰为 APP 与 MEL 混合物中仲胺基  $-\text{NH}_2$  的  $\text{N}-\text{H}$  对称和反对称伸缩振动吸收峰。新增的  $1468 \text{ cm}^{-1}$  处为  $-\text{CH}_3$  的反对称弯曲振动峰和  $-\text{CH}_2$  的对称弯曲振动峰,该峰表明涂覆芳纶织物表面已引入硅烷偶联剂 KH550。新增的  $461 \text{ cm}^{-1}$  处为  $\text{Al}-\text{O}$  键的伸缩振动峰。

## 2.3 锥形量热测试

### 2.3.1 点燃时间

各试样的点燃时间、火焰持续燃烧时间及火焰熄灭时间如表 4 所示。

从表 4 可以看出:对照样仅 17 s 就被点燃,40 s 时火焰熄灭,燃烧时间持续了 23 s;除 ZT-2 试样外,其他涂覆芳纶织物均未被点燃;ZT-2 试样的点燃时间发生在 151 s。由此可见,IFR/TPU/AIU 溶液能够使芳纶织物不被点燃,或延长芳纶织物的点燃时间,提升芳纶织物的阻燃性能。

表 4 试样燃烧参数

| 项目       | 对对照样 | ZT-1 | FP-1 | ZT-2 | FP-2 | ZT-3 | FP-3 | ZT-4 | FP-4 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 点燃时间     | 17   | —    | —    | 151  | —    | —    | —    | —    | —    |
| 火焰持续燃烧时间 | 23   | —    | —    | 133  | —    | —    | —    | —    | —    |
| 火焰熄灭时间   | 40   | —    | —    | 284  | —    | —    | —    | —    | —    |

