

DOI: 10.19333/j.mfkj.2017070260605

# 多层吸波机织物的结构设计

杨青青, 刘海文, 马晓红

(河北科技大学 纺织服装学院 河北 石家庄 050018)

**摘要:** 镍铁纤维具有磁导率高、吸波频带宽和吸收效率高等特点, 可将电磁波的部分能量转变为热能消耗掉。采用3种混纺比将羊绒与镍铁纤维混纺得到吸波功能纱线, 与纯羊绒纱线按1:3的配比分3层做经、纬纱排列, 设计并加工了接结3层织物, 改变了表组织中经纬纱的交织频率, 测试了织物的吸波性能。结果表明, 表层组织为平纹的织物吸波性能最好, 表层组织为1上3下斜纹和5枚8飞纬面缎纹的织物吸波性能较弱。

**关键词:** 镍铁纤维; 多层; 接结织物; 吸波性能  
**中图分类号:** TS 135.1      **文献标志码:** A

## Designing on multi-layer wave absorbing woven structures

YANG Qingqing, LIU Haiwen, MA Xiaohong

(College of Textile and Garment, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract:** Nickel-iron fiber can convert part of the energy of electromagnetic wave into heat energy due to its high permeability, wide frequency band and high electromagnetic wave absorption efficiency. Functional yarns were spun by mixing cashmere and the nickel fiber with three blend ratios, and then stitch woven to 3 layers fabrics with pure cashmere yarn in proportion to 1:3. The interweave frequency of warp and weft yarn in face structure was changed to examine the microwave absorbing property. The results show that the fabric with plain surface structure had best microwave absorbing performance and it decreased when the structure changed to 1/3 twill weave and 8/5 weft faced satin.

**Keywords:** nickel-iron fiber; multi-layer; stitch weave; microwave absorbing property

雷达吸波材料简称为吸波材料,它是能吸收投射到其表面的电磁波能量,并通过材料的介质损耗使电磁波能量转化为热能或其他形式的能量而耗散掉的一类材料。传统的外层涂覆型吸波材料难以满足现代隐身材料“宽、薄、轻、强”的需求,而结构型吸波材料,是当代隐身材料发展的重要方向<sup>[1]</sup>。

结构型吸波材料一般由透波层和吸波层组成,透波层首先让电磁波最大限度地进入隐身材料内部,吸波层将进入内部的电磁波转化为热能或其他形式的能量耗散掉。透波层主要通过多种纤维在多

个方向的混杂排布,使材料表面输入波阻抗和自由空间波阻抗匹配,尽量减少入射波的反射;吸波层则利用材料的厚度和锥体结构形成微波暗室,使微波阻抗从空气到吸波材料底端逐渐衰减,达到良好的吸波性能<sup>[2]</sup>。

镍铁纤维单位体积中储存的磁能较高,介电损耗吸收较强,磁导率较高,电阻率较低,在外界交变电磁场的作用下,可将电磁波的部分能量转变为热能消耗掉<sup>[3]</sup>。根据结构型吸波材料的原理,设计3层接结机织物吸波面料,以镍铁纤维和羊绒为原料,在织物表面利用羊绒纤维电导率低的优点,尽可能减少电磁波的反射,使其充分进入织物内部。内层织物利用镍铁纤维磁导率大的特点,充分吸收电磁波。此织物具有柔软、轻质、保暖、吸波性好等特点,可作为冬季战士作战服、特殊作业人员的防护服等隐身吸波面料。

收稿日期: 2017-07-28

基金项目: 河北省大学生创新创业训练计划项目资助 (201710082040)

第一作者简介: 杨青青, 本科生, 主要研究方向为功能性纺织品设计与加工。通信作者: 马晓红, E-mail: 1755890050@qq.com。

# 1 羊绒纱和镍铁纤维混纺纱的配伍

混杂纤维吸波材料可以通过纤维间的混杂排布和编织,使材料表面输入波阻抗和自由空间波阻抗匹配,是当代隐身材料发展的重要方向<sup>[2]</sup>。采用羊绒股线、羊绒与镍铁纤维混纺纱线,设计了3层接结结构的吸波织物。羊绒/镍铁纤维混纺纱线的配比如表1所示。

