

双面结构电磁屏蔽材料的制备及性能研究

盛澄成 徐 阳* 魏取福

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122)

摘 要 采用磁控溅射法在涤纶水刺非织造布单面和双面分别沉积了纳米结构的 Cu 薄膜, 利用矢量网络分析仪对所制备样品的电磁屏蔽效能进行了测试, 并理论计算分析了单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的屏蔽效能。结果表明: 在总镀膜时间相同的情况下, 双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能要明显优于普通单面屏蔽材料的电磁屏蔽效能; 普通单面屏蔽材料只对低波有相对较好的屏蔽效果, 而双面屏蔽材料对低波和高波都有相对较好的屏蔽效果, 且随着电磁波频率的增大, 其屏蔽效能呈增大的趋势。

关键词 磁控溅射, 单面屏蔽材料, 双面屏蔽材料, 电磁屏蔽效能

Preparation and property research of double structure electromagnetic shielding material

Sheng Chengcheng Xu Yang Wei Qufu

(Key Laboratory of Science and Technology of Eco-Textile, Ministry of Education,
Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

Abstract Nanostructure copper film deposited on the one side and two sides of polyester fiber spunlace nonwovens by magnetron sputtering method. The electromagnetic shielding property of sample was tested by vector network analyzer. The shielding effectiveness of single shielding material and double shielding material were analyzed by theoretical calculation. Experimental results showed that the electromagnetic shielding property of double shielding material was obvious better than single shielding material on the same coating time. Single shielding material had better shielding effect to the low electromagnetic wave. However, double shielding material had better shielding effect to the low electromagnetic wave and high electromagnetic wave. The shielding effectiveness had the trend to increase with the increase of wave frequency.

Key words magnetron sputtering, single shielding material, double shielding material, electromagnetic shielding property

随着科学技术的迅猛发展, 一些电子产品得到了广泛应用。但这些电子设备会不同程度的产生一些电磁波, 对人体健康造成威胁, 人体长期暴露在电磁辐射的环境中, 神经、内分泌和生殖等系统都会出现不同程度的损伤^[1]。电磁波还会对一些军事装备、精密仪器和雷达传输等方面产生影响^[2-3]。传统的电磁屏蔽纺织品大多采用单面导电镀膜的形式。单面屏蔽材料的屏蔽效能普遍很低, 但在一些特殊领域要求屏蔽体具有较高的屏蔽效能, 因此制备出高屏蔽效能的电磁屏蔽材料势在必行。近年来, 双面屏蔽材料越来越受到科研工作者的关注^[4-5], 相对于单面屏蔽材料, 双面屏蔽材料在屏蔽结构的优化上有更大的设计空间, 通过合理的优化设计, 可大大

提高材料的屏蔽效能。

因此, 本研究从实际生产出发, 在柔性纺织纤维基材的单面和双面分别沉积了导电性能良好的 Cu 薄膜, 利用纺织基材的绝缘性, 构成了简化的双面结构屏蔽复合材料, 并对其电磁屏蔽效能进行了分析和比较研究。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

涤纶水刺非织造布(PET, 面密度 500g/m²), 江苏菲特滤料有限公司; 金属铜靶(纯度 99.999%)。

高真空多功能磁控溅射设备(JZCK-420B 型, 直流源最大功率为 500W), 沈阳聚智科技开发有限

基金项目: 国家自然科学基金(51203064); 江苏省产学研联合创新资金项目(BY2014023-4)

作者简介: 盛澄成(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为功能纺织材料。

联系人: 徐阳(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事功能纺织材料方面的研究。

公司;矢量网络分析仪(8573ES 型),东南大学。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的预处理

将 PET 水刺非织造布剪成外径为 115mm,内径为 12mm 的圆环状试样,放入丙酮(分析纯)与蒸馏水以 1:1(质量比)混合的溶液中超声洗涤 50min,以去除 PET 水刺非织造布表面的灰尘和有机溶剂等杂质,然后用清水反复漂洗干净,放入约 50℃ 的烘箱中至干燥后装入样品袋,置于干燥培养皿中待用。

