

芳砜纶/不锈钢丝阻燃导电织物的制备及其电磁屏蔽性能研究

王艳婷¹ 王晓晓¹ 李 桢¹ 李婷婷¹ 林佳弘^{1,2,3} 彭浩凯^{1*}

(1.天津工业大学纺织科学与工程学院,天津 300387;

2.闽江学院福建新型功能性纤维与材料重点实验室,福州 350108;

3.闽江学院海洋学院,福州 350108)

摘 要 利用芳砜纶的阻燃性和金属丝的导电性制备了芳砜纶/不锈钢丝阻燃导电织物,并研究了织物的力学性能、阻燃性能和电磁屏蔽性能。结果表明:用细度为20S/2的芳砜纶做包覆材料纺成的包芯纱断裂强度和断裂伸长率最大,用该规格包芯纱制备的导电织物阻燃性能最好,燃烧损毁长度为56.34mm;织物的电磁屏蔽效能与织物层数、层压角度有关,在导电织物层压角度为 $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ 和 $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ 且织物层数为4层时,3种导电织物的平均电磁屏蔽效能比单层时约提高9dB;当织物层数为5层及以上时,电磁屏蔽效能比单层时平均提高约15dB,电磁屏蔽效能显著增加。

关键词 芳砜纶,导电织物,层压角,阻燃性,电磁屏蔽效能

Polysulfonamide/SS flame retardant and conductive fabric: manufacturing technique and electromagnetic shielding effectiveness

Wang Yanting¹ Wang Xiaoxiao¹ Li An¹ Li Tingting¹ Lin Jiahong^{1,2,3} Peng Haokai¹

(1.School of Textile Science and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387;

2.Fujian Key Laboratory of Novel Functional Fibers and Materials, Minjiang University,

Fuzhou 350108; 3.Ocean College, Minjiang University, Fuzhou 350108)

Abstract The flame retardancy of polysulfonamide and the electrical conductivity of metal filaments were used to prepare knitted fabrics with electromagnetic shielding and flame retardancy, and the mechanical properties, flame retardancy and electromagnetic shielding effectiveness of the fabrics were investigated. Results shown that the breaking strength and elongation at break of core spun yarn used polysulfonamide with the fineness of 20S/2 as cladding materials were all the largest. The flame retardant performance of the conductive fabric woven by this specification of core spun yarn was the best, and the burning damage length was 56.34mm. When the laminating angles of the fabric were $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ and $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ and the laminating number was 4 layers, the average value of dB was about 9 higher than that of the single layer. When the laminating number was 5 layers or more, the dB value was increased by about 15dB compared with the single layer, and the electromagnetic shielding effect was significantly increased.

Key words polysulfonamide, conductive fabric, lamination angle, flame retardancy, electromagnetic shielding effectiveness

随着科学技术的蓬勃发展,电子电器、无线电通讯得以普遍使用,但是电子设备在使用过程中会产生电磁辐射^[1]。电磁辐射达到一定强度后,一方面会危害人体健康,诱发疾病,严重时可能诱发癌症、白

血病^[2];另一方面,电子设备产生的电磁干扰也会影响设备的使用和测量的精准性^[3]。目前消除电磁波危害的主要方法是采用电磁屏蔽材料进行屏蔽,因此开发高效电磁屏蔽材料迫在眉睫。电磁屏蔽原理

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51503145);高技术有机纤维四川省重点实验室开放课题基金(PLN2016-07)

作者简介:王艳婷(1993-),女,研究生,主要研究方向为织物电磁屏蔽。

联系人:彭浩凯(1980-),男,讲师,从事导电复合材料研究工作。

包括吸收损耗、入射体表面的反射损耗、屏蔽体内部的多重反射损耗^[4],而导电性好的材料可以使电磁波发生反射从而获得较好的电磁屏蔽值。随着导电材料含量的增加,反射增加,透过材料的电磁波减少,电磁屏蔽效能增强,从而可以保护人体健康并延长电子设备的使用寿命^[3-4],因此具有良好导电性能的金属材料常被用作电磁屏蔽材料^[5]。金属丝对电磁干扰具有较好的屏蔽作用,但是金属制品密度大、成本高、不易加工,目前通常使用弹性好、易于加工、舒适性好的电磁屏蔽织物代替传统金属制品^[6-9]。

