

# 金属纤维混纺电磁屏蔽织物的研究进展

吴依琳<sup>1</sup>,李永贵<sup>1,2,3,\*</sup>,麻文效<sup>1</sup>

(1.内蒙古工业大学 轻工与纺织学院,内蒙古 呼和浩特 010080;

2.闽江学院 服装与艺术工程学院,福建 福州 350108;

3.福建省新型功能性纺织纤维及材料重点实验室,福建 福州 350108)

**摘要:**金属纤维不仅力学性能优异,而且具有良好的导电性,被广泛用于信号传输、防静电和电磁屏蔽等领域。金属纤维与普通纤维混纺得到的织物在防电磁辐射方面具有较好的应用。通过查阅文献和实证调查,阐述了电磁屏蔽织物的研究应用现状,探究了金属纤维混纺电磁屏蔽织物的制备原理,对其种类及性能进行了归纳,指出了在实际应用中存在的问题及未来的发展方向。

**关键词:**电磁屏蔽;金属纤维;混纺;织物

**中图分类号:**TS102.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-0356(2020)06-0001-04

在日常生活和工作中,人们所接触的一切电子设备几乎都会发射出电磁辐射,电磁污染成为危害生命、破坏设备运行的一大问题<sup>[1]</sup>。在现代战争中,一旦遭受电磁武器的攻击,军事机密就可能被窃取,因此,人们越来越重视电磁屏蔽织物的研发<sup>[2-4]</sup>。电磁屏蔽织物可分为金属纤维织物、金属镀层织物、导电涂层织物等<sup>[5-7]</sup>。日常生活中,使用电磁屏蔽纺织品越来越多,市场销售的电磁屏蔽纺织品主要是采用金属纤维电磁屏蔽织物制成的。金属纤维电磁屏蔽织物主要分为金属纤维混编织物和金属纤维混纺织物。本文归纳总结了金属纤维混纺电磁屏蔽织物的研究进展,为进一步深入研究该类织物提供参考。

## 1 金属纤维混纺织物的屏蔽原理

金属纤维混纺织物是由金属纤维混纺纱织成的。将金属丝抽成纤维状,然后与其他纤维混纺制成导电纱,最后织成织物,利用混纺纱线中金属纤维的导电性反射电磁波<sup>[8]</sup>。金属丝混纺织物的金属纤维在织物表面会形成导电网,对电磁波具有强烈的反射与吸收效果。当电磁波辐射到织物表面,这些均匀分布的金属纤维会将一部分电磁波反射回去,另一部分电磁波被

金属纤维吸收,从而减少了电磁波的透过量,起到屏蔽作用<sup>[9]</sup>。电磁屏蔽的有效性用屏蔽效能(SE)来表征,其定义如式(1)所示:

$$SE = 20 \lg \frac{E_1}{E_2} = 20 \lg \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

式(1)中, $E_1$ 为无屏蔽时的电场强度(N/C), $E_2$ 为有屏蔽时的电场强度(N/C); $H_1$ 为无屏蔽时的磁场强度(A/m), $H_2$ 为有屏蔽时的磁场强度(A/m)。屏蔽效能以分贝(dB)为单位,屏蔽效能值越大,表明屏蔽效果越好<sup>[10-11]</sup>。

## 2 金属纤维混纺电磁屏蔽织物的制备及性能

### 2.1 金属纤维的制备

金属纤维是以金属或合金为原料,经特定的加工工艺获得的纤维状材料。它不仅具有金属本身固有的特点,如优良的导电性、导热性和导磁性等,还具有纤维材料的柔韧性、可纺性等优点<sup>[12]</sup>。常见的金属纤维制备方法主要有几种。

