

引文格式: 韩银龙, 孙文波, 王晓白, 等. 金属网格透明薄膜的电磁屏蔽性能研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 101-107.

HAN Yinlong, SUN Wenbo, WANG Xiaobai, et al. Electromagnetic interference shielding performance of transparent metal-mesh film[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 101-107.

金属网格透明薄膜的电磁屏蔽性能研究

韩银龙, 孙文波, 王晓白, 张 博

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

[摘要] 为满足光电设备及武器装备光学窗口对具有高可见光透过率和强电磁屏蔽效能功能材料的迫切需求, 开展了金属网格透明薄膜的电磁屏蔽性能研究。通过在压印沟槽中刮填银浆和电镀铜的方法制备了网格形状不同、线宽不同、厚度不同的金属网格薄膜, 并对其可见光透过率、雾度、方阻和电磁屏蔽效能进行了测试表征, 研究了金属网格结构参数对其光学性能和电磁屏蔽性能的影响。结果表明, 制备的金属网格薄膜透明度高, 导电性好、电磁屏蔽性能优异, 其在透光率 85% 和雾度 3% 的前提下, 方阻低于 $0.2 \Omega/\text{sq}$, 电磁屏蔽效能达 35 dB 以上 (0.95~18 GHz)。相比于其他结构参数, 金属网格电磁屏蔽薄膜厚度的增加可在不影响光学性能的前提下显著提升其电磁屏蔽效能。

关键词: 金属网格; 电磁屏蔽; 透光率; 压印; 电镀

Electromagnetic Interference Shielding Performance of Transparent Metal-Mesh Film

HAN Yinlong, SUN Wenbo, WANG Xiaobai, ZHANG Bo

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In order to meet the urgent needs of optoelectronic devices and optical windows for transparent electromagnetic interference shielding materials with high optical transmittance and outstanding shielding effectiveness, research on electromagnetic shielding performance of transparent metal-mesh film is carried out. Metal-mesh films with different grid shapes, line widths and thicknesses are fabricated through the process of blading silver nanoparticle ink and electroplating Cu into the imprinted microgrooves. The effects of different structure parameters on the electromagnetic shielding, light transmittance and electrical conductivity of metal-mesh films are tested and analyzed. Results indicate that the fabricated metal-mesh film exhibits a shielding effectiveness (SE) up to 35 dB (0.95–18 GHz) and a sheet resistance less than $0.2 \Omega/\text{sq}$ at 85% transmittance and 3% haze. Compared with other structure parameters, the increase of the thickness of the metal-mesh film can significantly improve its electromagnetic shielding effectiveness without affecting the optical performance.

Keywords: Metal-mesh; Electromagnetic shielding; Light transmittance; Imprinting; Electroplating

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.22.101

随着电磁技术的不断发展, 透明电磁屏蔽已成为解决电子系统间电磁干扰, 防止电磁污染和电磁信息泄露的关键技术, 可有效保障电子仪器设备的正常工作, 保障机密信息的安全以及操作人员的身体健康, 可广泛应用于电子方舱、精密仪器仪表、屏蔽机柜、飞机座舱、整流罩等窗口屏蔽。透明电磁屏蔽技术主要依靠透明导电膜来实现, 目前使用最为广泛的透明导电膜是 ITO 薄

膜。ITO 薄膜具有方阻低 ($<10 \Omega/\text{sq}$)、透过率高 ($>90\%$) 的特点, 但根据薄膜生长的分子热力学原理, 为了使溅射到基片上的 ITO 晶粒在薄膜生长过程中有足够的能量迁移到较佳的晶格, 基片温度应为 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 甚至更高, 才能获得质量好、电阻率低、透光率高的 ITO 薄膜, 且 ITO 薄膜价格昂贵、柔韧性差, 这些因素限制了 ITO 薄膜的进一步应用^[1-3]。在这种情况下, 许多 ITO 薄膜

的代替品应运而生,如石墨烯^[4]、碳纳米管^[5]、金属纳米线^[6-8]、导电高分子和金属网格^[9-11]等,其中金属网格薄膜兼具极低的方阻和较高的光学透过率,且柔性极佳,除此之外,金属网格可以通过改变网线厚度、宽度和网格周期实现对透光率和导电性的自由调控,可设计性强,避免了其他透明导电膜高透光率和高导电性难以兼得的问题。

