

双层电磁屏蔽织物的组合设计与屏蔽效能研究

李雯¹, 王利君^{*1,2}

(1. 浙江理工大学 服装学院, 杭州 310018; 2. 浙江理工大学 浙江省服装工程技术研究中心, 杭州 310018)

摘要: 织物组合方式影响多层织物的屏蔽效能。选取4种具有不同吸收反射性能、不同结构参数的电磁屏蔽材料, 采用法兰同轴法测试单层织物的屏蔽效能, 再将不同种类面料的织物以不同的叠放顺序两两组合, 测试其屏蔽效能; 以单层织物屏蔽效能为基础, 分析双层织物屏蔽效能的变化规律, 探讨组合方式对多层电磁屏蔽织物屏蔽效能的影响。研究表明: 在测试频率范围内, 相较单层织物, 双层织物的屏蔽效能提高了10~40 dB, 其中在2 000~3 000 MHz频段内比30~1 000 MHz频段内提高更多; 吸收型双层织物在30~1 500 MHz范围内的屏蔽效能峰值大于在1 500~2 000 MHz范围的, 反射型双层织物则相反, 即吸收型双层织物屏蔽效能高频段增幅小于反射型双层织物; 双层织物屏蔽效能会因为其叠放顺序不同有所变化, 外层反射型面料里层吸收型面料的双层组合屏蔽效能最佳。

关键词: 多层织物; 屏蔽效能; 多层组合; 屏蔽机理; 组合方式

中图分类号: TS 195.591; TS 101.923 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2021)05-0390-06

Combination Design and Shielding Effectiveness of Double-Layer Electromagnetic Shielding Fabric

LI Wen¹, WANG Lijun^{*1,2}

(1. School of Fashion Design and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Apparel Engineering Research Center of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Fabric combination mode affects the multi-layer fabric shielding effectiveness. This paper selects four electromagnetic shielding materials with different absorption, reflection performance, and different structural parameters. The flange coaxial method was used to first test the single-layer fabric shielding effectiveness, and then different fabrics were combined in pairs based on fabric type and stacking order, and their shielding effectiveness were tested. Then, the variation rules of double-layer fabric shielding effectiveness was analyzed based on the single-layer fabric shielding effectiveness, and the influence of combination way of the shielding effectiveness of multi-layer electromagnetic shielding fabric was explored. The research results show that, in the test frequency range, the shielding efficiency of double-layer fabric is much improved by 30~40 dB, and more better in the range of 2 000~3 000 MHz than the range of 30~1 000 MHz; the shielding efficiency value of absorption double-bilayer fabric within 30~1 500 MHz is greater than 1 500~2 000 MHz, that is, the shielding efficiency rate of absorbed double-layer fabric is less than that of reflective double-layer fabric; double-layer fabric shielding effectiveness will be different due to its stacking order, and the combination of the outer layer of reflective fabric and the inner layer of absorbing fabric double-layer shows a best shielding effect.

Key words: multilayer fabric, shielding effectiveness, multilayer combination, shielding mechanism, combination mode

收稿日期: 2021-03-26; 修订日期: 2021-05-18。

基金项目: 浙江省重点实验室(工程技术研究中心)开放基金项目(2019FZKF09); 浙江理工大学科研启动基金项目(17072191-Y)。

作者简介: 李雯(1995—), 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 王利君(1971—), 女, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为功能服装及材料。Email: wanglijunhz@zstu.edu.cn

随着工业技术的高速发展和人们生活水平的不断提高,电磁辐射渗透到人类生活的方方面面,为了尽可能减少其对人体的伤害,消费者对防护产品提出了更高的要求。单层电磁屏蔽织物^[1]已无法满足高屏蔽效能的特定需求,而高性能单层屏蔽材料成本又高。为了解决此类问题,学者们尝试采用多层电磁屏蔽材料,通过合理的组合提高电磁屏蔽效能。电磁屏蔽织物具备柔软、多孔且易变形等特性,叠加组合之后得到的双层电磁屏蔽织物的屏蔽效能并非由两个单层的屏蔽效能简单叠加,同样也不能采用理想的双层介质屏蔽效能计算公式得到^[2]。因此,越来越多的研究者致力于对多层织物屏蔽效能的影响因素研究,寻求提高织物的屏蔽效能的方法。