(1)线材拉拔法是将较粗的金属线材在拉伸作用下通过拉丝模孔,使其发生塑性变形,制备较细纤维<sup>[13]</sup>。根据线材拉拔的数量,又可分为单丝拉拔法和集束拉拔法。单丝拉拔法是将单束金属线材通过孔径递减的超硬质合金或金刚石的拉丝模具,使其多次连续拉拔,从而得到要求细度的纤维<sup>[14]</sup>;集束拉拔法是将多束(如上万束)金属线材集为一束,外加包覆材料使其同步接受拉拔,这种方法改善了单丝拉拔法成本高、易断裂的缺点<sup>[15]</sup>。

收稿日期:2020-03-19;修回日期:2020-03-24

基金项目:中央引导地方科技发展专项项目(2018L3012);福建省基础研究及高校产学研合作计划(高校产学研合作)项目(2019H6019);福州市科技计划项目(2018-G-50)

作者简介:吴依琳(1996-),女,硕士研究生,主要从事功能纺织材料的研究。

\*通信作者:李永贵(1972-),教授,博士,主要研究方向为功能纺织纤维及材料,E-mail:liyonggui@mju.edu.cn。

(2)熔融纺丝法是将金属或合金材料熔融成熔体后,通过一定工艺使其形成液态流体并迅速冷却,从而制备金属纤维。由于金属熔体更倾向形成液滴而非线流,不易形成连续稳定的液流,给制备具有一定长度的金属纤维造成了困难<sup>[16]</sup>。

(3)机械切削法是以固态金属为原料,采用特制刀具直接切削成金属纤维的加工方法。该方法工艺流程简单,生产周期短,成本低,且不需要特殊装置,成为目前最广泛使用的金属纤维制备方法<sup>[17]</sup>。

上述3种制备方法通常用于制备微米级以上的金属纤维。目前,纳米级金属纤维的制备方法有有机凝胶-热分解法、模板法、物理/化学气相沉积法以及静电纺丝法等<sup>[18]</sup>。其中最常用的还是静电纺丝法,其工艺流程如图1所示<sup>[19-20]</sup>,该方法由于难以规模化制备,尚未实现工业化生产。

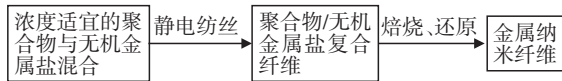


图1 静电纺丝法工艺流程

## 2.2 金属纤维混纺织物

目前,金属丝混纺屏蔽织物最常用的金属纤维主要是不锈钢纤维,部分采用银纤维、镍纤维和铜纤维。一般情况下,屏蔽织物中的金属纤维混合比例为5%~30%,织物中金属纤维比例越高,织物的屏蔽效能越好。当金属纤维超过一定量后,会使织物的手感变得厚、重、硬、不耐折,因此,确定合适的金属纤维混纺比尤为重要<sup>[21]</sup>。除了采用金属纤维混纺成纱的方法外,还可以制备包覆纱,以金属丝为芯,将普通纤维包覆在外层,获得具有屏蔽效能的纱线。混纺纱的优点是屏蔽效果持久,经反复多次水洗后屏蔽效能值不会下降;缺点是金属纤维容易在浅色织物中显露出来。包覆纱的优点是屏蔽效果好且持久,而且能够将金属纤维隐藏在纱线内部,缺点是易起毛起球。

### 2.2.1 不锈钢纤维混纺织物

组织结构不同的梭织物对电磁屏蔽性能有着不同的影响。林铭港等<sup>[22]</sup>认为在其他条件相同的情况下,平纹织物的电磁屏蔽性能最好,斜纹织物次之,缎纹织物最差。这是因为平纹织物的组织浮长线短,织物结构紧密,孔隙小,电磁波透过率低,因此,其屏蔽性能最好;而缎纹织物的组织浮长线较长,织物结构松散,孔隙大,电磁波透过率高,因此,其屏蔽性能较差;斜纹织物则介于两者之间。

针织物结构对织物电磁屏蔽性能影响较大。王金凤等<sup>[23]</sup>采用纯棉纱以及不锈钢长丝(8 μm)用横机编织成1+1罗纹、2+2罗纹、畦边组织、罗纹空气层和罗纹半空气层组织。5种织物的屏蔽效能不同频率范围内均可达20 dB以上。在这5种组织中,屏蔽效果最好的是畦边组织,这可能是由于畦边织物的组织结构较为紧密所致。