金属网格透明导电膜的制作工艺多样。Ma等^[12]使用光刻模板法将溅射得到的铝膜刻蚀成周期160 μm、线宽3.5 μm、厚度400 nm的正方形网格薄膜,其可见光透过率达95%,方阻低至4.7 Ω/sq,电磁屏蔽效能大于22 dB(12~18 GHz),此外,其团队还通过改变网格周期对金属网格的性能进行了调控。Han等^[13]使用裂纹模板法制备周期80~150 μm、线宽2~5 μm、厚度50 nm的随机形状银金属网格,其透光率达93%,雾度低于3%,电磁屏蔽效能大于12 dB(12~18 GHz)。Zhang等^[14]使用飞秒激光刻蚀和电子束蒸镀的方式制备周期200 μm、线宽10.5 μm、厚度600 nm的Ni-Au网格,其透光率大于85%,电磁屏蔽效能大于20 dB(0.15~5 GHz)。从以上研究结果可以看出,通过不同方法制备的不同形状、不同线宽、不同线厚、不同材质的金属网格薄膜性能各异,为理清金属网格结构参数对其性能的影响规律,刘伟等^[15]对理论透光率相同、网格形状不同的金属网格薄膜的导电性能进行了测试,测试结果表明,正六边形金属网格具有更低的电阻。刘小涵等^[16]运用谱域 Galerkin 法推导了周期结构金属网格的电磁场积分方程,用周期矩量法计算出网格的反射系数及透射系数,进而求出其电磁屏蔽效能,计算并分析了采用不同线宽、周期、衬底材料、衬底厚度时,金属网格薄膜的电磁屏蔽效能,最后采用激光直写和真空镀膜等工艺在 ZnS 基底上制作了周期360 μm、线宽12 μm、方阻分别为13 Ω/sq 和 25 Ω/sq 的薄膜样品,并对其在2~18 GHz 范围内的电磁屏蔽效能进行了测试。王建等^[17]使用 CST studio suite 电磁仿真软件计算了不同周期、不同线宽金属网格薄膜的电磁屏蔽效能,并通过光刻掩模和电阻热蒸发技术制备了不同周期的金属网格薄膜,对金属网格电磁屏蔽效能进行的实际测试结果与仿真计算结果存在一定差距,这是因为制造技术的限制使得制备得到的金属网格薄膜的结构和电导率同理想模型存在一定差距。

本文在理论分析的基础上,通过在压印沟槽中刮填银浆和电镀铜的方法,制备不同形状、不同线宽、不同厚度的金属网格薄膜,并对其可见光透过率、雾度、方阻和电磁屏蔽效能进行全面表征,分析金属网格结构参数对其光学性能和电磁屏蔽性能的影响规律,探究用于透明电磁屏蔽的金属网格的最佳结构。

1 模拟与设计

本文设计了正方形、正六边形、圆形3种形状的金属网格薄膜,用以仿真金属网格结构参数与其电磁屏蔽效能之间的关系(图1)。在假设金属网格线完全不透光,空白部分完全透光的前提下,金属网格薄膜理论透光率 T 的计算公式如下。

当金属网格为正方形时:

$$T = \frac{(p-w)^2}{p^2} \times 100\% \quad (1)$$

当金属网格为正六边形时:

$$T = \frac{\left(p - \frac{w}{\sqrt{3}}\right)^2}{p^2} \times 100\% \quad (2)$$

当金属网格为圆形时:

$$T = \frac{p^2 - \pi w(p-w)}{p^2} \times 100\% \quad (3)$$

电磁屏蔽通常依靠导电或磁性材料对电磁波的衰减作用实现,其衰减机制包括反射、吸收和多重反射,因此,电磁屏蔽材料对电磁波总的损耗作用 SE_T 等于反射损耗 SE_R 、吸收损耗 SE_A 和多重反射损耗 SE_M 的总和^[18],即

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (4)$$

$$SE_R = 39.5 + 10 \lg \left(\frac{\sigma}{2\pi f \mu} \right) \quad (5)$$

$$SE_A = 8.7t \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (6)$$

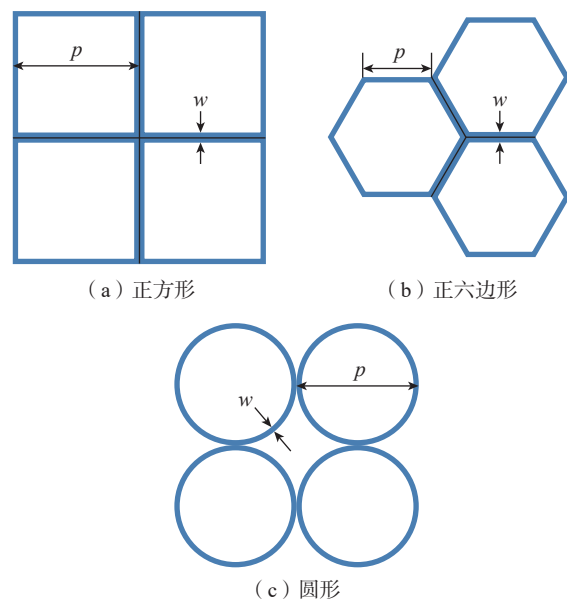


图1 3种形状金属网格薄膜网格单元格的几何性质
Fig.1 Geometric properties of thin film meshes with three shapes

$$SE_M = 20 \lg \left(1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} \right) \quad (7)$$