影响双层织物屏蔽效能的因素很多,研究方向主要分为两类,即组合方式和材料。MARCINIAK K 等^[3]及梁然然等^[4]研究了双层及多层电磁屏蔽织物不同的组合方式(叠放角度、叠放间距、织物层数以及金属纱线结构等)对其屏蔽效能的影响;荣幸等^[5]选用了不锈钢纤维混纺型材料叠加组合双层织物,研究其屏蔽效能;郑倩雪等^[6]、汪秀琛等^[7]和李亚萍等^[8]虽选用了多种面料研究双层电磁屏蔽织物的屏蔽效能,但选用的是同一种面料叠加组合的双层织物。电磁屏蔽织物根据对电磁波的屏蔽作用机理可分为吸波主导型织物和反射主导型织

物^[9]。CHOI J 等^[10]以及 BRZEZINSKI S 等^[11]通过对多层织物的吸波特性的研究发现,将电磁波反射层和电磁波吸收层进行适当组合可以提高材料的吸波性能。然而目前的研究仍不全面,在组合方式上,缺少对于双层织物叠放顺序的研究;在材料方面,对双层屏蔽织物研究多选择单一类型的材料,仅限于同种面料叠加组合,对吸收型与反射型面料的对比研究甚少。

因此,文中选取吸收型及反射型屏蔽材料,测试其结构参数,并根据面料类型对织物进行组合,采用法兰同轴法分别测试不同组合方式下双层织物的屏蔽效能;再结合单层织物的屏蔽效能,从同类型双层织物、不同类型双层织物以及不同叠放顺序双层织物等角度分析织物屏蔽效能的影响因素以及变化规律,为多层织物组合配伍设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料 铜镍菱形格面料(A),合肥曼家防辐射科技有限公司生产;导电布(B),嘉兴微波屏蔽材料厂生产;100% 镀银菱形格面料(C),30% 不锈钢纤维面料(D),均由合肥曼家防辐射科技有限公司生产。织物的具体参数见表 1。

表 1 织物参数

Tab.1 Fabric specifications

编 号	面料类型	成 分	织物组织	经纬密/ (根/dm)	厚度/ mm	面密度/ (g/m ²)
A	吸收主导型	涤纶镀铜镍	平纹	440×320	0.08	74
B	吸收主导型	$m(\text{涤纶}):m(\text{铜}):m(\text{镍})=62:25:13$	平纹	440×280	0.06	62
C	反射主导型		平纹	470×360	0.10	70
D	反射主导型	$m(\text{不锈钢}):m(\text{精梳棉}):m(\text{涤纶})=30:40:30$	斜纹	320×260	0.28	207

1.1.2 仪器 YG(B)141D 型数字式织物厚度仪、电子天平、FY800 织物防电磁辐射性能测试仪、R&S® SMB100A 微波信号发生器、R&S® FSL3 频谱分析仪,均由温州方圆仪器有限公司制造。

1.2 实验设计

从面料类型和叠放顺序两方面设计了测试对比实验,具体见表 2。其中,叠放顺序是指双层织物的里外层面料的区别,如 ab 表示 a 在外层,以此类推。

表 2 织物屏蔽效能测试实验设计

Tab.2 Experimental design of fabric shielding effectiveness test

对比方式	织物组合设置
同类型面料	吸收型+吸收型 aa,ab,bb
	反射型+反射型 cc,cd,dd
不同类型面料	吸收型+反射型 ab,ac,ad
同类型不同叠放顺序	反射型+反射型 ab 与 ba,cd 与 dc
不同类型不同叠放顺序	吸收型+反射型 ac 与 ca,ad 与 da,bc 与 cb,bd 与 db

