

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170902105

原料及结构参数对防电弧织物性能的影响

李 冻¹, 陈太球², 蒋春燕², 傅佳佳^{1,3}, 王鸿博^{1,3}

(1. 江南大学 江苏省功能纺织品工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 圣华盾防护科技股份有限公司, 江苏 无锡 214413; 3. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122)

摘 要 为优化防电弧织物设计, 分析了3种防电弧织物的结构参数, 并测试其拉伸、透气、透湿、阻燃、热稳定、热防护及电弧防护性能, 探讨了结构参数对其舒适性和防护性能的影响。结果表明: 原料种类对防护性能影响最显著, 芳纶/阻燃腈氯纶防电弧混纺织物存在阴燃现象, 芳纶质量分数越高, 织物的阻燃性和热稳定性越好; 对于单层防电弧织物, 随紧度增加13%, 织物的热防护性能(TPP值)增加6%, 电弧热防护性能值(ATPV值)增加42%, 但织物舒适性能下降, 其中透气性下降63%, 透湿性下降22%; 双层结构可有效地提高防电弧织物的TPP和ATPV值, 尤其是ATPV值增加最为显著, ATPV值超过单层织物的3倍, 双层结构织物的舒适性指标下降很少, 其中透气性能下降4%, 透湿性能下降7%。

关键词 防电弧织物; 结构参数; 舒适性能; 防护性能; 优化设计

中图分类号: TS 156 文献标志码: A

Influences of raw materials and fabric parameters on performance of anti-arc fabrics

LI Dong¹, CHEN Taiqiu², JIANG Chunyan², FU Jiajia^{1,3}, WANG Hongbo^{1,3}

(1. Engineering Technology Research Center for Functional Textiles of Jiangsu, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Swoto Protection Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214413, China; 3. Key Laboratory of Eco-Textiles (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract In order to optimize the designs of anti-arc fabrics, the structures and parameters of three kinds of anti-arc fabrics were analyzed, and the extensibility, breathability, moisture permeability, flame retardancy, thermal stability, thermal protection and arc protection performance were tested. The influences of fabric parameters on comfort and protection properties were also investigated. The results show that the influence of raw materials on the protection properties is the most significant, and a smoldering phenomenon exists for fabrics prepared from flame retardant nitrile and aramid. The higher the aramid content is, the better the flame retardant and thermal stability of the fabric are. For single-layer anti-arc fabrics, when the tightness increases by 13%, thermal protective performance (TPP) and arc thermal performance value (ATPV) increase by 6% and 42%, respectively, but the comfort properties decline, and the breathability and the moisture permeability reduce by 63% and 22%, respectively. The double-layer structure effectively increases the value of ATPV and TPP of anti-arc fabrics, significantly for ATPV value, and the ATPV value of double layer is three times greater than that of single layer fabrics, but comfort properties reduce weakly, and breathability and moisture permeability reduce by 4% and 7%, respectively.

Keywords anti-arc fabric; structure parameter; comfort property; protection property; optimization design

收稿日期: 2017-09-08 修回日期: 2018-01-18

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(XJFZ/2015/1)

第一作者简介: 李冻(1992—)男, 硕士生。主要研究方向为功能纺织品研究与开发。

通信作者: 王鸿博, E-mail: wxwanghb@163.com。

电弧对人体所产生的危害主要是热伤害,电弧产生的总能量是严重爆燃事故的 3~4 倍以上^[1]。其高强度热使衣服起火燃烧,同时产生的爆炸或震荡力使衣服崩裂开来,将工作人员的身体直接暴露于高热、火焰或熔融的金属中^[2-4]。电弧事故使人体受到严重烧伤甚至丧命,且后续治疗或抚恤问题都会造成巨大的经济损失^[5]。

国外对电弧防护服防护性能的研究已有二十多年的时间,在材料开发、产品设计生产、标准制定、检测仪器的研制等方面已处于领先地位,目前国外知名的防电弧织物是杜邦公司生产的 Protera[®] (由 65% 阻燃腈氯纶,28% 间位芳纶,5% 对位芳纶和 2% 抗静电长丝织造而成);我国对电弧防护服的认识及开发较晚,研究较少且水平较低,现阶段服装等基本上是模仿杜邦公司的配方、组织规格、服装结构和检测标准^[6-8],而国外已从整体上考虑电弧防护服的防护性能、舒适性能以及搭配问题等^[9]。

基于我国防电弧织物的研究现状,本文通过对 3 种不同规格电弧防护织物的力学性能、舒适性能和防护性能的相关性指标进行测试和分析,研究了织物参数对防电弧织物舒适性和防护性能的影响,从而为国内开发高品质防电弧织物提供参考。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

