

带电作业用导电纱线及阻燃低电阻面料的制备和应用

刘海燕, 李文辉, 张 佳

(湖南永霏特种防护用品有限公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 选用聚苯硫醚(PPS)纤维和不锈钢纤维混纺制备导电纱线, 对不同面料组织结构和经纬密的 PPS/不锈钢混纺面料的软硬度及电阻进行测试与表征, 制备集阻燃和屏蔽等功能为一体的低电阻面料。研究表明: 采用规格为 36 tex \times 2、PPS 纤维与不锈钢纤维质量比为 50:50 混纺而成的导电纱线作为经纬纱, 优选五枚三飞缎纹组织进行织造, 所得面料手感柔软, 且以经纬密分别为 18 根/cm 和 12 根/cm 的面料制成的导电鞋鞋垫, 电阻值为 272.5 Ω , 满足国家标准要求。同时, 该面料的生产成本低, 屏蔽性能与阻燃性能优异, 能够满足带电作业场景下的防护需求。

关键词: 聚苯硫醚(PPS); 不锈钢; 导电纱线; 阻燃低电阻面料; 屏蔽性能

中图分类号: TS 107.2

文献标志码: A

Preparation and application of conductive yarns and flame-retardant low-resistance fabrics for live working

Liu Haiyan, Li Wenhui, Zhang Jia

(Hunan Yongfei Special Protective Equipment Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China)

Abstract: Conductive yarns were prepared by blending polyphenylene sulfide (PPS) fibers and stainless steel fibers. The softness and resistance of PPS/stainless steel blended fabrics with different fabric structures and warp and weft densities were tested and characterized. Low-resistance fabrics with integrated flame retardancy and shielding functions were fabricated. The research results show that by using the blended conductive yarns with a specification of 36 tex \times 2 and a mass ratio of PPS fiber to stainless steel fiber of 50:50 as the warp and weft yarns, and choosing the five-end three-flying satin weave for weaving, the resulting fabrics have a soft hand feel. The conductive shoe insole made of fabric with a density of 18 and 12 yarns/cm respectively has a resistance value of 272.5 Ω , which can meet the national standards and have low production costs. It also has excellent shielding and flame-retardant properties, which can meet the protection requirements in live working scenarios.

Key words: polyphenylene sulfide (PPS); stainless steel; conductive yarn; flame-retardant low-resistance fabric; shielding property

在进行交流 110~750 kV、1 000 kV, 以及直流 500~500 kV 及以下电压等级电气设备的带电作业时, 人体若直接接触设备的高压带电部分, 会有危险电流流经人体, 危及人身安全。为保障人员安全, 作业人员需穿戴全套屏蔽服(等电位均压服)^[1]。屏蔽服通过构建良好的导电系统实现防护功能, 具体

而言, 是将上衣与手套、裤子连接, 裤子再与袜子、鞋子相连, 同时在接缝处设置分流交流线, 以承载服装中的主要电流流通, 使人体与高电压设备环境形成等电位状态。基于这一原理, 屏蔽服能够起到有效的屏蔽防护作用, 确保工作人员的人身安全。

基于上述带电作业场景及防护需求, 屏蔽服需

收稿日期: 2023-11-24

作者简介: 刘海燕, 女, 1997 年生, 湖南衡阳人, 硕士, 主要研究方向为纺织材料和纺织品加工, 362192028@qq.com

具备良好的屏蔽性能、较低的电阻、适当的流通容量、一定的阻燃性,以及较好的服用性能。GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》和 GB/T 25726—2010《1 000 kV 交流带电作业用屏蔽服装》^[2]等标准均对整套屏蔽服的性能及检测提出了明确要求。其中针对配套导电鞋,标准强制要求其电阻不得大于 500 Ω 。

本文聚焦阻燃低电阻机织面料的制备和应用,以聚苯硫醚(PPS)/不锈钢纤维混纺材料为原料,探究不同面料组织结构和经纬密对其软硬度与电阻的影响,旨在制备兼具阻燃和高效屏蔽功能的低电阻面料,进一步提升带电作业屏蔽服的性能。