金属纤维混纺非织造布的电磁屏蔽性能稍差一些。Ozen Mustafa Sabri等<sup>[24]</sup>将不锈钢纤维(12 μm)与涤纶纤维按照一定比例混合,通过针刺法得到不锈钢纤维比例分别为5%、10%、20%、25%、30%的非织造布。在0~3 000 MHz范围内,织物的屏蔽效能随着不锈钢纤维含量的增加而增大,但最高仅达18 dB,屏蔽效果不佳。其原因非织造布的纤维排列杂乱无序,存在较多的孔隙,使得电磁波容易穿透。

不同的纺纱方式也会对织物的电磁屏蔽性能产生不同的影响。闫鑫鑫等<sup>[25]</sup>采用涤纶/不锈钢短纤(8 μm)混纺,混纺比为80/20,通过全聚纺(紧密纺的一种)、赛络菲尔纺和赛络纺的方法,分别得到全聚混纺纱、赛络菲尔包缠纱和赛络包芯纱,在0~1 500 MHz范围内,包缠纱织物和包芯纱织物的SE值都能达到20 dB以上,而混纺纱织物的SE值难以达到20 dB以上。其原因是在混纺纱中,不锈钢纤维以非连续的方式排列,而包芯纱和包缠纱中的不锈钢纤维都是连续排列,能够沿着纱线轴向形成有效的电连接,因此,其导电性更胜一筹,电磁屏蔽性能也更好。

织物紧度也是影响电磁屏蔽性能的重要因素之一。Liu Zhe等<sup>[26]</sup>将不同线密度(41.67、31.25、25 tex)的不锈钢/棉纤维混纺纱分别织成平纹、斜纹和缎纹织物(其中平纹织物为主要研究对象)。随着织物紧度从60%增大到120%,其SE值由最初的13 dB增加到31 dB左右,说明织物紧度与电磁屏蔽性能呈正相关。但是,当织物紧度超过100%时,SE的增加程度变小,这是由于织物紧度的增加使得纱线之间的空隙越来越小,单位面积内金属纤维的数量越来越多,当紧密度增加到一定程度时,间隙中金属纤维的增加趋于稳定,因此SE的增加也趋于稳定。

金属纤维的含量对于织物电磁屏蔽性能有着最直接的影响。周灵等<sup>[27]</sup>选用羊毛纤维与不锈钢纤维(7.8 μm)混纺,不锈钢纤维含量分别为5%、10%、15%、20%、25%。在不同频率条件下,随着不锈钢纤

维含量的增加,织物的 SE 值不断升高。但是,当不锈钢纤维含量超过 15% 时,纱线的力学性能下降,毛羽指数增加,条干均匀度下降,容易出现断头现象。由此认为,混纺纱的不锈钢纤维含量应该控制在 15% 以内。

此外,金属纤维的含量对织物的透气性有着明显的影响。Palanisamy Sundaramoorthy 等<sup>[28]</sup>将不锈钢纤维(8 μm)与丙纶纤维按照不同混纺比(1/99、10/90、20/80、40/60、75/25)混纺成纱,织得 5 种斜纹织物。所有织物中,透气性最好的是混纺比为 75/25 的纱线织成的织物,因为该织物金属纤维含量高、刚度大导致织物蓬松度提高,容易形成更大的气孔,从而提高了织物的透气性。