表1 镍铁纤维含量设计

股线编号	原料组分	镍铁纤维含量/%	股线线密度/tex
a	羊绒	0	36 × 2
b	羊绒/镍铁纤维混纺	8.34	36 × 2
c	羊绒/镍铁纤维混纺	11.11	36 × 2
d	羊绒/镍铁纤维混纺	13.89	36 × 2

在织物各层进行了纱线搭配和排列比设计,如表2所示。可以看出,表层的镍铁纤维含量仅为2.1%,目的是避免镍铁纤维间形成导电网格而导致大量电磁波被表面反射,中层、里层的镍铁纤维含量分别为2.8%和3.5%,可发挥镍铁纤维对电磁波的充分吸收作用<sup>[4]</sup>。

表3 织物组织设计

织物编号	表层组织	中层组织	里层组织	经纬纱排列比 表层:中层:里层	组织循环经(纬) 纱数 $R_j(R_w)$ /根
1#	平纹	平纹	平纹	1:1:1	24
2#	1上3下斜纹	平纹	平纹	1:1:1	24
3#	8枚5飞纬面缎纹	平纹	平纹	1:1:1	24

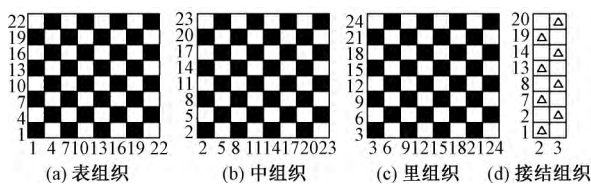


图1 1#织物的表、中、里组织图及接结组织图

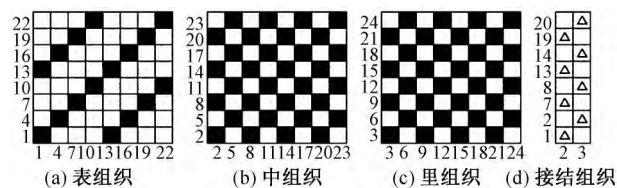


图2 2#织物的表、中、里组织图及接结组织图

采用中层经纱接结表层纬纱联合里层经纱接结中层纬纱的方法进行了表里层之间的联结。为了直观表达1#~3#织物中经纬纱的接结状态,做了纬纱1及纬纱2在织物中的纬向截面示意图,分别如图4~6所示,图中圆形截面均代表经纱。为了满足

表2 织物各层纱线的种类和排列比

织物层次	搭配股线	经、纬向 2种股线排列比	镍铁纤维混纺 股线用量/%	镍铁纤维 含量/%
表层	a和b	a:b为3:1	25	2.1
中层	a和c	a:c为3:1	25	2.8
里层	a和d	a:d为3:1	25	3.5

# 2 接结3层吸波织物结构设计

## 2.1 织物结构设计

一般单一介质单层材料的电磁参数调整范围较小,很难在宽频率范围内同时满足阻抗匹配和强吸收<sup>[5]</sup>。采用2组分3层接结的空心结构,表层形成电磁参数阻抗匹配,内层对电磁波充分的吸收。织物具有整体性好,不分层且无胶合,良好的吸湿、透气及保暖性。3层组织结构由3个系统的经纱和3个系统的纬纱构成,各自独立系统的经纬纱交织形成织物的表层、中层和里层<sup>[6]</sup>。为了比较不同的经纬纱交织频率对吸波性能的影响,织物的组织设计如表3所示,织物组织图及接结组织图如图1~3所示。图中横向数字表示经纱序号;纵向数字表示纬纱序号;△表示提综。

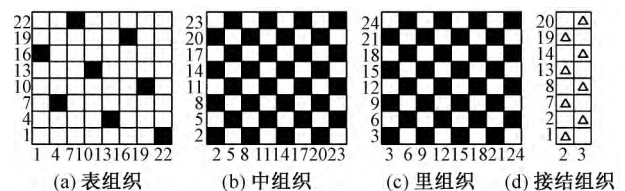


图3 3#织物的表、中、里组织图及接结组织图

对微波阻抗匹配和强吸收的要求,中层及里层经纱每间隔7根会分别与上层和中层纬纱发生接结,即在1个完整的组织循环里,中层组织的经纱中只有经纱2与表层组织纬纱1、7、13、19进行交织,里层组织的经纱中只有经纱3与中层组织纬纱2、8、14、20交织。