实验选取杭州威垒特科技有限公司开发的 3 种防电弧混纺织物,其原因为:该公司曾参与 2015 年国家电弧防护标准制定的研讨,与国内其他企业相比,其开发的产品防护等级更齐全,销售量在国内位居前列,开发的织物供应于国家电网,其产品在国内具有一定的代表性。为研究单层和多层结构对防电弧织物舒适性和防护性能的影响以及二者之间的差异,选择单层和双层结构织物,具体结构参数见表 1。

表 1 织物参数
Tab.1 Fabric parameters

试样编号	织物成分及其质量分数/%	紧度/%	厚度/mm	密度/(根·(10 cm) ⁻¹)		线密度/tex		纱线捻度/(捻·(10 cm) ⁻¹)		面密度/(g·m ⁻²)
				经向	纬向	经纱	纬纱	经纱	纬纱	
A(单层)	a/b/c(23/35/42)	75	0.51	222	200	20	20	68	68	180
B(单层)		85	0.60	264	218	23	23	64	64	230
C(双层)	表层 a/c/d/e(34/10/20/36)	72	0.43	288	180	14	14	85	82	270
	里层 b/e(50/50)	72	0.41	288	180	14	14	90	86	

注: a—阻燃腈氯纶; b—间位芳纶; c—对位芳纶; d—锦纶(66); e—粘胶; A、B 与 C 织物的表层和里层均为平纹组织,各层经纬纱均为 2 合股纱线。

YG026D 型多功能电子织物强力机,宁波纺织仪器厂; 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; Serial # 403-44 型热防护性能测试仪,美国西北测试科技公司; GZX-9146MBE 型电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司医疗设备厂; YG(B)461E 型数字式织物透气性能测定仪,温州大荣纺织仪器有限公司; YG601H-II 型电脑式织物透湿仪,宁波纺织仪器厂。

1.2 性能测试

按照 DL/T 320—2010《个人电弧防护用品通用技术要求》中相应的国内外测试标准,测试织物的拉伸力学性能、舒适性能(透气性、透湿性)、防护性能(热稳定性能、阻燃性能、热防护性能、电弧防护性能)。

1.2.1 拉伸性能测试

按 GB/T 3923.2—2013《纺织品 织物拉伸性能 第 2 部分:断裂强力的测定(抓样法)》测试织物的拉伸性能。经纬向各测试 5 块试样,结果取平均值。

1.2.2 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。经纬向各测试 3 块试样,记录续燃时间、阴燃时间和炭化长度,结果取平均值。

1.2.3 热稳定性能测试

参照 GA 10—2002《消防员灭火防护服》进行实验,取 5 块试样,在 225 °C 电热鼓风干燥箱内保持 5 min,计算热收缩率,结果取平均值。热收缩率计算公式为

$$p = \frac{B - A}{B} \times 100\%$$

式中: p 为热收缩率,%; B 为实验前织物的尺寸,mm; A 为实验后织物的尺寸,mm。

1.2.4 热防护性能 TPP 值测试

材料热防护性能(TPP 值)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 GA 10—2002 测试织物的 TPP 值。

1.2.5 电弧防护性能测试

电弧防护性能主要包括电弧热防护性能(ATPV 值)、材料破裂阈能(EBT 值) 2 个指标。ATPV 值定义为入射到材料或多层材料系统上有 50% 的可能性导致皮肤二级烧伤的能量值, ATPV 值越大, 表明织物对电弧的热防护性能越好; EBT 值定义为入射到材料或材料系统上, 有 50% 的可能性导致试样破裂的能量值, EBT 值越大, 表明织物抵抗电弧爆裂效应的能力越强。最终的防电弧性能取二者之中的最小值^[10]。按照 ASTM F 1959—2012《服装面料电弧热防护性能值测试方法》测试。

1.2.6 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。试样面积为 20 cm², 不同部位测试 10 次, 结果取平均值。

1.2.7 透湿性能测试

按 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性实验方法 第 1 部分: 吸湿法》进行实验。测试温度为 38 ℃, 相对湿度为 90%, 流速为 0.3 ~ 0.5 m/s。试样透湿量计算公式为

$$w = \frac{24\Delta m}{St} \times 100\%$$

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; Δm 为同一实验组合体 2 次称量质量之差, g; S 为试样实验面积, m²。测试结果取 4 块试样的平均值。

2 结果与讨论

2.1 织物的拉伸性能

对 3 种织物的拉伸性能进行测试, 结果见表 2。

表 2 织物的拉伸性能测试结果

Tab.2 Fabric extensibility test results

试样编号	断裂强力/N		断裂伸长率/%	
	经向	纬向	经向	纬向
A	946.2	789.2	12.6	14.2
B	1 438.5	1 094.0	13.8	15.4
C	917.2	514.4	15.7	14.8