式中, μ 为材料的磁导率; σ 为材料的电导率; f 为入射电磁波的频率; t 为材料厚度; δ 为趋肤深度, 其计算公式为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

金属材料电导率高, 趋肤深度为纳米量级, 反射损耗是其主要的屏蔽机制, 对于金属网格结构来说, 只要网格线间距小于入射电磁波波长的一半, 即可实现有效的电磁屏蔽^[19]。研究中, 设计并制备的金属网格周期为微米量级, 远小于微波波段电磁波的波长, 可使用 CST studio suite 电磁仿真软件计算具有不同结构参数金属网格薄膜的电磁屏蔽效能, 计算条件为假设金属网格薄膜无限大, 且其材质为理想铜导体 (电导率为 5.8×10^7 S/m), 计算结果如图 2 所示。图 2 (a) 为理论透光率 92%、线宽 4 μm 、线厚 14 μm 的不同形状金属网格薄膜的电磁屏蔽效能-频率曲线图, 可以看出, 不同形状金属网格薄膜的电磁屏蔽效能均随频率的增加而降低, 正方形和六边形金属网格薄膜电磁屏蔽效能相近, 圆形金属网格薄膜的电磁屏蔽效能略低。图 2 (b) 为理论透光率为 92% 的六边形金属网格薄膜在 18 GHz 处的电磁屏蔽效能随网格线宽、线厚变化的曲线图, 可以看出, 在理论透光率一定的前提下, 具有高深宽比网格线的金属网格薄膜电磁屏蔽效能更高。

2 试验与测试

2.1 金属网格薄膜制备

本文所使用的金属网格薄膜具体制备过程如下。首先根据金属网格结构参数定制压印模板, 利用压印模板在表面涂覆有 UV 胶的 PET 衬底上进行压印, 待胶层在 UV 光下预固化后脱模; 接着在成型的压印胶层表面刮填纳米银浆, 银浆流动填充到胶层的沟槽中, 将胶层表面的银浆刮净后放入烘箱干燥烧结; 最后采用电镀铜的方法填平沟槽。本文中制备的金属网格薄膜尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。

2.2 微观结构表征

本文使用德国 Zeiss 公司生产的 Supra55 场发射扫描电子显微镜对金属网格电磁屏蔽薄膜的微观结构进行表征。

2.3 光电性能测试

透光率和雾度是表征透明电磁屏蔽薄膜光学性能的关键指标, 其中透光率是指透过试样的光通量与射到试样上的光通量之比, 雾度是指透过试样而偏离入射光方向的散射光通量与透射光通量之比。参照 GB/T 2410—2008 《透明速率透光率和雾度的测定》^[20], 使用上海仪电物理光学仪器有限公司生产的 WGT-S 透光率雾度测定

仪测定透明电磁屏蔽薄膜的透光率和雾度, 每个样品随机选取 5 个区域进行测定, 取平均值。

方阻是透明电磁屏蔽薄膜的关键性能指标, 研究中采用苏州晶格电子有限公司生产的 ST2253 型多功能数字式四探针测试仪测定透明电磁屏蔽薄膜的方阻, 每个样品随机选取 10 个区域进行测定, 取平均值。

电磁屏蔽材料对电磁波的屏蔽程度通常用屏蔽效能来表示, 是指同一激励电平下, 无屏蔽材料时接收到的功率与有屏蔽材料时接收到的功率之比, 并以对数表示为

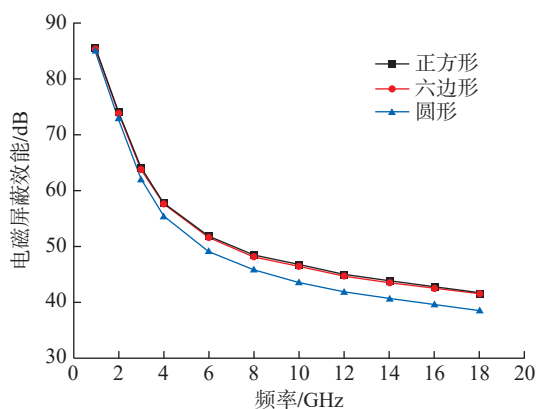
$$SE = 10 \lg (P_0/P_i) \quad (9)$$

式中, SE 为屏蔽效能, dB; P_0 为无屏蔽材料时的接收功率, W; P_i 为有屏蔽材料时的接收功率, W。本文参照 GJB 8820—2015 《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》^[21], 采用以矢量网路分析仪为基础的窗口法测定透明电磁屏蔽薄膜的电磁屏蔽效能。