Lou 等^[2]使用涤纶长丝包覆不锈钢丝和裸铜丝制成导电包芯纱,以导电包芯纱为原料制备导电织物,研究表明导电织物具有良好的电磁屏蔽作用。Hwang 等^[6]通过竹炭粗纱与不锈钢丝混合包绕成纱,制备具有远红外和电磁屏蔽功能的导电织物。Erdumlu 等^[10]研究了棉/金属包芯纱织物的电磁屏蔽性能,指出织物组织结构对电磁屏蔽效能影响不大,电磁屏蔽效能不会因为覆盖一层纯棉织物而减小。Lin 课题组^[7-8]将包覆材料与不同金属丝混合包绕成纱,制备出电磁屏蔽织物。研究表明,电磁屏蔽织物舒适性得到改善,电磁屏蔽效能与织物层数和层压角度有关。

芳砵纶又称聚砵基酰胺纤维,属于芳香族聚酰胺类耐高温合成纤维^[11-14],由于在分子主链上引入了极强的吸电子基团砵基($-\text{SO}_2-$),通过苯环的双键共轭体系,使酰胺基上氮原子的电子云密度显著降低,从而获得抗热氧老化的稳定性,使芳砵纶具有优异的阻燃、耐热性能^[11-12],极限氧指数超过 33。芳砵纶一般用于制作消防服、特种工作服、高温过滤材料、F.H 级绝缘纸,在安全防护、环保、化工、航空航天等领域应用广泛。

本研究利用芳砵纶的阻燃性、耐高温特性和不锈钢丝屏蔽电磁波的优异特性,制备了芳砵纶/不锈钢丝阻燃导电织物,研究了芳砵纶含量、织物层数、层压角度等对导电织物阻燃和电磁屏蔽性能的影响。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

316L 不锈钢丝(直径 0.06mm、断裂强力 354.36cN、断裂伸长率 29.4%),元能股份有限公司;芳砵纶纱线(纤维长度 51mm、极限氧指数 33),上海特氨纶有限公司。

花式捻线机(HN32-04 型),苏州华飞纺织科技

有限公司;手摇横机(9G 型),江苏恒星机械制造有限公司;纱线捻度仪(Y331C 型),温州方圆仪器有限公司;万能强力仪(HT-9101 型),弘达仪器有限公司;垂直燃烧仪(Y815G 型),温州大荣纺织有限公司;电磁屏蔽仪(HP8752C 型),温州大荣纺织有限公司。

1.2 包芯纱的制备

使用芳砵纶做包覆材料,316L 不锈钢丝做芯纱,采用花式捻线机在转速 2000r/min、理论捻度 60 捻回/10cm、捻合方向为 S 捻的条件下包绕成纱,得到 3 种不同规格的包芯纱样品 P20SS006、P32SS006、P40SS006。以 P20SS006 为例,P 代表单纱原料为芳砵纶,20 表示股纱中单纱支数,SS 代表不锈钢丝,006 代表不锈钢丝直径为 0.06mm。包芯纱样品的技术参数见表 1。

表 1 包芯纱样品的技术参数

项目	P20SS006	P32SS006	P40SS006
芳砵纶细度/S	20/2	32/2	40/2
不锈钢丝直径/mm	0.06	0.06	0.06
包芯纱细度/tex	120.29	110.84	106.73
包芯纱捻度/[捻回 $\cdot(10\text{cm})^{-1}$]	66.288	66.908	66.231
捻度不匀率/%	8.74	4.07	6.03
包芯纱强度/N	12.49	10.31	9.74

注:20S/2 表示合股纱的合股数为 2,每根合股纱的细度为 20。

1.3 芳砵纶/不锈钢丝阻燃导电织物的制备

将包芯纱穿过手摇横机机台支架上的导纱钩和张力的弹簧,随后将其引入机头导纱钩中。调节手摇横机度目等参数,将起针梳的针齿与参与编织的织针 1 隔 1 相错排放,推动机头编织第一横列,检查编织情况,待每枚织针都参与编织后穿入钢丝锁住,放下起针梳并悬挂重锤,开始正常编织,得到 3 种不同规格的芳砵纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品 PSS20、

