



电磁屏蔽用罗纹导电针织物的设计及性能分析

王金凤, 张 勇

(浙江理工大学材料与纺织学院、丝绸学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了探究不锈钢导电针织各组织结构的电磁屏蔽效果, 采用纯棉纱与不锈钢丝分别编织 1+1 罗纹组织、2+2 罗纹组织、畦编组织、罗纹空气层组织和罗纹半空气层组织, 测试并分析各组织的导电性及电磁屏蔽效果, 结果表明: 双层畦编组织的电磁屏蔽效果相对最优。为了探究如何得到电磁屏蔽效果高的组织组合, 利用 Eviews 软件对数据进行处理, 选用多元线性回归模型对数据进行拟合, 分析不同组织复合后的电磁屏蔽效果与各基础组织电磁屏蔽效果间的联系, 并通过拟合后方程系数的大小关系, 来判断原组织对复合后组织的影响程度, 结果表明: 复合织物的电磁屏蔽效果与各组成部分织物的电磁屏蔽效果线性相关。

关键词: 电磁屏蔽; 不锈钢丝; 罗纹导电针织物; 多元线性回归模型

中图分类号: TS184.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)09-0551-09

Design and performance analysis of ribbed conductive knitted fabric for electromagnetic shielding

WANG Jinfeng, ZHANG Yong

(Silk Institute, College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to explore the electromagnetic shielding effect of various knitting structures of stainless steel conductive knitted fabric, the cotton yarn and stainless steel wire were used respectively to knit 1+1 rib, 2+2 rib, full cardigan stitch, ribbed air layer fabric and ribbed semi-airlayer fabric. Besides, the conductivity and electromagnetic shielding effect of each fabric were tested and analyzed. It is concluded that the electromagnetic shielding effect of the double-layer full cardigan stitch is relatively optimal. In order to explore how to obtain the combination of high electromagnetic shielding effect, the data were processed by Eviews, and the multiple linear regression model was used to fit the data to investigate the relationship between electromagnetic shielding effect of different fabrics and each basic fabric. The influence of original weave on composite weave was judged by the fitted equation coefficient. The results show that the electromagnetic shielding effect of the composite fabric is linearly related to the electromagnetic shielding effect of each component.

Key words: electromagnetic shielding; stainless steel wire; ribbed conductive knitted fabric; multiple linear regression model

收稿日期: 2018-11-20 网络出版日期: 2019-05-06

基金项目: 纺织科学与工程浙江省重中之重一级学科开放基金项目(2014KF03); 浙江理工大学科研启动基金项目(1402003-Y); “纺织纤维材料与加工技术”国家地方联合工程实验室“纺织科学与工程”重中之重一级学科(浙江理工大学)优秀博士专项项目(2014YBZX0)

作者简介: 王金凤(1986—), 女, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要从事智能纺织品方面的研究。

电磁辐射是继水、空气和噪音污染后的又一大污染源,自然型电磁污染源与人工型电磁污染源产生的电磁辐射,会对人和动物的神经系统、免疫系统造成损伤^[1]。电磁波可导致前三个月的胎儿肢体残缺或畸形,四到六个月之间的智力受损、甚至痴呆,六个月以后的免疫力低下^[2]。电磁辐射存在于生活的每一个角落,电脑、微波炉等生活中常用的电器都是电磁波的生产源。因此,易感人群(孕妇、老人、儿童、抵抗力较低的人群及经常处于电磁辐射区域的白领等)需要电磁屏蔽服,常用的是金属纤维和镀银纤维两种材料。电磁屏蔽织物是具有质量轻、柔软和较好力学性能的屏蔽材料,且具有结构可控、编织灵活、轻柔耐洗涤等特点^[3]。

国内电磁屏蔽织物的研究起步较晚,20世纪60年代开始研究,70—80年代成功通过混纺工艺,运用铜丝与柞蚕丝两种原料制备出电磁屏蔽服^[4];直到90年代中期,电磁屏蔽织物慢慢进入大众视线;目前,我国已成功研制出很多新型的电磁屏蔽织物^[5-7]。国外对电磁屏蔽织物的研究比国内要早几十年,在20世纪30年代开始进行防护服装的制备;早期因为技术不成熟,面料比较厚重,成本比较高,屏蔽效率差,主要局限于从事雷达、微波通讯等电磁辐射较多的行业工作人员使用^[8]。随着生活水平的提高,人们对电磁屏蔽面料的要求也越来越高,对电磁屏蔽面料的研究逐渐向轻薄柔软、安全与多功能性方向发展。Chen等^[9-10]利用铜纤维与涤纶纤维等混纺制备电磁屏蔽织物,在30~1000 MHz频率范围内,可实现30 dB以上的屏蔽效果。

当前市面上大多数的电磁屏蔽织物都是机织类涂层和复合织物^[11-12],涂层织物的电磁屏蔽效果会随洗涤次数的增加而减弱;复合织物相对厚重,日常穿着舒适性较差;相对于其他类型织物而言,针织物工艺流程短、原料适应性强、可以一次成型、产品用途广泛、生产加工过程中噪音小,且针织物由于其线圈结构,伸缩性、柔软性等都比机织物好,穿着相对舒适。

电磁屏蔽材料的电磁屏蔽效能值越大,则电磁屏蔽效果越好。屏蔽效能在30 dB以下,表明屏蔽效果差;屏蔽效能在30~60 dB,表明屏蔽效果中等,可用于工业电子设备;屏蔽效能在60~90 dB之间,表明屏蔽效果良好,可用于航天、军用电子设备;屏蔽效能在90 dB以上,则表明屏蔽效果优秀,可用于高精尖仪器^[13]。电磁屏蔽服装的研究主要集中

