

# POD 纤维在防电弧混纺织物中的应用

李 冻<sup>1a</sup>, 周晨宇<sup>2</sup>, 傅佳佳<sup>1a, b</sup>, 王鸿博<sup>1a, b</sup>

(1. 江南大学 a. 江苏省功能纺织品工程技术研究中心; b. 生态纺织教育部重点实验室 江苏 无锡 214122;

2. 江苏天华色纺有限公司 江苏 无锡 214413)

**摘要:** 为优化防电弧面料设计, 基于防电弧面料 Protera<sup>®</sup> 的混纺原料和混纺比, 纺制了不同混纺比的阻燃腈氨纶/芳纶 1313/POD(聚芳噁二唑纤维)/对位芳纶混纺织物, 并对其强伸性、耐磨性、透气性、透湿性、阻燃、热稳定、热膨胀和热防护性能进行测试, 探讨了 POD 纤维对其舒适性和防护性能的影响。研究表明: 与芳纶 1313 相比, 在稳定织物强力, 增加耐磨性的同时, POD 纤维改善了防电弧面料的舒适性和防护性能, 其中, 织物耐磨性是芳纶 1313 的两倍, 透湿性增加了 35%, 电荷半衰期减少 57%, 热膨胀率增加了 20%, 热防护性能值(TPP) 增加 9.2%, 但是损毁长度减少 22%, 热收缩率降低 12%。

**关键词:** 防电弧面料; POD; 舒适性; 防护性; 优化设计

中图分类号: TS102.52

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)11-0048-05

引用页码: 111108

## Application of POD fiber in anti-arc blended fabrics

LI Dong<sup>1a</sup>, ZHOU Chenyu<sup>2</sup>, FU Jiajia<sup>1a, b</sup>, WANG Hongbo<sup>1a, b</sup>

(1a. Engineering Technology Research Center for Functional Textiles of Jiang Su; 1b. Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Tian Hua Color Spinning Co., Ltd., Wuxi 214413, China)

**Abstract:** In order to optimize the designs of anti-arc fabrics, according to blending materials and blending ratio of anti-arc fabric Protera<sup>®</sup>, the blended fabrics of Vinyon N/aramid fiber 1313/POD (polyaromatic oxadiazole fiber) / para-aramid with different blending ratio were spun, and the extensibility, wear resistance, air permeability, moisture permeability, flame retarding, thermal stability, thermal expansion and thermal protection performance were tested. The effects of POD fiber on comfort properties and protection properties were also explored. The test results showed that compared with aramid fiber 1313, POD fiber improved the comfort and protection properties of anti-arc fabrics while stabilizing fabric strength and increasing wear resistance. In addition, the wear resistance was twice than that of aramid fiber 1313, and moisture permeability increased by 35%; charge half-life decreased by 57%; thermal expansion rate and TPP value increased by 20%, and 9.2% respectively, but damage length and heat shrinkage reduced by 22% and 12% respectively.

**Key words:** anti-arc fabrics; POD; comfort properties; protection properties; optimized design

电弧灼伤是继电击之外对社会生命财产安全造成严重威胁的电气事故, 电弧事故产生的高强度热

能是严重爆燃事故的 3~4 倍以上, 持续时间低于 2 s, 瞬时温度高达 13 000 °C<sup>[1]</sup>, 同时伴随环境中气体和金属物的爆炸性扩张, 强大作用力会把织物撕裂开来, 使人身完全暴露在金属熔滴(1 600 km/h) 和电弧的热量之下, 增加热伤害程度, 给工人的后续治疗或者抚恤问题造成巨大的经济损失<sup>[2-5]</sup>。

聚芳噁二唑纤维(POD) 是指主链含有苯环和噁二唑环的一类芳杂环高分子材料, 是中国于 2009 年

收稿日期: 2018-02-01; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0309100); 江苏省产学研前瞻性研究项目(BY2016022-23); 江苏省先进纺织工程技术中心立项课题项目(XJFZ/2015/1)

