

不锈钢纤维机织物的电磁屏蔽及力学性能

闫鑫鑫¹, 谢春萍¹, 刘新金^{1,2}, 苏旭中¹

(1. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 湖北省纺织新材料与先进加工技术省部共建国家重点实验室培育基地, 武汉 430000)

摘要: 为了研究不锈钢纤维纱的结构对织物电磁屏蔽性能及力学性能的影响, 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/不锈钢长丝包缠纱及 T/S 80/20 全聚混纺纱, 并采用上述纱线织制了 3 种平纹机织物和一上三下斜纹织物。测试织物在 0 ~ 1 500 MHz 低频段上的电磁屏蔽效能, 并对其拉伸、断裂、顶破性能进行测试, 同时在测试的基础上, 分析四种织物对纱线的利用率。结果表明: 在低频时, 织物对电磁波的屏蔽以反射为主, 吸收为辅; 赛络菲尔纱织物和赛络包芯纱织物屏蔽效能相当, 全聚混纺纱织物屏蔽效能较差; 综合织物的屏蔽效能和力学性能, 赛络菲尔纱织物性能最佳。

关键词: 不锈钢短纤; 不锈钢长丝; 纱线结构; 电磁屏蔽; 力学性能

中图分类号: TS106.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2018)08-0029-06 引用页码: 081106

Electromagnetic shielding and mechanical properties of stainless steel fiber woven fabrics

YAN Xinxin¹, XIE Chunping¹, LIU Xinjin^{1,2}, SU Xuzhong¹

(1. Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Hubei Province State Key Laboratory Training Ground of Textile New Materials and Processing, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to study the influence of stainless steel fiber yarn structure on the electromagnetic shielding performance and mechanical properties of the fabric, polyester / stainless steel filament core-spun yarns, polyester / stainless steel filament spun yarns and T/S 80/20 blended yarns of the same yarn linear density were spun by using Sirospun, Sirofil spun and complete condensing spinning. Electromagnetic shielding effect of the fabrics under 0 ~ 1 500 MHz low frequency band was tested. Besides, the tensile strength, breaking and bursting properties of the fabrics were tested. At the same time, the utilization rate of the four kinds of fabrics on the yarns was analyzed based on the test. The results show that the shielding of electromagnetic wave is mainly reflection and absorption little by the fabrics at low frequency. The shielding effectiveness of the Sirofil spun yarns fabric and the Siro core-spun yarns fabric is equivalent, and the shielding effectiveness of the complete condensing spinning fabric is poor. Considering the shielding effectiveness and mechanical properties of fabrics, the Sirofil spun yarns fabric performance is the best.

Key words: stainless steel short fiber; stainless steel filament; yarn structure; electromagnetic shielding; mechanical properties

电磁屏蔽织物的发展趋于多元化, 人们在注重屏蔽性能的同时更加关注织物的耐久性、多功能性、

舒适性及绿色环保性等。如莫斯科纺织材料研究院制作的镍合金丝交织针织物穿着舒适且多次洗涤不影响织物的屏蔽性能^[1]; 上海华天公司开发的 HTC 纤维制作的电磁屏蔽材料不仅具有良好的电磁屏蔽性能, 还具有抗静电、抗菌和防臭性能^[2]; 王伟等^[3]对化学镀铜的织物进行了镀锡, 减少了材料制备过程中的污染, 使屏蔽织物的生产更加绿色环保。为了减少电磁辐射, 提高织物的服用性和环保性, 相比

收稿日期: 2017-11-27; 修回日期: 2018-06-05

基金项目: 江苏省产学研项目(BY2016022-27); 江苏省先进纺织工程技术中心基金项目(XJFZ/2016/4); 纺织服装产业河南省协同创新项目(hnfx14002)

作者简介: 闫鑫鑫(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为功能纺织品。通信作者: 谢春萍, 教授, wxcp@vip.163.com。