1.3 电磁屏蔽性能测试

根据 GJB 6190—2008《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》和 SJ 20524—1995《材料屏蔽效能的测量方法》，选用法兰同轴法测试试样的电磁屏蔽效能 SE，测试频率为 30 MHz ~ 3 GHz。测试时分别取基准试样和负载试样，面料的屏蔽效能为两者测量数据的绝对值差值。样品规格如图 1 所示。

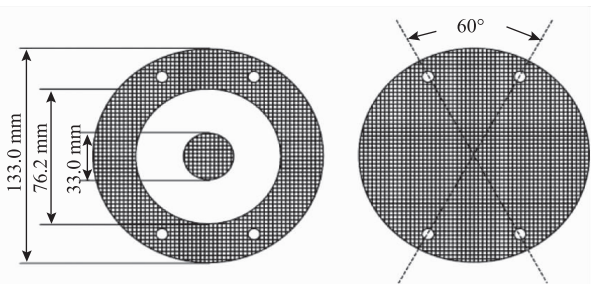


图 1 测试样品尺寸
Fig. 1 Test sample size

2 结果与分析

2.1 面料类型对双层组合织物屏蔽效能的影响

2.1.1 同类型双层织物组合的屏蔽效能变化规律

图 2 为吸收型面料 a 与 b 叠加组合的双层织物，即 aa, ab, bb 与其单层织物的屏蔽效能对比情况。图 3 为反射型面料 c 与 d 叠加组合的双层织物，即 cc, cd, dd 与其单层织物的屏蔽效能对比情况。

由图 2 和图 3 所知，在吸收型双层织物中，屏蔽效能大小为 $aa > ab > bb$ ；在反射型双层织物中，屏蔽效能大小为 $cc > cd > dd$ ；吸收型和反射型的双层织物屏蔽效能均比单层织物高，其提高范围在 10 ~ 40 dB 之间。另外，相较于单层织物，双层织物屏蔽效能高频段比在低频段提高得更多。电磁屏蔽织物的屏蔽效能

$$SE = R + A + B =$$

$$168 - 10 \lg \frac{f \mu_r}{\sigma_r} + 1314.3t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} + 20 \lg(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}}) \quad (1)$$

式中：SE 为屏蔽效能，dB；R 为反射衰减量，dB；A 为吸收损耗量，dB；B 为多次反射衰减量，dB； μ_r 为电磁屏蔽织物相对铜的磁导率，H/m； σ_r 为电磁屏蔽织物相对铜的电导率，S/m；f 为电磁波频率，MHz；t 为电磁屏蔽织物厚度，cm； δ 为趋肤深度（定义电磁波衰减到原强度的 1/e，即 37% 处所对应的深度，它与电磁波频率、相对电导率及相对磁导率有关）。

由式(1)可知，在较低频段时，电磁屏蔽主要是反射损耗，它与电磁波频率 f、外层屏蔽织物的相对电导率 σ_r 及磁导率 μ_r 有关，所以双层织物屏蔽效

能与外层织物屏蔽效能相关。由图 2 可知，面料 b 屏蔽效能小于面料 a，因而双层织物 bb 的屏蔽效能反而小于单层织物面料 a。在高频段，电磁屏蔽以织物对电磁波的吸收为主，屏蔽效能取决于频率 f、有效屏蔽体的厚度 t 及电导率 σ_r ，双层屏蔽织物有效屏蔽体的厚度比单层屏蔽织物的厚，因此双层织物的屏蔽效能比单层大，且显著提高。

