

不锈钢电磁屏蔽织物的屏蔽效能

闫鑫鑫, 谢春萍, 刘新金, 苏旭中

(江南大学 生态纺织教育部重点实验室 江苏 无锡 214122)

摘要: 研究纱线结构和双层织物的排列方式对织物屏蔽效能的影响。采用新型 sirospun、sirofil-spun 和全聚纺, 分别纺制相同线密度的涤纶/不锈钢长丝包芯纱、涤纶/不锈钢长丝包缠纱, 以及 T/S 80/20 混纺纱, 并采用上述纱线织制了 3 种单层平纹机织物, 采用法兰同轴法对单层织物、同种纱线双层织物、不同纱线双层织物及不同排列角度双层织物的屏蔽性能测试, 结合电磁屏蔽理论对实验结果进行分析。结果表明: 所纺纱线密度相同时, 包缠纱毛羽最少且强力最高, 混纺纱的毛羽最多强力最低; 经纬纱均采用包芯纱织制织物时, 其屏蔽效能最好; 双层织物成 45° 交叉排列屏蔽效能有所提高。
关键词: 不锈钢短纤; 不锈钢长丝; 电磁屏蔽; 纱线结构; 纱线排列

中图分类号: TS106.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-7003(2018)10-0035-06

引用页码: 101106

Shielding effectiveness of stainless steel electromagnetic shielding fabric

YAN Xinxin, XIE Chunping, LIU Xinjin, SU Xuzhong

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The effect of the structure and the arrangement of the yarns on the shielding effectiveness of the fabric was studied. Polyester/stainless steel filament core yarns, polyester/stainless steel filament yarns and T/S 80/20 blended yarns with the same yarn density were spun by using sirospun, sirofil-spun and complete condensing spinning. Three kinds of monolayer plain weave fabrics were fabricated by the above yarns, and the shielding effectiveness of monolayer fabrics, double-layer fabrics with the same structure yarns, double-layer fabrics with the different structure yarns and double-layer fabrics with different arrangement was tested. The experimental results were analyzed by combining electromagnetic shielding theory. The results showed that, when the density of yarns is same, the hairiness of the sirofil-spun yarn is the least and the strength is the strongest, but the hairiness of the blended yarn is the most and the strength is the lowest. When both the warp and weft yarns are woven with the core yarn, the electromagnetic shielding effect is the best. When double-layer fabrics are arranged with 45°, the electromagnetic shielding property can improve.

Key words: stainless steel fiber; stainless steel filament; electromagnetic shielding; yarn structure; yarn arrangement

对于人体防护电磁辐射而言, 穿戴具有防辐射功能的织物较为便利, 研究及开发具有电磁屏蔽性

能的环保型织物逐渐得到了人们的青睐^[1]。有研究表明: 对于一般设备(频率在 30 ~ 3 000 MHz) 屏蔽效能可在 10 ~ 20 dB 的材料即可达到屏蔽要求。在众多屏蔽材料中, 金属纤维或金属化纤维有较高的导电性和导磁性, 且能与常规纤维采用混纺、交织、并线、包芯、包缠的方法, 制得防辐射织物^[2]。相比一般屏蔽材料, 不锈钢织物则屏蔽效能更加持久, 且多次洗涤屏蔽效能不减^[3]。有关不锈钢抗磁性纺织材料, 国内外均有研究, 其中从纱线出发探究其结构对织

收稿日期: 2018-01-03; 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0309200); 江苏省产学研项目(BY2016022-16); 江苏省自然科学基金项目(BK20170169)

作者简介: 闫鑫鑫(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为功能性纱线。通信作者: 谢春萍 教授, wxchp@vip.163.com。