表 2 芳砵纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品的技术参数

项目	PSS20	PSS32	PSS40
横向密度/[纵行 $\cdot(5\text{cm})^{-1}$]	24	22	20
纵向密度/[横列 $\cdot(5\text{cm})^{-1}$]	38	35	32
织物克重/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	228.46	220.32	215.68
纵向断裂强力/N	244.40	173.27	131.71
横向断裂强力/N	230.48	176.26	123.46
透气量/[$\text{mL}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$]	633.07	731.51	990.56
透湿量/[$\text{g}\cdot(\text{d}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$]	1294.66	3917.27	6109.91

PSS32、PSS40。以 PSS20 为例,其中 P 代表单纱原料为芳腈纶,SS 代表不锈钢丝,20 表示股纱中单纱支数。芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品的技术参数见表 2。由表可知,按照织物克重和紧密度排序,从大到小顺序为 PSS20>PSS32>PSS40。

1.4 测试方法

1.4.1 包芯纱捻度测试

采用纱线捻度仪,根据 GB/T 2543.2—2001《纺织品 纱线捻度的测定》和英国标准 ISO 2061—2010《纺织品 纱线捻度的测定 直接计数法》进行测试。首先根据标准调节实验室环境,随后将样品夹持在间距为 25cm 的纱线捻度仪夹钳中,调节指针归零,设置实验次数及仪器转速等参数,每种规格的样品测试 16 次,取平均值。

1.4.2 包芯纱强伸性能测试

采用万能强力仪,根据 GB/T 3916—2013《纺织品 卷装纱 单根纱线断裂强力和断裂伸长率的测定(CRE 法)》以及英国 ISO 2062:2009《纺织品 卷装纱 使用等速伸长(CRE)仪测定单根纱线断裂强力和断裂伸长率》进行测试。将万能强力仪夹持隔距设置为 250mm,拉伸速度选择 300mm/min 匀速拉伸,每种规格的样品测试 20 次,取平均值。

1.4.3 织物阻燃性能测试

采用垂直燃烧仪,根据 GB/T 5455—1997《纺织品燃烧性能试验垂直法》进行测试。首先将织物裁剪成 300mm×80mm 尺寸,随后将其固定在垂直燃烧仪夹具中,在夹具悬挂时保证织物自然下垂,在织物底部进行燃烧,燃烧 12s 停止,记录实验数据。

1.4.4 织物电磁屏蔽效率测试

根据 ASTM D4935-10《测量平面材料电磁屏蔽效率的方法》标准,使用频谱分析仪对规格为 150mm×150mm 的导电织物样品进行测试。测试前,需要事先准备与待测物同等大小和厚度的中空试片对仪器进行校正。中空试片电磁屏蔽效能为 SE_0 ,同等规格的待测物的电磁屏蔽效能为 SE_1 ,则实际电磁屏蔽效能 $SE_2 = SE_1 - SE_0$,每种规格的样品测试 12 次,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 包芯纱捻度分析

图 1 为包芯纱样品的捻度。由图可知,3 个包芯纱样品 P20SS006、P32SS006、P40SS006 的实测捻度分别为 66.288 捻回/10cm、66.908 捻回/10cm、66.231 捻回/10cm,样品捻度基本相同。纱

线通过加一定捻度,使得单位长度内芳腈纶含量增加,外力拉伸时,包芯纱断裂强度和断裂伸长率提高;加低捻有利于清除纱线弱节,纤维间抱合和交互作用增强,纤维的断裂强力得到提高。3 种规格包芯纱基本符合针织物编织纱线的要求,因此可用于编织电磁屏蔽织物。

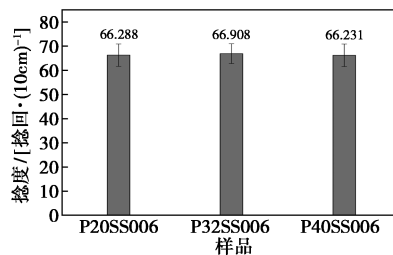


图1 包芯纱样品的捻度

2.2 包芯纱力学性能分析

图 2 为包芯纱样品的力学性能。由图可知:样品 P20SS006 的力学性能最好,其断裂强度和断裂伸长率分别为 1.04cN/dtex、35.61%;P20SS006 的断裂强度较 P32SS006、P40SS006 分别提高 11.83%、14.28%,断裂伸长率较 P32SS006、P40SS006 分别提高 6.22%、24.42%。