于纤维和面料的开发与应用,其电磁屏蔽织物的屏蔽效能与织物的各项参数相关。厚度、紧度和密度等宏观因素均对电磁屏蔽效能产生影响,且其影响具有正相关性^[14-17]:a)厚度:由于电磁波在进入较厚的屏蔽织物后,内部各界面会发生更多的反射,从而损耗的电磁波能量更多;b)紧度:纱线排列越紧密,孔径越小,会使得孔径的偶极作用越小,从而会提高屏蔽效果^[18];c)密度:纱线支数越小,织成的织物相对厚实,从而会提高屏蔽效果^[19]。导电纤维的空间分布、导电纤维的占比等都会对织物屏蔽效能产生影响^[20]。在一定范围内,提高导电纤维含量,反射波的比例增加,织物的电磁屏蔽性能会相应提升。防辐射纤维的改良和生产制备技术的改进等是提高电磁屏蔽效果的重要手段^[21-22],通过技术改进,提高材料的导电率和导磁率,并且增加织物面料厚度^[23-24],可以促进电磁波的衰减,提高织物的屏蔽效果。

本文采用纯棉纱与不锈钢丝分别编织1+1罗纹组织、2+2罗纹组织、畦编组织、罗纹空气层组织和罗纹半空气层组织,测试并分析各组织的导电性及电磁屏蔽效果,并利用Eviews对数据进行处理,选用多元线性回归模型对数据进行拟合,获得电磁屏蔽效果高的组织组合及不同组织复合后的电磁屏蔽效果与各基础组织电磁屏蔽效果间的联系。

1 实验部分

1.1 原料及织物选择

不锈钢纤维是一种直径在10 μm 以下的软态新型工业材料^[25],属于纯金属纤维,密度在约为8.0 g/m^3 ,8 μm 的不锈钢纤维强力超过2.9 cN。本文选择20 S/3纯棉纱以及不锈钢长丝用横机共编织五种常用的罗纹组织,分别为1+1罗纹组织、2+2罗纹组织、畦编组织、罗纹空气层组织和罗纹半空气层组织,这5种常用罗纹组织线圈结构示意图和编织示意如图1所示。在编织过程中,1+1罗纹组织、畦编组织和罗纹半空气层组织的编织都较为容易,2+2罗纹组织和罗纹空气层组织的编织最难。2+2罗纹组织编织较为困难是由于容易出现漏针或不能正常退圈,尤其是在织物的边缘处;罗纹空气层组织编织较为困难,是由于在编织过程中,经常需要关闭和打开起针三角,但其断纱或漏针现象不明显。

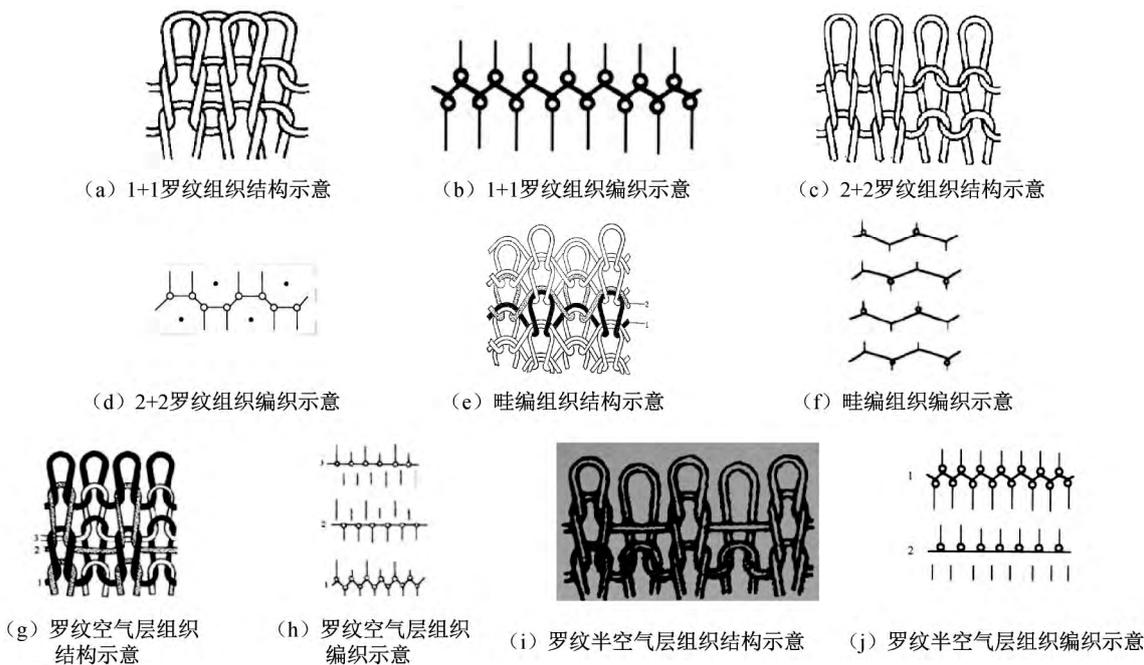


图 1 5 种常用的罗纹组织结构示意图和编织示意图

1.2 罗纹组织织物密度

在一定条件下,织物的密度越大,织物的空隙等

越小,电磁屏蔽效果越好,各罗纹组织织物密度具体数据如表 1 所示。

表 1 各罗纹组织密度

组织密度	组织结构				
	罗纹空气层组织	罗纹半空气层组织	2+2 罗纹组织	满针罗纹组织	畦编组织
横密/(个·10 cm ⁻¹)	52	30	48	30	42
纵密/(个·10 cm ⁻¹)	52	62	80	72	54

1.3 导电性能测试

由于线圈的空间配置等原因,线圈横列方向的电阻测量值与线圈纵行方向的电阻测量数据存在较大的差异,将待测织物四个角分别标注为 A、B、C 和 D 四个点,当要测 AC 与 BD 间的电阻时,可以利用万用表的 4 个夹子依次夹住 A、B、C 和 D 四个点,并将 A、C 点的夹子夹在一个表头上,B 和 D 点的夹子夹在一个表头上。对于各个组织,分别纵向选取三个 4 cm×4 cm 的区域,对于每一个区域依次统计线圈纵行方向和线圈横列方向上 1、2、3 cm 和 4 cm 内线圈个数。