作者简介: 李冻(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为功能纺织品。通信作者: 王鸿博, 教授, wxwanghb@163.com。

成功研发具有自主知识产权的耐热纤维,且已经实现商品化。与芳纶 1313 和芳砜纶相比,其价格等同,但 POD 纤维的初始分解温度比芳纶 1313 和芳砜纶高 50 ~ 60 °C,热收缩率小于芳砜纶和芳纶 1313<sup>[6-7]</sup>。相比于其他芳杂环聚合物,如 Kevlar、PI、PBO,其具有材料来源广泛,合成简单,价格低廉的优势<sup>[8]</sup>。

目前,国外著名的防电弧面料是杜邦公司生产的 Protera<sup>®</sup>(65% 阻燃腈氯纶,28% 芳纶 1313,5% 对位芳纶和 2% 抗静电长丝),国内对防电弧服的研究还是处于选材、加工工艺改进、材料测试上,服装材质和结构基本上是参考国外的配方,检测标准和手段还有赖于国外的方法<sup>[9-11]</sup>,产品受到国外企业的压

制,国内又没有对防电弧面料进行开发和研究。在原料价格不变的条件下,产品性能是决定产品生存和发展的关键,因此,本文通过添加 POD 纤维来研究其对防电弧混纺织物的协同效应。

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料

本实验原料有江苏宝德新材料有限公司的 POD 纤维,抚顺瑞华纤维有限公司的阻燃腈氯纶,常熟宝沣特种纤维有限公司的芳纶 1313 和芳纶 1414 纤维。测试结果如表 1 所示。

表 1 纤维参数

Tab. 1 Fiber parameters

纤维名称	断裂强力/ CN	断裂强度/ (CN · dtex <sup>-1</sup> )	断裂伸 长率/%	回潮率/ %	线密度/ dtex	初始模量/ (CN · dtex <sup>-1</sup> )	初始分解 温度/°C	价格/ (元 · kg <sup>-1</sup> )
POD 纤维	6.86	4.58	18.95	7.95	1.5	7.04	450	100
芳纶 1313	10.56	5.03	32.04	6.14	2.1	13.96	380	100
阻燃腈氯纶	4.97	3.11	26.76	2.87	1.6	5.23	180	40
芳纶 1414	26.45	15.56	3.14	7.40	1.7	34.90	470	180

由表 1 可以看出,芳纶 1414 主要是用来增加防电弧面料的强力,鉴于 POD 纤维强度略低于芳纶

1313,所以,本文适当增加了对位芳纶的含量,根据 Protera<sup>®</sup>配方做出四种面料的设计,如表 2 所示。

表 2 织物参数

Tab. 2 Fabric parameters

试样 编号	织物 原料	厚度/ mm	纱线线 密度/tex	纱线捻度/ (捻 · 10 cm <sup>-1</sup> )	纵密/ (横列 · 5 cm <sup>-1</sup> )	横密/ (纵行 · 5 cm <sup>-1</sup> )	平方米质量/ (g · m <sup>-2</sup> )
A	a/b/c (60/30/10)	1.03	42	55	35	45	154
B	a/b/c/d (60/20/10/10)	0.99	42	55	35	45	170
C	a/b/c/d (60/10/10/20)	1.04	48	55	35	45	180
D	a/c/d (60/10/30)	0.92	48	55	35	45	174

注: a 为阻燃腈氯纶, b 为芳纶 1313, c 为芳纶 1414, d 为 POD, 四种面料均为平针织物。

#### 1.1.2 仪器

XD-1 型纤维细度仪、Y802N 型八篮恒温恒烘箱、YG601H-II 型电脑式织物透湿仪、YG026D 型织物强力机、YG004 型单纤维强力机(宁波纺织仪器厂), TGAQ500 热重分析仪(日本株式会社), YG815 型垂直法阻燃性能测试仪(山东安丘江北纺织仪器有限公司), Y322N 型泰伯式织物耐磨实验仪、Serial # 403-14 型 TPP 测试仪(美国西北测试科技公司), GZX-