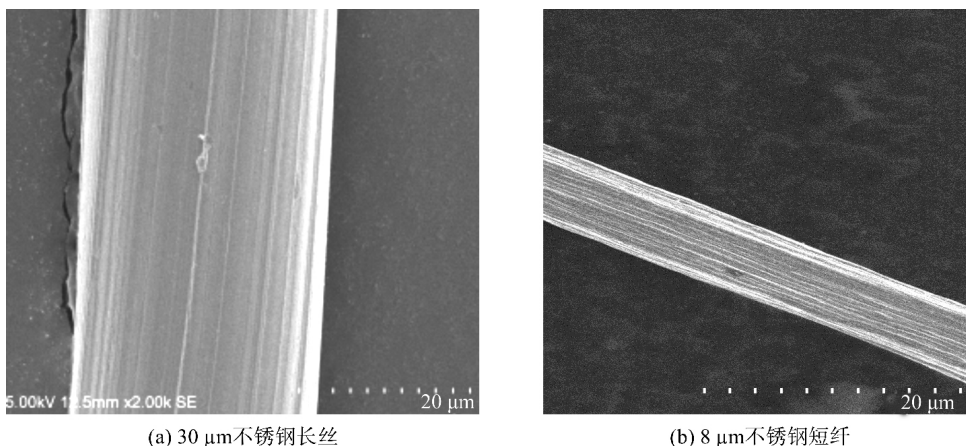
金属涂层织物,人们更多使用金属纤维与普通纤维混纺、包缠、交织等方法制成织物,其耐用性和屏蔽性能的持久性相对较好^[4]。其中,不锈钢金属纤维织物因其屏蔽效能持久而更多地受到人们的青睐^[5],因此对不锈钢金属纤维织物的深入研究尤为重要。对于机织物来说,不锈钢含量越多,纱线排列越紧密,其电磁屏蔽性能越好,但同时力学性能和服用性能也越差^[6]。为了进一步探究不锈钢织物的物理机械性能,本文采用三种不同结构的不锈钢纱线并制成织物,对比分析其电磁屏蔽及力学性能,并为防辐射纺织品的开发提供参考。

1 纱线及织物的制备

1.1 不锈钢短纤及长丝的选用

不锈钢长丝和不锈钢短纤分别采用直径为

30 μm 、8 μm 的 316 L 奥氏体不锈钢(上海普盛金银丝纺织品有限公司)。316 L 奥氏体不锈钢含有少量的碳元素,使其不易生锈,符合纺织品的要求。另外,其导电性、导磁性都比一般纺织材料高并且具有较高的熔点和良好的耐酸碱耐腐蚀性^[7]。因此采用 316 L 奥氏体不锈钢制成的功能性纺织品可延长其使用寿命。不锈钢长丝的制备是单丝拉伸法,不锈钢短纤则采用集束拉伸法,因此两者具有不同的表面特征。图 1 为不锈钢长丝和不锈钢短纤放大 2 000 倍的纵向电镜图。由图 1 可以看出,不锈钢长丝纵向表面平整光滑,而不锈钢短纤纵向呈现凹凸不平。这种结构上的不同在纺纱上表现为长丝与纤维之间抱合力差、成纱结构松散,外包纤维易滑脱;而短纤之间的沟槽增大了纤维之间的摩擦力,使其抱合紧密,易于成纱。



(a) 30 μm 不锈钢长丝

(b) 8 μm 不锈钢短纤

图 1 不锈钢纤维形态结构

Fig. 1 Stainless steel fiber structure

1.2 纱线的纺制及织物的织造

全聚赛络纺是紧密赛络纺的一种,是由江南大学自主研发的一种新型纺纱方法。其原理是:在普通三罗拉牵伸皮圈基础上,将前罗拉设计成直径为 50 mm 表面带窄槽的空心罗拉^[8]。本实验采用 QFA1528 型全聚纺细纱机(无锡第七纺织企业有限公司)纺制 28 tex T/S 80/20 混纺纱;在细纱机上将两根混合均匀的涤纶/不锈钢粗纱条平行喂入牵伸区,进行纺纱。为了尽可能控制单一变量,需要对 QFA1528 型全聚纺细纱机进行改造,然后纺制赛络包芯纱和赛络菲尔纱。细纱机的改造:在 QFA1528 型全聚纺细纱机上加装单槽导丝轮装置、长丝退绕装置和张力的盘装置,单槽导丝轮可以在摇架上左右移动,控制长丝喂入前罗拉位置^[9]。赛络包芯纱设