物屏蔽效能的影响颇多,但是结论不尽相同。K. B. Cheng^[4]等探究了不锈钢纱线的结构、织物的不同规格对织物屏蔽效能的影响,发现不锈钢丝与短纤纱织物的屏蔽效能高于不锈钢短纤和铜丝混纺织物,纱支不同,屏蔽效能也有所差异。肖倩倩^[5]等认为不锈钢包芯纱织物的屏蔽效能高于不锈钢混纺纱织物;沙杉^[6]等认为相同不锈钢含量、相同间距情况下,不锈钢混纺纱织物的屏蔽性能高于不锈钢包芯纱织物,并验证了此结论与不锈钢纱线模型所得结论一致。本文为了探究纱线的不同结构、同种纱线双层织物、不同纱线双层织物及不同排列角度双层织物的屏蔽性能,采用不同的纺纱方法,设计出3种纱线并制成织物,采用法兰同轴法测试其屏蔽效能。

1 实验

1.1 原料

全聚混纺纱所用原料为涤纶/不锈钢短纤粗纱条(江苏省纺织技术研究所),混纺比为80/20,其中不锈钢短纤的规格为直径8 μm,长度40 mm。赛络包芯纱和赛络菲尔包缠纱所用原料为316 L型不锈钢长丝(上海普盛金银丝纺织品有限公司),规格为直径30 μm,最大拉伸强力800 N/mm²,相对电导率0.023,电导率1.12e⁶ s/m,涤纶粗纱定量3.4 g/10 m。

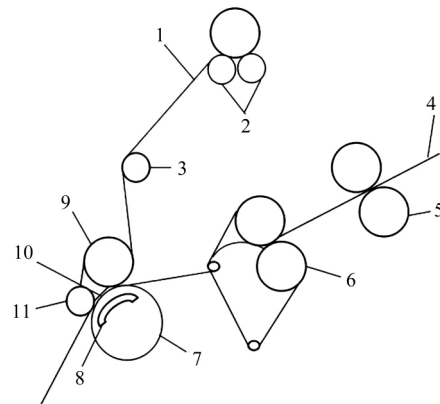
1.2 设备

QFA1528型全聚纺细纱机、QFA1528型细纱机(无锡第七纺织企业有限公司),乌斯特兹HL400型毛羽测试仪(瑞士乌斯特技术有限公司),YG068C全自动单纱强力仪(苏州长风纺织机电科技有限公司),Agilent E5061A型矢量网络分析仪(美国安捷伦科技有限公司)。

1.3 纱线的纺制

在QFA1528型全聚纺细纱机上纺制T/S 80/20混纺纱。全聚纺是紧密纺的一种,它是在普通三罗

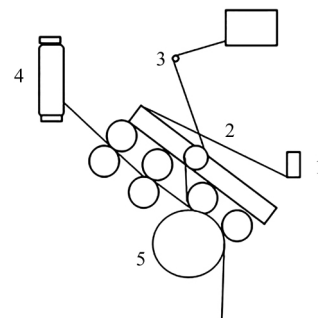
拉牵伸皮圈的基础上,将前罗拉设计成直径为50 mm表面带窄槽的空心罗拉。全聚纺成纱毛羽少,生产稳定,并且对原料有很好的适应性。在改造的QFA1528型细纱机上纺制赛络包芯纱和赛络菲尔纱。细纱机的改造:在QFA1528型全聚纺细纱机的基础上加装单槽导丝轮装置,长丝退绕装置和张立盘装置,单槽导丝轮装置可在摇架上左右移动,以便控制长丝喂入前罗拉的位置,并通过工艺优化选出最佳包芯效果的纱^[7]。赛络包芯纱和赛络菲尔纱的纺纱原理如图1、图2所示。纺纱工艺配置如表1所示。