1.4 电磁屏蔽效能测试

运用 FY800 织物防电磁辐射测试仪(三思机电科技有限公司,南通)进行测量,测试 5 种单层罗纹织物、5 种双层罗纹织物以及 5 种随机复合罗纹织物共计 15 种电磁屏蔽效能情况;并测试 5 种单层罗纹织物及 4 种随机复合罗纹织物洗涤前后电磁屏蔽效能情况。

1.5 洗涤方法

将各个组织和陪洗物放入洗衣机,陪洗物的量根据规定的重量而确定,加入适量的洗涤剂,以便获

得良好的搅拌泡沫;在洗涤过程中,水的温度保持在 40 ℃,洗涤的时间为每次 8 min。在冲洗的过程中,用冷水满水位冲洗,采取柔和的方式脱水。当完成最后一次脱水后,不进行拉伸或绞拧,而是将各组织从洗衣机中拿出,直接挂在绳上晾干。

2 结果与讨论

2.1 罗纹组织织物导电性能分析

罗纹组织织物的电阻测试数据如表 2 所示。由表 2 可知,沿织物的纵向方向和横向方向,各织物的电阻大致随着所测区域长度的增加而增加,且通过对不同组织间的对比可知,畦编组织和罗纹空气层组织的电阻相对较小,其他三种织物的电阻则相对较大。沿织物的横向方向,织物电阻可认为每个线圈纱段电阻串联,各织物的电阻随长度的增加而增加;沿织物的纵向方向,织物电阻可认为每个线圈纱段电阻并联和串联的电路网,受线圈横列数和纱段电阻的综合影响,因此各织物的电阻随长度的增加而略有增加。由畦编组织的线圈结构中的每个线圈处都有一个未封闭的悬弧,每个线圈单元的电阻均

为线圈和悬弧电阻并联^[26-28],单位面积电阻会相对更小;罗纹空气层组织线圈结构中的某些区域具有

两层组织,可看成是两块织物叠起来,两块电阻并联,从而使待测织物的电阻变小。

表2 各组织织物的电阻

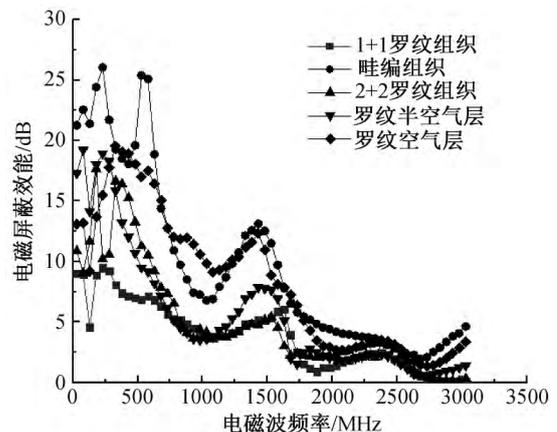
Ω

组织类型	序号	区域一长度/cm				区域二长度/cm				区域三长度/cm			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
罗纹空气层组织	1	17.2	21.2	23.9	44.7	16.7	19.6	19.5	30.2	19.5	21.0	32.4	33.0
	2	17.0	21.4	27.2	33.5	18.7	19.6	23.6	35.6	19.1	26.8	35.2	50.3
	3	17.2	24.9	30.4	39.2	19.6	19.6	28.2	32.3	20.4	26.9	35.8	60.4
	4	17.0	21.1	30.2	52.3	32.2	21.9	30.5	44.2	17.6	24.1	23.1	64.8
1+1罗纹组织	1	13.0	33.5	41.3	60.1	22.1	30.9	51.9	68.3	11.8	32.8	46.3	56.4
	2	16.9	34.2	55.4	83.3	16.5	23.3	61.0	76.3	12.8	30.4	45.7	64.3
	3	17.3	34.5	46.2	84.3	17.1	34.3	57.3	76.2	14.2	38.6	50.3	69.0
	4	17.4	33.9	53.1	70.7	18.6	25.6	63.1	89.2	17.2	39.7	65.2	78.1
2+2罗纹组织	1	6.9	19.8	32.5	146.0	16.8	31.3	41.8	85.3	12.4	37.8	75.0	123.0
	2	12.4	27.0	38.8	155.0	17.4	34.4	57.2	93.2	12.7	38.8	131.0	671.0
	3	15.2	29.6	47.2	321.0	24.5	43.7	53.6	105.7	16.6	42.2	82.0	1848.0
	4	21.5	23.0	49.8	526.0	28.3	41.4	58.1	138.4	15.2	43.8	153.0	1650.0
畦编组织	1	7.2	32.5	28.1	38.6	11.2	32.3	60.2	43.2	9.2	17.9	23.9	25.7
	2	10.8	31.8	32.6	84.3	11.5	33.1	87.3	77.1	10.1	22.7	24.8	21.0
	3	12.7	23.7	37.5	51.6	14.6	30.1	115.4	178.9	10.8	23.1	26.6	26.6
	4	13.9	40.1	43.6	54.7	16.0	40.2	124.5	175.6	10.5	15.2	27.2	33.4
罗纹半空气层组织	1	32.8	38.9	35.6	56.1	24.9	40.9	44.0	52.2	22.2	36.7	66.4	79.8
	2	33.7	30.5	63.7	57.0	21.6	39.0	60.5	59.8	23.8	44.3	62.5	80.4
	3	29.3	32.5	72.3	54.1	25.4	41.3	39.1	69.0	24.8	42.0	69.6	108.0
	4	34.8	32.9	66.6	62.0	27.4	35.6	62.8	53.4	27.9	45.8	37.7	70.9