因电弧产生的爆炸力会撕裂织物, 我国电力行

表 4 织物的防护性能测试结果

Tab.4 Fabric protection performance test results

试样编号	热收缩率/%		阴燃时间/s		损毁长度/mm		TPP 值/ (kW·s·m ⁻²)	ATPV 值/ (cal·cm ⁻²)	EBT 值/ (cal·cm ⁻²)
	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向			
A	2.0	1.3	5.9	5.3	8.0	8.8	443.8	6.2	15.0
B	1.3	1.0	9.6	8.2	9.0	8.0	468.9	8.8	21.0
C	6.0	3.8	0.0	0.0	10.5	9.5	602.9	19.0	19.0

业标准对防电弧织物断裂强力有明确划分和要求。本文采用的 3 种织物的断裂强力均符合 DL/T 320—2010 标准: 150 ~ 200 g/m² 时, 织物断裂强力 ≥ 300 N; 200 ~ 290 g/m² 时, 织物断裂强力 ≥ 450 N, 断裂伸长率相差不大。

对位芳纶具有优异的力学性能, 其主要作用是增加织物的强力, 由于 C 织物中对位芳纶质量分数较 A、B 织物少, 即使增加 C 织物的股线捻度和织物密度也不能补偿其较低的断裂强力。

2.2 织物的舒适性能

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, 织物结构是影响透气性和透湿性的主要因素。3 种织物的舒适性测试结果见表 3。

表 3 织物的舒适性能测试结果

Tab.3 Fabric comfort performance test results

试样编号	透气性/(mm·s ⁻¹)	透湿性/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)
A	1 326	3 823
B	489	2 973
C	1 276	3 567

织物紧度是指纱线的覆盖率或覆盖系数, 紧度越大, 织物就越紧密。B 织物的紧度比 A 织物增加 13%, 则舒适性能综合值减少 85%, 其中, 透气性减少 63%, 透湿性减少 22%, 表明单层织物的透气性和透湿性与织物紧度成负相关, 因为紧度越大, 空气和湿气分子就越不易透过织物, 织物的舒适性降低。

A 织物的紧度比 C 织物的单层织物紧度略大, 二者基本可视为相等。由表 3 可知, C 织物的透气性比 A 织物减小 4%, 透湿性减小 7%, 这表明双层结构虽然一定程度降低了织物的通透性, 减小了织物的透气性和透湿性, 但作用效果并不显著, 双层织物与单层织物的舒适性不存在明显差异。C 织物的单层织物紧度比 B 织物少 15%, 但透气性增加了 160%, 透湿性增加了 20%, 表明降低双层织物中单层织物的紧度, 可显著地提高织物的舒适性。

2.3 织物的防护性能

防护性能是功能织物研究的重要内容。本文主要研究电弧防护织物的热稳定性能、阻燃性能、热防护性能以及电弧防护性能, 测试结果见表 4。

2.3.1 热稳定性能

间位芳纶具有优异的耐热性(300℃热空气收缩率为5%~6%),对位芳纶在高温下具有不收缩、不熔融的特性。由表4可知,C织物的经纬向热收缩率均大于A和B织物,这是由于C织物的芳纶含量较少,而热收缩率较大的纤维(阻燃腈氯纶、锦纶和黏胶纤维)含量远远高于A、B,因此在相同的受热情况下,用C织物制成的电弧防护服变形程度会更加严重。

2.3.2 阻燃性能

3种织物均无续燃、无熔滴,且炭化长度小于150mm,符合DL/T 320—2010要求。芳纶不引起织物的续燃和阴燃,而A、B织物存在阴燃现象,这是阻燃腈氯纶造成的,但C织物不存在阴燃现象,因为C织物经过阻燃后整理处理,阻燃剂会在织物的内部形成永久性交联,消除了阴燃现象。

芳纶纤维在高温下被炭化后膨胀形成致密的炭化层,该炭化物会依附在织物上而不脱落,A、B织物的损毁长度小于C织物,这是因为A、B中含有较大比例的芳纶纤维,芳纶纤维本身的阻燃性能远好于粘胶、锦纶等常规纤维,且芳纶含量越高,炭化层结构越致密,可有效地阻止空气的进一步加入以及可燃气体的扩散,从而阻断了燃烧的进行,增加芳纶纤维的混纺比可提高防电弧织物的阻燃性能。

2.3.3 热防护性能

A、B织物的纤维组成成分相同,但织物结构参数存在差异。B织物的紧度比A织物增加13%,TPP值增加6%,这是由于紧度越大的织物,透过织物的热量就越少,热防护性能就越强。