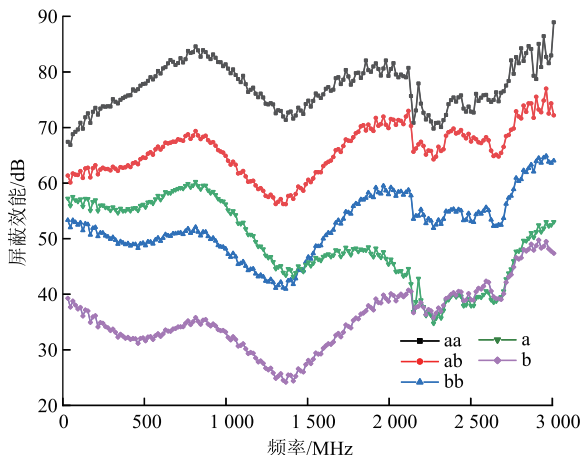


图 2 吸收型双层织物与单层的屏蔽效能对比
Fig. 2 Comparison of shielding efficiency between absorbed double-layer fabric and single layer

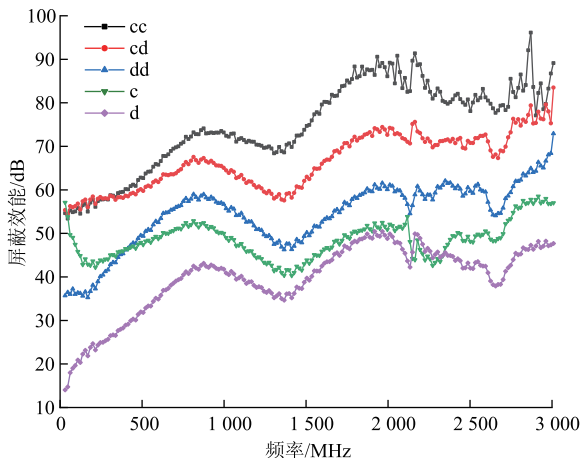


图 3 反射型双层织物与单层的屏蔽效能对比
Fig. 3 Comparison of shielding effectiveness of reflective double-layer fabric with single layer

此外，对比图 2 和图 3 可知，在测试频率范围内，吸收型和反射型双层织物屏蔽效能变化趋势基本相同，呈现出先上升再下降，再上升再下降，最后趋于平缓的态势。但是，吸收型双层织物在 30 ~ 1 500 MHz 范围内屏蔽效能峰值大于在 1 500 ~ 2 000 MHz 范围，反射型双层织物则相反，在 1 500 ~ 2 000 MHz 范围内屏蔽效能峰值大于 30 ~ 1 500 MHz 范围的。由高频磁场感应涡流屏蔽理论^[12]可知，在高频磁场下，屏蔽织物会产生感应电流并进一步形成反向磁场，导致电磁波耗损；随着

频率增大,吸收型面料产生的涡流效应增强,抵消原磁场电场的能力增加,因此屏蔽效能增大,但是涡流效应增加到一定程度后不再持续。因此,吸收型双层织物屏蔽效能高频段屏蔽效能增幅小于低频段;其次,随着微波频率的增加其波长越短,穿透织物的能力就越强,而吸收型面料反射电磁波能力弱于反射型面料,因此在高频段吸收型双层织物增幅小于反射型双层织物。

2.1.2 不同类型双层织物组合的屏蔽效能变化规律 吸收型与反射型叠加的双层织物屏蔽效能如图 4 所示。

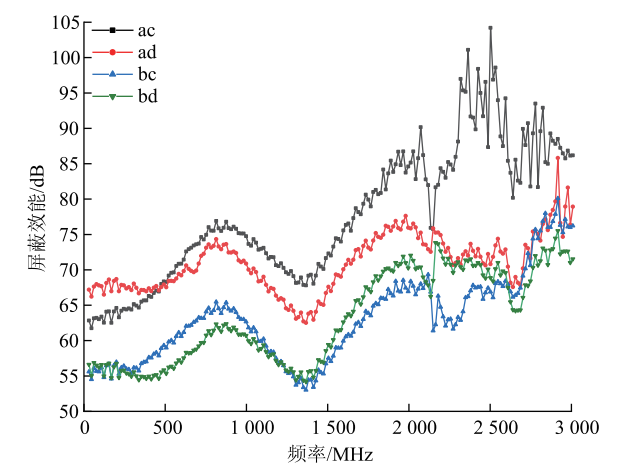


图 4 吸收型与反射型叠加的双层织物屏蔽效能
Fig. 4 Shielding effectiveness of double-layer fabric superimposed by absorption and reflection