2.2 电磁屏蔽性能分析

织物不同复合情况下其电磁屏蔽效果不同,为了提高可比性,分别按照单一组织,双层织物以及复合织物三类作曲线图,结果如图2所示。图2表明,不同组织间电磁屏蔽效果差距很大,但无论单一组织或双层组织,其电磁屏蔽效果都会随着电磁波频率的增加而呈现减小的趋势。电磁波频率小于1000 MHz,织物的电磁屏蔽效能相对较好。对于双层畦编组织和双层罗纹空气层组织,当电磁波小于1000 MHz时, S_{SE} 的值基本都在20 dB以上,可有效屏蔽90%以上的电磁波;当电磁波频率小于500 MHz时, S_{SE} 的值基本在30 dB以上,即可屏蔽95%以上的电磁波。当采用基础组织进行编织时,电磁屏蔽效果并不理想。5个组织中,电磁屏蔽相对较好的是畦编组织和罗纹空气层组织,而畦编组织和罗纹空气层组织的电阻相对较小,进一步证实织物的导电性与电磁屏蔽效能具有正相关性;畦编组织和罗纹空气层组织在所测5种组织织物中结构紧密,透过的电磁波相对较少,被反射或内部吸收的电磁波比例大,故电磁屏蔽效能也相应大;双层织物的电磁屏蔽效果会显著增加,在大部分区间内,会比

构成其的任意组织的电磁屏蔽效能都好。在两个基础组织屏蔽效能都大的波段,其电磁屏蔽效能也大,反之,在这两个屏蔽效能都小的波段,其电磁屏蔽效能也相对较差。对于双层织物电磁屏蔽效能的增加,可能与厚度变化有关;当厚度增加时,透射波所经过的路径变大,吸收的电磁波会增加。相对于单层织物而言,双层织物间也会存在一定的电磁波反射现象,也会增加电磁屏蔽的效果。在双层织物中,电磁屏蔽效果最好的是双层畦编组织,其原因可能与畦编组织织物结构相对较为紧密有关。



(a) 单层电磁屏蔽

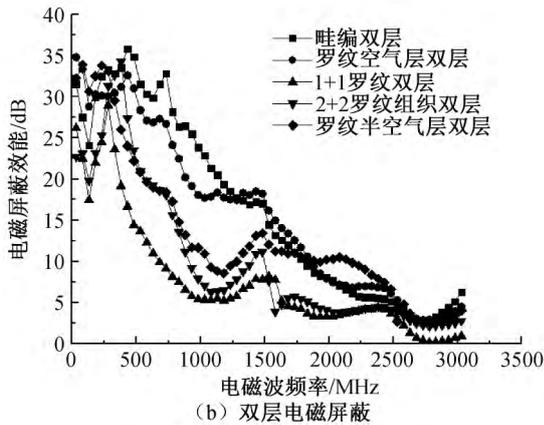


图 2 5 种织物电磁屏蔽效果图

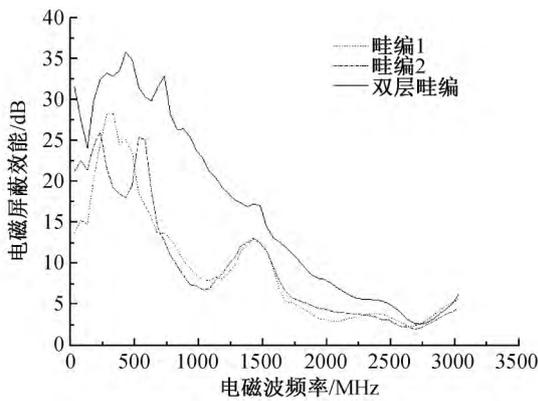


图 3 双层畦编组织织物与构成的单层织物电磁屏蔽效果对比

由于畦编组织和罗纹空气层组织的电磁屏蔽效果最好,将其相互复合,并与双层织物的电磁屏蔽效果对比,结果如图 5 所示。图 5 表明,对于复合织物而言,其与双层织物一样,在大部分区间内,电磁屏蔽效果会比构成其的任意一块组织的电磁屏蔽效果都好;当电磁波频率小于 1000 MHz 时,复合织物电磁屏蔽效能小于任意双层织物;当电磁波频率大于 1000 MHz 时,复合织物电磁屏蔽效能与双层畦编

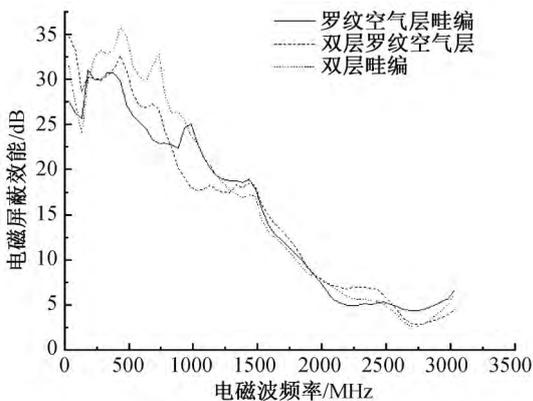


图 5 双层罗纹空气层组织、双层畦编组织以及复合后组织三者电磁屏蔽效果对比

由于电磁屏蔽效能相对较好的是畦编组织和罗纹空气层组织,双层织物与组成其的单层织物电磁屏蔽效能曲线如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,双层织物的电磁屏蔽曲线与其构成的单层织物电磁屏蔽曲线形状近似一致,曲线为单层织物曲线近似向上平移,并且电磁波频率为 500~1500 MHz 期间,双层织物较单层织物电磁屏蔽效能曲线更圆滑,屏蔽效能提高更多。因为 300~3000 MHz 为分米波段,可用于小容量微波中继通信、对流层散射通信、中容量微波通信及移动通信^[29]。以上结果表明,可以采用双层织物复合来提高织物的电磁屏蔽效果。