1.2.2 屏蔽材料的制备

采用直流磁控溅射法在室温条件下先在 PET 水刺非织造布单面和双面分别沉积纳米结构的 Cu 薄膜,且单面屏蔽材料的总镀膜时间和双面屏蔽材料的总镀膜时间相同,双面屏蔽材料的两面镀膜时间相同。靶材和基材之间的距离为 70mm,为使溅射出的粒子能均匀地沉积到基材上,设定样品架以 100r/min 的速度旋转。为保证 Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的纯度,将本体真空度抽到 5.0×10^{-4} Pa,然后通入高纯氩气(99.999%),气体流量为 20sccm,预溅射 10min,以除去 Cu 靶表面的杂质。其他工艺参数经过前期摸索确定为:Cu 的溅射功率 100W,溅射压强 0.6Pa。实验过程中,采用水循环冷却装置控制基材温度在室温状态。

1.3 屏蔽材料的电磁屏蔽性能测试

Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能依据 ASTM-D4935—99 规定,使用矢量网络分析仪(8573ES 型),利用法兰同轴法进行测试。

2 结果与讨论

2.1 Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能比较

利用矢量网络分析仪对同质同量的 Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能进行测试,结果如图 1 所示。

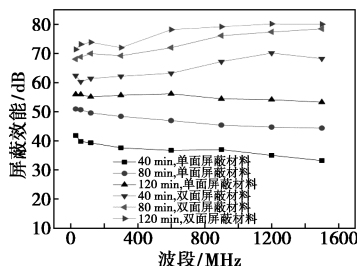


图 1 试样的屏蔽效能比较图

由图可知,在总镀膜时间相同的情况下,Cu 双

面屏蔽材料的屏蔽效能要比单面屏蔽材料的屏蔽效能高 20~30dB,双面屏蔽材料的最高屏蔽效能能达到 80dB 左右。

本实验中屏蔽材料的屏蔽原理可以理解为:采用低电阻的导电材料 Cu,利用电磁波在导电材料 Cu 表面的反射、内部的吸收以及在内部的多次反射损耗,使得电磁波能量发生损耗。而屏蔽效能定义为没有屏蔽时入射到材料的电磁波能量与在同一地点经屏蔽后电磁波能量的比值,即为屏蔽材料对电磁信号的衰减值。衰减值越大,表明屏蔽效能越好,而总的屏蔽效能(SE, dB)可由式(1)表示。

$$SE = R + A + B \quad (1)$$

式中, R 为反射损耗, dB; A 为吸收损耗, dB; B 为屏蔽体内部多重反射损耗, dB^[6]。

根据传输线法^[7]得出了多层屏蔽体的理论计算公式,本实验中单面屏蔽材料可视为是双层屏蔽体,双面屏蔽材料可视为是三层屏蔽体。单面屏蔽材料的物理模型可用图 2 来表示(其中,上边是绝缘介质层,下边是金属屏蔽层)。为计算方便,假设金属屏蔽层是无限大平板,平面电磁波从无穷远处自上向下传播过来。将单面屏蔽材料中的 $n=2$ 代入 Schelkunoff 多层薄膜屏蔽理论计算公式^[8]当中,则得到式(2):

$$SE = 20\log_{10} | e^{T_1 L_1 + T_2 L_2} | + 20\log_{10} | \frac{(K_0 + K_1)(K_1 + K_2)(K_2 + K_0)}{8K_0 K_1 K_2} | + 20\log_{10} | (1 - q_1 e^{-2T_1 L_1})(1 - q_2 e^{-2T_2 L_2}) | \quad (2)$$

单面屏蔽材料的反射损耗 R 、吸收损耗 A 和屏蔽体内部多次反射损耗 B 可由式(3—5)计算:

$$R = 20\log_{10} | \frac{(K_0 + K_1)(K_1 + K_2)(K_2 + K_0)}{8K_0 K_1 K_2} | \quad (3)$$

$$A = 20\log_{10} | e^{T_1 L_1 + T_2 L_2} | \quad (4)$$

$$B = 20\log_{10} | (1 - q_1 e^{-2T_1 L_1})(1 - q_2 e^{-2T_2 L_2}) | \quad (5)$$

双面薄膜屏蔽体的物理模型可用图 3 来表示(其中,上边是金属屏蔽层,中间是绝缘介质层,下边也是金属屏蔽层)。假设 $L_1 = L_2'$, $L_2 = L_1' + L_3'$, $K_1 = K_2'$, $K_2 = K_1' = K_3'$, $T_1 = T_2'$, $T_2 = T_1' = T_3'$, $\alpha_1 = \alpha_2'$, $\alpha_2 = \alpha_1' = \alpha_3'$, $\beta_1 = \beta_2'$, $\beta_2 = \beta_1' = \beta_3'$ 。同理,将双面薄膜中的 $n=3$ 代入 Schelkunoff 多层薄膜屏蔽理论计算公式当中,得到式(6):

$$SE' = 20\log_{10} | e^{T_1' L_1' + T_2' L_2' + T_3' L_3'} | + 20\log_{10} | \frac{(K_0 + K_1')(K_2' + K_3')(K_3' + K_0)}{16K_0 K_1' K_2' K_3'} | + 20\log_{10} | \prod_m^1 (1 - q_m' e^{-2T_m' L_m'}) | \quad (6)$$