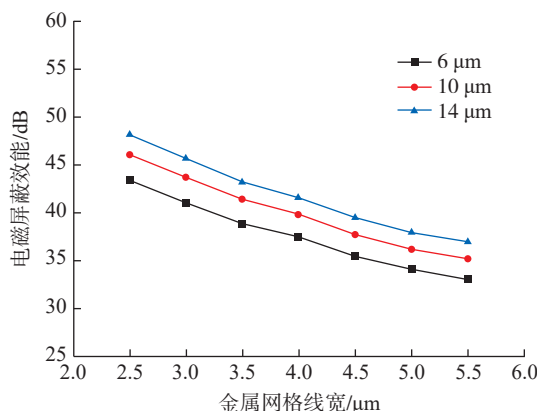
3 结果与分析

3.1 金属网格形状对其性能的影响研究

为研究金属网格形状对其性能的影响规律, 制备了



(a) 不同形状金属网格薄膜的电磁屏蔽效能



(b) 正六边形金属网格薄膜在 18 GHz 处的电磁屏蔽效能

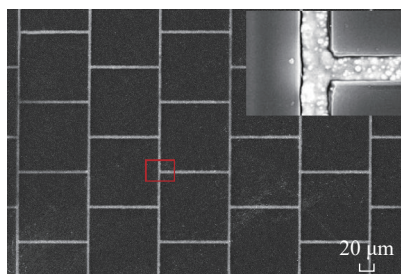
图 2 理论透光率为 92% 的金属网格薄膜电磁屏蔽效能仿真计算结果

Fig.2 Numerical shielding effectiveness of various metal-meshes with the optical transmittance of 92%

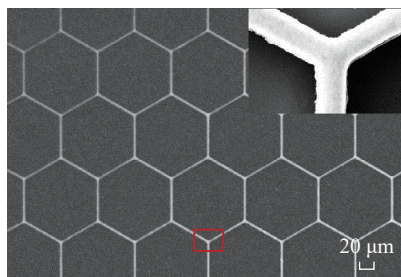
线宽 4 μm、线厚 14 μm,理论透光率均为 92% 的正方形和六边形的金属网格薄膜,其扫描电镜照片见图 3。可以看出,两种金属网格薄膜形状规则、完整,网格线宽度均一,沟槽内金属填充紧密,无明显缺陷。

两种不同形状金属网格薄膜的光学和电学性能数据见表 1。可以看出,两种形状金属网格薄膜的可见光透过率相近,约为 85%,低于其理论透光率,这是因为:(1)金属网格薄膜中使用的 PET 基材并非 100% 透光;(2)网格制备过程中不可避免地发生网格线宽较设计线宽增加的情况,造成透光率减小。两种金属网格薄膜的雾度也较为接近,约为 3%。正方形金属网格薄膜的方阻值略大于六边形金属网格薄膜,这是因为在理论透光率相同的情况下,六边形金属网格的边长更短,线电阻更低,并联后的总电阻也会更低,有利于薄膜整体方阻的降低。

两种不同形状金属网格薄膜的电磁屏蔽效能测试结果见图 4。可以看出,金属网格薄膜的电磁屏蔽性能优异,在 0.95~18 GHz 较宽频率范围内两种薄膜的电磁屏蔽效能均达到 35 dB 以上,优于现有的 ITO 薄膜,与



(a) 正方形



(b) 六边形

图 3 正方形和六边形金属网格薄膜的扫描电镜照片

Fig.3 SEM images of metal-mesh films with square grids and hexagonal grids

表 1 不同形状金属网格薄膜的光学和电学性能

Table 1 Optical and electrical performances of metal-mesh films with different grid shapes

网格形状	透光率/%	雾度/%	方阻/(Ω·sq ⁻¹)
正方形	85.6	3.1	0.12
六边形	85.2	2.9	0.11

其他新型透明电磁屏蔽薄膜相比,也处于较高水平(表 2^[6-7,10,13-14,22-24])。此外,在高频区域六边形金属网格薄膜的电磁屏蔽效能略高于正方形金属网格薄膜,这一方面是因为六边形金属网格薄膜的方阻略低于正方形金属网格;另一方面是因为在理论透光率相同的情况下,六边形网格单元具有相较于正方形网格单元更小的单元面积,更有利于高频电磁屏蔽。

3.2 金属网格厚度对其性能的影响研究

为研究金属网格厚度对其性能的影响规律,制备了线宽 2.5 μm、边长 60 μm,厚度分别为 6 μm、10 μm 和 14 μm 的六边形金属网格薄膜,其扫描电镜照片见图 5。其中,厚度为 14 μm 的金属网格薄膜因网格宽深比过小,为维持结构的稳定性,在金属网格表面涂覆有一层

