

# 频率选择表面(FSS)柔性屏铺覆工艺对透波窗口透波性能的影响

梁 垠<sup>1,2</sup> 兰 天<sup>1</sup> 董立超<sup>1</sup> 张春波<sup>1</sup> 刁训刚<sup>2</sup>

(1 航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

(2 北京航空航天大学, 北京 100191)

**文 摘** 为了研究工程中柔性FSS屏铺覆工艺对透波窗口通带插损的影响,设计并制备了几种不同工艺缺陷的平板,采用自由空间传输反射法研究了平板在不同入射角下的通带损耗。结果表明:拼接缝隙使通带损耗在0°和60°入射角下增加了0.3 dB;拼接褶皱使通带损耗在0°入射角下增加了0.77 dB,在60°入射角下增加了1.55 dB;多层间FSS错位使通带损耗在0°入射角下增加了0.3 dB,在60°下入射角增加了1.05 dB。拼接褶皱对周期结构破坏最大,因此使通带损耗增加更大,在大入射角下通带损耗增加更加明显,在铺覆工艺时应尽量避免破坏柔性FSS屏的完整性。

**关键词** FSS屏,拼接缝隙,拼接褶皱,层间错位,通带损耗

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.03.013

## Influence of Frequency Selective Surfaces (FSS) Flexible Sheet Placement Processes on Transmission Performance of Electromagnetic Window

LIANG Yin<sup>1,2</sup> LAN Tian<sup>1</sup> DONG Lichao<sup>1</sup> ZHANG Chunbo<sup>1</sup> DIAO Xungang<sup>2</sup>

(1 Research Institute of Aerospace special materials & Technology, Beijing 100074)

(2 Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract** To study the influence of the placement process of the flexible FSS panels on the passband insertion loss of transmission window, several panels with different defects were designed and fabricated. The free-space transmission/reflection method was used to study the passband insertion loss of the panels at different incident angles. The results show the aperture makes the passband insertion loss increase by 0.3 dB, when incident angel is between 0° and 60°. The drape makes the passband insertion loss increase by 0.77 dB when incident angel is 0° and by 1.55 dB when incident angel is 60°; the dissymmetry make the passband insertion loss increase by 0.3 dB when incident angel is 0° and by 1.05 dB when incident angel is 60°. The drape has the greatest damage to the periodic structure, so it increases the passband insertion loss more significantly, and the passband insertion loss increases more obviously at large incident angle. The integrity of the flexible FSS panels should be avoided damage as far as possible in the placement process.

**Key words** FSS sheet, Aperture, Drape, Dissymmetry, In-band transmission loss

### 0 引言

频率选择表面(FSS)<sup>[1]</sup>是一种周期性排列的具有带通或带阻特性的金属表面结构。利用FSS技术,可使一定频带内的电磁波呈现透明状态,且其透波特性随频率变化而变化,而在另一些频带内呈现出接近全反射特性<sup>[2-4]</sup>。将FSS技术与透波窗口有效结合,可有效地实现雷达天线的隐身和电子设备抗干扰能力<sup>[5-7]</sup>。

在FSS透波窗口制造技术方面,一种简单便捷的

方法是在聚酰亚胺薄膜基底上采用镀膜、光刻得到柔性FSS膜<sup>[8-10]</sup>,然后采用铺覆粘结工艺转移到天线罩上,这是FSS透波窗口制备常用的、相对比较简单方法<sup>[11]</sup>。由于柔性FSS薄膜为无延展性平面,而透波窗口大多为不可展开平面的曲面形状,平面柔性FSS薄膜贴覆在曲面透波窗口上时,会不可避免地出现拼接缝隙、拼接褶皱、层间错位等缺陷,这些缺陷造成FSS结构整体有序性和连续性遭到破坏,而FSS