置外包纱线为涤纶,线密度为 28 tex,不锈钢长丝直径为 30 μm 。将两根涤纶粗纱平行喂入双喇叭口并控制喇叭口间距,长丝经过导丝轮和张力的装置在前喇叭口处和涤纶粗纱混合成纱。赛络菲尔纱的纺制:将一根涤纶粗纱喂入喇叭口并在前喇叭口处与经过张力的长丝汇合成纱。长丝采用径向退绕,消极喂入,纱线捻系数均为 390。

纱线的结构对织物的后道加工有着重要影响,图 2 为上述三种纱的成纱表面结构。由图 2 可以看出,赛络菲尔纱中不锈钢均匀缠绕在涤纶短纤的表面,成纱结构紧密;赛络包芯纱中不锈钢长丝位于纱线中间且无弯曲、扭转、漏芯,其表面被涤纶短纤包覆;全聚赛络纱中不锈钢短纤和涤纶短纤直径相差不大且不锈钢短纤的含量较少,因此在高倍显微镜



(a) 赛络菲尔纱纵截面

(b) 赛络包芯纱纵截面

(c) 全聚混纺纱纵截面

图 2 成纱表面结构

Fig. 2 Surface structure of the yarn

下观察两者区别不明显。分别测试三种纱的成纱强力、伸长和毛羽,如表 1 所示。由表 1 可以看出,三种纱线的成纱性能较好,均能达到织造要求。根据表 2 所示的工艺参数,采用全自动剑杆小样织机织制平纹和斜纹织物,并使用 YG141D 织物厚度仪、SZT-2A 四探针电阻测试仪测量织物厚度和织物表面电阻。

表 1 纱线基本性能

Tab. 1 Basic properties of yarn

纱线编号	纱线种类	强力/ cN	断裂伸长/ %	3 mm 以下 毛羽数
A	全聚赛络混纺纱	572.71	12.43	1 078.4
B	赛络菲尔纱	792.42	9.65	576.6
C	赛络包芯纱	708.15	9.36	834.7

表 2 织物基本参数

Tab. 2 Basic parameters of fabrics

样品编号	组织结构	经纱	纬纱	经纬密/(根·(10 cm) ⁻¹)	织物厚度/mm	织物总紧度/%	织物电阻/Ω
1 [#]	平纹	A	A	273.7 × 263.7	0.320	69.82	10 ⁸
2 [#]	平纹	B	B	273.7 × 263.7	0.335	69.82	10 ⁷
3 [#]	平纹	C	C	273.7 × 263.7	0.322	69.82	10 ⁷
4 [#]	一上三下斜纹	C	C	266.4 × 253.6	0.401	78.72	10 ⁷

1.3 测试仪器

实验所用仪器见表 3。

1.4 测试方法

温度为 20 ℃,相对湿度为(65 ± 2)%。屏蔽效能测试: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。由于样布的限制,本实验采用每块样布取 5 个不同位置的试样,分别

测试 5 次,取平均值。参考标准: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》。

拉伸性能测试:采用 HD026N⁺ 型织物电子强力仪测试织物的拉伸断裂强力。测试时,在织物的经纬向不同位置分别取 5 块样品进行测试,并取平均值作为测试结果。依据标准:GB/T 3923.1—2013《纺织品 织物拉伸性能 第一部分:断裂强力和断裂伸长率的测定(条样法)》。