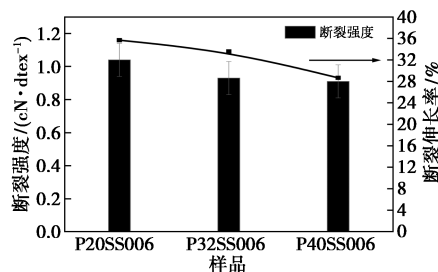


图2 包芯纱样品的力学性能

包芯纱力学性能的差异主要与纱线粗细、加捻程度有关。包芯纱样品 P20SS006 较粗,芳腈纶含量多,纱线加捻程度大,纤维能够更充分地接触,因而产生较大的摩擦力,纤维与纤维之间的相对滑动减少,受到拉伸时纱线间纤维受力性能同时提高,使得单纱强力增加,包芯纱断裂强度得到提高。

2.3 织物阻燃性能分析

在材质相同的情况下,织物阻燃性能与织物克重或织物紧密程度密切相关。同样的纱线,织物克重越大,阻燃性能越好,燃烧损毁长度会随着织物紧密程度大幅度下降。芳腈纶的极限氧指数为 33,具有优异的阻燃性能。图 3 为芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品的燃烧损毁长度。由图可知:样品 PSS20 阻燃性能最佳,燃烧损毁长度为 56.34mm;样品 PSS32、PSS40 的燃烧损毁长度分别是

76.29mm、96.08mm; PSS20 的燃烧损毁长度比 PSS32、PSS40 分别缩短 26.15%、41.36%。燃烧过程中织物无明显收缩、破裂、熔融滴落现象,燃烧后织物出现炭化、边缘变脆的现象,织物形态保持良好且阴燃和续燃时间均为 0。根据 GB/T 5455—1997《纺织品燃烧性能试验垂直法》可知,3 个样品的阻燃性能均达到防护服标准。

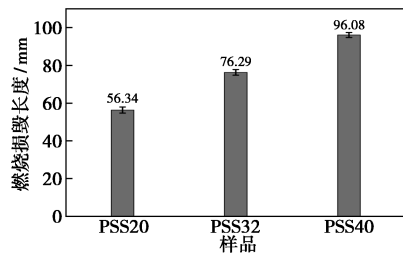


图3 芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品的燃烧损毁长度

芳腈纶在导电织物中起阻燃效果。芳腈纶含量越高,织物阻燃性能越好。这主要是因为芳腈纶中含有腈基,并且依靠苯环共轭作用使得织物具有极佳的热稳定性^[15-17],从而在燃烧时没有出现明显的熔融现象,这是影响织物阻燃效果的主要原因。织物阻燃效果还与纱线加捻程度、织物与空气接触程度等有关。纱线加低捻织物燃烧时,空气与纱线纤维接触越充分,越易于燃烧,但是对织物阻燃效果影响较小。

2.4 织物电磁屏蔽性能研究

金属丝的细度、织物组织类型、导电织物层数、层压角度等因素会影响织物电磁屏蔽效能^[18]。在屏蔽材料中,当导电织物暴露在电磁场中时,层压角度变化会改变屏蔽网络的完整性,导电织物的覆盖

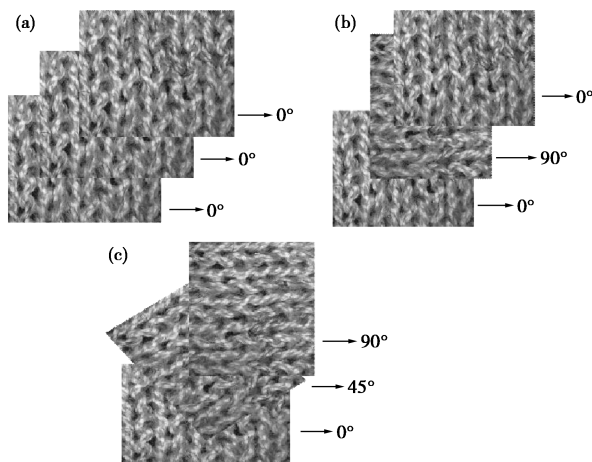


图4 织物层压角度示意图

[(a) 0°/0°/0°; (b) 0°/90°/0°; (c) 0°/45°/90°]

面积也会发生变化,从而改变电磁屏蔽效能。一般而言,随着入射频率的提高,同一规格导电织物的电磁屏蔽效能会发生变化,因此入射波更容易透过织物^[7,19]。织物层压角度示意图见图4。