## 2.3.2 热释放速率和总释放热

各试样的热释放速率和总释放热如图 3 和图 4

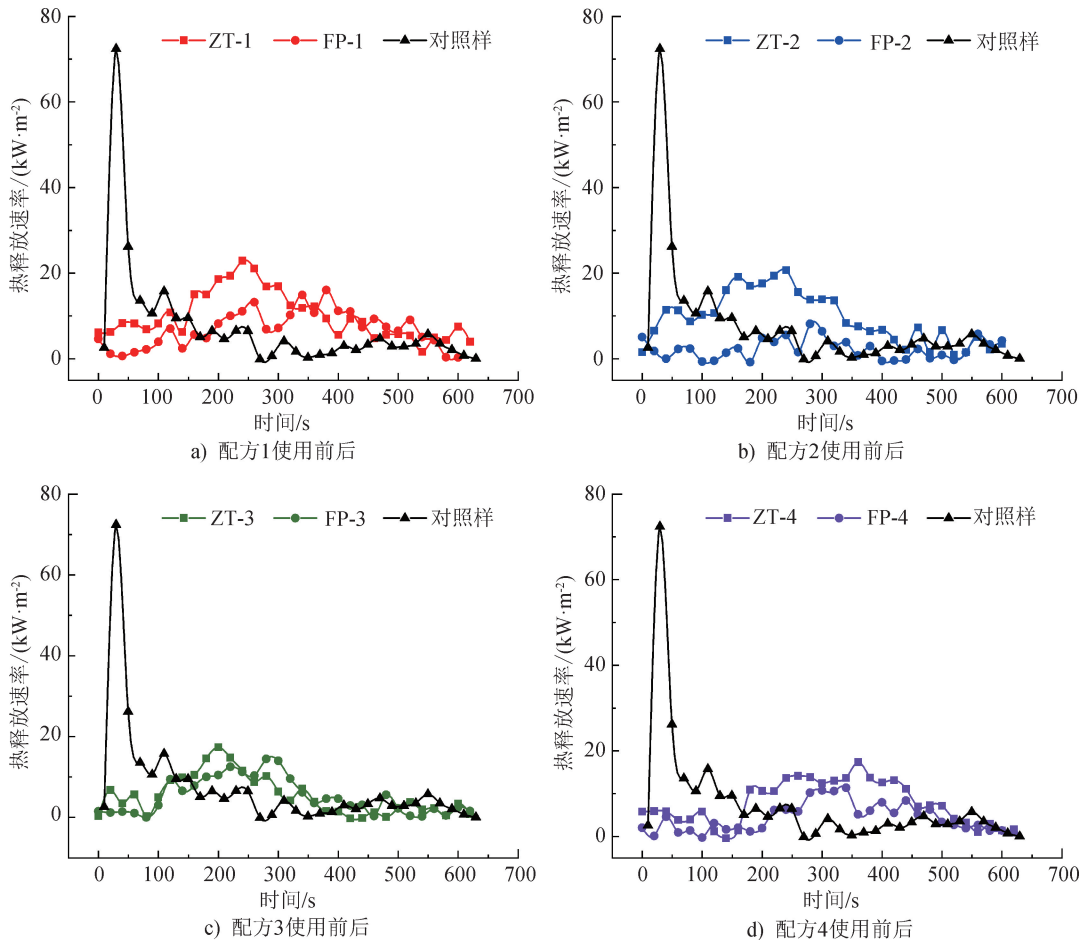


图 3 试样的热释放速率

Fig. 3 Heat release rate of samples

由图 3 可以看出:

(1) 总体而言,发泡涂层芳纶织物的热释放速率比直接涂层芳纶织物的小。

(2) 与对对照样相比,涂覆芳纶织物的热释放速率更为平稳。

(3) 对对照样及 ZT-1、FP-1、ZT-2、FP-2、ZT-3、FP-3、ZT-4、FP-4 试样的最大热释放速率即热释放速率峰值  $p_{HRR}$  分别为 73.514、25.234、16.054、21.928、9.968、18.882、16.966、19.934、14.175 kW/m<sup>2</sup>。与对照

所示。

样的  $p_{HRR}$  相比,ZT-1、FP-1、ZT-2、FP-2、ZT-3、FP-3、ZT-4、FP-4 试样的  $p_{HRR}$  分别降低了 65.7%、78.2%、70.2%、86.4%、74.3%、76.9%、72.9%、80.7%。

由图 4 可以看出:

(1) 发泡涂层芳纶织物的总释放热比直接涂层芳纶织物的小。

(2) FP-2、ZT-3、FP-3 及 FP-4 试样的总释放热小于对对照样的总释放热。

(3) 对对照样及 ZT-1、FP-1、ZT-2、FP-2、ZT-3、

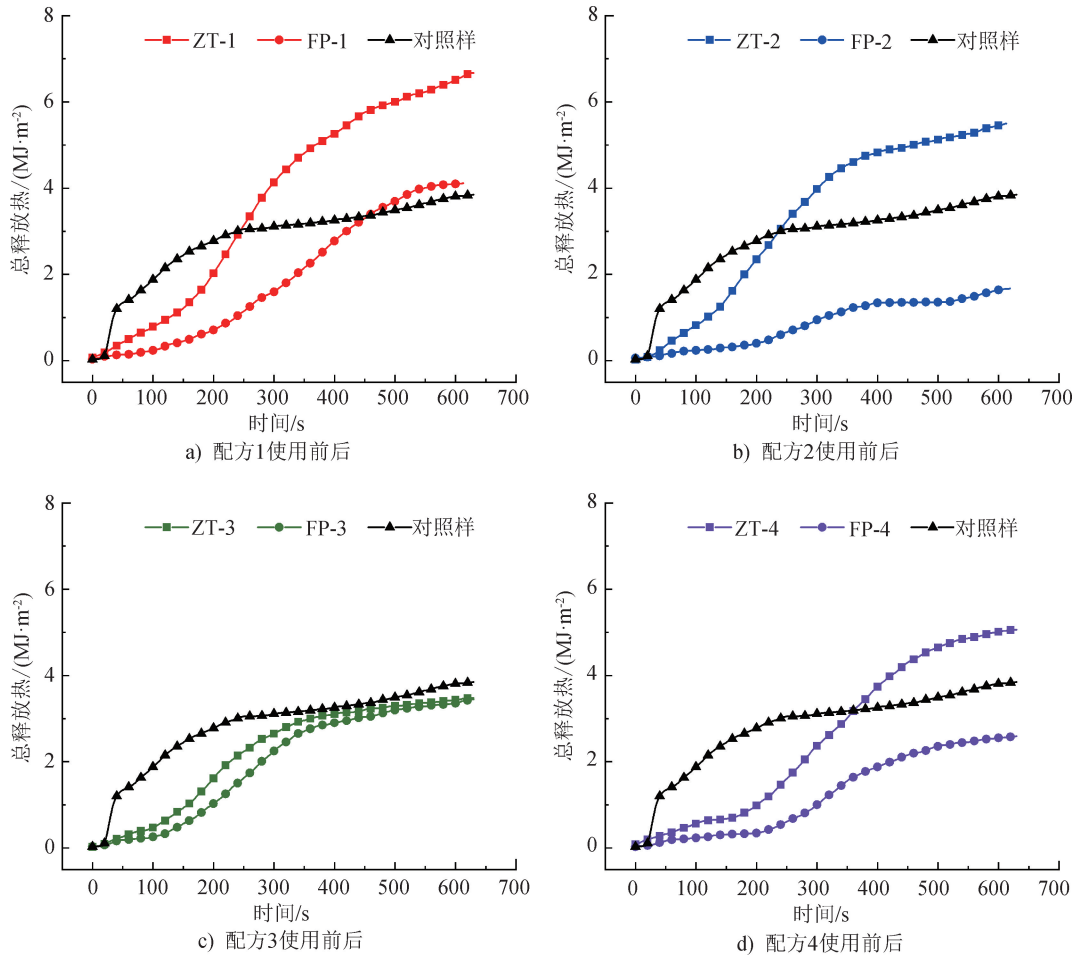


图 4 试样的总释放热

Fig. 4 Total heat release of samples

FP-3、ZT-4、FP-4 的总释放热分别为 3.862、6.670、4.113、5.497、1.671、3.480、3.468、5.069、2.648 MJ/m<sup>2</sup>。与对照样相比, FP-2、ZT-3、FP-3、FP-4 试样的总释放热分别降低了 56.7%、9.9%、10.2% 和 31.4%, ZT-1、FP-1、ZT-2、ZT-4 试样的总释放热分别升高了 72.7%、6.5%、42.3%、31.3%。

### 2.3.3 质量损失

锥形量热测试得到的试样质量见表 5 及图 5。

从表 5 可以看到:涂覆芳纶织物中,ZT-2 试样的残炭率最低,这与其能被点燃有关;使用配方 3 得到的涂覆芳纶织物的残炭率整体最高。

从图 5 可以看到:

(1)对照样在 13~32 s 时质量有一个急剧下降的过程,从 1.58 g 下降到 0.90 g,19 s 内质量损失占总损失的 40%。随后,质量损失趋于平稳,32~630 s 时质量从 0.90 g 逐渐下降到 0.02 g,残炭率

为 1.2%。

表 5 试样的残炭率

Tab. 5 Residual carbon rate of samples

| 试验样品 | 测试前质量/g | 测试后质量/g | 残炭率/% |
|------|---------|---------|-------|
| 对照样  | 1.71    | 0.02    | 1.2   |
| ZT-1 | 2.08    | 0.12    | 5.8   |
| FP-1 | 2.23    | 0.13    | 5.8   |
| ZT-2 | 2.17    | 0.07    | 3.2   |
| FP-2 | 2.16    | 0.11    | 5.1   |
| ZT-3 | 2.42    | 0.18    | 7.4   |
| FP-3 | 2.26    | 0.17    | 7.5   |
| ZT-4 | 2.31    | 0.14    | 6.1   |
| FP-4 | 2.37    | 0.13    | 5.5   |