表 3 实验所用仪器

Tab. 3 Experiment equipments

仪器名称	型号	生产厂家
织物厚度仪	YG141D 型	上海艾测电子科技有限公司
四探针电阻测试仪	SZT-2A 型	北京同德创业科技有限公司
矢量网络分析仪	Agilent E5061A 型	美国安捷伦科技有限公司
频谱分析仪	E5061A 型	美国安捷伦科技有限公司
网络衰减器	TS021A1 型	美国安捷伦科技有限公司
织物电子强力仪	HD026N ⁺ 型	南通宏大实验仪器有限公司
落锤式撕裂仪	YG033A 型	常州华纺纺织仪器有限公司
电子式织物顶破强力测试仪	HD026N ⁺ 型	南通宏大实验仪器有限公司

织物撕裂性能测试: YG033A 落锤式撕裂仪进行测试, 每种织物经纬向各测试5次, 读取测量结果并取平均值。

顶破性能测试: 采用 HD026N⁺ 型电子式织物顶破强力试验仪, 夹布圆环的内径为 2.5 cm, 弹子直径为 2 cm, 设置下降速度为 100 mm/min。每种织物经纬向各测试5次, 记录顶破强力并取平均值。

2 织物性能分析

2.1 织物的电磁屏蔽效能

2.1.1 频率对织物电磁屏蔽效能的影响

手机、电视等家用电子产品的频率一般在 0 ~ 1 500 MHz, 故本实验以 200、400、600、800、1 000、1 200、1 400 MHz 为测试频点, 对四种织物的电磁屏蔽效能进行测试, 测试结果如图 3 所示。

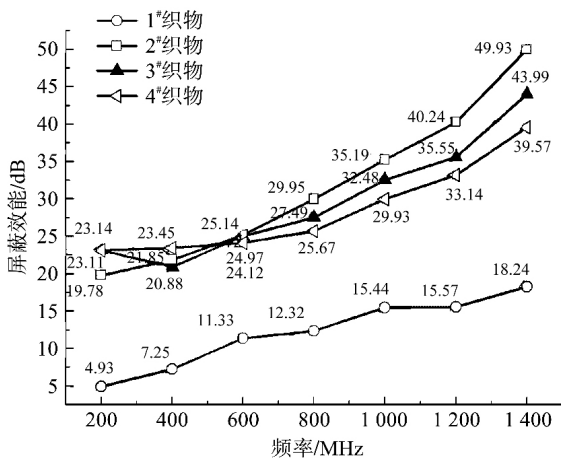


图3 不同纱线结构织物的屏蔽效能

Fig. 3 Electromagnetic shielding effectiveness of fabrics with different yarn structures

对比图 3 中的数据可以发现, 随着电磁波频率的增加, 四种织物的电磁屏蔽效能均呈上升趋势, 且趋势较为明显; 1# 织物在 200 ~ 600 MHz 时, 其屏蔽效能只有 5 dB 左右, 处在较低的水平; 而在 800 MHz 时, 四种织物屏蔽效均达到 10 dB 以上, 屏蔽效率大于 67%, 满足屏蔽织物日常需求。在低频时, 织物的电磁屏蔽主要以反射为主, 吸收为辅^[10]。以 1# 织物为例, 为了便于计算, 把 1# 电磁屏蔽机织物看成金属屏蔽网, 由金属丝网屏蔽理论可求得织物在 400 MHz 和 1 200 MHz 的理论反射损耗和理论吸收损耗。反射损耗与电磁波频率有关, 吸收损耗与织物形成的孔径大小有关。

$$S = A + R \quad (1)$$

$$A = 27.3 \frac{d}{w} \quad (2)$$

$$R = 20 \lg\left(\frac{1 + 4K^2}{4K}\right) \quad (3)$$

式中: S 表示理论电磁屏蔽效能, dB; A 表示吸收损耗, dB; d 表示孔的深度(织物的厚度), cm; w 表示矩形孔的宽边长度, cm; R 表示织物的反射损耗, dB; $K = 6.69 \times 10^{-3} fw$; f 表示电磁波的频率, MHz。