1 导电纱线的制备

PPS 纤维是以 PPS 树脂为原料,经熔融纺丝制得的。PPS 纤维具有优良的力学性能,其强度为 2.65~3.08 cN/dtex,伸长率为 25%~35%,且具有优良的可纺性。在热性能方面,PPS 纤维的熔点高达 285 $^{\circ}\text{C}$,在 200 $^{\circ}\text{C}$ 下,其强度保持率达 60%,当温度升至 250 $^{\circ}\text{C}$ 时,强度保持率约为 40%^[3],表明 PPS 纤维具有良好的热稳定性及耐热性。初生 PPS 纤维未经拉伸,存在较大的无定型区。经高温拉伸处理后,聚合物分子沿纤维轴方向较整齐地排列,分子取向度提高。再经热处理后,纤维的结晶性能得以改善,分子链对称性提高。得益于此,PPS 纤维在极其恶劣的环境条件下仍能稳定保持其原有性能,可有效抵抗酸、碱、烃、酮、醇等化学试剂的侵蚀,耐化学稳定性好。

不锈钢纤维同样具备诸多优异特性。它不仅具有高弹性模量、高抗弯强度及高抗拉强度等固有的物理特性,还具有良好的导电性。与化学纤维和天然纤维相比,不锈钢纤维在抗静电、防电磁波辐射、耐高温和耐腐蚀等方面表现突出。同时,它还兼具天然纤维或化学纤维的柔软性能,直径为 8 μm 的不锈钢纤维,其柔软性与 13 μm 的麻纤维相近。

混纺纱加工过程中,不同种类的纤维会发生不同程度的相互交织与缠绕混合。随着牵伸工艺的进行,纱线逐渐变细变长,纱线内部不同种类纤维的形态和相对位置也会随之改变。具体而言,在纱线牵伸过程中,纤维向纱线轴向中心偏转的概率随着纱线的变细而增大。而导电纤维在纱线中的相对位置,在很大程度上决定了纱线的长度电阻和纱线间的接触电阻,进而影响导电纺织品的导电方式及整体电阻。

基于上述纤维特性及混纺原理,本文优选质量分数为 50% 的 PPS 纤维(阻燃材料)与 50% 的不锈钢高导电、高强度纤维进行纺纱操作,制备线密度为 36 tex 的 PPS/不锈钢纤维混纺单纱,再对单纱进行加捻,制备 PPS/不锈钢纤维混纺双股导电纱线。在长丝簇状态下,加捻操作能够排出纱线中的部分空气,从而降低其电阻值,提高电导率,实现材料的多功能性。

PPS/不锈钢纤维混纺双股导电纱线的具体制备工艺流程如下:首先,将不锈钢丝拉制成截面含 8 000~10 000 根单丝的丝束(单丝直径控制为 6~8 μm);其次,在并条机上,通过牵伸将不锈钢丝束拉制成纤维,然后与 PPS 纤维按照质量比为 50:50 进行混纺,制备混纺粗纱;再次,将粗纱牵伸成线密度为 36 tex 的单纱,再将两股单纱并合为双股纱线;最后,进行络筒操作,得到最终的导电纱线。

2 PPS/不锈钢混纺面料的制备

2.1 面料组织结构的确定

以制备的 PPS/不锈钢纤维混纺双股导电纱线作为经纬纱,设计面料经密为 25 根/cm、纬密为 18 根/cm、幅宽为 150 cm,分别织制 1/1 平纹、2/1 斜纹和五枚三飞缎纹 3 种组织结构的阻燃低电阻面料。