(2)涂覆芳纶织物的质量损失则整体较平稳,没有急剧下降的过程,说明由 IFR/TPU/AIU 溶液形成的阻燃涂层能够增强芳纶织物的热稳定性,延长其热解时间。

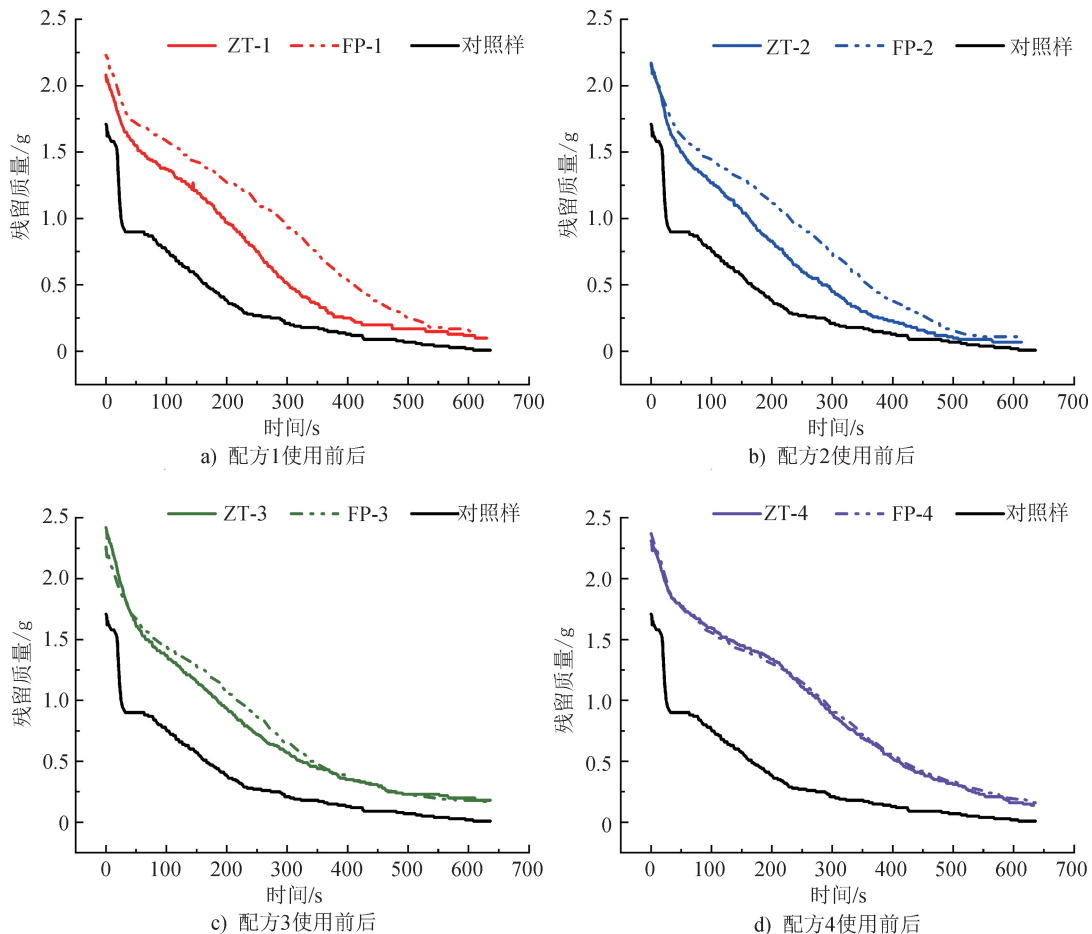


图5 试样的质量残留状况

Fig. 5 Mass residue status of samples

### 2.3.4 有效燃烧热

有效燃烧热可表征燃烧过程中气相活性成分对热释放的贡献。试样的有效燃烧热如图6所示。

从图6可以看出:(1)相较于对照样的有效燃烧热峰值 $p_{EHC}$ ,涂覆芳纶织物的 $p_{EHC}$ 都显著减小,这表明涂覆芳纶织物的气相分解产物中,有效燃烧成分含量减少。(2)对照样在100 s内的有效燃烧热急剧上升,在200 s左右燃烧过程基本结束;而涂覆芳纶织物的有效燃烧热在200 s左右才急剧升高,且单位质量织物燃烧所释放的热量明显小于对照样的,原因在于阻燃涂层改变了芳纶织物的热裂解历程,增加了炭化残渣,减少了可燃性气体的产生。