9146MBE 型干燥箱(上海博迅实业有限公司), YG(B) 461E 型织物透气性能测试仪、YG(B) 342D 型织物感应式静电测定仪(温州大荣纺织仪器有限公司)。

### 1.2 性能测试

按 DL/T 320—2010《个人电弧防护用品通用技术要求》,测试防电弧面料的力学性能,主要包括断裂强力、耐磨性能;防护性能,主要包括织物的热收

缩性能、阻燃性能、热膨胀和热防护性能。此外,目前市场对防电弧服的舒适性要求越来越高,舒适性差的服装往往得不到市场的青睐,因此在具备一定的防护性能要求时,织物的舒适性也是衡量防护服的重要指标。同时,为了研究织物的舒适性,测试了织物的透气性、透湿性和抗静电性能。

### 1.2.1 力学性能测试

按 GB/T 3923.2—1998《纺织品 织物拉伸性能 第2部分:断裂强力的测定 抓样法》测试织物的断裂强力。试样规格为 50 mm × 250 mm,预加张力为 2 N,拉伸速度为 100 mm/min。按 ASTM D 3884—2007《纺织品耐磨性的标准指南(旋转平台、双头法)》测试织物耐磨性 3 次,取平均值。

### 1.2.2 透气性能测试

按 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的测定》进行实验。试样面积 20 cm<sup>2</sup>,试样在三级标准大气下调湿 24 h,采用大块试样测试,同一样品不同部位测试 30 次,测试结果取平均值。

### 1.2.3 透湿性能测试

设置参数使得实验箱温度为 38 °C,相对湿度为 80%,气流速度为 0.3 ~ 0.5 m/s 时,放入试样进行平衡 0.5 h 后取出试样称重,将称重好的试样再次放入实验箱内,60 min 后再次称重。试样透湿量计算如下式所示:

$$w = \frac{24 \times \Delta m}{S \cdot t} \quad (1)$$

式中:  $w$  为每平方米每天(24 h)的透湿量,  $g/m^2 \cdot d$ ;  $t$  为实验时间,  $h$ ;  $\Delta m$  为同一实验组合体 2 次称量之差,  $g$ ;  $S$  为试样实验面积,  $m^2$ 。

取 3 次实验结果平均值。

### 1.2.4 抗静电性能测试仪

按 GB/T 12703—1991《纺织品 静电测试方法》,取 3 次实验结果平均值。

### 1.2.5 阻燃性能测试

按 GB/T 5455—2014《纺织品 燃烧性能 垂直方向 损毁长度阴燃和续燃时间的测定》进行实验。剪取试样大小为 300 mm × 80 mm,经纬向各取 3 块试样,将试样固定在试样夹上。接通电源并点火,调控火焰高度在 40 mm 左右,待火焰稳定后,启动实验按钮,织物在火焰下燃烧 12 s 后,记录续燃时间(织物离开火焰后保持有焰燃烧的时间)、阴燃时间(织物离开火焰后保持无焰燃烧的时间),然后取下试样,沿着试样长度方向内,在损毁区域最高点处折一条

直线,在距离底边和侧边各 6 mm 处,挂上相应的的重锤(查阅资料后选择 113.4 g 重锤),轻轻提起试样底部的另一端,直至重锤悬空,此时,试样的撕裂长度就为损毁长度。计算续燃时间、阴燃时间、损毁长度的平均值。