由图 4 可以看出,在双层织物中屏蔽效能顺序为 $ac > bc, ad > bd$,且 ac 与 bc 的屏蔽效能之差大于 ad 与 bd 的屏蔽效能之差。由此可以推得,当里层面料相同时, a 作为外层面料的双层面料屏蔽效能均高于 b 作为外层面料的双层面料,这是由于单层织物 a 的屏蔽效能高于单层织物 b 的屏蔽效能(见图 2)。吸波主导型织物的屏蔽原理^[13]是织物将电磁波吸收后转变为其内能,就单层织物而言,在测试频率范围内面料 a 的屏蔽效能大于面料 b 。究其原因,面料 a 所具备的介电常数、高磁导率、高电磁损耗等条件优于面料 b ,面料 a 对于电磁波的吸收损耗大于面料 b 。因此,当选用同一种反射型面料作为里层织物,且透过电磁波的反射损耗相同时,双层织物的屏蔽效能取决于外层吸收层面料对于入射电磁波的吸收损耗能力。

由图 4 还可以看出,在测试频率范围内,不同类型双层织物屏蔽效能变化趋势基本相同;此外,在 2 000 ~ 3 000 MHz 范围内,双层织物 ac 的屏蔽效能呈先上升趋势,到 2 500 MHz 左右时达到巅峰值,而后呈下降趋势。这是因为面料 a 与面料 c 叠加之后

使得双层织物 ac 的经纬纱线交错,孔隙减小,金属导电网格结构紧密,导电性增大^[14],随着频率增大,涡流效应增强,屏蔽效能增大。但涡流效应增加到一定程度后,不会再增大,所以在 2 500 MHz 之后,屏蔽效能减小;并且随着微波频率的增加其波长越短,穿透织物的能力就越强,电磁波越难以被织物屏蔽。

2.2 叠放顺序对双层织物屏蔽效能的影响

2.2.1 同类型不同叠放顺序双层织物屏蔽效能变化规律 图 5 为同类型双层织物不同叠放顺序的屏蔽效能比较。

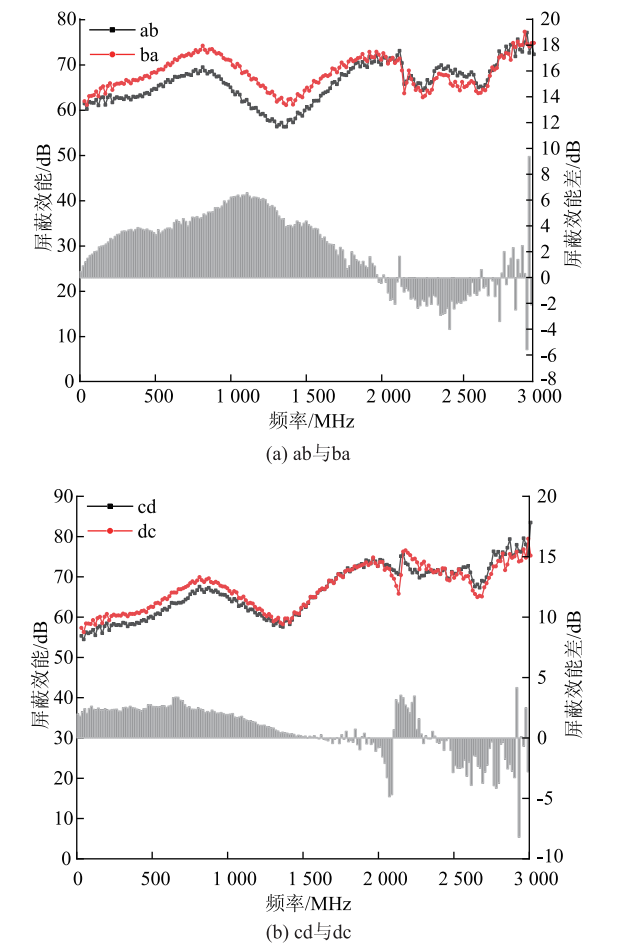


图 5 同类型不同叠放顺序的双层织物屏蔽效能对比
Fig. 5 Comparison of shielding effectiveness of double-layer fabric with same type and different stacking sequence