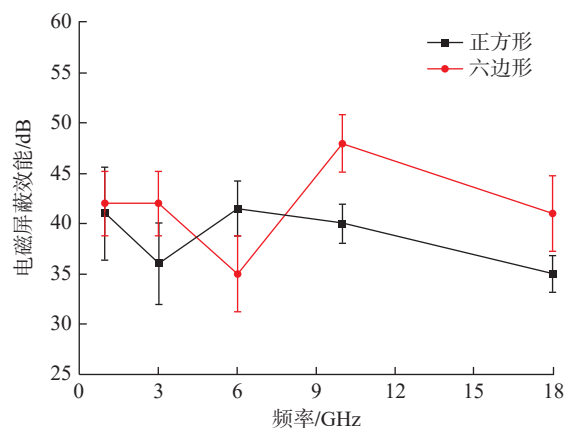


图 4 不同形状金属网格薄膜的电磁屏蔽效能

Fig.4 Electromagnetic shielding effectiveness of metal-mesh films with different grid shapes

表 2 透明电磁屏蔽薄膜的光学和电磁屏蔽性能对比

Table 2 Comparison of optical and electromagnetic shielding properties of transparent electromagnetic shielding films

透明电磁屏蔽薄膜	透光率/%	电磁屏蔽效能/dB	参考文献
银纳米线组成的多层金属网格薄膜	80	35 (8~12 GHz)	[6]
银纳米线薄膜	91	28 (8~12 GHz)	[7]
ITO 薄膜	71	20 (0.03~18 GHz)	[10]
铜金属网格薄膜	68	16~50 (0.03~18 GHz)	[10]
石墨烯/金属网格复合薄膜	90	14 (12~18 GHz)	[13]
双层金属网格薄膜	76	>37 (0.15~5 GHz)	[14]
银纳米线薄膜	85	35 (8~12 GHz)	[22]
藻酸钙/银纳米线/聚氨酯复合薄膜	81	31 (8~12 GHz)	[23]
银金属网格薄膜	91	26 (12~18 GHz)	[24]

聚合物保护膜。

厚度不同的金属网格薄膜的光学和电学性能数据见表3。可以看出,不同厚度金属网格薄膜的可见光透过率和雾度均相近,这是因为金属网格薄膜的透光率主要由其占空比决定,与厚度无直接关系。此外,随着金属网格薄膜厚度的增加,其方阻呈逐渐降低的趋势,这与电阻定律中导体的电阻与其横截面积成反比的规律相一致。

3种不同厚度金属网格薄膜的电磁屏蔽效能测试结果见图6。可以看出,金属网格薄膜的厚度越大,对其电磁屏蔽效能的提升越有利,这是因为厚度增加有利于薄膜导电性的提高,从而整体上提升金属网格薄膜的电磁屏蔽效能,特别是在金属网格薄膜电磁屏蔽效能较低的高频区域,提升效果更为明显。

3.3 金属网格宽度对其性能的影响研究

为研究金属网格宽度对其性能的影响规律,制备了边长 $60\ \mu\text{m}$ 、厚度 $14\ \mu\text{m}$,线宽分别为 $2.5\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5.5\ \mu\text{m}$ 的六边形金属网格薄膜,其扫描电镜照片见图7。其中,线宽为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的金属网格薄膜因网格宽深比过

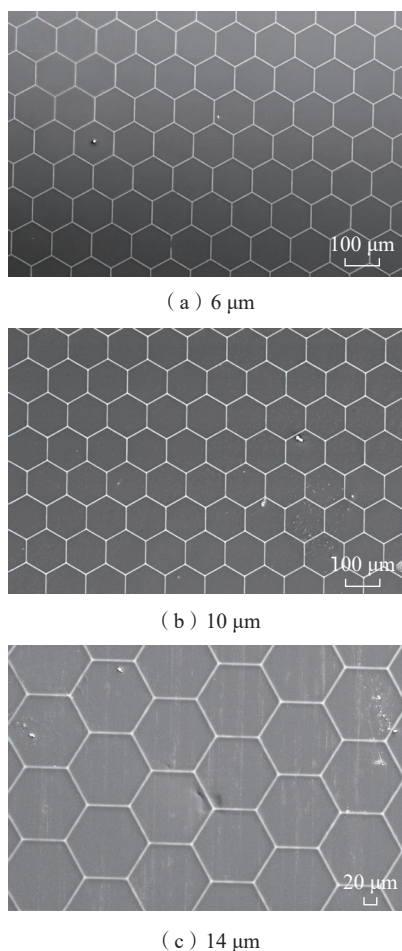


图5 不同厚度的六边形金属网格薄膜的扫描电镜照片
Fig.5 SEM images of hexagonal metal-mesh films of different thicknesses