### 1.2.6 热收缩性能测试

参照 GA 10—2002《消防员灭火防护服》进行实验,裁取 10 mm × 10 mm 试样 3 块,在标准大气条件下调湿 24 h 后,放入 240 °C 的烘箱内保持 5 min 后迅速取出,并测量经向和纬向尺寸,测试结果取平均值,根据下式计算热收缩率:

$$P/\% = \frac{B - A}{B} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $P$  为热收缩率;  $B$  为实验前织物的尺寸;  $A$  为实验后织物的尺寸。

### 1.2.7 热膨胀性能测试

具有芳环和芳杂环的化学纤维具有优异的热防护性能,这类纤维材料在高温炭化后会膨胀变厚,从而增加对热量的隔绝,将四种试样经过 240 °C 处理 5 min,计算热膨胀率,其计算如下式所示:

$$q/\% = \frac{M - N}{N} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $q$  为织物热膨胀率;  $M$  为热处理后织物的厚度;  $N$  为热处理前织物的厚度。

### 1.2.8 热防护性能 TPP 测试

材料热防护性能(简称 TPP)是指透过织物引起二级烧伤的暴露能量,TPP 值越大,表示热防护服的防热辐射性能越好。根据国家标准 GA 10—2014《消防员灭火防护服》测试 TPP 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 织物的力学性能

DL/T 320—2010《个人电弧防护用品通用技术要求》中对电弧防护面料的断裂强力和耐磨性有具体的标准要求。因此,探讨 POD 纤维对防电弧面料的断裂强力和耐磨性能影响,测试结果见表 3。

表 3 织物的力学性能测试结果

Tab. 3 Mechanical property test results of fabric

试样编号	断裂强力/N	循环周期数/圈
A	160.4	86
B	174.7	138
C	170.2	117
D	168.3	163

从表 3 可以看出,四种面料的织物结构相同,其断裂强力差别不大,C 面料的断裂强力和 D 面料断裂强力接近。四种织物的厚度差异较小,但耐磨性差异较大,B 面料、C 面料和 D 面料的耐磨性好于 A 面料,其中 D 面料的耐磨性是 A 面料的两倍,表明 POD 纤维的加入可改善织物的耐磨性。综上可知,相比较芳纶 1313 纤维而言,POD 防电弧面料一方面在稳定织物断裂强力的同时,其耐磨性是芳纶 1313 的两倍。

### 2.2 织物的舒适性

透气性和透湿性主要受空气和湿气通过纱线之间空隙能力的影响,透湿性同时受纤维自身导湿性能的影响,抗静电性主要受材料自身的导电性和回潮率影响,四种面料的舒适性测试结果见表 4。

表 4 织物的舒适性能测试结果

Tab. 4 comfort property test results of fabric

试样编号	透气性/ (mm · s <sup>-1</sup> )	透湿性/ (g · m <sup>-2</sup> · d)	电荷半衰期/s
A	3 662	33 972	9.55
B	3 412	35 670	6.78
C	2 811	35 670	4.32
D	3 173	45 862	4.11

未充满系数为线圈长度与纱线直径的比值,用来衡量纱线粗细对织物细密程度的影响。未充满系数越小,针织物就越紧密。四种防电弧面料在统一的成圈系统下编织,其线圈长度相同,排列密度一致。与 A 面料、B 面料相比,C 面料和 D 面料的纱线线密度偏大,纱线较粗,未充满系数偏小,织物较紧密。

从表 4 可以看出,与 A 面料、B 面料相比,C 面料、D 面料透气性有减小趋势,这是因为 C、D 的未充满系数小,织物较紧密,空气透过织物的阻力较大。A 面料与 B 面料相比,其织物结构和紧密程度相同,但 B 面料的透湿性增加了 5%,D 面料与 A 面料相比,虽然 D 的未充满系数小,织物紧密程度偏大,但其透湿性仍比 A 面料增加 35%。这是因为,织物的透湿性一方面受织物结构的影响,另一方面纤维原料也起到一定的辅助作用,导湿性优良的纤维能够增加织物的透湿量。这表明,POD 纤维比芳纶 1313 有更好的导湿性,POD 纤维的加入可以有效地改善织物的透湿性。