### 2.4 垂直燃烧测试

垂直燃烧测试得到的试样损毁长度如图7所示。

从图7可以直观地观察到:

(1)各试样的经向损毁长度大于纬向损毁长

度,表明涂覆芳纶织物的纬向阻燃性能优于经向阻燃性能。

(2)同一配方的涂覆芳纶织物,发泡涂层芳纶织物的损毁长度大于直接涂层芳纶织物的损毁长度,表明直接涂层芳纶织物阻燃性能优于发泡涂层芳纶织物阻燃性能。

(3)经向阻燃性能由好到差的试样排序为 ZT-1 > ZT-3 > ZT-4 > FP-1 > ZT-2 = FP-3 > FP-4 > FP-2,纬向阻燃性能由好到差的试样排序为 ZT-1 > ZT-3 > FP-1 > FP-3 = ZT-4 > ZT-2 = FP-3 > FP-2。

再结合客户对损毁长度不超过100 mm的要求,由于FP-2试样的损毁长度大于100 mm,其阻燃性能达不到客户的要求。除FP-2试样外,其余试样的损毁长度均不大于100 mm,皆达到了客户的要求。此外,所有涂覆芳纶织物均没有出现续燃、阴燃及熔融滴落的现象,试样均满足客户对续燃时间不超过5 s、阴燃时间不超过5 s及无熔融滴落的要求。