收稿日期:2020-09-16

第一作者简介:梁垠,1978年出生,高级工程师,主要从事透波复合材料方面的研究工作。E-mail:liangyin78@sina.com,18611788102

结构整体有序性和连续性直接影响透波窗口的透波性能<sup>[12]</sup>。这种铺覆工艺造成的缺陷无法采用电磁仿真的方法进行准确评估。

国外B. A. Munk研究了不同形状的FSS单元结构错位位移误差对FSS电磁传输特性的影响<sup>[13]</sup>。国内国防科学技术大学的陈强等针对曲面FSS天线罩在实际制备过程中双层方环形FSS单元结构出现的单个方向错位位移误差情况,探讨了错位位移对双层FSS单元结构电磁反射特性的影响<sup>[14]</sup>。南京理工大学的王立超研究了三层FSS单元结构在两个方向上同时发生错位位移误差时的电磁传输特性影响规律<sup>[15]</sup>。西北工业大学的马鑫等针对频率选择表面在实际加工过程中存在的随机误差问题,提出了一种基于随机误差的FSS理论分析模型,同时给出了频率选择表面传输系数的数学期望计算公式<sup>[16]</sup>。北京航空航天大学的黄敏杰等考察了单元形状的微小改变对方环形FSS单元结构电磁传输特性的影响<sup>[17]</sup>。

本文通采用工艺试验和透波性能测试的方法分析了这种工艺缺陷对透波窗口透波性能的影响,通过工艺设计研究了柔性FSS屏拼接缝隙、拼接褶皱、层间错位对透波窗口通带插损的影响,拟为加载柔性FSS屏透波窗口的工程化应用提供了设计依据。

## 1 实验

### 1.1 原材料

石英纤维布QW140A,荆州市菲利华石英玻璃有限公司产品。氰酸酯树脂自制;氰酸酯载体胶膜J-245CQ,黑龙江石油化工研究院;PMI泡沫71XT,德固赛公司;柔性FSS屏广州杰赛科技有限公司。

### 1.2 试样制备

#### 1.2.1 石英纤维/氰酸酯树脂预浸布制备

采用热熔法<sup>[18]</sup>将氰酸酯树脂浸渍石英纤维布,制得石英纤维/氰酸酯树脂预浸布。

#### 1.2.2 石英纤维/氰酸酯复合材料面板制备

石英纤维/氰酸酯复合材料面板结构如图1所示,FSS单元特征及排布方式如图2所示。

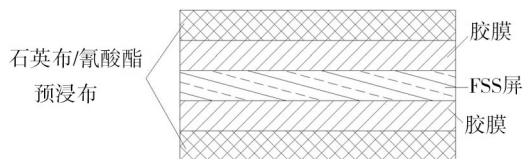


图1 面板结构

Fig. 1 The structure of panel

将石英布/氰酸酯预浸料和氰酸酯载体胶膜裁剪成500 mm×500 mm,按顺序将一层石英布/氰酸酯预浸料、一层氰酸酯载体胶膜、一层FSS屏、一层氰酸酯载体胶膜和一层石英布/氰酸酯预浸料叠放在一起,然后热压

罐固化。固化工艺如下:80℃恒温1.0 h,120℃恒温1.0 h,170℃恒温1.0 h加压0.3 MPa,200℃恒温2.0 h,220℃恒温4.0 h,自然冷却到60℃以下,取出试样。

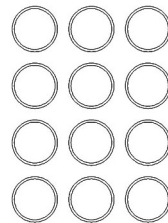


图2 FSS单元特征及排布方式

Fig. 2 The character and configuration of FSS unit

### 1.2.3 频率选择表面(FSS)平板制备

将PMI泡沫加工成500 mm×500 mm×5 mm,在PMI泡沫两侧贴覆J-245CQ胶膜,然后按顺序将面板、PMI泡沫、面板叠在一起,热压罐固化。固化工艺如下:升温至180℃加压0.3 MPa,恒温4.0 h,自然冷却到60℃以下,取出平板。

### 1.3 样品测试

通带插损采用自由空间传输反射法<sup>[19]</sup>在北京环境特性研究所进行测试,入射角0°和60°。

## 2 结果与分析

### 2.1 FSS屏拼接缝隙的影响

设计并研制了两种不同拼接缝数量的FSS平板,编号分别为1#和2#,1#FSS平板采用2张FSS屏拼接,拼接缝隙一条,2#FSS平板采用8张FSS屏拼接,拼接缝隙十条,拼接方式分别如图3和图4所示。