1-不锈钢长丝;2-导丝辊;3-导丝轮;4-涤纶粗纱;5-后罗拉;6-中罗拉;7-前罗拉;8-吸风插件;9-阻捻胶辊;10-气流导向装置;11-前胶辊

图1 赛络包芯纱纺制原理

Fig. 1 Spinning process of Siro-spinning core-spun yarn



1-手动摇架;2-导丝轮;3-长丝张立盘;4-粗纱;5-前罗拉

图2 赛络菲尔纱纺制原理

Fig. 2 Spinning process of the sirofil core-spun yarn

表1 纺纱工艺

Tab. 1 Spinning parameters

线密度/tex	罗拉隔距/mm	细纱总牵伸/倍	细纱捻系数	隔距块/mm	钢丝圈号数	锭速/(r·min ⁻¹)
21	70×70×60	17.70~47.09	360	2.80	69 032/0	8 000

1.4 不锈钢纤维织物的制备

实验所用的织物由全自动剑杆小样织机织造,经纬纱分别采用自制纱线,采用统一的织机工艺参数,统一织制平纹织物。分别采用 YG141D 织物厚

度仪、SZT-2A 四探针电阻测试仪测量织物厚度及织物表面电阻。织物的基本参数如表2所示,为了便于描述给三块织物分别命名为1[#]织物、2[#]织物、3[#]织物。

表 2 织物基本参数
Tab.2 Basic parameters of fabrics

样布 编号	平均厚度/ mm	所用纱线	经密/ (根·10 cm ⁻¹)	纬密/ (根·10 cm ⁻¹)	织物总紧度/ %	织物体积电阻率/ (Ω·cm)
1 [#]	0.320	全聚混纺纱	273.7	263.7	69.82	20.88
2 [#]	0.322	赛络菲尔包缠纱	273.7	263.7	69.82	10.03
3 [#]	0.335	赛络包芯纱	273.7	263.7	69.82	11.43

1.5 纱线及织物性能测试方法

1.5.1 纱线性能测试

温度为 20 ℃ ,相对湿度为(65 ±2) % 。

纱线毛羽测试: 采用乌斯特兹 HL400 型毛羽测试仪 ,测试纱线毛羽 ,设置测试纱线长度为 1 000 m ,并分别记录 100 m 纱线的 1、2、3、4、6、8 mm 毛羽数。

纱线强力测试: 参照《纺纱实验教程》纱线强力测试方法 ,采用 YG 068C 全自动单纱强力仪测试纱线强力。测试时选用上下夹头夹持距离 50 cm ,预加张力 0.5 cN/tex ,下降速度 50 cm/min ,每种纱线测试 40 次 ,取平均值。

1.5.2 织物性能测试

温度为 23 ℃ ,相对湿度为 50% ~ 70% 。

屏蔽性能测试: 采用法兰同轴法 ,Agilent E5061A 型矢量网络分析仪、频谱分析仪、TS0210A1 型网络衰减器测试织物的屏蔽性能。为了提高测试的准确性、减少误差 ,采用多次实验并取平均值。本实验采用每块样布取 5 个不同位置的试样(避开布边) ,分别测试 5 次 ,取平均值。测试时将试样放置于同轴小室的法兰之间 ,之后和矢量网络分析仪连接 ,如图 3 所示。参考 ASTM D 4935—2010《测量平面材料的电磁屏蔽效应的试验方法》及 QJ 2809—1996《平面材料屏蔽效能的测试方法》。

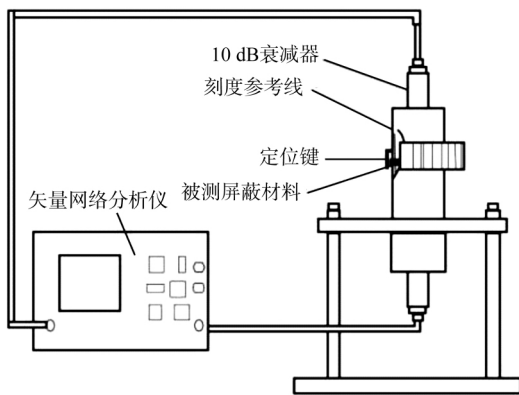


图 3 法兰同轴示意

Fig. 3 The coaxial diagram of flange

织物电阻率测试: 采用 SZT-2A 四探针电阻测试

仪 ,仪器预热 30 min ,然后将 4 cm × 4 cm 的织物放置于四探针平台上 ,探针间距为 1 mm ,保证探针所有针尖与织物良好接触 ,并调节 SB118 的电流输出量程为 1 mA 。