Tezel 等^[20]的研究表明,同轴传输法和自由空间测量技术可用于测量织物的电磁屏蔽效能。研究表明,在自由空间测量过程中,当电场极化方向平行于导电金属线方向时,织物表现出电磁屏蔽效应。因此,在本研究中,利用同轴传输测量技术探究织物层数、层压角度对芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物电磁屏蔽效能的影响。

2.4.1 织物层数和入射波频率对织物电磁屏蔽效能的影响

在织物层压角度为 0°/0°/0°/0°/0°/0°条件下,考察织物层数对织物电磁屏蔽效能的影响。图5为芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图。由图可以看出,3 个样品的电磁屏蔽效能随着织物层数增加而增加,当织物层数从 1 层增加至 6 层时,电磁屏蔽效能表现出类似的增长规律。当入射波频率在 500~3000MHz

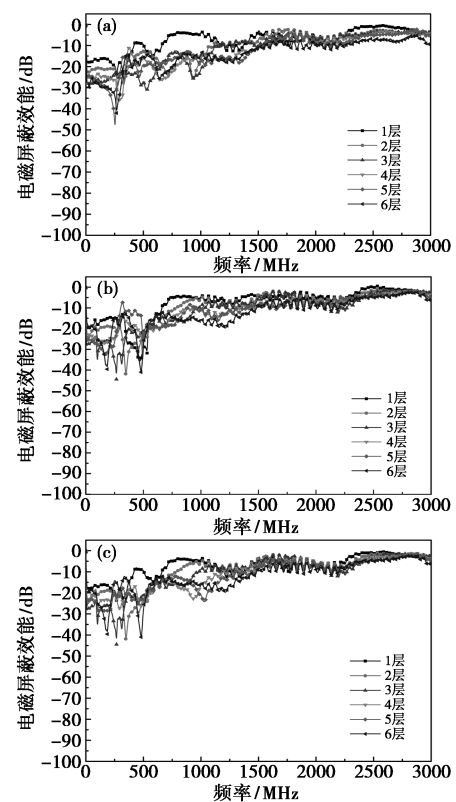


图5 织物层压角度为 0°/0°/0°/0°/0°/0°时芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图

[(a) PSS20; (b) PSS32; (c) PSS40]

时,平均电磁屏蔽效能低于 10dB,说明织物电磁屏蔽效能较差。

织物层数从 1 层增加至 6 层时,芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物的厚度增加,有利于电磁波发生多次反射从而发生衰减。而且随着织物层数的增加,织物的孔隙减小,可以有效避免电磁波穿透织物,所以随着织物层数的增加,织物电磁屏蔽平均值增加,但是效果并不明显。芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物之所以有电磁屏蔽效能主要是利用了不锈钢丝的导电性,织物中的金属纤维通过形成屏蔽网络使电磁波衰减,而且屏蔽网络越完整,电磁屏蔽效能越好。织物层压角度为 $0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ 时,织物各层内的不锈钢丝排列形式相同,织物形成的屏蔽网络基本一致,产生的有效回路少,无法对不同角度入射的电磁波进行有效屏蔽,所以屏蔽效能不理想,即仅仅改变织物层数并不能赋予织物良好的电磁屏蔽效能。

2.4.2 层压角度和入射波频率对电磁屏蔽效能的影响

在织物层压角度为 $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ 条件下,探究织物层数对其电磁屏蔽效能的影响。

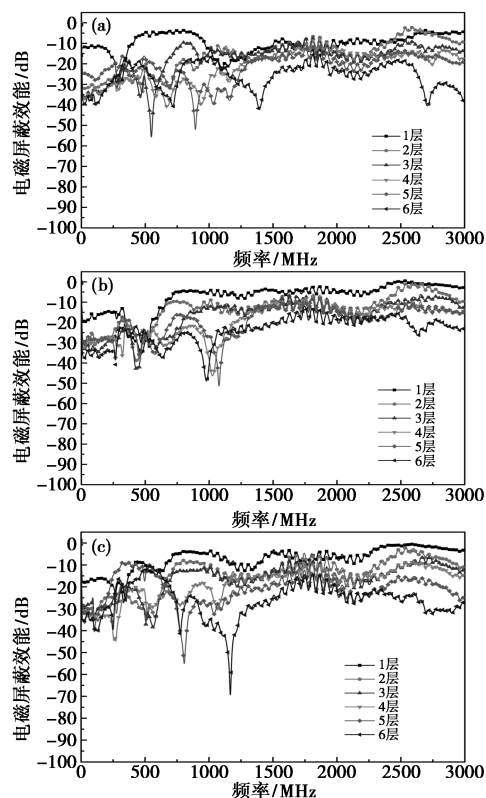


图 6 织物层压角度为 $0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}$ 时芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图