## 2.2 织物规格及上机设计

为了使3层经纱在钢筘中更好的重叠,每筘齿采用3入,即1表1中1里穿入同一筘齿。由于经纱2、经纱3分别与表层、中层的纬纱进行接结(见图1~3),织造时送经量明显大于其他经纱,需要

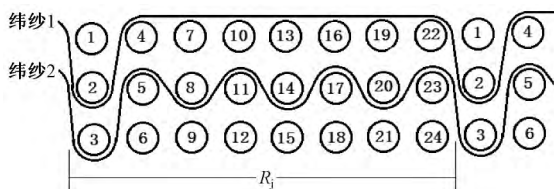


图4 1# 织物纬纱1、纬纱2的纬向截面示意图

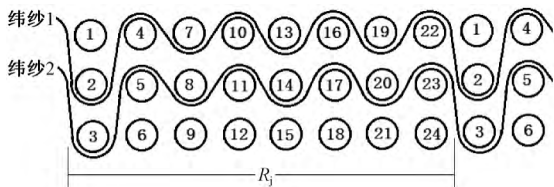


图5 2# 织物纬纱1、纬纱2的纬向截面示意图

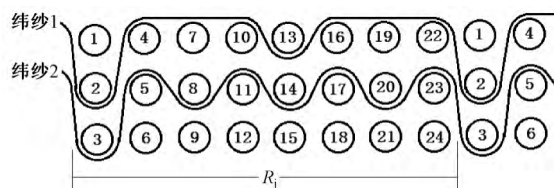


图6 3# 织物纬纱1、纬纱2的纬向截面示意图

采用双轴送经。3种织物采用的原料配比、织物密度等其他参数均相同。织物规格及上机工艺参数见表3。由图1~6得到各织物上机图,如图7~9所示。

表3 织物规格及上机工艺参数

织物结构类型		接结3层空心吸波织物
纱线线密度/tex		77
经密/(根·(10 cm) <sup>-1</sup> )		108
纬密/(根·(10 cm) <sup>-1</sup> )		96
织物缩率/%		经向 14.8 纬向 11.1
双轴送经	经轴1 经轴2	接结经纱 其余经纱
穿箱根数		1箱3入
箱号/(齿·(10 cm) <sup>-1</sup> )		32

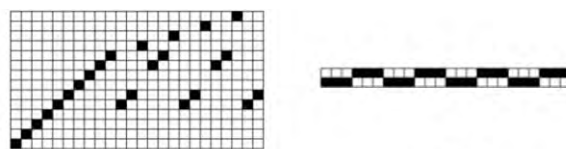
### 2.3 不同组织经纬纱屈曲程度研究

当其他因素一定时,经纬纱在织物中的屈曲程度可以通过平均浮长对比得出<sup>[7]</sup>。平均浮长值越大,纱线屈曲越小,织物结构越松。平均浮长按式(1)计算。

$$F_j = \frac{R_w}{t_j} \quad F_w = \frac{R_j}{t_w} \quad (1)$$

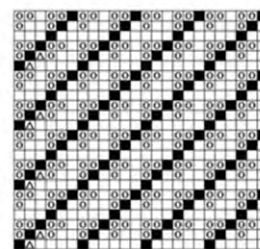
式中:  $F_j$ 、 $F_w$  分别为经、纬纱的平均浮长;  $R_j$ 、 $R_w$  分别为组织循环经、纬纱数;  $t_j$ 、 $t_w$  分别为经、纬纱的交错次数。