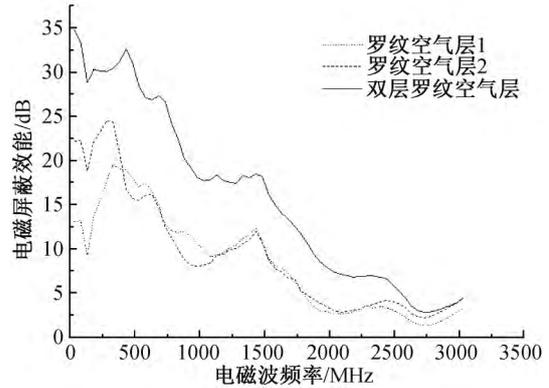


图 4 双层罗纹空气层组织织物与构成的单层织物电磁屏蔽效果对比

组织织物基本相同,并且电磁屏蔽效能曲线波动较小。

本文选取 5 种罗纹织物进行随机复合,进行电磁屏蔽效能的测试,结果图 6 所示。由图 6 可知,随着织物层数的增加以及织物间的复合,当电磁波频率小于 700 MHz 时,罗纹半空气层组织与畦编组织复合的织物电磁屏蔽效能最好;当电磁波频率大于 700 MHz 时,罗纹空气层组织与畦编组织复合复合织物电磁屏蔽效能最好。

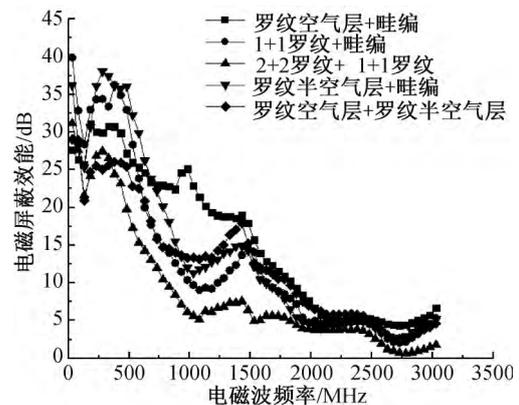


图 6 5 种组织复合的电磁屏蔽效果图

2.3 洗涤对电磁屏蔽效能的影响

为了实现数据的对比,本文选取5种组织单层织物洗涤前后屏蔽效能进行对比,结果如图7所示。图7表明,当电磁波频率小于1500 MHz时,经过20次的洗涤实验后,5种常用的罗纹组织织物电磁屏蔽效果比未洗涤时好;当电磁波频率大于1500 MHz时,洗涤前后织物的电磁屏蔽效果差异不明

显;洗涤前后2+2罗纹组织电磁屏蔽效果差异最大,罗纹半空气层组织、罗纹空气层组织和畦编组织基本不变。洗涤前当电磁波频率小于700 MHz时,罗纹半空气层组织与畦编组织复合的织物电磁屏蔽效能最好;当电磁波频率大于700 MHz时,罗纹空气层组织与畦编组织复合织物电磁屏蔽效能最好,故将其洗涤前后的电磁屏蔽效果进行分析。