[(a) PSS20; (b) PSS32; (c) PSS40]

图 6 为芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图。由图可知:当织物层压角度发生变化时,织物电磁屏蔽效能显著增加。织物层数为 3 层时,样品 PSS20、PSS32、PSS40 的平均电磁屏蔽效能约为 17dB,较单层织物平均电磁屏蔽效能提高 2 倍左右;样品 PSS20 层数为 5 层和 6 层时,其平均电磁屏蔽效能分别达到 22dB 和 24dB,屏蔽效果较单层织物显著提高;样品 PSS32、PSS40 平均电磁屏蔽效能与 PSS20 类似。当入射频率为 1500MHz、织物层数为 6 层时,样品 PSS20 的电磁屏蔽效能达到 45dB,屏蔽效益在 99.99% 以上,达到完全屏蔽的效果;入射频率为 2714MHz 时,其屏蔽效能达到 43dB。整体而言,入射波频率在 $0\sim 3000$ MHz 范围时,样品 PSS32、PSS40 的电磁屏蔽效能略差于 PSS20,这跟包芯纱的细度以及织物的紧密程度有关。

在织物层压角度为 $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ 条件下,考察织物层数对其电磁屏蔽效能的影响。图 7 为芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图。从图可知,随着织物层数的增加,织物电磁屏蔽效能显著增加。改变层

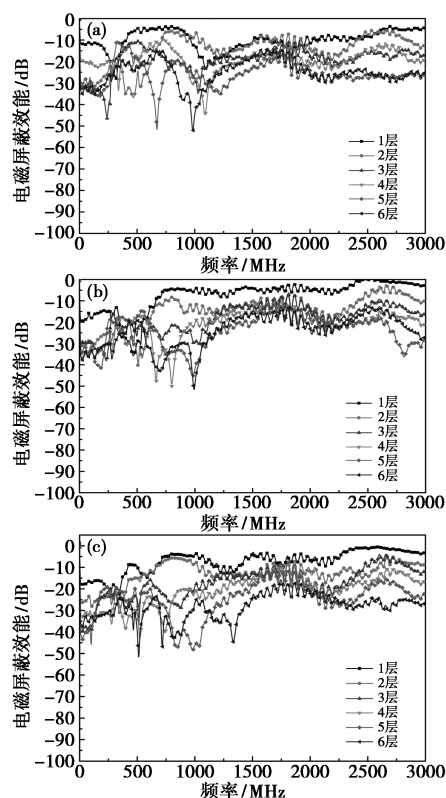


图 7 织物层压角度为 $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$ 时芳腈纶/不锈钢丝阻燃导电织物样品电磁屏蔽效能与织物层数的关系曲线图

[(a) PSS20; (b) PSS32; (c) PSS40]

压角度后当织物层数为4层时,3种织物样品的平均电磁屏蔽效能接近20dB;织物层数为5层时,3种织物样品的平均电磁屏蔽效能接近22dB;织物层数为6层时,3种织物样品的平均电磁屏蔽效能分别为26dB、24dB、25dB,较单层织物的平均电磁屏蔽效能显著提高。

结合图6和图7知,电磁屏蔽效能与织物层数和层压角度有关。层压角度为 $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ 且织物层数为4层时,3种导电织物样品的平均电磁屏蔽效能比单层时约提高9dB;当织物层数为5层及以上时,3个样品平均电磁屏蔽效能比单层时提高约15dB,电磁屏蔽效能显著增强。这主要是因为层压角度发生改变后,不锈钢丝在织物中的排列方向会发生变化,芳纶/不锈钢丝阻燃导电织物中的不锈钢丝有更大的覆盖面积,用于衰减和反射电磁波的屏蔽网络完整性提高。随着织物层数的增加,电磁波在织物中的多重反射增加,电磁屏蔽效能增强。层压角度的改变可使织物在各个方向形成回路,并产生感生电流,消耗电磁波的能量,且层压角度的改变使回路逐渐细密,覆盖范围增加,可形成各种形式的连通网孔,从而扩大电磁屏蔽范围,达到综合屏蔽效果。这也是影响电磁屏蔽效能的主要原因^[2]。