为了研究经纬纱的屈曲程度对织物吸波性能的

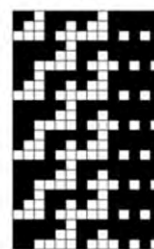


(a) 穿综图

(b) 穿箱图

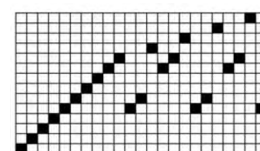


(c) 组织图



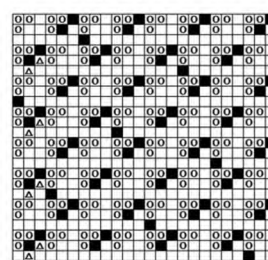
(d) 纹板图

图7 1# 织物上机图

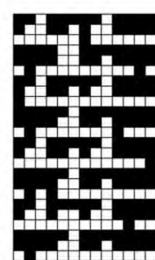


(a) 穿综图

(b) 穿箱图

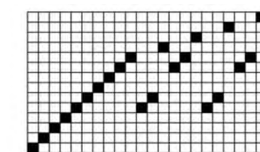


(c) 组织图



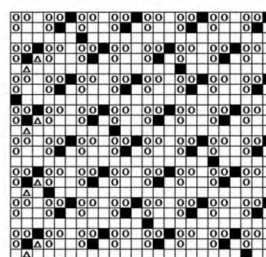
(d) 纹板图

图8 2# 织物上机图

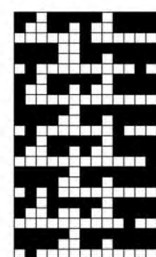


(a) 穿综图

(b) 穿箱图



(c) 组织图



(d) 纹板图

图9 3# 织物上机图

影响接结3层吸波织物的表层分别选取3种组织,其平均浮长的计算结果如表4所示。由表4可以看出,每种组织的经纬向平均浮长一致,但3种组织之间平均浮长差异明显。当其他因素一定时,平纹织物经纬纱屈曲程度最大,织物结构最紧密;8枚5飞纬面缎纹织物经纬纱屈曲最小,结构最疏松;1上

表4 织物表组织平均浮长

织物编号	表层组织	$R_j(R_w)$	$t_j(t_w)$	$F_j(F_w)$
1 <sup>#</sup>	平纹	2	2	1
2 <sup>#</sup>	1上3下斜纹	4	2	2
3 <sup>#</sup>	8枚5飞纬面缎纹	8	2	4

3下斜纹居中。

### 3 吸波性能测试与分析

吸波材料所吸收的雷达波属于微波,频率分布在2~18 GHz范围内。吸波材料的反射系数 $R$ 与反射率的关系<sup>[8]</sup>见式(2):

$$R = 10 \lg \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2)$$

式中: $R$ 为吸收材料的反射系数,dB; $\varepsilon_1$ 为吸波材料反射率,%; $\varepsilon_2$ 为金属板材反射率,%。

实验中金属板材反射率为100%。由式(2)可导出吸波材料的反射率计算公式:

$$\varepsilon_1 = 10^{R/10} \quad (3)$$

吸波材料的吸收率与反射率的关系式见式(4)。

$$\varepsilon_3 = 1 - \varepsilon_1 \quad (4)$$

式中 $\varepsilon_3$ 为吸波材料吸收率,%。

反射系数 $R$ 越小,则反射率越低,吸收率越高,说明材料的吸波能力越好。

按照GJB 2038—1994《雷达吸波材料反射率测试方法》,采用Agilent8720ET矢量网络分析仪对3种织物进行测试<sup>[9]</sup>,得到频率在2~18 GHz范围内的反射系数曲线,如图10所示。

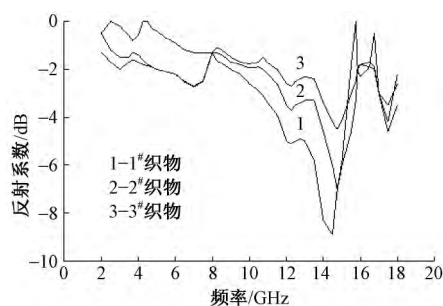


图10 3种吸波织物的反射系数曲线

3层接结空心织物由于具有立体结构特征和蓬松的空气层,电磁波入射后通过复杂的反射、透射和折射,形成了多次吸收和衰减,因而均有良好的吸波性能。从图10可以看出:在5~13 GHz范围内,3种织物的反射系数下降明显,吸波效果快速递增;从曲线的整体走势看出,3种织物相比,反射系数由高到低为1<sup>#</sup><2<sup>#</sup><3<sup>#</sup>,对微波的吸收率由高到低为1<sup>#</sup>>2<sup>#</sup>>3<sup>#</sup>。