双面薄膜屏蔽体的反射损耗 R' 、吸收损耗 A'

和屏蔽体内部多次反射损耗 B' 可由式(7—9)计算:

$$R' = 20\log_{10} \left| \frac{(K_0 + K_1')(K_1' + K_2')(K_2' + K_3')(K_3' + K_0)}{16K_0K_1'K_2'K_3'} \right| \quad (7)$$

$$A' = 20\log_{10} \left| e^{T_1'L_1'+T_2'L_2'+T_3'L_3'} \right| \quad (8)$$

$$B' = 20\log_{10} \left| \prod_m^1 (1 - q_m' e^{-2T_m'L_m'}) \right|^{[9]} \quad (9)$$

由理论计算分析可以知道,双面屏蔽材料和单面屏蔽材料的反射损耗差值(ΔR)按式(10)计算:

$$\Delta R = R' - R = 20\log_{10} \left| \frac{(K_1 + K_2)(K_0 + K_2)}{2K_2(K_1 + K_0)} \right| \quad (10)$$

式中, $K_1 = K_2', K_2 = K_1' = K_3'$ 。

因为本实验的屏蔽体是金属的良导体,而金属的波阻抗近似于 0 (即 $K_2 \approx 0$), 所以 $\Delta R \approx$

$$\frac{K_1K_0}{2K_2(K_1 + K_0)} > 0。$$

同样可知,吸收损耗的差值(ΔA)按式(11)计算:

$$\Delta A = A' - A = 20\log_{10} \left| e^{T_1'L_1'+T_2'L_2'+T_3'L_3'} \right| - 20\log_{10} \left| e^{T_1L_1+T_2L_2} \right| = 0 \quad (11)$$

式中, $L_1 = L_2', L_2 = L_1' + L_3', T_1 = T_2', T_2 = T_1' = T_3'$ 。可以得出,只要屏蔽体的厚度相同,则吸收损耗值相同^[10]。

同理,屏蔽体内部多次反射损耗差值(ΔB)可按式(12)计算:

$$\Delta B = B' - B > 0 \quad (12)$$

式中, $L_1 = L_2', L_2 = L_1' + L_3', T_1 = T_2', T_2 = T_1' = T_3', q_1 = q_1', q_2 = q_2'$ 。

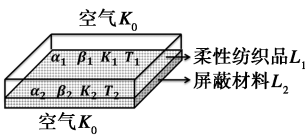


图 2 单面屏蔽材料物理模型

(α_n, β_n 为第 n 层材料的涡流系数; K_n 为第 n 层材料的本征阻抗; T_n 为第 n 层材料的传播常数; K_0 为空气的本征阻抗)

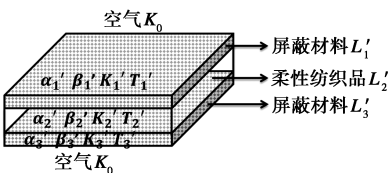


图 3 双面屏蔽材料物理模型

(α_n', β_n' 为第 n 层材料的涡流系数; K_n' 为第 n 层材料的本征阻抗; T_n' 为第 n 层材料的传播常数; K_0 为空气的本征阻抗)