2 结果与分析

2.1 纱线性能分析

三种不锈钢纤维纱的基本性能测试结果如表 3 所示。由表 3 可以看出 ,对于不同结构的纱线 ,不锈钢混纺纱毛羽最多 ,长丝包芯纱次之 ,包缠纱毛羽最少。毛羽形成的原因之一: 在加捻三角区中 ,由于纤维的几何位置和纺纱张力的不同 ,导致一根纤维从外到内、再从内到外发生多次转移 ,当纤维头端被挤出后 ,由于没有张力和向心压力的作用 ,纤维就停留在纱的表面形成毛羽。在混纺纱中不锈钢和涤纶均以短纤维的形式存在 ,纤维之间摩擦加剧 ,内外转移次数增多 ,毛羽增多。包缠纱中不锈钢长丝包裹在涤纶纤维的外部 ,对涤纶纤维在纱表面形成的毛羽起到包缠贴服作用 ,因此 ,包缠纱毛羽最少。而包芯纱中 ,只有涤纶短纤裸露在纱线表面 ,不锈钢以长丝的形式存在于纱芯 ,在一定程度上 ,纱芯的存在对涤纶纤维的加捻三角区有一定破坏 ,使毛羽增加。

表 3 纱线基本性能

Tab.3 Basics properties of yarn

纱线品种	强力/ cN	断裂伸长率/ %	3 mm 以下毛羽根数/ (根·10 cm ⁻¹)
赛络菲尔包缠纱	792.42	12.43	576.6
赛络包芯纱	708.15	9.36	834.7
全聚混纺纱	572.71	9.65	1 078.4

由表 3 还可知 ,包缠纱强力最高 ,断裂伸长最大 ,这是因为不锈钢丝以螺旋的形式包缠在涤纶纤维表面 ,其强力利用系数达到最大; 对于包芯纱 ,不锈钢长丝的加入会破坏纤维之间的抱合力 ,使纱线强力降低。对比包芯纱和混纺纱强力 ,可以看出包芯纱的强力高于混纺纱 ,这主要与纤维的形态和成纱方式有关。不锈钢长丝连续性好 ,刚性大 ,承担拉

力大,而不锈钢短纤和涤纶短纤抱和力差,强力相对较低。包芯纱和混纺纱的断裂伸长率相差不大。由拉伸理论分析可知,在拉伸时纱条中心的长丝纤维首先被拉断,接着剩下的长丝继续断裂,此时涤纶纤维仍处于抽拔滑移过程,并未达到最大断裂伸长,因此包芯纱中的不锈钢长丝对纱体的断裂伸长影响不大^[8],又因为纱线特数和捻度相同,故断裂伸长相差不大。

2.2 织物屏蔽性能分析

2.2.1 纱线种类对屏蔽效能的影响

不同纱线结构织物的电磁屏蔽效能如图4所示。

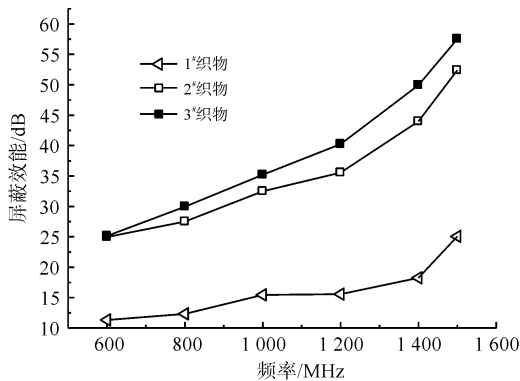


图4 不同纱线结构织物的电磁屏蔽效能

Fig. 4 Electromagnetic shielding effectiveness of fabrics with different yarn structures