矩形孔的宽边长度可以通过纬密和纱线密度求出。通过计算可得, 当电磁波频率为 400 MHz 时, 1# 织物的理论吸收损耗为 9.1 dB, 反射损耗为 9.24 dB; 当电磁波频率为 1 200 MHz 时, 1# 织物的理论吸收损耗为 9.1 dB, 反射损耗为 18.01 dB。由图 3 可以看出, 在 1 200 MHz 时, 织物的电磁屏蔽效能有所提高, 但理论计算值高于实际测量值。这是因为假设的金属网是均匀的, 而织物中不锈钢短纤分布较为分散, 形成的金属网格比理论值大且不均匀。由孔隙导磁理论可知, 单位面积内, 孔隙越大, 屏蔽效能越差。

2.1.2 纱线结构对织物屏蔽效能的影响

根据波导理论可知, 屏蔽纤维的电导率、磁导率及纤维的连续性等均影响织物的屏蔽效能^[11]。屏蔽纤维连续性越好, 织物屏蔽效能越高。同时, 经纬向均有不锈钢纤维的织物其屏蔽效能高于单向含有不锈钢纤维的织物。屏蔽织物屏蔽性能的好坏通常用屏蔽效能 SE 表示, 即在相同检测环境下, 未屏蔽时的电场强度 E_0 与屏蔽后的电场强度 E 的比值的分贝值, 表示为 $SE = 10 \lg(E_0/E)$ 。

由图 3 可以看出, 2# 织物和 3# 织物屏蔽效能相差不多, 而 1# 织物在 600 ~ 1 500 MHz 频段内, 相比 2# 和 3# 织物屏蔽效能低 10 dB 左右。这主要有两个方面的原因: 其一, 全聚混纺纱中, 不锈钢以非连续的形式存在于纱体中, 电阻率高、质量不均匀率大、纤维分布不均匀, 使得纱线沿轴向方向缺乏有效的电连续, 因此在一定频段内, 全聚混纺纱的导电纤维利用率较低, 导致屏蔽效能较低。其二, 当把织物看做有孔的屏蔽体时, 此时织物就相当于有孔的金属板, 金属板上的每一个孔或缝都相当于一个波导。根据波导理论可知: 线径越大, 波导截止频率越小, 当达到截止频率时, 则无屏蔽性能^[12]。赛络菲尔纱织物中不锈钢长丝缠绕在涤纶纤维的外侧, 形成的孔隙大于赛络包芯纱织物, 所以赛络菲尔纱织物的屏蔽效能更容易衰减。

2.2 织物的力学性能

四种织物的拉伸断裂性能测试结果如表 4 所示。由表 4 可以看出 2# 织物的强力最高, 3#、4# 织物强力相差不大, 1# 织物强力最低。

表 4 织物的力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of fabrics

织物	断裂强力/N		断裂伸长/%		撕裂强力/N		顶破强力/N	
	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向	经向	纬向
1#	709	647.7	16.74	13.67	32	30	860	815
2#	946	910.0	13.49	13.23	56	54	1 051	1 011
3#	847	833.0	12.88	11.09	53	52	976	900
4#	813	810.0	13.34	12.12	50	48	942	923

影响织物强力的主要因素有纤维的原料、成纱结构和织造的方式。由于 1#、2#、3# 织物原料相同、织造工艺相同, 故本实验中影响拉伸性能的主要因素为成纱结构。A 纱线中不锈钢短纤分布不均匀, 且与涤纶纤维的抱合力差, 导致织物经纬向薄弱环节较多, 在拉伸时纤维间易产生滑移; B 纱线, 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; C 纱线, 不锈钢长丝的加入会破坏纤维之间的抱合力, 使纱线强力稍有降低, 但幅度不大。2# 和 3#、4# 织物的断裂伸长率相差不大。由拉伸理论可知, 在拉伸时位于织物边缘的纱线首先由屈曲变为伸长, 随着拉伸力的增加, 此时织物的伸长主要是纱线和纤维的伸长与变细。对于 1# 织物原料为不锈钢短纤和涤纶短纤, 当织物受到拉伸时, 边缘纱线首先被拉断, 纤维抽拔滑移, 织物再次伸长, 不锈钢短纤的加入, 使得纱线间的抱合力降低, 伸长增加, 而不锈钢长丝的加入对 2# 和 3# 织物的拉伸影响不大。