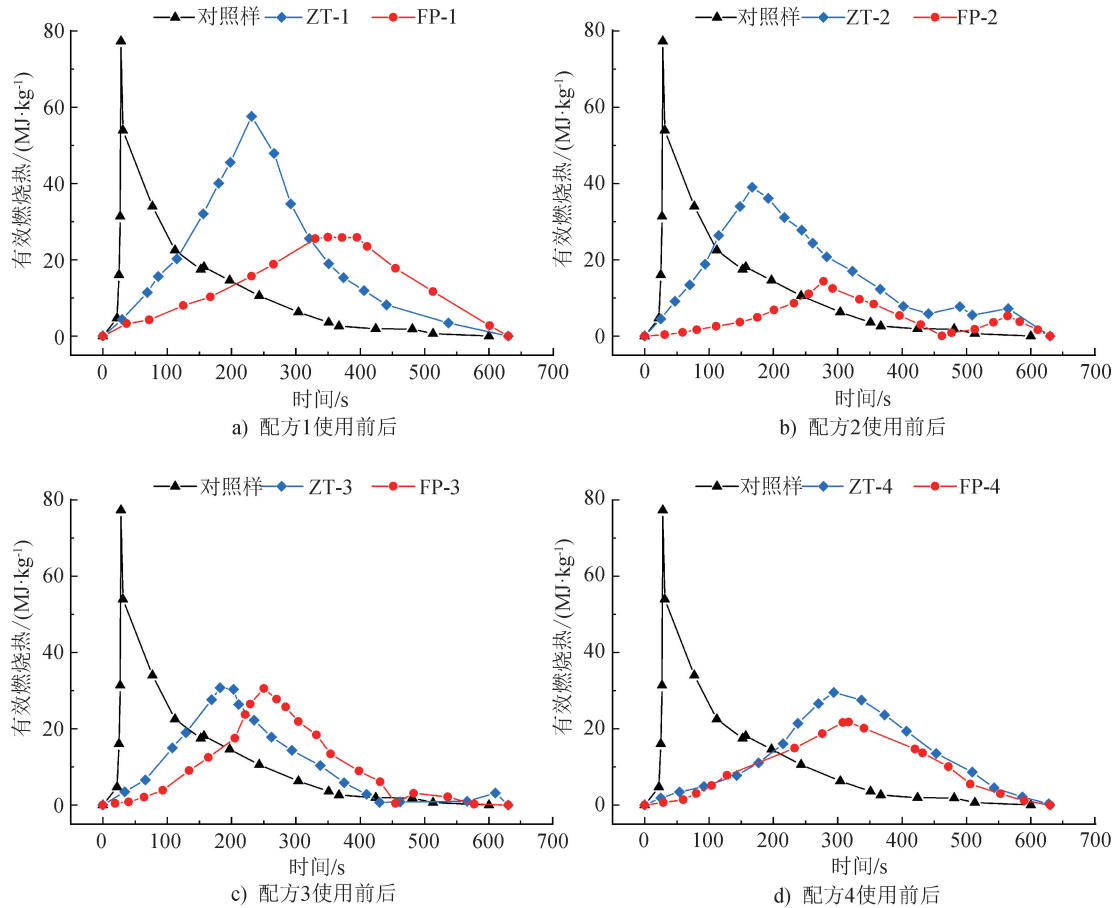


图 6 试样的有效燃烧热

Fig. 6 Effective heat of combustion of samples

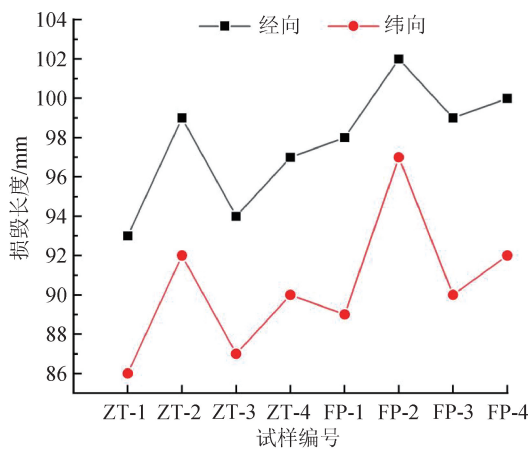


图 7 试样的损毁长度

Fig. 7 Destruction length of samples

### 3 结论

(1) 由 IFR/TPU/AIU 溶液形成的阻燃涂层能

够提升芳纶织物的阻燃性能。

(2) 由 IFR/TPU/AIU 溶液形成的阻燃涂层能够延长芳纶织物的点燃时间或使芳纶织物不被点燃,并降低了芳纶织物的热释放速率。其中,阻燃性能最好的 IFR/TPU/AIU 溶液配方为  $m(\text{APP}) : m(\text{MEL}) : m(\text{PER}) : m(\text{TPU}) : m(\text{AIU}) = 12 : 6 : 2 : 16 : 20$ ;与对照样相比,试样 ZT-3 和试样 FP-3 的热释放速率峰值  $p_{\text{HRR}}$ 、总释放热分别降低了 74.3%、9.9% 和 76.9%、10.2%,残炭率分别为 7.4% 和 7.5%。与直接涂层芳纶织物相比,发泡涂层芳纶织物的热释放速率、总释放热和有效燃烧热更低。