### 2.2.2 其他纤维混纺电磁屏蔽织物

银纤维电磁屏蔽性能也十分优异。李丹等<sup>[29]</sup>以银纤维为外包纱,棉纱为芯纱,制成银/棉包覆纱,以此为经纱;纬纱为镀银长丝与棉纱线按不同的比例间隔排列而成,经纬密度分别为 350、205 根/10 cm,织物组织为平纹。该织物电磁屏蔽效率达到了 99.99% 以上,屏蔽效果优异;在 10~3 000 MHz 范围内,织物的 SE 值几乎都在 40 dB 以上,最高达到 58.4 dB。张谭<sup>[30]</sup>采用长绒棉纱与银纤维重叠成圈,使得银纤维被棉纱覆盖,大大改善了织物的外观与面料的服用性。由此获得的织物重量为 200~260 g/m<sup>2</sup> 之间,其 SE 值基本都在 40 dB 左右。该面料不仅透气性好,屏蔽性能优异,同时由于银纤维受到棉纱的遮盖保护,使其屏蔽性能更持久。

镍丝混纺织物的电磁屏蔽性能不如不锈钢丝混纺织物与银纤维混纺织物。王建明等<sup>[31]</sup>将涤棉纱与镍金属丝按照不同的比例制成合股纱,再通过改变纱线的经纬密,织成不同含量的金属丝梭织物。在 0~500 MHz 范围内,该织物阻挡了 80% 以上的电磁波,说明织物在该波段范围内具有良好的电磁屏蔽性能。但是,织物的电磁屏蔽性能随着电磁波频率的增加而下降。当电磁波频率高于 700 MHz 时,电磁波的透过率急剧增加,这一现象表明镍金属丝混纺织物对高频电磁波的屏蔽性能较差。

铜丝混纺织物的电磁屏蔽性能在中、低频范围内非常好,但在高频范围内,其屏蔽性能较差。Cheng Kuobing 等<sup>[32]</sup>以玻璃纤维为增强体,铜丝为导电相,丙纶为外包纱,通过空心锭子纺纱法,获得导电包覆纱。再用此纱线制备 4 种不同组织结构的针织物(纬平织

物、纬平内嵌织物、1+1 罗纹织物、2+1 罗纹织物)。在 0.3~1 500 MHz 范围内,织物的 SE 值基本维持在 20 dB 左右及以上,最高达到 107.37 dB,屏蔽效果较好;在 1 500~3 000 MHz 范围内,织物的 SE 值大部分在 15 dB 左右及以下,屏蔽效果较差。

不同金属纤维的电磁屏蔽性能不同,见表 1。

表 1 不同电磁辐射频率波段内的不同金属纤维的屏蔽效能

纤维种类	低频段	中频段	高频段
	(0~300 MHz) SE 值/dB	(300~1 200 MHz) SE 值/dB	(1 200~3 000 MHz) SE 值/dB
不锈钢纤维	30~60	20~45	5~20
银纤维	55~60	45~55	35~45
镍丝	10~25	5~15	0~5
铜丝	40~110	15~40	0~15

## 3 结语

电磁屏蔽织物在军工领域和日常生活中占据越来越重要的位置。当前研究较多的为不锈钢纤维混纺织物,该织物在中低频范围内屏蔽效果较好,在高频范围内屏蔽效果不稳定。银纤维大多用于抗菌织物,但其电磁屏蔽效果也很好,在低中高频范围内其屏蔽效能值都比较高,有待深入研究。铜纤维和镍纤维织物对中低频电磁射线的屏蔽效果较好,但对高频电磁射线的防护性能较差。织物的电磁屏蔽效能随着金属纤维含量的增加而升高;金属纤维在纱体中排列连续性越好,其电磁屏蔽效果越好;相对而言,织物结构越致密,电磁屏蔽性能越好。但是,织物电磁屏蔽效能越高,说明织物导电性越好,但也伴随着安全隐患。

今后,应致力于降低金属纤维的细度,进一步优化织物结构设计,改进织物后整理技术,改善织物手感、色牢度、耐磨性等,在赋予织物良好屏蔽性能的同时,提高织物的服用性能及其他综合应用性能。