综上 2# 织物的断裂强力、撕裂强力、顶破强力均为四种织物之最, 说明其耐用性最好; 断裂伸长与织物的弹性、风格、抗皱性、悬垂性等服用性能都有一定的关系, 2# 织物的断裂伸长在四种织物中居于中间, 则在一定程度上表明其同类织物中可能不易变形折皱。

2.3 纱线强力利用率

纱线强力利用率是影响纱线及其织物强度的重要因素。名义纤维强度是指商品上标签标注的纤维断裂强度, 假设纱线断裂时, 纱中的每根纤维同时达到断裂极限, 此时的断裂强力为纱线或织物的名义断裂强力^[13]。已知不锈钢短纤的密度为 7.9 g/cm³, 涤纶纤维的密度为 1.38 g/cm³, 分别测得三种纱线 A、B、C 的强力为 572.71、792.42、708.15 cN。可分

别求得纱线的断裂强度 P_0 和横截面积 S :

$$S = \frac{m}{\rho l} \quad (4)$$

$$P_0 = \frac{F}{S} \quad (5)$$

$$F_{\text{名}} = P_0 \times S_1 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{F_{\text{实}}}{F_{\text{名}}} \quad (7)$$

式中: F 表示纱线强力, N; m 表示纱线或织物的质量, g; ρ 表示纤维密度, g/cm³; l 表示纱线或织物的长度, cm; S_1 表示织物的横截面积, mm²; γ 表示纱线强力利用率; $F_{\text{实}}$ 表示织物的实测断裂强力, N; $F_{\text{名}}$ 表示织物的名义断裂强力, N。 γ 反映了织物在承受拉力断裂时, 织物中纱线断裂的同时性^[10]。

表 5 归纳出四种织物中纱线强力利用率。其中 γ 值越大, 表示织物在拉断时, 同时断裂的纱线越多, γ 值越小, 表示同时断裂的纱线数越少。

表 5 纱线利用率

Tab. 5 Yarn utilization ratio

样品	S_1/mm^2	$F_{\text{名}}/\text{N}$	$F_{\text{实}}/\text{N}$	γ
1#	1.421 3	781.74	647.70	0.83
2#	1.393 4	1 061.84	946.00	0.89
3#	1.403 8	956.00	847.13	0.88
4#	1.382 7	941.64	813.15	0.86

由表 5 可以清晰地看出, 织物对纱线的利用率情况 2# 织物纱线利用率最高, 为 89%, 故相同原料和织造情况下 2# 织物强力最高。对 2# 织物分析, 不锈钢长丝均匀地缠绕在涤纶纤维的外部, 使得成纱更加紧密, 纤维之间接触面积大, 摩擦力增加, 拉伸时纤维之间不易滑移, 故强力利用率偏高。对比 3# 织物和 4# 织物, 可以看出平纹织物纱线利用率比斜纹织物高, 这是因为平纹织物交织点多, 浮长短, 纱线间的摩擦力大, 在经向拉断时, 纱线断裂的同时性有所提高, 而斜纹织物浮长长, 经纬纱线间的摩擦相对较小, 故纱线利用率低。

3 结 论

1) 在 QFA1528 型全聚纺细纱机上纺制三种纱线, 其中赛络菲尔纱因其独特的成纱结构即长丝包缠在短纤纱的外面, 使得纱线毛羽最少, 强力最高, 但三种纱线性能均能满足织造要求。四种织物中, 赛络菲尔纱织物的拉伸强力、顶破强力、撕裂强力居四种织物之最, 并理论分析得出赛络菲尔纱织物对