针对制备的 3 种阻燃低电阻面料,开展面料软硬度的主观评价打分工作。具体操作方法:用拇指与食指在面料厚度方向上轻捏,感受面料压缩难易程度并判断软硬度,为避免双手用力差异影响测试结果,测试人员需换手重复操作。该主观评价采用 16 分制,其中最高分“16 分”代表面料的柔软度最佳,最低分“1 分”则表示柔软度最差。本次评价邀请 10 位测试人员参与打分,最终取 10 人打分的平均值作为面料软硬度的评价结果,具体数据详见表 1。在面料采用相同纱线且经纬密一致的前提下,面料组织成为影响面料手感的唯一变量。通过主观评价发现,斜纹组织相较于平纹组织表现出更柔软的手感,而缎纹组织相较于斜纹组织更为柔软。基于此,本文最终确定选用五枚三飞缎纹组织来制备阻燃低电阻面料。

2.2 经纬密的影响

2.2.1 成本核算

以制备的 PPS/不锈钢纤维混纺双股导电纱线作为经纬纱进行面料织造。在设计面料参数时,经密分别设定为 25、22、18 和 15 根/cm,纬密则分别

表 1 不同组织结构 PPS/不锈钢混纺面料的软硬度主观评价结果

Tab.1 Subjective evaluation results of the softness of PPS/stainless steel blended fabrics with different organizational structures

组织结构	软硬度评分/分
1/1 平纹	6
2/1 斜纹	10
五枚三飞缎纹	14

与之对应设定为 18、16、12 和 8 根/cm, 面料幅宽设定为 150 cm, 组织结构采用五枚三飞缎纹。织造过程中, 采用 3 入/箱的穿箱方式, 上机张力控制在 0.5~0.8 N。

在成本核算方面, 以“1 m 长面料可制作 19 双鞋垫”为基准进行计算。统计不同经纬密下纱线的用量及单双鞋垫的成本, 结果见表 2。

在确保面料使用相同导电纱线且组织结构相同

表 2 不同经纬密下纱线用量及鞋垫成本

Tab.2 Yarn consumption and insole cost under different warp and weft densities

面料编号	经密/ (根·cm ⁻¹)	纬密/ (根·cm ⁻¹)	纱线用量/(g·m ⁻¹)		鞋垫成本/ (元·双 ⁻¹)
			经纱	纬纱	
1#	25	18	347	249	12.52
2#	22	16	304	222	11.12
3#	18	12	249	162	8.80
4#	15	8	215	115	7.20

的前提下, 面料经纬密成为影响其纱线用量和成本的唯一变量。由表 2 可知, 随着经纬密的降低, 纱线用量与成本显著下降: 与 1# 面料(经密 25 根/cm、纬密 18 根/cm) 相比, 2# 面料(经密 22 根/cm、纬密 16 根/cm) 的经纱用量减少 12%、纬纱用量减少 10%、成本降低 12%; 3# 面料(经密 18 根/cm、纬密 12 根/cm) 的经纱用量减少 28%、纬纱用量减少 35%、成本降低 30%; 4# 面料(经密 15 根/cm、纬密 8 根/cm) 的经纱用量减少 38%、纬纱用量减少 53%、成本降低 42%。

2.2.2 面料电阻

结合 GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》对导电鞋电阻性能的要求, 采用 4 种不同经纬密的面料制作导电鞋鞋垫, 并测试其电阻值, 结果见表 3。

表 3 导电鞋鞋垫的电阻值测试结果

Tab.3 Test results of the resistance value of conductive shoe insoles

面料编号	经向密度/ (根·cm ⁻¹)	纬向密度/ (根·cm ⁻¹)	电阻值/ Ω
1#	25	18	120.0
2#	22	16	140.0
3#	18	12	272.5
4#	15	8	465.0

由表 3 可知, 1#、2#、3# 面料制成的鞋垫电阻

值分别为 120.0、140.0 和 272.5 Ω , 均满足国家强制标准要求($\leq 500 \Omega$); 而 4# 面料制成的鞋垫电阻值达 465.0 Ω , 且性能稳定性差, 易出现不合格情况, 无法满足带电作业安全要求。

2.2.3 面料软硬度

对 4 种不同经纬密的面料进行软硬度主观评价, 结果见表 4。

表 4 4 种不同经纬密面料的软硬度主观评价结果

Tab.4 Subjective evaluation results of softness of four fabrics with different warp and weft densities