致密的炭化层可阻挡热传导和热辐射,减少反馈给织物的热量,增加织物的热防护性能。C织物的芳纶含量小于A、B织物,炭化层结构较为疏松,理论上C的热防护性能不如A,但C的TPP值却比A增加36%,比B增加28%,这是因为一方面C的双层结构降低了织物的通透性,减少透过织物的热量,同时,双层结构形成了中间空气层,空气层可缓冲一部分辐射热。

2.3.4 电弧防护性能

根据防电弧指标就低原则,A、B和C织物应以ATPV值作为电弧防护性能的指标,电弧防护性能值分别为6.2、8.8、19.0 cal/cm²。B织物的紧度比A织物增加13%,ATPV值增加42%,EBT值增加40%,表明防电弧织物的电弧防护性能与织物的紧度成正相关。

TPP是模拟在爆燃环境(50%对流热,50%辐射

热)下织物的防热辐射性能指标,ATPV是表示辐射热在90%以上的环境下织物的热防护性能指标。C织物的TPP值比A增加36%,ATPV值显著地增加了206%,表明双层织物的中间空气层对辐射热有显著缓冲作用,其对电弧热效应的防护比爆燃的热防护更为显著。

C织物的芳纶含量小于A、B织物,芳纶含量低可削弱织物的电弧热防护性能,但结果是C的ATPV值比A增加206%,说明在不影响织物舒适性的同时,双层织物的电弧防护性能值可达到单层织物的3倍以上。此外,C织物的ATPV值比B增加116%,说明当双层织物中单层织物紧度降低15%时,双层防电弧织物在显著提高其舒适性能的同时,电弧防护性能仍能超过单层织物的2倍。

3 结 论

1) 织物紧度与防电弧织物的热防护性能和电弧防护性能成正相关,与织物的透气性、透湿性成负相关。B织物的紧度比A织物增加13%,ATPV值比A织物增加42%,TPP值增加6%,舒适性指标综合值减少85%,所以,适度减小织物紧度可在不显著降低防护性能的同时,有效增加电弧防护织物的舒适性。

2) 国内电弧防护织物主体成分为阻燃腈氯纶和芳纶,并沿用了杜邦公司Protera®织物的配方,但缺少了抗静电纤维,C织物中添加了锦纶、粘胶纤维,减少了芳纶的用量,降低成本的同时,也降低了防电弧织物的热稳定性和阻燃性能。

3) 在保证织物舒适性、提高热防护性能的情况下,双层防电弧织物的电弧防护性能是单层织物的3倍以上;当双层防电弧织物的单层织物紧度降低15%时,其在显著提高织物舒适性,增加热防护性能时,电弧防护性能仍可超过单层织物的2倍。

综合本文实验结果,在防电弧织物设计时,纤维原料以阻燃腈氯纶和芳纶纤维为主体,可加入低成本纤维来取代高价的芳纶并增加其功能性。通过增加织物紧度的方法来提高防电弧织物的防护性能会严重降低其舒适性,采用单层低紧度的多层织物设计可显著提高防电弧织物的舒适性能和防护性能。

FZXB

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]. *Power 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]. *Power 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. Study on performance test and influencing factors of arc protective clothing [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]. *Power 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: 中国产业用纺织品行业协会, 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 Nonwovens & Industrial Textiles Association, 2011: 1-8.
- [6] 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 11th Symposium on Functional Textiles, Nanotechnology Application and Low Carbon Textile. Beijing: Beijing Textile Engineering Society, 2011: 338-341.
- [7] 张生辉, 樊争科, 肖秋利, 等. 防电弧织物的开发与研究 [J]. *中国个体防护装备*, 2015(6): 5-8.
ZHANG Shenghui, FAN Zhengke, XIAO Qiuli, et al. Development and research of anti-arc fabric [J]. *China Personal Protection Equipment*, 2015(6): 5-8.
- [8] 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): 79-82.
LIU Lin, LI Shixiong, XIAO Qiuli, et al. Current situation and development of safety protective clothing in power industry in china [J]. *Cotton Textile Technology*, 2015, 43(4): 79-82.
- [9] POIRIER M P, MEADEN R D, MCGINN R, et al. The influence of flash and resistant clothing on thermoregulation during exercise in the heat [J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2015, 12(9): 654-667.
- [10] 段胜伟. 判定防电弧服功能有双重标准 [N]. *中国纺织报*, 2012-04-23(3).
DUAN Shengwei. Double standards of judging the function of anti-arc clothing [N]. *China Textile News*, 2012-04-23(3).