而从两种不同类型屏蔽材料的内部结构分析可知, Cu 的单面屏蔽材料有一个屏蔽体与绝缘介质的界面,反射损耗值 $R = R_1$; 而对于 Cu 的双面屏蔽材

料有两个导电屏蔽体与绝缘介质的界面,当电磁波进入屏蔽体表面时,在屏蔽体第一界面处,部分电磁波被反射损耗,而未被损耗的电磁波会继续进入到基体内部(即涤纶织物内部),穿过基体内部的电磁波会进入到第二界面处,由于基体和第二界面波阻抗的差异甚大,电磁波会在第二界面发生反射损耗,反射损耗总值为 $R = R_1 + R_2$ (单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的反射损耗屏蔽原理分别如图 4 和图 5 所示)。因此,在镀膜时间相同的情况下,由于 Cu 双面屏蔽材料比 Cu 单面屏蔽材料的特殊界面多了 1 倍,构成每个特殊界面的不同材料的高本征阻抗匹配差值也增加了 1 倍,这使得电磁波在这些特殊界面处发生的反射损耗也增加了 1 倍^[4-5],对比图(4—5)还可以发现,双面屏蔽材料内部的多次反射界面有 4 个,而单面屏蔽材料内部的多次反射损耗界面只有 2 个。因此,双面屏蔽材料增加了电磁波在屏蔽体内部反射、衍射的次数,则内部多次反射损耗值也会增大。因此,不论是从理论计算还是从屏蔽体内部结构分析都可以得出,双面屏蔽材料的屏蔽效能大于单面屏蔽体材料的屏蔽效能。

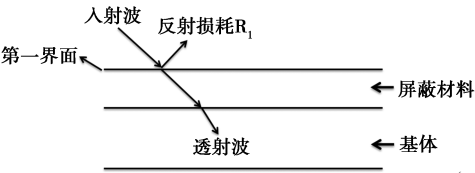


图 4 单面屏蔽材料的反射损耗原理示意图

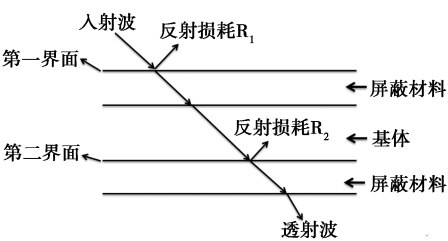


图 5 双面屏蔽材料的反射损耗原理示意图

2.2 Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能特性分析

利用矢量网络分析仪分别对 Cu 单面屏蔽材料和双面屏蔽材料的屏蔽效能进行点频测试,结果如表 1 和表 2 所示(表 1 中两种屏蔽材料的镀膜时间都为 40min,表 2 中选择了双面屏蔽材料,镀膜总时间为分别 40、80 和 120min,双面镀膜时间相同)。

表 1 两种屏蔽材料电磁屏蔽效能测试结果

频率/MHz	SE/dB							
	30	60	120	300	600	900	1200	1500
单面屏蔽材料	41.85	39.82	39.34	37.58	36.72	36.98	35.01	33.21
双面屏蔽材料	62.42	60.36	61.43	62.18	63.25	67.24	70.21	69.26

表 2 双面屏蔽材料电磁屏蔽效能测试结果

	SE/dB							
频率/MHz	30	60	120	300	600	900	1200	1500
40min	62.42	60.36	61.43	62.18	63.25	67.24	70.21	69.26
80min	68.07	68.86	70.01	69.26	72.01	76.12	77.45	78.46
120mn	71.42	73.21	73.86	72.05	78.25	79.21	80.21	80.06

从表 1 可以看出,对于单面屏蔽材料,在低频情况下有相对较好的屏蔽效能,但随着电磁波频率的增大,屏蔽效能开始呈现逐渐减小的趋势,在频率为 1500MHz 时,屏蔽效能降到了 33.21dB,这说明单面屏蔽材料对于低波有相对较好的屏蔽效果,而对于高波其屏蔽效果较差;而双面屏蔽材料,不论是低频还是高频电磁波,都有很好的屏蔽效果,这说明双面屏蔽材料适用于不同波段电磁波的屏蔽。由于 $E=h\nu$ (其中, h 为普朗克常数, ν 为电磁波频率), 由该公式可知,电磁波频率越高,则电磁波的能量也就越高,而单面屏蔽材料对电磁波的屏蔽能力有限,因此在高频情况下,其屏蔽效能较低;而对于双面屏蔽材料,由于高本征阻抗匹配界面增加了一倍,所以使得该种屏蔽材料的屏蔽效能大大提高,相应地,屏蔽效率也得到大大提高。因此,即使在高频情况下,仍有很好的屏蔽效果。