随着 POD 纤维的加入,芳纶 1313 的减少,织物的电荷半衰期呈降低的趋势,当 POD 纤维完全取代

芳纶 1313 时,其电荷半衰期比芳纶 1313 防电弧面料减少了 57%,说明用 POD 纤维织造的防电弧面料的抗静电功能要比芳纶 1313 系列的优良,穿着时相对不容易产生静电。

### 2.3 织物的防护性能

本文主要研究了电弧防护面料的热收缩性、热膨胀性、阻燃性能及热防护性能,测试结果见表 5。

表 5 织物的防护性能测试结果

Tab. 5 Protection performance test results of fabric

试样编号	热收缩率/ %	阴燃 时间/s	损毁 长度/mm	热膨 胀率/%	TPP/ (cal · cm <sup>-2</sup> )
A	28.3	4.8	11.5	54.0	7.477
B	20.0	4.1	9.0	64.0	7.531
C	23.3	4.3	9.5	54.6	7.939
D	25.0	4.9	9.0	67.3	8.174

从表 5 可以看出,与 A 面料相比,B 面料、C 面料和 D 面料的热收缩率有减小的趋势,其中 D 的热收缩率比 A 减少了 12%,表明 POD 纤维的加入明显改善了织物的热稳定性。

四种防电弧面料均无续燃、无熔滴,都存在阴燃现象,且碳化长度小于 150 mm,符合 DL/T 320—2010《个人电弧防护用品通用技术要求》标准。研究结果已表明,在受到高温时,芳纶 1313 纤维会迅速膨胀并被碳化,形成依附于织物而不脱落的隔热层,从而阻挡热量与身体的接触,降低人身灼伤程度,碳化量越大,结构越质密,就越不容易从织物上脱落下来,织物的热防护性能就越好,这也是芳纶 1313 纤维被广泛用作为防电弧服的原因之一。与 A 面料相比,B 面料、C 面料和 D 面料的损毁长度有减少的趋势,其中 D 面料的损毁长度比 A 面料少 22%,表明和芳纶 1313 相比,POD 纤维有增加防电弧面料阻燃性能的优势。

A、B、C、D 的热膨胀率呈递增的趋势,其中 D 的热膨胀率比 A 增加了 20%,表明 POD 纤维的加入提高了织物的热膨胀性能。致密的炭化层一方面可以阻挡热传导和热辐射,另一方面减少反馈给织物的热量,增加织物的热防护性能。用 POD 纤维完全替代芳纶 1313 纤维,在织物结构和紧密程度接近情况下,D 面料的 TPP 值比 A 面料增加了 9.2%。其原因是,POD 纤维和防电弧面料具有很好热膨胀率,高温处理后,POD 纤维膨胀使得织物结构变得更加紧密,增加了对热量的隔绝作用,在一定程度上提高织物的热防护性能。

### 3 结 论

POD 纤维的断裂强度比芳纶 1313 低,更容易破裂,初始模量小于芳纶 1313,织物手感相对比较柔软,回潮率高于芳纶 1313,纤维的可纺性好,织物更加舒适。POD 纤维的阻燃性与 1313 无明显差异,但其初始分解温度比芳纶 1313 高了 70 °C,耐热性能更好。

POD 防电弧织物的耐磨性好于芳纶 1313 纤维,其耐磨性达到芳纶 1313 纤维的两倍,具有优良的透湿性、抗静电性、热稳定性能、阻燃性和热膨胀性能,使得织物在相同结构设计下,增加织物舒适性的同时,提高了防电弧面料的防护性能。

综上,POD 和芳纶 1313 纤维的价格成本相同,但 POD 在稳定织物强力、增加织物耐磨性能的同时,在一定程度上提高了织物的热防护性能和舒适性,因此,在防电弧面料或其他热防护面料开发中,可以用 POD 纤维来取代传统的芳纶 1313 纤维。