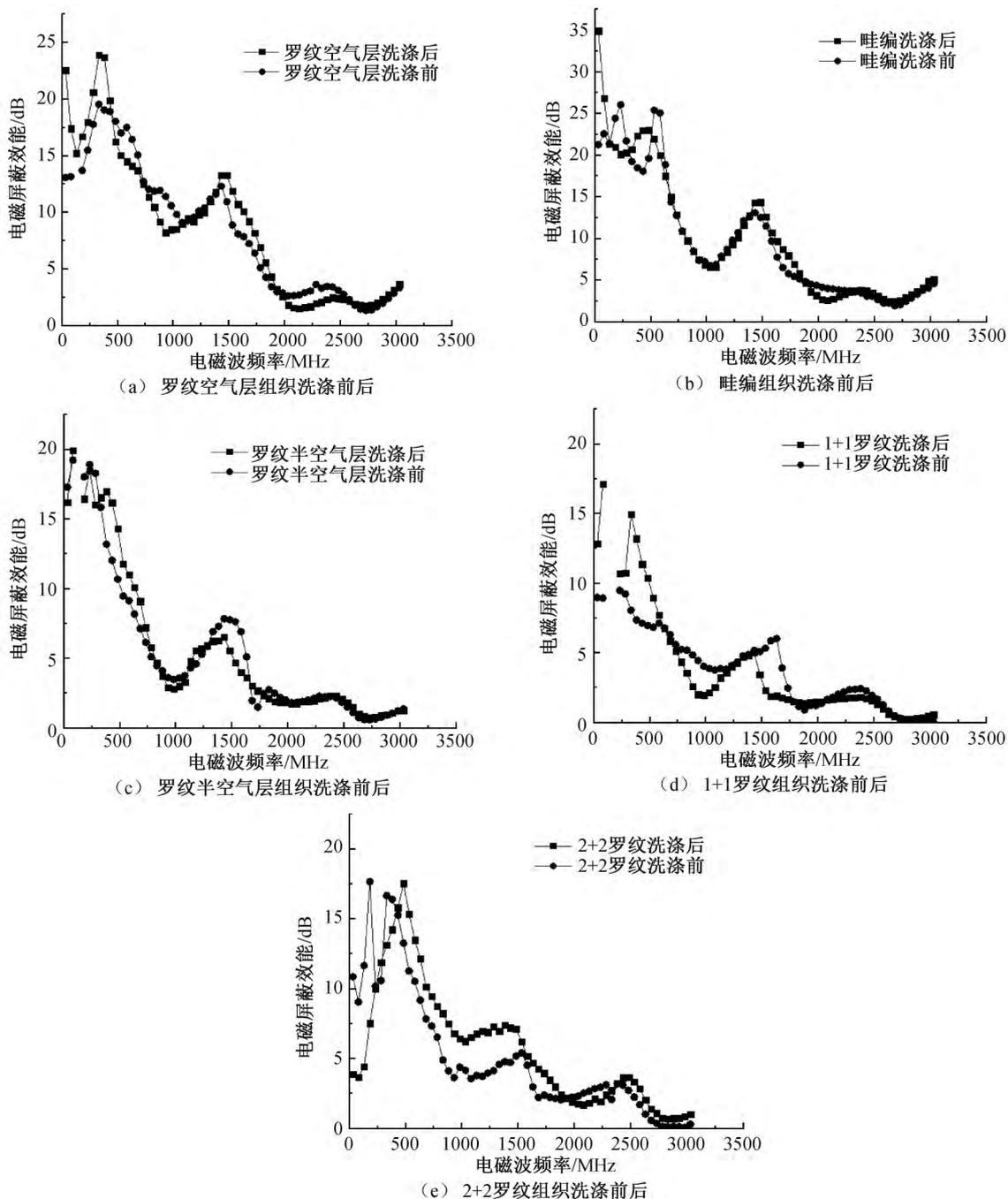


图7 5种常用的罗纹组织洗涤前后电磁屏蔽效能对比图

4种罗纹组织复合织物洗涤前后对电磁屏蔽效能的影响如图8所示。图8表明,经过20次的洗涤实验后,4种罗纹组织复合织物电磁屏蔽

效果差异不明显,除少量电磁波频率范围内其电磁屏蔽效果略微有减弱外,电磁屏蔽效果有增加的趋势。

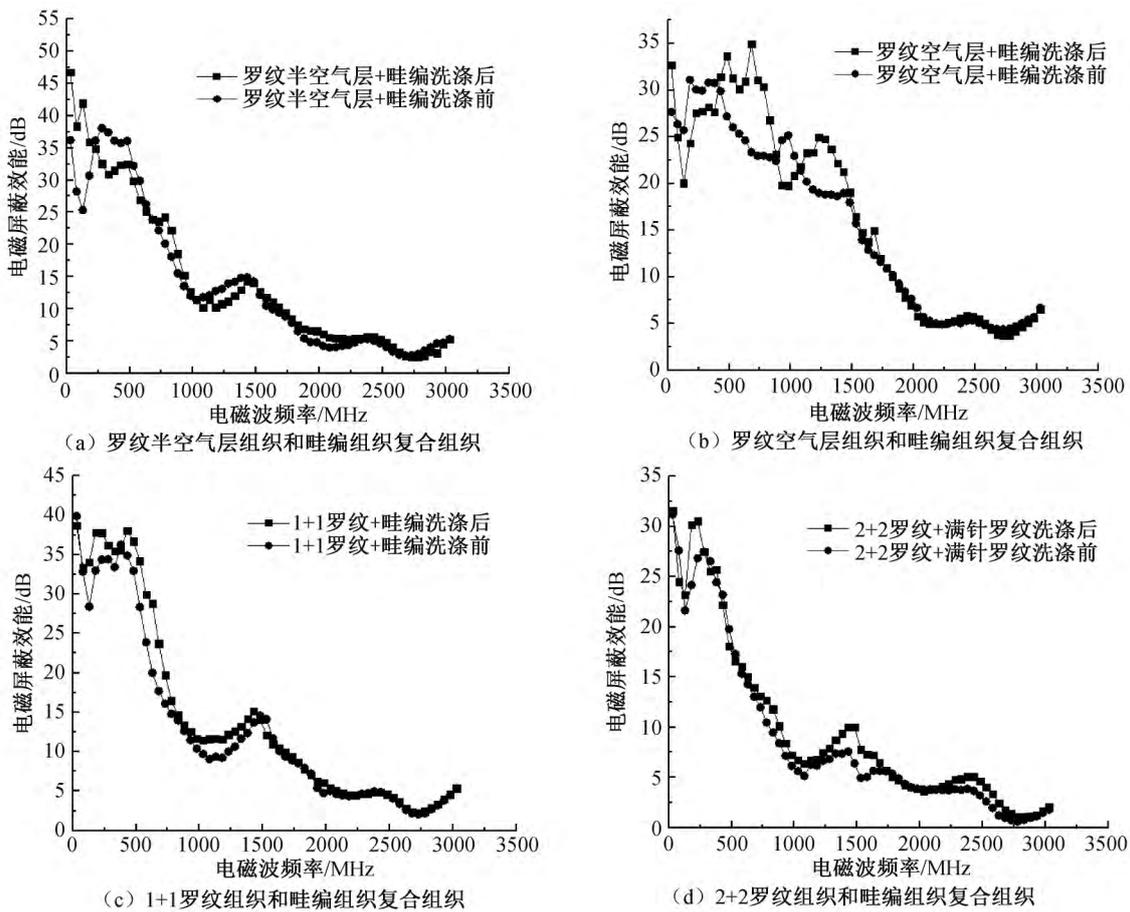


图 8 4 种罗纹组织复合织物洗涤前后电磁屏蔽效能对比图

综合图 7 和图 8,可以发现洗涤后织物的电磁屏蔽效果除少量电磁波频率范围内其电磁屏蔽效果略微有减弱外,其他频率范围内有增加的趋势,出现该现象的原因,可从以下几方面进行分析:

- a) 织物宏观尺度:经过洗涤实验后,织物由于缩水等原因,其密度增加,故电磁屏蔽效果增强。
- b) 洗涤强度:由于洗涤方式采用的是轻柔织物的洗涤标准,所以洗涤的强度比较低,虽然洗涤了 20 次,但是对织物的结构损伤比较少。
- c) 织物含水量:织物在洗涤后,由于干燥不完全,织物中所含水的质量增加,故织物的导电性增强,同时纱线吸水后膨胀,织物的紧密程度增加,电磁屏蔽性能增强。
- d) 原料性能:由于不锈钢丝和棉纱的性能比较好,耐洗涤,所以在洗涤过程中,较少出现纱线断裂等情况,织物电磁屏蔽效果下降不明显。

由图 3—图 8 所有织物的电磁屏蔽曲线可知,电磁波频率大于 500 MHz 时,随着电磁波频率的增加,织物的电磁屏蔽效能减弱迅速,其原因是电磁波的波长与频率成反比,频率越高,能量越高,传透能

力越强,能量高而穿过物体;由于随着频率的增高,当电磁屏蔽体不止一个孔洞,而且孔距小于信号半波长时,屏蔽效能降低明显,从而导致屏蔽体的孔缝泄漏成为电磁屏蔽最关键的要素。对于高频电磁波而言,织物线圈间的微孔,是屏蔽效能降低的主要因素。