由图4可知,频率在0~1500 MHz时,包芯纱和包缠纱织物电磁屏蔽效能的峰值往往在20 dB以上,而混纺纱织物的电磁效能峰值却难以达到20 dB,限制了混纺纱织物的使用范围。在混纺纱中不锈钢短纤和涤纶纤维充分混合,此时不锈钢以非连续的方式存在于纱体中,电阻值高,且质量不均匀,导致不锈钢短纤分布不均匀,使纱线沿轴向缺乏有效的电连接。因此,包芯纱织物的屏蔽性能高于包缠纱织物。当把织物看成含有网孔的屏蔽体时,孔隙则影响织物的屏蔽性能。织物形成的孔或缝相当于一个矩形波导管,波导的截止频率主要与孔隙的线径大小有关,线径越大,波导的截止频率越低,当电磁波频率达到截止频率时,则无屏蔽性能^[9]。包缠纱中中长丝缠绕在涤纶纤维的外侧,所形成的孔或缝相比包芯纱更大一些,所以包缠纱织物的屏蔽性能更弱。

2.2.2 双层织物的排列角对屏蔽效能的影响

为了探究双层织物的排列角对织物屏蔽性能的影响,采用1#和2#织物、1#和3#织物、2#和3#织物、1#和1#织物、2#和2#织物、3#和3#织物两两叠合,分别测试在

0°、45°、90°排列角度下的屏蔽性能,如图5所示。

由图5可以看出,当两块织物成45°排列时,织物的屏蔽性能最好。一方面是因为45°交叉排列织物中,经纬纱纵横交错,形成的网格孔隙最小;另一方面,在测试时,电场和磁场在样品圆形平面沿半径方向均匀分布,而45°排列的织物在4个方向上均有不锈钢纱线,导致入射到织物上的电磁波垂直分量增加,电磁屏蔽效能增强。当织物成0°、90°排列时,屏蔽效能相差不大,这是因为垂直(平行)交叉的织物可以屏蔽掉互相垂直的电场和磁场^[10]。

采用Matlab双因素方差分析方法对上述织物的电磁屏蔽性能进行分析^[11]。在0~1500 MHz频段对织物两两交叉排列的排列方式和纱线结构进行双因子方差分析。分析时,在0~1500 MHz内取200、400、800、1000、1200、1400 MHz的织物屏蔽效能平均值。返回值P大于α时,假设成立,因子之间无显著差异,设定α为0.05。0~1500 MHz双因子方差分析结果见表4。

表4 双因子方差分析

Tab. 4 Two-factor analysis of variance

方差来源	偏平方和	自由度	方差	P值
列因子	16.583	2	3.90	0.0559
行因子	805.167	5	75.78	0

由表4可以看出,0~1500 MHz双因子方差分析所得P值分别为0.0559、0, P_1 大于0.05, P_2 小于0.01,说明列因素有差异,行因素有显著差异。即在0~1500 MHz内纱线的结构对织物屏蔽性能的影响较为显著,排列角对其影响较小。

3 结论

对不同结构的纱线和不同排列方式的电磁屏蔽织物进行细微分析,多角度出发找出影响屏蔽性能的因素,探究各因素与屏蔽效能的相关性。

1) 通过不同的纺纱方法,得到赛络包芯纱、赛络菲尔包缠纱和全聚混纺纱三种纱线。在相同纺纱工艺条件下,不锈钢混纺纱毛羽最多,强力最低,长丝包芯纱次之,包缠纱毛羽最少,强力最高。

2) 当织物中不锈钢含量、经纬密、紧度等参数同时,包芯纱织物屏蔽效能最好。这是因为包芯纱织物形成的孔隙相对较小。由孔隙导磁可知,孔隙越小,屏蔽性能越好;又因为包芯纱中不锈钢是连续的,导致其电阻值相对较低。