从表 2 可以看出,在镀膜时间相同的情况下,随着电磁波频率的提高,双面屏蔽材料的屏蔽效能除个别波段以外基本呈增大的趋势;在同一波段下,随着镀膜时间的提高,屏蔽效能也相应提高。对于双面屏蔽材料,能使 99.99% 的电磁波被损耗,屏蔽效率几乎为 100%,而电磁波频率越高,相应地能量也就越高,而这些能量几乎都会被屏蔽材料所损耗,所以频率越高,双面屏蔽材料的屏蔽效能也越高。个别波段出现偏差可能是因为:(1)在测试时,样品与仪器间密封性不好,使得屏蔽效能比实际值要低些,尤其是有介质材料作为夹层材料时电磁泄漏更严重;(2)在测量过程中,发射源提供了杂波信号,而双面薄膜屏蔽材料无法对所有波段电磁波进行屏蔽,屏蔽效能自然会下降^[9]。

图 6 为 Cu 双面屏蔽材料的 AFM 图片。如图 6(a) 所示,当 Cu 单面镀膜时间小于 20min 时,Cu 颗粒呈不连续结构沉积在涤纶纤维表面,未能形成连续的薄膜,此时双面屏蔽材料的导电性较差,则屏蔽效能相对比较低。如图 6(b) 所示,随着 Cu 单面镀膜时间大于 40min 时,薄膜表面颗粒的横向和纵向同时生长,进行团聚,然后互相连接在一起,形成了连续的薄膜,薄膜表面的粗糙度和均匀性得到明

显改善,薄膜更加平整和致密,表面较为光滑^[11],此时双面屏蔽材料的导电性优异,屏蔽效能得到大大提高。

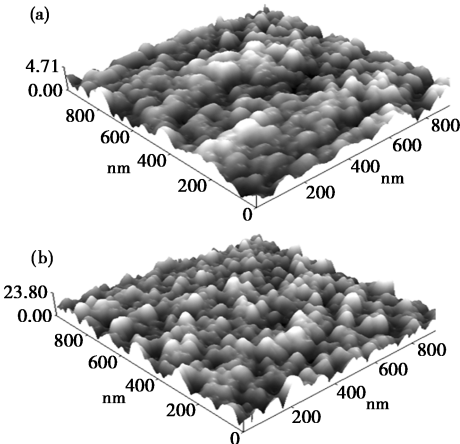


图 6 Cu 双面屏蔽材料的 AFM 图
[(a)镀膜 40min;(b)镀膜 80min]

3 结论

在总镀膜时间相同的情况下,双面屏蔽材料的电磁屏蔽效能大于单面屏蔽材料的屏蔽效能;单面屏蔽材料只能对低波有很好的屏蔽效果,在高波情况下,屏蔽效能降低,而对于双面屏蔽材料,对低波和高波都有很好的屏蔽效果,且随着波段的增大,其屏蔽效能也呈增大的趋势;随着镀膜时间的增加,双面屏蔽材料的屏蔽效能也增大。

参考文献

[1] 葛安香,李凤艳,闫江山,等.金属化电磁屏蔽纺织品的研究现状[J].山东纺织科技,2015,56(2):37-40.
[2] 刘琳,张东.电磁屏蔽材料的研究进展[J].功能材料,2015,46(3):3016-3022.
[3] 陈先华,刘娟,张志华,等.电磁屏蔽金属材料的研究现状及发展趋势[J].兵器材料科学与工程,2012,35(5):96-100.
[4] 张晓宁,毛倩瑾,王群.三明治型电磁屏蔽材料的制备与性能[J].材料研究学报,2002,16(5):536-540.
[5] 张晓宁,王群,葛凯勇,等.合成纤维复合夹层屏蔽结构改性及其电磁特性研究[J].复合材料学报,2003,20(1):85-90.
[6] 王锦成.电磁屏蔽材料的屏蔽原理及研究现状[J].化工新型材料,2002,30(7):16-18.
[7] 陈省区.塑料机盒的抗 EMI 膜研究[D].杭州:浙江大学,2008.
[8] 钟良,刘传慧,刘继胜,等.多层电磁屏蔽镀层制备工艺研究[J].工艺与检测,2008,11(4):82-83.
[9] 张晓宁.层状复合电磁屏蔽材料的设计与制备[D].北京:北京工业大学,2000.
[10] 蔡迎波,杨锋,余亚军,等.三层电磁屏蔽复合材料结构设计[J].金属功能材料,2009,16(4):13-15,22.
[11] 孟灵灵.涤纶基布表面磁控溅射纳米铜膜及性能研究[D].无锡:江南大学,2013.