纱线的利用率最高。

2) 在0~1500 MHz内,织物的电磁屏蔽以反射为主,吸收为辅。赛络菲尔纱织物在400 MHz时,电磁波的理论吸收损耗为9.1 dB,理论反射损耗为9.24 dB;1200 MHz时,理论吸收损耗为9.1 dB,反射损耗为18.01 dB。全聚纱织物由于纱中不锈钢纤维的不连续使得其织物的屏蔽效能较赛络菲尔纱织物和赛络包芯纱织物屏蔽性能稍低。

3) 综合考虑织物的力学性能和屏蔽性能,赛络菲尔纱织物最好,赛络包芯纱织物次之,全聚混纺纱织物最差。

参考文献:

[1] 王俊斌. 防辐射服装的发展与现状[J]. 中国高新技术企业, 2009(1): 14-22.
WANG Junbin. Development and status of radiation protection clothing [J]. Chinese Hi-tech Enterprises, 2009(1): 14-22.

[2] 程岚. 复合结构电磁屏蔽织物的设计及其性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
CHENG Lan. Composite Structure of Electromagnetic Shielding Fabric Design and Performance [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.

[3] 王炜, 朱美芳, 李成新, 等. 一种配位自组装技术高分子负载型活化膜的制备方法: CN 101205687 [P]. 2008-06-25.
WANG Wei, ZHU Meifang, LI Chengxin, et al. A self-assembly technique of polymer supported activated carbon membrane preparation method: CN 101205687 [P]. 2008-06-25.

[4] 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.

[5] 厉红英, 施瑜, 郑瑾. 两种防辐射面料的性能研究[J]. 上海纺织科技, 2017, 45(7): 35-37.
LI Hongying, SHI Yu, ZHENG Jin. Performance of two kinds of radiation-resistant fabrics [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2017, 45(7): 35-37.

[6] 严春. 不锈钢纤维混纺面料服用性能与评价研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
YAN Chun. Study on the Serviceability and Evaluation of

Stainless Steel Fiber Blended Fabric [D]. Shanghai: Donghua University, 2014.

[7] 张文彦. 奥氏体不锈钢纤维微观结构与物性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
ZHANG Wenyan. Research on the Stainless Steel Fiber is Change of Microstructure and Physical Properties [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.

[8] 谢春萍, 高卫东, 刘新金, 等. 一种新型窄槽式负压空心罗拉全聚纺系统[J]. 纺织学报, 2013, 34(6): 137-141.
XIE Chunping, GAO Weidong, LIU Xinjin, et al. Novel complete condensing spinning system with strip groove structure [J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(6): 137-141.

[9] 曹梦龙, 徐伯俊, 谢春萍, 等. 基于 sirofil-spun 新型花式纱的纺制及性能分析[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.

[10] CHEN H C, LEE K C, LIN J H, et al. Fabrication of conductive woven fabric and analysis of electromagnetic shielding via measurement and empirical equation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184: 124-130.

[11] 张加东, 赵银昌, 张晓玲, 等. Schelkunoff 原理及其应用示例[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2013, 26(3): 187-189.
ZHANG Jiadong, ZHAO Yinchang, ZHANG Xiaoling, et al. Schelkunoff theorem and application example [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2013, 26(3): 187-189.

[12] 王建忠, 奚正平, 汤慧萍, 等. 不锈钢纤维织物电磁屏蔽效能的研究现状[J]. 材料导报, 2012, 26(10): 33-35.
WANG Jianzhong, XI Zhengping, TANG Huiping, et al. Research progress of electromagnetic shielding effectiveness of stainless steel fabric [J]. Materials Review, 2012, 26(10): 33-35.

[13] 梁双强, 陈革, 万德军, 等. 二维三轴编织扁带及其织物的力学性能分析[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(3): 7-11.
LIANG Shuangqiang, CHEN Ge, WAN Dejun, et al. Study on the mechanical properties of two-dimensional triaxial braided flat tapes and their fabrics [J]. Technical Textiles, 2017, 35(3): 7-11.