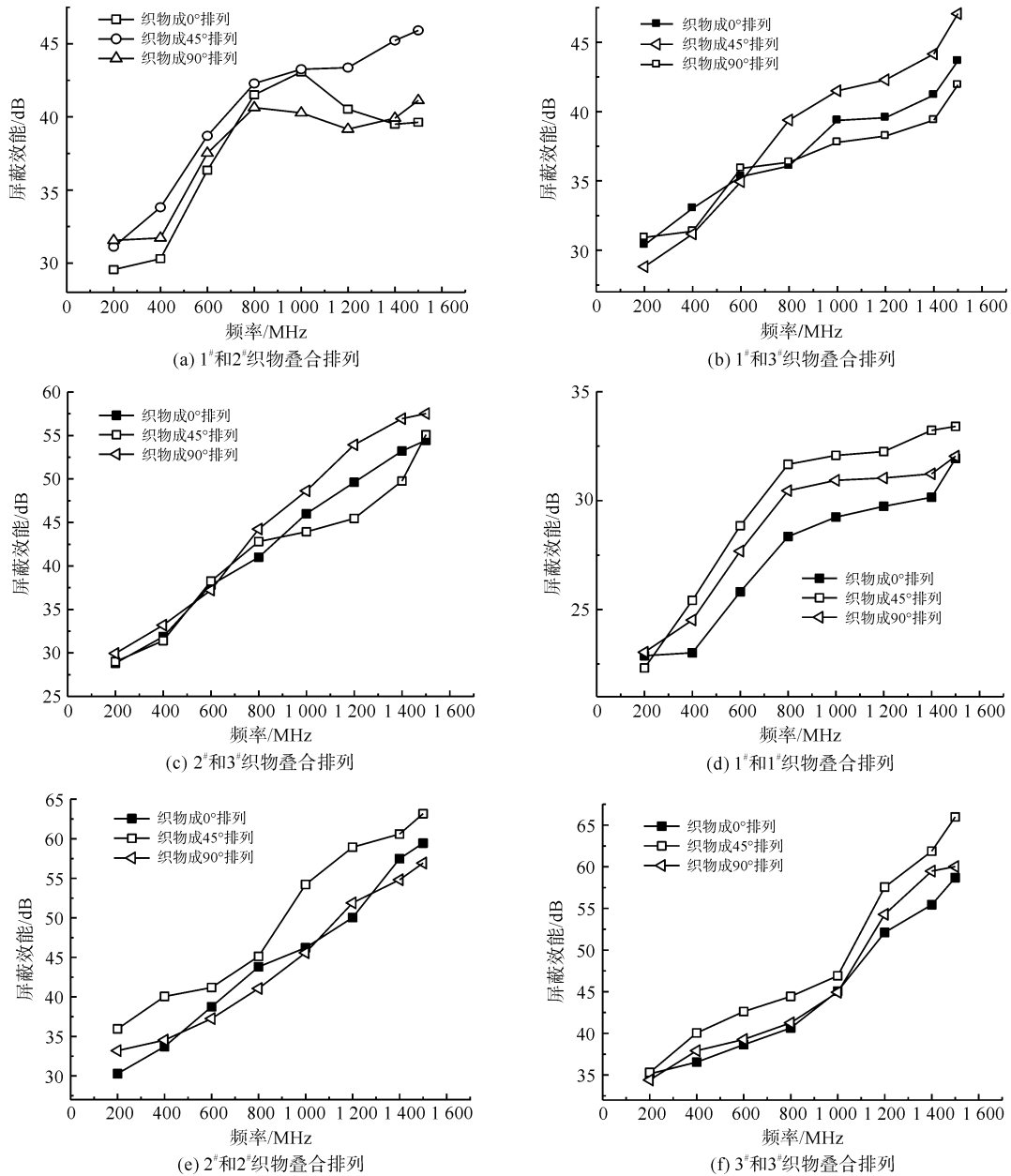


图 5 不同排列方式的织物电磁屏蔽效能

Fig. 5 Electromagnetic shielding effectiveness of yearsns with different arrangement