面料编号	经密/ (根·cm ⁻¹)	纬密/ (根·cm ⁻¹)	软硬度 评分/分
1#	25	18	6
2#	22	16	9
3#	18	12	11
4#	15	8	13

由表 4 可知, 随着经纬密的降低, 面料手感逐渐变柔软。1# 面料评分最低(6 分), 手感最硬; 4# 面料评分最高(13 分), 手感最柔软; 3# 面料(经密 18 根/cm、纬密 12 根/cm) 评分 11 分, 手感柔软度适中。

综合性能与成本因素可知: 4# 面料电阻值不稳定, 无法满足安全要求; 1# 和 2# 面料虽电阻值低, 但制作成本较高; 3# 面料既满足国家标准对电阻值的强制要求, 又具备适中的柔软度, 且成本低。因此, 最终确定面料参数为: 经密 18 根/cm、纬密 12 根/cm,

组织结构为五枚三飞缎纹,穿扣方式为3入/箱。

3 面料的阻燃性能和屏蔽性能

对最终优选出的3#面料进行阻燃性能与屏蔽性能测试。

经测试,3#面料的屏蔽效率为28 dB,符合导电鞋鞋垫及屏蔽面罩面料标准且面料的织造方式规范,可有效隔绝高压电场干扰。

参照 GB/T 17591—2006《阻燃面料》^[4]中针对阻燃防护服用面料的要求,对3#面料的阻燃性能进行测试。具体测试结果见表5。

表5 面料的阻燃性能

Tab. 5 The flame retardant performance of the fabric

指标	测试结果	
	经向	纬向
损毁长度/mm	37	35
续燃时间/s	0	0
阴燃时间/s	0	0
有无熔融、滴落	无	无

由表5可知,3#面料阻燃性能优异,其经向损毁长度为37 mm、纬向为35 mm,满足国家标准要求(≤ 150 mm);经纬向续燃时间和阴燃时间均为0 s,满足国家标准要求(≤ 5 s);且经纬向均无熔融、滴落现象,可在火灾风险环境下有效阻止火焰蔓延,保障作业人员安全。

4 结论

本文以PPS纤维与不锈钢纤维作为原材料,通

过混纺工艺制备PPS/不锈钢纤维混纺双股导电纱线。经“不锈钢丝拉丝(8 000~10 000根丝束,单丝直径6~8 μm)→并条机牵伸混纺(PPS与不锈钢纤维质量比50:50,制粗纱)→牵伸并合(36 tex单纱,双股并合)→络筒”工艺,成功制备规格为36 tex \times 2的PPS/不锈钢混纺双股导电纱线,该导电纱线兼具导电与阻燃性能。

优选经密18根/cm、纬密12根/cm、五枚三飞缎纹组织织制的3#面料,制成导电鞋鞋垫后,测得其电阻值为272.5 Ω ,满足国家强制标准要求(≤ 500 Ω),安全性能优良;同时,其经纱用量为249 g/m、纬纱用量为162 g/m,鞋垫成本仅为8.8元/双,生产成本较高经纬密面料降低30%,实现了性能与成本的高效平衡。

采用3#面料制成的屏蔽面料,其屏蔽效率达28 dB,阻燃性能指标(损毁长度、续燃/阴燃时间、无熔融滴落)均满足GB/T 17591—2006标准要求,可作为带电作业屏蔽服导电鞋鞋垫的主要面料,为作业人员提供安全可靠的防护保障。

参 考 文 献

- [1] 中国电力企业联合会. 带电作业用屏蔽服装: GB/T 6568—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2] 中国电力企业联合会. 1 000 kV 交流带电作业用屏蔽服装: GB/T 25726—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] 胡毅, 王力农, 张丽华, 等. 交流高压带电作业用屏蔽服装: CN200720300521. 4[P]. 2008-12-03.
- [4] 中国纺织工业联合会. 阻燃织物: GB/T 17591—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

科技点亮绿途 创新守护蔚蓝

智能绘就清景 数智焕新山河

匠心雕琢生态 携手共筑蓝天