(3) 涂覆芳纶织物的纬向阻燃性能优于经向阻燃性能,直接涂层芳纶织物的阻燃性能优于发泡涂层芳纶织物的阻燃性能。

(4) 本文研究了 2 种涂层工艺对芳纶织物阻燃性能的影响,但未涉及阻燃涂层附着量,可将其列为下一步的研究方向。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [ 1 ] QI P, WANG S H, WANG W J, et al. Chitosan/sodium polyborate based micro-nano coating with high flame retardancy and superhydrophobicity for cotton fabric[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 205: 261-273.
- [ 2 ] DHUMAL P S, BHAKARE M A, LOKHANDE K D, et al. Bio-waste derived, phosphorus decorated composite for highly efficient flame retardant for cotton fabric[J]. Cellulose, 2022, 29(16): 8879-8888.
- [ 3 ] ALI QW, SHABANI V, GUTMANN J S, et al. 氮和磷改性的溶胶-凝胶基阻燃化合物[J]. 何鹏飞,译. 国际纺织导报, 2022, 50(2): 16-19.
- [ 4 ] PETKOVSKA J, MLADENOVIC N, MARKOVIĆ D, et al. Flame-retardant, antimicrobial, and UV-protective lignin-based multilayer nanocoating[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2022, 4(6): 4528-4537.
- [ 5 ] SMITH D L, VEST N A, RODRIGUEZ-MELENDÉZ D, et al. Bio-sourced intumescent nanocoating[J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(4): 2200911.
- [ 6 ] 林燕萍, 杨陈, 王晨露,等. 浅述几种阻燃剂与阻燃工艺[J]. 国际纺织导报, 2022, 50(8): 17-20.
- [ 7 ] SMYTHE T A, SU G, BERGMAN Å, et al. Metabolic transformation of environmentally-relevant brominated flame retardants in fauna: a review[J]. Environment International, 2022, 161: 107097.
- [ 8 ] SARWAR N, HUMAYOUN U B, NAWAZ A, et al. Development of sustainable, cost effective foam finishing approach for cellulosic textile employing succinic acid/xylitol crosslinking system[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2021, 30: e00350.
- [ 9 ] XIE X, LI S, WANG X, et al. An effective and low-consumption foam finishing strategy for robust functional fabrics with on-demand special wettability[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 426: 131245.
- [ 10 ] HOQUE E, ACHARYA S, SHAMSHINA J, et al. Review of foam applications on cotton textiles[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(1/2): 486-501.
- [ 11 ] 张薄, 刘萍, 黄卓然,等. 水性阻燃剂的涂覆量对织物阻燃性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(9): 22-28.
- [ 12 ] 魏亮, 刘介正, 李肇魁,等. 新型消防服外层镀铝阻燃隔热面料的研发及性能测试[J]. 产业用纺织品, 2014, 32(4): 12-15.
- [ 13 ] 魏保良, 刘津玮, 王涵龙,等. 石墨烯发泡涂层织物的制备及其性能[J]. 毛纺科技, 2022, 50(9): 50.
- [ 14 ] 徐瑾, 胡敬海, 敖波. 丙纶织物的阻燃涂层整理[J]. 印染助剂, 2021, 38(7): 52-54.

(上接第 22 页)

- [ 14 ] 刘心格. 我的第一件“的确良”衬衣[J]. 纵横, 2004(3): 48-49.
- [ 15 ] 军需生产史料丛书: 军需生产综述(1949—1993)[M]. 北京: 中国人民解放军出版社, 1990: 112-113.
- [ 16 ] 中国化学工业大事记(1949—1994)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 97.
- [ 17 ] 端小平, 周宏, 陈新伟. 中国化纤简史[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2023: 63.
- [ 18 ] 徐平. 65式军服再现《芳华》: 迄今为止中国军队影响最大的一代服装[EB/OL]. (2017-12-20) [2023-12-01]. [http://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzI2MzAwOTgyNQ==&mid=2649930656&idx=1&sn=81da647a5fd6ac5dcd8d3ef518984df7&chksm=f24478eec533f1f8acd416fb5bdad4e727663753718f06b512cd94bf99d30c4ef9a408e51495&scene=27](http://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI2MzAwOTgyNQ==&mid=2649930656&idx=1&sn=81da647a5fd6ac5dcd8d3ef518984df7&chksm=f24478eec533f1f8acd416fb5bdad4e727663753718f06b512cd94bf99d30c4ef9a408e51495&scene=27).
- [ 19 ] 陈锦华. 国事忆述[M]. 北京: 中共党史出版社, 2005.
- [ 20 ] 顾明. 周恩来和他的秘书们[M]. 北京: 中国广播电视出版社, 1992: 18.
- [ 21 ] 谢春涛. 向毛泽东学习[M]. 北京: 中共中央党校出版社, 2013: 30.
- [ 22 ] 王喜仁. 我国维纶生产现状和今后科研与生产方向[J]. 合成纤维工业, 1982(5): 32.
- [ 23 ] 陈东林. 开放的前奏: “四三方案”及其对改革开放的影响[J]. 中国国家博物馆馆刊, 2019(1): 10-18.