由图 5 可以看出,叠放顺序对同类型双层织物屏蔽效能有一定的影响。总体而言,在低中频段,无论是吸收型织物还是反射型双层织物,里层面料屏蔽效能高于外层面料时二者叠加组合的双层织物屏蔽效能好。这是因为单层面料 b, d 的金属含量少,孔隙较大,屏蔽效能低,其在里层会使透过的电磁波较强。以 ab 与 ba 为例,面料 a 的阻抗远小于面料 b ,由电磁波反射原理^[15]可知:

$$E_{R_1} = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} E_1 \quad (2)$$

$$H_{R_1} = \frac{A_2 - A_1}{A_1 + A_2} H_1 \quad (3)$$

对于 ab, $E_{R_1} \approx 0$, $H_{R_1} \approx H_1$, 因此磁场分量经多次反射被面料 a 吸收, 进入面料 b 的电场强度增强, 对于吸收型面料 b, 其金属含量少, 导电率小吸收损耗小, 且经纬密度小, 孔隙大, 电磁波透过大, 因此电

磁屏蔽效能低; 相反, 对于 ba, $E_{R_1} \approx E_1$, $H_{R_1} \approx 0$, 电场分量经多次反射被面料 b 吸收, 进入面料 b 的磁场强度增强, 由于面料 a 的磁导率大, 吸收消耗大, 经纬密度大, 孔隙小, 电磁波透过减小, 故屏蔽效能高。