小,为维持结构的稳定性,在金属网格表面涂覆有一层聚合物保护膜。

宽度不同的金属网格薄膜的光学和电学性能数据见表4。可以看出,金属网格薄膜的可见光透过率随宽度的增加略有降低,这与可见光透过率理论计算公式中呈现的规律相一致。3种金属网格薄膜的雾度较为接近,约为3%。此外,随着金属网格宽度从 $2.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $4\ \mu\text{m}$,其方阻从 $0.12\ \Omega/\text{sq}$ 略微降低到 $0.11\ \Omega/\text{sq}$,随着金属网格的宽度进一步增至 $5.5\ \mu\text{m}$,其方阻不再降低,仍为 $0.11\ \Omega/\text{sq}$ 。

3种不同宽度金属网格薄膜的电磁屏蔽效能测试结果见图8。可以看出,不同宽度金属网格薄膜的电磁屏蔽效能无明显变化规律,宽度为 $5.5\ \mu\text{m}$ 的金属网格薄膜的电磁屏蔽效能相对较低,这可能与相同制备工艺下线宽增加引起的金属间致密度降低有关。

4 结论

(1)模拟计算结果表明,在透光率一定的前提下,具有高深宽比的金属网格薄膜电磁屏蔽效能更高。

(2)通过在压印沟槽中刮填银浆和电镀铜的方法可制备高深宽比、大尺寸的金属网格薄膜,其透明度高,导电性好,电磁屏蔽性能优异,在透光率达85%,雾度为3%的前提下,方阻低于 $0.2\ \Omega/\text{sq}$,电磁屏蔽效能达35

表3 不同厚度金属网格薄膜的光学和电学性能

Table 3 Optical and electrical performances of metal-mesh films with different thicknesses

网格厚度/ μm	透光率/%	雾度/%	方阻/ $(\Omega \cdot \text{sq}^{-1})$
6	87.2	3.2	0.18
10	85.7	2.8	0.17
14	86.8	2.9	0.12

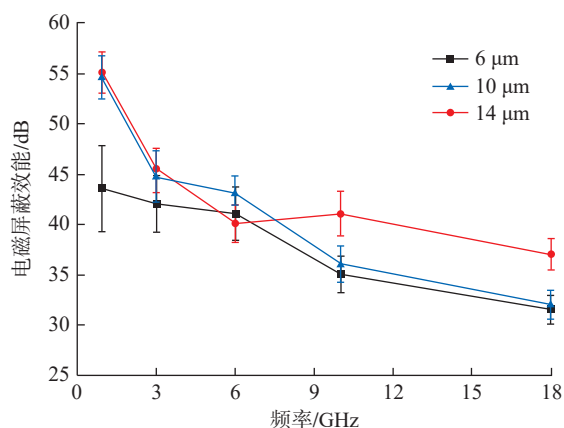


图6 不同厚度金属网格薄膜的电磁屏蔽效能
Fig.6 Electromagnetic shielding effectiveness of metal-mesh films with different thicknesses

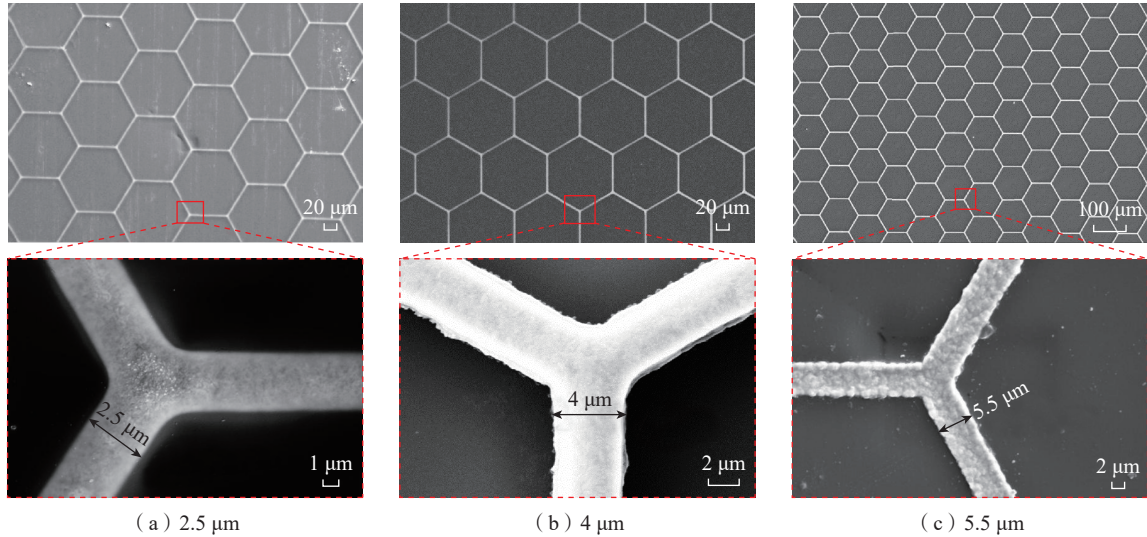


图 7 不同宽度的六边形金属网格薄膜的扫描电镜照片
Fig.7 SEM images of hexagonal metal-mesh films of different widths