### 参考文献:

- [1] DUSCA A I. Electromagnetic pollution and human health [J]. *Journal of Life Science*, 2010, 4 (3): 61-63.
- [2] TAN Y, LI J, GAO Y, *et al.* A facile approach to fabricating silver-coated cotton fiber non-woven fabrics for ultrahigh electromagnetic interference shielding[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 458(15): 236-244.
- [3] LIU Z, ZHANG Y, RONG X, *et al.* Influence of metal fibre content of blended electromagnetic shielding fabric on shielding effectiveness considering fabric weave[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2015, 23(4): 83-87.
- [4] ENGIN F Z, USTA I. Electromagnetic shielding effec-

- tiveness of polyester fabrics with polyaniline deposition [J]. *Textile Research Journal*, 2014, 84(9): 903-912.
- [5] BEDELOGLU A. Investigation of electrical, electromagnetic shielding, and usage properties of woven fabrics made from different hybrid yarns containing stainless steel wires[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2013, 104(12): 1 359-1 373.
- [6] TOPP K, HAASE H, DEGEN C, *et al.* Coatings with metallic effect pigments for antimicrobial and conductive coating of textiles with electromagnetic shielding properties [J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2014, 11 (6): 943-957.
- [7] ABRAHAM J, MOHAMMED A P, XAVIER P, *et al.* Investigation into dielectric behaviour and electromagnetic interference shielding effectiveness of conducting styrene butadiene rubber Composites containing ionic liquid modified MWCNT[J]. *Polymer*, 2017, 112: 102-115.
- [8] LOU C W, HE C H, LIN J H. Manufacturing techniques and property evaluations of conductive elastic knits[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, 49(4): 503-533.
- [9] YANG Y, WANG J P, LIU Z, *et al.* A new study on the influencing factors and mechanism of shielding effectiveness of woven fabrics containing stainless steel fibers[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2019, 1: 1-17.
- [10] NERUDA M, VOJTECH L. Electromagnetic shielding effectiveness of woven fabrics with high electrical conductivity: complete derivation and verification of analytical model [J]. *Materials*, 2018, 11: 1-20.
- [11] JAGATHEESAN K, RAMASAMY A, DAS A, *et al.* Electromagnetic shielding effectiveness of carbon stainless steel polypropylene hybrid yarn-based knitted fabrics and their composites[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2018, 109(11): 1 445-1 457.
- [12] 庾莉萍. 金属纤维的特性及其开发应用[J]. *金属制品*, 2009, (3): 45-49.
- [13] 翟世先, 翟海平, 王 进, 等. 铬不锈钢线材无酸拉拔工艺探讨[J]. *金属制品*, 2017, (1): 5-6, 10.
- [14] 姚利丽, 周志嵩, 王 威, 等. 超高强钢拉拔影响单丝扭转性能的相关因素[J]. *金属制品*, 2019, 45(3): 1-7.
- [15] 邱从章, 刘楚明. 集束拉拔法金属纤维的现状和发展趋势 [J]. *金属材料与冶金工程*, 2007, (2): 14-18.
- [16] LIM T H, LEE S H, YEO S Y. Highly conductive polymer/metal/carbon nanotube composite fiber prepared by the melt-spinning process[J]. *Textile Research Journal*, 2017, 87(5): 593-606.
- [17] 石 丹. 金属纤维的生产方法、应用及展望研究[J]. *中国金属通报*, 2018, (5): 221-222.
- [18] 闵福贵, 李 涛, 张立红. 纳米金属纤维的湿化学法制备技术[J]. *洛阳理工学院学报(自然科学版)*, 2011, (2): 8-11, 16.
- [19] MEI L, CHEN H, SHAO Y, *et al.* Highly aligned magnetic composite nanofibers fabricated by magnetic-field-assisted electrospinning PAN/FeCo solution [J]. *High Performance Polymers*, 2019, 31(2): 230-237.
- [20] CHOI J, PARK J, KANG J, *et al.* Investigation of physicochemical properties of CuSn-based PAN nanofibers prepared via electrospinning method[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2019, 5: 641-648.
- [21] 陈 莉, 薛 洁, 李 皓, 等. 电磁屏蔽织物的研究现状 [J]. *纺织导报*, 2018, (3): 68-71.
- [22] 林铭港, 温惠文, 杨甜甜, 等. 含不锈钢纤维机织物的电磁屏蔽效能研究[J]. *轻纺工业与技术*, 2018, (9): 5-7.
- [23] 王金凤, 张 勇. 电磁屏蔽用罗纹导电针织物的设计及性能分析[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2019, (5): 1-12.
- [24] OZEN M S, SANCAK E, BEYIT A, *et al.* Investigation of electromagnetic shielding properties of needle-punched nonwoven fabrics with stainless steel and polyester fiber [J]. *Textile Research Journal*, 2013, 83(8): 849-858.
- [25] 闫鑫鑫, 谢春萍, 刘新全, 等. 不锈钢电磁屏蔽织物的屏蔽效能[J]. *丝绸*, 2018, 55(10): 35-40.
- [26] 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.
- [27] 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, (11): 18-21.
- [28] PALANISAMY S, TUNAKOVA V, KARTHIK D, *et al.* Study on textile comfort properties of polypropylene blended stainless steel woven fabric for the application of electromagnetic shielding effectiveness[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 254: 1-7.
- [29] 李 丹, 田 琳. 银/棉包覆纱织物性能研究[J]. *化纤与纺织技术*, 2014, 43(3): 19-23.
- [30] 张 谭. 高性能电磁屏蔽针织物的研究开发及应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
- [31] 王建明, 赵云娜, 曹 婧, 等. 导电防辐射织物的研制[J]. *毛纺科技*, 2008, (2): 43-45.
- [32] CHENG K B, RAMAKRISHNA S A, LEE K C. Electromagnetic shielding effectiveness of copper glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(10): 1 039-1 045.