2.5 电磁屏蔽机理分析

电磁屏蔽原理是使入射到织物上的电磁波发生反射、吸收等,使透过织物的电磁波尽可能少,这就表明织物结构越紧密,孔隙越少,电磁屏蔽效能就越好。样品PSS20所用包芯纱捻系数大,结构紧密,织物紧密度增强,单位面积包芯纱交织次数多,连接性提高,有利于不锈钢丝形成导电网络,反射消耗的电磁波更多而且还可以减少织物孔洞,降低漏磁,从而提高电磁屏蔽性能。通过改变织物层压角度,当电场极化平行于导电金属线方向时,通过同轴测试可以发现织物的电磁屏蔽效能较好。

3 结论

采用芳纶包覆不锈钢丝,成功制备具有阻燃和电磁屏蔽效能的导电织物。结果表明:当层压角度为 $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$,仅仅改变织物层数对电磁屏蔽效能影响不大,随着入射频率的增加,织物几乎没有电磁屏蔽效能;改变织物层压角度,随着织物层数增加,电磁屏蔽效能显著增加。织物层压角度为 $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ 、织物层数为4层时,样品PSS20、PSS32、PSS40的

平均电磁屏蔽效能比单层时约提高9dB,织物层数为5层及以上时,平均电磁屏蔽效能比单层时提高约15dB,电磁屏蔽效能显著增加,满足民用电磁屏蔽防护的要求。尤其是PSS20,在织物层压角度为 $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ$ 、入射频率为1500MHz、织物层数为6层时,电磁屏蔽效能达到45dB,屏蔽效益达99.99%以上,达到完全屏蔽的效果;入射频率为2714MHz时,其电磁屏蔽效能达到43dB,该类型织物可用于工业或特殊衣物的电磁屏蔽,也可用作精密仪器保护罩、军用帐篷等。

参考文献

- [1] 戴玉婷,王莉莉,荣新山,等.电磁屏蔽材料的研究进展[J].化工新型材料,2015,43(10):24-26.
- [2] Lou Chingwen, Lin Tingan, Chen Anpang et al. Stainless steel/polyester woven fabrics and copper/polyester woven fabrics: manufacturing techniques and electromagnetic shielding effectiveness[J]. Journal of Industrial Textiles, 2015, 45(1): 214-236.
- [3] 文珊. 不锈钢纤维织物的屏蔽和服用性能[J]. 纺织学报, 2004, 25(6): 79-81.
- [4] 肖红,唐章宏,王群,等.电磁屏蔽织物的导电网格结构及其屏蔽效能的一般影响规律研究[J].纺织学报,2015,36(2):35-42.
- [5] Park J G, Louis J, Cheng Q, et al. Electromagnetic interference shielding properties of carbon nanotube buckypaper composites[J]. Nanotechnology, 2009, 20(41): 415702.
- [6] Hwang P W, Chen A P, Lou C W, et al. Electromagnetic shielding effectiveness and functions of stainless steel/bamboo charcoal conductive fabrics[J]. Journal of Industrial Textiles, 2013, 44(3): 477-494.
- [7] 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, 192-193(4): 549-554.
- [8] Lin J H, Chen A P, Hsieh C T, et al. Physical properties of the functional bamboo charcoal/stainless steel core-sheath yarns and knitted fabrics[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(6): 567-573.
- [9] Ramachandran T, Vigneswaran C. Design and development of copper core conductive fabrics for smart textiles[J]. Journal of Industrial Textiles, 2009, 39(1): 81-93.
- [10] Erdumlu N, Saricam C. Electromagnetic shielding effectiveness of woven fabrics containing cotton/metal-wrapped hybrid yarns[J]. Journal of Industrial Textiles, 2016, 46(4): 1084-1103.
- [11] 汪晓峰,张玉华.芳纶的性能及其应用[J].纺织导报,2005(1):18-20.
- [12] 任加荣,汪晓峰,张玉华.芳纶的市场开发与应用[J].产业用纺织品,2007,25(5):1-6.

(下转第121页)