表 4 不同宽度金属网格薄膜的光学和电学性能
Table 4 Optical and electrical performances of metal-mesh films with different line widths

网格宽度/ μm	透光率/%	雾度/%	方阻/ $(\Omega \cdot \text{sq}^{-1})$
2.5	86.8	2.9	0.12
4	85.2	2.9	0.11
5.5	84.0	3.2	0.11

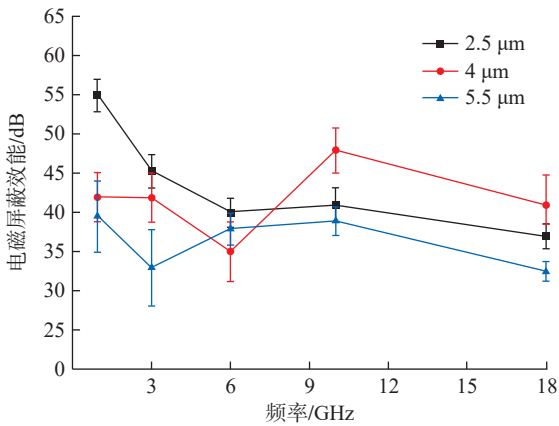


图 8 不同宽度金属网格薄膜的电磁屏蔽效能
Fig.8 Electromagnetic shielding effectiveness of metal-mesh films with different line widths

dB 以上(0.95~18 GHz)。

(3) 金属网格厚度的增加可在不降低光学性能的前提下显著提高金属网格薄膜的电磁屏蔽效能。金属网格宽度的增加对其电磁屏蔽效能的提升作用有限。

参考文献

[1] MARIKKANNU S, KASHIF M, SETHUPATHY N, et al.

Effect of substrate temperature on indium tin oxide (ITO) thin films deposited by jet nebulizer spray pyrolysis and solar cell application[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2014, 27: 562–568.

[2] MADARIA A R, KUMAR A, ZHOU C W. Large scale, highly conductive and patterned transparent films of silver nanowires on arbitrary substrates and their application in touch screens[J]. Nanotechnology, 2011, 22(24): 245201.

[3] KUDRYASHOV D, GUDOVSKIKH A, ZELENTSOV K. Low temperature growth of ITO transparent conductive oxide layers in oxygen-free environment by RF magnetron sputtering[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 461: 012021.

[4] BAE S K, KIM H, LEE Y, et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(8): 574–578.

[5] WU Z C, CHEN Z H, DU X, et al. Transparent, conductive carbon nanotube films[J]. Science, 2004, 305(5688): 1273–1276.

[6] GU J H, HU S W, JI H J, et al. Multilayer silver nanowire/polyethylene terephthalate mesh structure for highly efficient transparent electromagnetic interference shielding[J]. Nanotechnology, 2020, 31(18): 185303.

[7] ZHU X Z, XU J, QIN F, et al. Highly efficient and stable transparent electromagnetic interference shielding films based on silver nanowires[J]. Nanoscale, 2020, 12(27): 14589–14597.

[8] KANG S B, KIM J H, JEONG M H, et al. Stretchable and colorless freestanding microwire arrays for transparent solar cells with flexibility[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 121.

[9] BI Y G, LIU Y F, ZHANG X L, et al. Ultrathin metal films as the transparent electrode in ITO-free organic optoelectronic devices[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(6): 1800778.

[10] TUNG P D, JUNG C W. High optical visibility and shielding effectiveness metal mesh film for microwave oven application[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(4): 1076–1081.

[11] PHAN D T, JUNG C W. Optically transparent and very thin structure against electromagnetic pulse (EMP) using metal mesh and saltwater for shielding windows[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 2603.

[12] MA L M, LU Z G, TAN J B, et al. Transparent conducting

graphene hybrid films to improve electromagnetic interference (EMI) shielding performance of graphene[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(39): 34221–34229.

[13] HAN Y, LIU Y X, HAN L, et al. High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding[J]. *Carbon*, 2017, 115: 34–42.

[14] ZHANG Y Q, DONG H X, LI Q S, et al. Double-layer metal mesh etched by femtosecond laser for high-performance electromagnetic interference shielding window[J]. *RSC Advances*, 2019, 9: 22282–22287.