2.4 多元线性回归模型

为了优化设计复合组织织物与多层织物的电磁屏蔽效果,同时为了探究复合组织与其组成的各个组织间的电磁屏蔽关系,进行多元线性回归模型处理数据,选用 Eviews 软件进行模型的建立。

把影响因变量 Y 的自变量个数用 p 来表示,每个自变量分别表示为 x_1, x_2, \dots, x_p , 所得到的多元线性回归模型的形式可用式(1)来表示:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (1)$$

其中: $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p, \sigma^2$ 是参数,且其与 x_1, x_2, \dots, x_p 无关,则上式称为因变量 Y 对自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 的多元线性回归方程。

如果观测样本有 n 组,依次记作: $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}, y_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 令:

$$\beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{pmatrix}, \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix},$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (2)$$

则式(3)即为多元线性回归方程的矩阵形式:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

其中 e_1, e_2, \dots, e_n 满足以下条件:

a) ϵ 必须服从正态分布。

b) $E(\epsilon_i) = 0$ 。

c) $D(\epsilon_i)$ 为一确定的值,即对于每个 ϵ_i ,而言,其方差都是一样的,并且其与自变量都满足相互独立的要求。

d) 符合 $\text{cov}(\epsilon_i, \epsilon_j) = 0, (i \neq j)$ 的要求。

通过 F 检验检验因变量与所有自变量的综合线性关系是否显著成立。对各回归系数的显著性检验,通过 t 检验来完成。

考虑到复合织物或双层织物都是两块织物的组合,所建的变量有两个,运用多元线性回归模型,获得复合后的组织的电磁屏蔽效果为:

$$R_i = a * R_x + b * R_y + c \quad (4)$$

其中: R_i 表示复合后的组织; R_x 和 R_y 表示两个基本组织的电磁屏蔽效果; a, b 和 c 分别为参数。

在处理数据的过程中,各组织结构分别用代码表示,具体如下:1+1 罗纹组织为 R_1 , 畦编组织为 R_2 , 2+2 罗纹组织为 R_3 , 罗纹半空气层组织为 R_4 , 罗纹空气层组织为 R_5 。

将图 2 中各单层及双层织物的电磁屏蔽效能数据导入 Eviews 软件后,通过建模获得五种双层组织多元线性回归模型各系数,结果如表 3 所示;将图 2(a)与图 6 各单层及复合织物的电磁屏蔽效能数据导入 Eviews 后,通过建模获得 5 种复合织物组织多元线性回归模型各系数情况(表 4)。

表 3 5 种双层组织的各系数情况

系数	$R_{11}+R_{12}$	$R_{21}+R_{22}$	$R_{31}+R_{32}$	$R_{41}+R_{42}$	$R_{51}+R_{52}$
a	1.5***	0.9***	1.1***	1.0***	0.9***
b	1.1***	0.5**	0.7***	0.9***	0.7***
c	-1.4*	2.9***	0.8*	3.3***	1.5***
F	125.5	131.8	332.6	145.6	526.8
$P(F)$	0	0	0	0	0

注: R_{1X} 表示 R_1 的第 X 块区域; $R_{1X}+R_{1Y}$ 表示 R_1 的第一块区域和 R_1 的第二块区域组合;***, **, * 分别表示在 1%, 5%, 10% 的显著性水平下,显著拒绝原假设; F 表示 F 检验的值; $P(F)$ 表示 F 值的概率。

表 4 五种复合层织物的各系数情况

系数	R_2+R_5	R_1+R_2	R_1+R_3	R_2+R_4	R_4+R_5
a	0.2***	1.1**	1.1***	1.2*	0.7***
b	1.4*	1.1***	1.2***	0.5***	0.8***
c	2.2**	-1.4*	-1.3*	0.0	2.2***
F	309.2	259.0	201.7	282.2	825.5
$P(F)$	0	0	0	0	0

注: R_X+R_Y 表示 R_X 和 R_Y 复合;***, **, * 分别表示在 1%, 5%, 10% 的显著性水平下,显著拒绝原假设; F 表示 F 检验的值; $P(F)$ 表示 F 值的概率。

表 3 和表 4 的 F 检验的概率都为 0,表明复合织物电磁屏蔽效能与其单层织物电磁屏蔽效能为显著综合线性关系。为了判断其各项系数是否显著,通过 t 检验进行检验。当选取 $R_{41}+R_{42}, R_{51}+R_{52}$ 和 R_4+R_5 的情况时,即当选取罗纹半空气层组织双层织物、罗纹空气层组织双层织物以及罗纹半空气层组织和罗纹空气层组织复合时, a, b 和 c 三个系数都在 1% 的显著性水平下显著拒绝原假设,故其拟合效果非常好;当选取 $R_{21}+R_{22}$ 的情况时,即当选择畦编组织双层织物时, a, b 和 c 三个系数至少在 5% 的显著性水平下显著拒绝原假设,故其拟合效果好;另外,当选取 $R_{11}+R_{12}, R_{31}+R_{32}, R_2+R_5, R_1+R_2, R_1+R_3$ 的情况时,即当选择 1+1 罗纹组织双层织物、2+2 罗纹组织双层织物、畦编组织和罗纹空气层组织复合织物、1+1 罗纹组织和畦编组织复合织物、1+1 罗纹组织和 2+2 罗纹组织复合织物,各系数至少在 10% 的显著性水平下都是显著拒绝原假设的,即数据拟合良好。由于这十种情况织物复合中, a 和 b 的系数都是正数,故复合织物的电磁屏蔽效果与各组成部分织物的电磁屏蔽效果正线性相关,与验证实验结果吻合。