#### 参考文献:

- [1] LAVERTY G. 电弧防护服防护性能测量[J]. 电力安全技术, 2008, 10(9): 64-68.  
LAVERTY G. Protective performance of arc protective clothing [J]. Electric Safety Technology, 2008, 10(9): 64-68.
- [2] 陈增发,张泽. 电弧防护发展历史与防护服的选择[J]. 电力安全技术, 2008, 10(11): 68-72.  
CHEN Zengfa, ZHANG Ze. Development history of arc protection and selection of protective clothing [J]. Electric Safety Technology, 2008, 10(11): 68-72.
- [3] 李红彦,孙成勋,朱宝余,等. 电弧防护服性能测试及影响因素研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(4): 89-92.  
LI Hongyan, SUN Chengxun, ZHU Baoyu, et al. Research progress of arc-rated clothing in electric power industry [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(4): 89-92.
- [4] 黎海添. 运行人员配置防电弧产品的合理性分析[J]. 电力安全技术, 2013, 15(7): 62-63.  
LI Haitian. Rationality analysis of anti-arcing products for operators [J]. Electric Safety Technology, 2013, 15(7): 62-63.
- [5] 刘军虎. 电力行业安全防护技术及防护需求浅谈 [C]// 2011 中国安全防护纺织服装产业创新发展论坛论文集. 西安: 中国纺织工程学会, 2011: 1-8.  
LIU Junhu. Security protection technology and protection needs of power industry [C]// 2011 Innovation and Development Forum Proceedings on Safety and Protection of Chinese Textile and Garment Industry. Xi'an: China Textile Engineering Society, 2011: 1-8.
- [6] 高占勇. 聚芳噁二唑短纤维纺丝设备的研制[J]. 国际纺织导报, 2012(11): 22.  
GAO Zhanyong. Study and manufacture for POD staple fiber spinning equipment [J]. Melliand China, 2012(11): 22.
- [7] 李文涛,吴萌,张超波,等. 聚芳噁二唑纤维的性能及其应用[J]. 高科技纤维与应用, 2013, 38(1): 32-33.  
LI Wentao, WU Meng, ZHANG Chaobo, et al. Properties and applications of aromatic polyoxadiazoles fiber [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(1): 32-33.
- [8] 贾二鹏,施楣梧,叶光斗,等. 耐高温阻燃聚芳噁二唑纤维的结构及其性能[J]. 纺织学报, 2012, 33(6): 144.  
JIA Erpeng, SHI Meiwu, YE Guangdou, et al. Structure and properties of high temperature resistant flame-retardant poly(phenylene-1,3,4-oxadiazole) (POD) fibers [J]. Journal of Textile Research, 2012, 33(6): 144.
- [9] 马新安,张莹. 纺织品热防护技术研究进展[C]// 第11届功能性纺织品、纳米技术应用及低碳纺织研讨会论文集. 北京: 北京纺织工程学会, 2011: 338-341.  
MA Xin'an, ZANG Ying. Study on thermal protection technology of textile [C]// The 10th Symposium on Functional Textiles, Nanotechnology Application and Low Carbon Textile. Beijing: Beijing Textile Engineering Society, 2011: 338-341.
- [10] 张生辉,樊争科,肖秋利,等. 防电弧面料的开发与研究[J]. 中国个体防护装备, 2015(6): 5-8.  
ZHANG Shenghui, FAN Zhengke, XIAO Qiuli, et al. Arc proof fabric research and development [J]. China Personal Protective Equipment, 2015(6): 5-8.
- [11] 刘琳,李世雄,肖秋丽,等. 我国电力行业安全防护服的现状及发展[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(4): 81.  
LIU Lin, LI Shixiong, XIAO Qiuli, et al. Status and development of China safety protective clothing in electric power industry [J]. Cotton Textile Technology, 2015, 43(4): 81.