[3] 贺建国, 蒲 剑, 陈力群. 吸湿凉感纬编面料开发[J]. 服装学报, 2018, (4): 288—293.

## Analysis of High Technology and Intelligent Textile Fabric

ZHANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>

(1.Sichuan Textile Science Research Institute, Chengdu 610072, China;

2.Sichuan Textile Information Center, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** The technical characteristics and research ideas of several high-tech textile fabrics were introduced. The trend of intelligent manufacturing and technological progress of traditional textile industry and products were expounded from the direction of artificial intelligence, to provide reference for textile development and enterprise technology upgrading.

**Key words:** intelligence; high technology; textile; fabric

(上接第 4 页)

## Research Progress of Metal Fiber Blended Electromagnetic Shielding Fabric

WU Yi-lin<sup>1</sup>, LI Yong-gui<sup>1,2,3,\*</sup>, MA Wen-xiao<sup>1</sup>

(1.College of Textile and Light Industry, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Clothing and Design Faculty, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Key Laboratory of Novel Functional Textile Fibers and Materials,

Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Metal fiber had excellent mechanical properties and good electrical conductivity. It was widely used in signal transmission, anti-static and electromagnetic shielding and other fields. The fabric made of metal fiber and ordinary fiber had good application in protection against electromagnetic radiation. Based on the literature review and empirical investigation, the research and application status of electromagnetic shielding fabrics were expounded. The preparation principle of metal fiber blended electromagnetic shielding fabric was explored, and its types and properties were summarized. The problems in its practical application and its future development direction were pointed out.

**Key words:** electromagnetic shielding; metal fiber; blending; fabric

(上接第 8 页)

## Research Progress of Anion Functional Textiles

LI Chen-xia, ZHANG Ji-shu\*

(School of Textile, Apparel and Design, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

**Abstract:** The effects of negative ions on the human body and its occurrence mechanism were expounded. The research status and development trend of negative ion functional textiles were reviewed from the preparation methods, the measurement of negative ion generation, the research progress and the application in life. It could provide reference for the further development of negative ion functional textiles.

**Key words:** negative ion; functional textile; status; trend

欢迎订阅《纺织科技进展》杂志!

邮发代号: 62—284

海外发行代号: DK51021