3 结论

本文采用纯棉纱与不锈钢丝分别编织 1+1 罗纹组织、2+2 罗纹组织、畦编组织、罗纹空气层组织和罗纹半空气层组织,通过电磁屏蔽效能分析探究不锈钢导电针织各组织结构的电磁屏蔽效果,主要结论如下:

a) 通过对织物电磁屏蔽效果图分析,在电磁波频率为 1000 MHz 以下时,各类罗纹织物电磁屏蔽效果较好,对电磁辐射的屏蔽率超过 95%。

b) 不同的组织以及不同的组织间的复合对电磁屏蔽的影响差距很大,单层织物电磁屏蔽相对较好的是畦编组织和罗纹空气层组织;而双层畦编组织编织的电磁屏蔽织物的效果最好。

c) 经过 20 次的洗涤实验后, 织物电磁屏蔽效果差异不明显, 除少量电磁波频率范围内其电磁屏蔽效果略微有减弱外, 电磁屏蔽效果有增加的趋势。

d) 利用 Eviews 软件对电磁屏蔽效能数据进行处理, 选用多元线性回归模型对数据进行拟合, 结果表明复合织物的电磁屏蔽效果与各组成部分织物的电磁屏蔽效果线性正相关, 本文所获得的模型和测试数据可为研制电磁屏蔽导电针织物奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 丁世敬, 赵跃智, 葛德彪. 电磁屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 30-34.
- [2] 张晓霞. 防辐射孕妇装的屏蔽性能与结构设计研究[D]. 上海: 东华大学, 2009: 13-14.
- [3] 肖红. 电磁辐射防护织物及服装的技术特点和标准分析[J]. 纺织导报, 2017(Z1): 87-93.
- [4] 褚玲, 赵其明. 电磁屏蔽织物的研究现状及开发趋势[J]. 化纤与纺织技术, 2010, 39(4): 41-42.
- [5] 李亚萍, 汪秀琛, 潘振, 等. 导电海绵在电磁屏蔽服装中的应用研究[J]. 现代纺织技术, 2018, 26(1): 39-44.
- [6] 刘梅城, 洪杰. 不锈钢纤维/磁性涤纶纤维织物电磁屏蔽性能研究[J]. 现代纺织技术, 2014, 22(2): 8-10.
- [7] 乔辉, 沈忠安, 孙显康, 等. 功能性服装面料研究进展[J]. 服装学报, 2016, 1(2): 127-132.
- [8] 王秀玮. 导电织物电磁屏蔽性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017: 5-12.
- [9] Chen H C, Lee K C, Lin J H, et al. Comparison of electromagnetic shielding effectiveness properties of diverse conductive textiles via various measurement techniques [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192(10): 549-554.
- [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, 84(1): 124-130.
- [11] 闫鑫鑫, 谢春萍, 刘新金, 等. 不锈钢纤维机织物的电磁屏蔽及力学性能[J]. 丝绸, 2008, 55(8): 29-34.
- [12] 薛洁. 化学镀银锦纶织物的电磁屏蔽性能与稳定性研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018: 5-12.
- [13] 陈莉, 薛洁, 刘皓, 等. 电磁屏蔽织物的研究现状[J]. 纺织导报, 2018(3): 68-71.
- [14] 杨照玲, 李建平, 奚正平, 等. 超细不锈钢纤维的制备和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(9): 748-751.
- [15] 杨雅岚, 刘哲. 混纺型电磁屏蔽织物屏蔽作用的影响机制研究[J]. 毛纺科技, 2013, 41(8): 14-18.
- [16] Liu Z, Wang X C. Influence of fabric weave type on the effectiveness of electromagnetic shielding woven fabric [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2012, 26(14/15): 1-9.
- [17] Liu Z, Wang X C. Relation between shielding effectiveness and tightness of electromagnetic shielding fabric[J]. Journal of Industrial Textiles, 2013, 43(2): 302-316.
- [18] Rajendrakumara K, Thilagavathi G. Electromagnetic shielding effectiveness of copper / PET composite yarn fabrics[J]. Indian Journal of Fiber & Textile Research, 2012, 37(2): 133-137.
- [19] 孟金凤, 孟家光, 张琳玫, 等. 柔丝纤维混纺纱及其针织物的性能测试[J]. 西安工程大学学报, 2014, 28(6): 663-667.
- [20] Perumalraj R, Dasaradan B S, Anbarasu R, et al. Electromagnetic shielding effectiveness effectiveness of copper core - woven fabrics[J]. Journal of the Textile Institute, 2009, 100(6): 512-524.
- [21] 杜斌, 杨双合. 电磁辐射屏蔽材料的研究进展综述[J]. 科技信息, 2010, 15(9): 418-419.
- [22] Jalali M, Dauterstedt S, Michaud A, et al. Electromagnetic shielding of polymermatrix composites with metallic nanoparticles [J] Composites: Part B: Engineering, 2011, 42(6): 1420-1426.
- [23] 施楣梧, 关福旺. 电磁波频率选择透通纺织品的设计和加工[J]. 纺织高校基础科学学报, 2018, 31(3): 266-271.
- [24] Gkarneshan N, Varadarajan B. Engineering knits for versatile technical applications; some insights on recent researches[J]. Journal of Institute Textile, 2012, 42(1): 52-75.
- [25] 赵阿卿, 朱方龙, 张艳梅, 等. 不锈钢纤维织物的应用及其纯纺针织物的开发[J]. 针织工业, 2018(3): 14-17.
- [26] 王金凤, 龙海如. 线圈转移对导电弹性针织柔性传感器的电-力学性能影响[J]. 纺织学报, 2013, 34(7): 62-67.
- [27] Wang J F, Long H R, Soltanian S et al. Electromechanical properties of knitted wearable sensors; part 1-theory[J]. Textile Research Journal, 2014, 84(1): 3-15.
- [28] 蔡倩文, 王金凤, 陈慰来. 纬编针织柔性传感器结构及其导电性能[J]. 纺织学报, 2016, 37(6): 48-53.
- [29] 王兴亮. 通信系统概论 [M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2017: 20-40.

(责任编辑: 廖乾生)