2.2.2 不同类型不同叠放顺序双层织物屏蔽效能变化规律 图6为不同类型、不同叠放顺序的双层织物屏蔽效能比较。

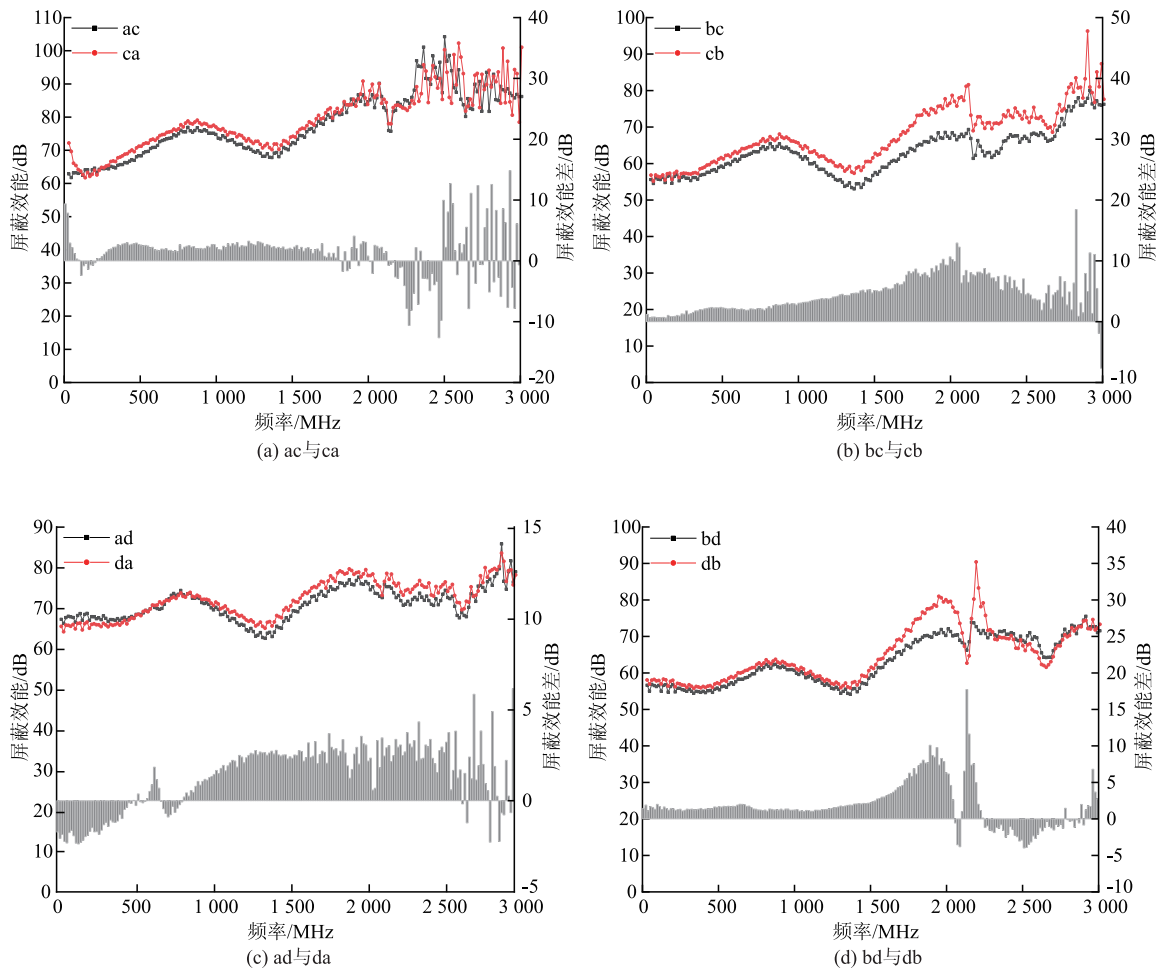


图6 不同类型、不同叠放顺序的双层织物屏蔽效能比较屏蔽效能对比

Fig. 6 Comparison of shielding effectiveness of double-layer fabric with different type and different stacking sequence

由图6可知, 总体而言, 外层使用反射型面料、里层使用吸收型面料叠加的双层织物屏蔽效能高。这是因为反射型面料电导率高, 磁导率低, 在对电磁场有很好屏蔽效果的同时又能衰减部分磁场强度, 使得里层不发生磁饱和现象; 吸收型面料磁导率高, 对磁场强度吸收能力强, 可以达到更好的屏蔽效果。而如果外层使用吸收型面料就很容易产生磁饱和现象, 致使屏蔽效能低。

由图6还可以看出, 无论是同类型还是不同类型双层织物组合, 在叠放顺序不同时, 将单层面料屏蔽效能差的置于外层的双层组合屏蔽效能高; 与

面料 b 与 d 组合的双层织物, 都是面料 b 和 d 在外层的屏蔽效能高。因为对于面料 b 和面料 d, 电磁波在双层电磁屏蔽织物之间多次反射增多, 其在里层会由于本身金属含量小、孔隙大而导致透过面料的电磁波较强; 其在外层, 则会因为里层面料的所含金属含量高、金属网密、电导率好, 增大了电磁波在双层屏蔽面料之间的多次反射衰减, 从而减少透过的电磁波。

3 结语

文中从面料类型角度出发研究对比了吸收型

与反射型面料叠加组合后的双层织物屏蔽效能变化规律,同时分析了叠放顺序对屏蔽效能的影响,得出如下结论:

相较单层织物,双层织物屏蔽效能高频段比在低频段提高得更多,且吸收型双层织物屏蔽效能高频段较反射型双层织物的增幅更大,但是增幅有限;双层织物叠放顺序不同时,无论是同类型还是不同类型双层织物组合,在一定频率范围内,双层织物组合时单层面料屏蔽效能高的面料在内层其屏蔽效能高;另外,不同类型不同叠放顺序双层织物采用外层反射型面料里层吸收型面料的双层组合屏蔽效能高。反射型织物在外层在一定程度上虽然能减小电磁波辐射的透过量,但并不能完全消除辐射本身的危害,过大的辐射反射量会形成二次污染,从而降低防护材料的合理应用价值。

参考文献:

- [1] 刘茜,吴湘济,秦臻. 几种电磁屏蔽面料屏蔽效能的研究[J]. 产业用纺织品, 2012, 30(10): 27-30.
LIU Qian, WU Xiangji, QIN Zhen. Research on the shielding effectiveness of several electromagnetic shielding fabrics[J]. Industrial Textiles, 2012, 30(10): 27-30. (in Chinese)
- [2] SCHULZ R B, PLANTZ V C, BRUSH D R. Shielding theory and practice[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(3): 187-201.
- [3] MARCINIAK K, GRABOWSKA K E, STEMPIEN Z, et al. Shielding of electromagnetic radiation by multilayer textile sets[J]. Textile Research Journal, 2019, 89(6): 948-958.
- [4] 梁然然,肖红,王妮. 双层及多层电磁屏蔽织物的屏蔽效能[J]. 纺织学报, 2017, 38(9): 51-58.
LIANG Ranran, XIAO Hong, WANG Ni. Shielding effectiveness of double and multilayer electromagnetic shielding fabric[J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(9): 51-58. (in Chinese)
- [5] 荣幸,刘哲,张永恒. 不锈钢纤维混纺型双层电磁屏蔽织物的屏蔽效能研究[J]. 丝绸, 2015, 52(5): 16-20.
RONG Xing, LIU Zhe, ZHANG Yongheng. Research on shielding effectiveness of stainless steel fiber blended type double-layer electromagnetic shielding fabrics[J]. Journal of Silk, 2015, 52(5): 16-20. (in Chinese)
- [6] 郑倩雪,刘哲,张永恒,等. 双层防电磁辐射织物的屏蔽效能[J]. 纺织学报, 2016, 37(1): 47-51.
ZHENG Qianxue, LIU Zhe, ZHANG Yongheng, et al.

Shielding effectiveness of double electromagnetic shielding fabric[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(1): 47-51. (in Chinese)

- [7] 汪秀琛,李亚云,段佳佳,等. 宽频范围同类型双层电磁屏蔽织物的屏蔽效能变化规律[J]. 现代纺织技术, 2020, 28(3): 21-26.
WANG Xiuchen, LI Yayun, DUAN Jiajia, et al. Variation rule of shielding effectiveness of same-type double-layer electromagnetic shielding fabric in wide frequency range[J]. Advanced Textile Technology, 2020, 28(3): 21-26. (in Chinese)
- [8] 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.
LI Yaping, WANG Xiuchen, PAN Zhen, et al. Research on applications of conductive sponge in electromagnetic shielding clothing[J]. Advanced Textile Technology, 2018, 26(1): 39-44. (in Chinese)
- [9] 杨苗苗,王瑄,王进美,等. 电磁屏蔽防护织物的研究进展[J]. 纺织科技进展, 2014(5): 1-3.
YANG Miaomiao, WANG Xuan, WANG Jinmei, et al. Research progress of electromagnetic shielding fabric[J]. Progress in Textile Science and Technology, 2014(5): 1-3. (in Chinese)
- [10] CHOI J, JUNG H T. A new triple-layered composite for high-performance broadband microwave absorption[J]. Composite Structures, 2015, 122: 166-171.
- [11] BRZEZINSKI S, RYBICKI T, KARBOWNIK I, et al. Light, multi-layer, screening textiles with a high capacity for absorbing electromagnetic fields in the high frequency range[J]. International Journal of Materials Research, 2012, 103(5): 638-642.
- [12] 黄帅. 服用织物电磁防护性能影响因素分析[D]. 天津:天津工业大学,2016.
- [13] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 2版. 北京:人民邮电出版社,2011.
- [14] 肖红,唐章宏,王群,施楣梧. 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.
XIAO Hong, TANG Zhanghong, WANG Qun, et al. Research on conductive grid structure and general influence factors to shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(2): 35-42. (in Chinese)
- [15] 钱照明,程肇基. 电力电子系统电磁兼容设计基础及干扰抑制技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2000.

(责任编辑:邢宝妹)