3) 织物中不锈钢纱线的排列方式对其电磁屏蔽效能影响规律较为明显。当两块织物成 45° 交叉排列时 织物在 4 个方向上均含有不锈钢纱线,形成的网格最密。此时电磁波垂直分量增加,织物对电磁波的反射量增加,屏蔽效能增强。

参考文献:

[1]刘君妹,贾立霞. 不锈钢长丝排列对复合板材电磁屏蔽效能影响[J]. 棉纺织技术, 2017, 45(7): 19-22.
LIU Junmei, JIA Lixia. Effect of stainless steel filament arrangement on electromagnetic shielding effectiveness of

composite board [J]. Cotton Textile Technology, 2017, 45(7): 19-22.
[2]肖红,施楣梧. 电磁纺织品研究进展[J]. 纺织学报, 2014, 35(1): 151-157.
XIAO Hong, SHI Meiwu. Research progress on electromagnetic textiles [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(1): 151-157.
[3]秦燕萍,王岩,刘海英,等. 不锈钢纤维混纺织物防辐射性能研究[J]. 棉纺织技术, 2015, 43(11): 29-32.
QIN Yanping, WANG Yan, LIU Haiying, et al. Radiation protection study of stainless steel blended fabric [J]. Cotton Textile Technology, 2015, 43(11): 29-32.

- [4] CHENG K B , CHENG T W , LEN K C , et al. Effects of yarn constitutions and fabric specifications on electrical properties of hybrid woven fabrics [J]. *Composites* , 2003 (34) : 971-978.
- [5] 肖倩倩,张玲玲,宿霞菲. 含不锈钢纤维织物电磁屏蔽效能影响因素研究[J]. *丝绸* , 2010(2) : 26-30.
XIAO Qianqian , ZHANG Lingling , SU Xiafei. Study on influencing factors of electromagnetic shielding effectiveness of fabric with stainless steel fibers [J]. *Journal of Silk* , 2010 (2) : 26-30.
- [6] 钞杉. 含金属纤维电磁屏蔽纺织品屏蔽效能的影响因素研究[D]. 上海: 东华大学, 2014: 41-47.
CHAO Shan. The Influence Factor of Shielding Effectiveness of Electromagnetic Shielding Textiles Containing Metal Fibers [D]. Shanghai: Donghua University , 2014: 41-47.
- [7] 曹梦龙,徐伯俊,谢春萍,等. 基于 sirofil-spun 新型花式纱的纺织及性能分析[J]. *丝绸* , 2016 , 53(6) : 1-5.
CAO Menglong , XU Bojun , XIE Chunping , et al. Spinning of new fancy yarn based on the sirofil-spun and its performance analysis [J]. *Journal of Silk* , 2016 , 53 (6) : 1-5.
- [8] 汝强,胡社军,胡显奇,等. 电磁屏蔽理论及屏蔽材料的制备[J]. *包装工程* , 2004(5) : 21-23.
RU Qiang , HU Shejun , HU Xianqi , et al. Electromagnetic shielding theory and the preparation of shielding material [J]. *Packaging Engineering* , 2004(5) : 21-23.
- [9] 施楣梧,王群. 电磁功能纺织材料[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 153-159.
SHI Meiwu , WANG Qun. Electromagnetic Functional Textile Materials [M]. Beijing: Science Press , 2015: 153-159.
- [10] ORTLEK H G , SARACOGLU O G , SARITAS O , et al. Electromagnetic shielding characteristics of woven fabrics made of hybrid yarns containing metal sires [J]. *Fibers and Polymers* , 2012(13) : 63-66.
- [11] 郭萍. 双因素方差分析的应用及 Matlab 实现[J]. *长沙大学学报* , 2014 , 28(5) : 138-140.
GUO Ping. Application of two factor analysis of variance and its realization with Matlab [J]. *Journal of Changsha University* , 2014 , 28(5) : 138-140.