从图10还可看出:在14~16 GHz范围内,3块织物的反射系数曲线先后出现吸收峰(即吸收率的最大值);1<sup>#</sup>织物在频率为14.64 GHz时,反射系数最小,为-8.79 dB;2<sup>#</sup>织物在频率为15.02 GHz时,反射系数最小,为-6.72 dB;3<sup>#</sup>织物在频率为15.22 GHz时,反射系数最小,为-4.47 dB。根据式(3)和(4),计算3种织物的反射率和吸收率,结果如表5所示。可以看出,1<sup>#</sup>织物吸收率最高,2<sup>#</sup>织物吸收率居中,3<sup>#</sup>织物吸收率最低。

表5 织物在吸收峰对应的反射率及吸收率比较

织物种类	表层组织	吸收峰频率/GHz	反射系数/dB	反射率/%	吸收率/%
1 <sup>#</sup>	平纹	14.64	-8.79	13.1	86.9
2 <sup>#</sup>	1上3下斜纹	15.02	-6.72	21.3	78.7
3 <sup>#</sup>	8枚5飞纬面缎纹	15.22	-4.47	35.7	64.3

结合2.3分析可以得出,其他条件相同时,织物中经纬纱的屈曲程度会影响其吸波性能。屈曲程度越大,吸收电磁波的效率越高。1<sup>#</sup>织物的3层均采用平纹组织,平均浮长最小,织物中纱线屈曲剧烈,交织点形成了很多类似尖锥的立体结构<sup>[10]</sup>,对电磁波的吸收更加充分。2<sup>#</sup>和3<sup>#</sup>织物随着平均浮长增大,吸波性能逐渐减弱。

### 4 结论

①在3层接结空心吸波织物中,羊绒与镍铁纤维在3个方向以不同比例混杂排列,可避免镍铁纤维间形成导电网格而导致大量电磁波被表面反射。

②3层接结空心吸波织物作为结构型吸波材料,内部有空气层和丰富的纤维毛羽,电磁波入射后通过复杂的反射、透射和折射被充分吸收和耗损,测试结果显示,3种织物均具有良好的吸波性能。

③其他条件相同时,织物的吸波性能会受到经纬纱平均浮长的影响。经纬纱平均浮长越小,吸收率越高。上层为平纹的织物吸波性能优于上层为斜纹或缎纹的织物。

④3层接结空心吸波织物具有无胶合、不分层的特点,保持了羊绒织物轻盈柔软、吸湿透气、保暖的优良特性。

#### 参考文献:

- [1] 张健,张文彦,奚正平. 隐身吸波材料的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S4): 504-508.
- [2] 樊威,孟家光,孙润军,等. 混杂纤维增强结构隐身复合材料研究进展[J]. 纺织导报, 2017(1): 66-68.
- [3] 魏赛男,李瑞洲,陈利,等. 吸波铁纤维的结构及性能[J]. 纺织学报, 2013, 34(1): 16-19.

- [4] 周灵. 羊毛/不锈钢纤维混纺纱及其织物抗电磁辐射性能研究[J]. 毛纺科技, 2016, 44(11): 18-21.
- [5] 李旺昌, 周祥, 应耀, 等. 雷达吸波隐身材料的进展及发展趋势[J]. 材料导报, 2015, 29(S2): 353-357.
- [6] 臧海迪, 白燕. 多层接结织物的设计技巧[J]. 毛纺科技, 2014, 42(11): 1-3.
- [7] 荆妙蕾. 织物结构与设计[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2014.
- [8] 彭志远. 镍铁纤维柔性吸波机织物的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2013.
- [9] 何山. 雷达吸波材料性能测试[J]. 材料工程, 2003(6): 25-28.
- [10] 丁志荣, 张琰卿, 温娇, 等. 绒面吸波织物的制备及其吸波性能[J]. 纺织学报, 2015, 36(10): 44-48.