[15] 刘伟, 方一, 李修, 等. 栅格形状对金属栅格透明导电膜性能的影响[J]. *中国印刷与包装研究*, 2014, 6(6): 112–117.

LIU Wei, FANG Yi, LI Xiu, et al. Influence of grid geometry on the properties of metal grid transparent conductive films[J]. *China Printing and Packaging Study*, 2014, 6(6): 112–117.

[16] 刘小涵, 赵晶丽, 冯晓国, 等. 高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 80–87.

LIU Xiaohan, ZHAO Jingli, FENG Xiaoguo, et al. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 80–87.

[17] 王建, 徐均琪, 苏俊宏, 等. 金属网栅电磁屏蔽窗口薄膜的设计与制备[J]. *激光与红外*, 2020, 50(3): 327–332.

WANG Jian, XU Junqi, SU Junhong, et al. Design and preparation of metal grid electromagnetic shielding window film[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(3): 327–332.

[18] GEETHA S, SATHEESH KUMAR K K, RAO C R K, et al. EMI shielding: Methods and materials—A review[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(4): 2073–2086.

[19] NEELAKANTA P. Handbook of electromagnetic materials: Monolithic and composite versions and their applications[M]. Boca Raton: CRC press, 1995.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 透明塑料透光率和雾度的测定: GB/T 2410—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics: GB/T 2410—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[21] 中国人民解放军总装备部. 电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法: GJB 8820—2015[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2016.

The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department. Measuring methods for shielding effectiveness of electromagnetic shielding materials: GJB 8820—2015[S]. Beijing: The Chinese People's Liberation Army General Armaments Department, 2016.

[22] JUNG J, LEE H, HA I, et al. Highly stretchable and transparent electromagnetic interference shielding film based on silver nanowire percolation network for wearable electronics applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(51): 44609–44616.

[23] JIA L C, YAN D X, LIU X F, et al. Highly efficient and reliable transparent electromagnetic interference shielding film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(14): 11941–11949.

[24] HAN Y, LIN J, LIU Y X, et al. Crackle template based metallic mesh with highly homogeneous light transmission for high-performance transparent EMI shielding[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25601.

通讯作者: 张博, 研究员, 主要研究方向为特种功能材料与结构。

(责编 七七)

(上接第 100 页)

[11] RODOPOULOS C A, KERMANIDIS A T, STATNIKOV E, et al. The effect of surface engineering treatments on the fatigue behavior of 2024–T351 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16(1): 30–34.

[12] 甘忠, 王亮, 谭海兵, 等. 大型立体化铣样板设计与制造方法探索[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(17): 78–80, 88.

GAN Zhong, WANG Liang, TAN Haibing, et al. Exploration of design and manufacturing method to stereoscopic chemical-milling template with jumbo size[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(17): 78–80, 88.

[13] 贾玉红, 何景武. 现代飞行器制造工艺学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

JIA Yuhong, HE Jingwu. Modern aircraft manufacturing processes[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2010.

[14] 中国航天工业总公司. 铝合金化学铣切工艺规范: QJ 2911—1997[S]. 北京: 中国航天工业总公司, 1997.

China Aerospace Corporation. Aluminum alloy chemical milling process specification: QJ 2911—1997[S]. Beijing: China Aerospace Corporation, 1997.

[15] ZHANG S K, BI Q Z, JI Y L, et al. Real-time thickness compensation in mirror milling based on modified Smith predictor and disturbance observer[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 144: 103427.

[16] 毕庆贞, 丁汉, 王宇晗. 复杂曲面零件五轴数控加工理论与技术[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016.

BI Qingzhen, DING Han, WANG Yuhan. Theory and technique for five-axis NC machining of complex surface part[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 (第 1 部分): 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Metallic materials—Tensile testing (Part 1): Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[18] 中国航空工业总公司. 金属材料轴向加载疲劳试验方法: HB 5287—1996[S]. 北京: 中国航空工业总公司, 1996.

Aviation Industry Corporation of China. Fatigue test method for axial loading of metallic materials: HB 5287—1996[S]. Beijing: Aviation Industry Corporation of China, 1996.

[19] 中华人民共和国航空工业部. 材料疲劳试验统计分析方法: HB/Z 112—1986[S]. 北京: 中华人民共和国航空工业部, 1987.

Ministry of Aviation Industry of China. Statistical analysis method of material fatigue test: HB/Z 112—1986[S]. Beijing: Ministry of Aviation Industry of China, 1987.

[20] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.

GAO Zhentong, XIONG Junjiang. Fatigue reliability[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2000.

通讯作者: 茅健, 教授, 博士, 主要研究方向为精密工程、检测与控制。

(责编 晓月)