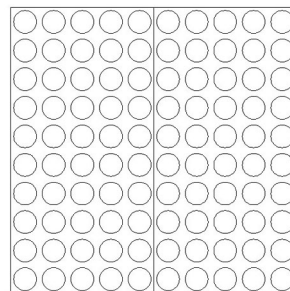


图3 2张FSS屏拼接方式

Fig. 3 The splice of two sheet FSS

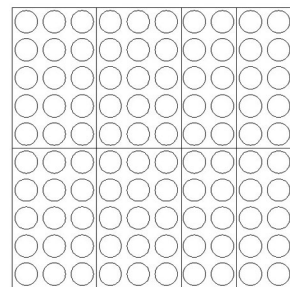


图4 8张FSS屏拼接方式

Fig. 4 The splice of eight sheet FSS

1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>FSS平板在不同入射角下垂直极化通带损耗如图5和图6所示。

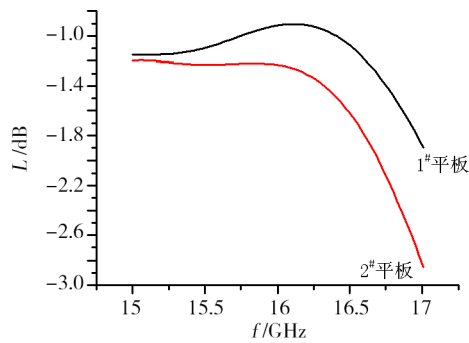


图5 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>平板入射角0°通带损耗  
Fig. 5 The in-band transmission loss of slab (0°)

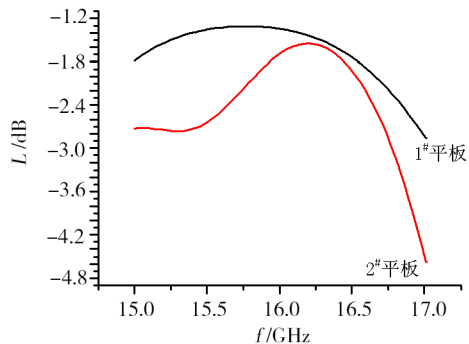


图6 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>平板入射角60°通带损耗  
Fig. 6 The in-band transmission loss of slab (60°)

由图5和图6可以看出,0°入射角时,1<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-0.9 dB,2<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.2 dB,通带损耗增大0.3 dB。60°入射角时,1<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.35 dB,2<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.65 dB,通带损耗增大了0.3 dB。根据谱域 Galerkin 法原理<sup>[20]</sup>,FSS周期阵列的截断对边缘单元电流分布影响较大,对内部单元电流分布影响较小,而单元电流分布直接影响透射系数<sup>[21]</sup>。2<sup>#</sup>FSS平板相对1<sup>#</sup>FSS平板周期阵列截断更多,因此2<sup>#</sup>FSS平板相对1<sup>#</sup>FSS平板受影响的边缘单元更多,电流分布起伏较大,会偏离谐振频率基准电流,从而通带损耗增大。试验结果也表明FSS柔性屏多张拼接比单张通带损耗要大。

## 2.2 FSS屏拼接褶皱的影响

由于透波窗口不可展开性,柔性FSS屏铺覆粘贴时不可避免出现褶皱,从而造成整个周期阵列被打乱,为此设计并研制了两种FSS平板,编号分别为3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>FSS平板由4块FSS屏拼接而成,FSS拼接时保持周期单元连续、完整,4<sup>#</sup>FSS平板也由4块FSS屏拼接而成,拼接时打乱周期单元的完整性,3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>FSS平板的拼接方式如图7和图8所示。

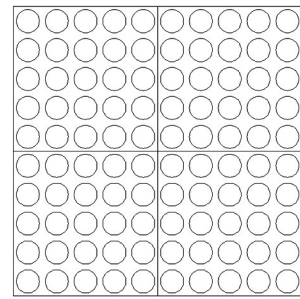


图7 FSS屏连续拼接方式  
Fig. 7 The splice of consecutive FSS

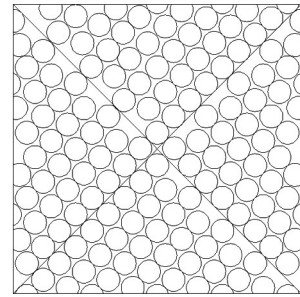


图8 FSS屏不连续拼接方式  
Fig. 8 The splice of inconsecutive FSS

3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>FSS平板在不同入射角下垂直极化通带损耗如图9和图10所示。

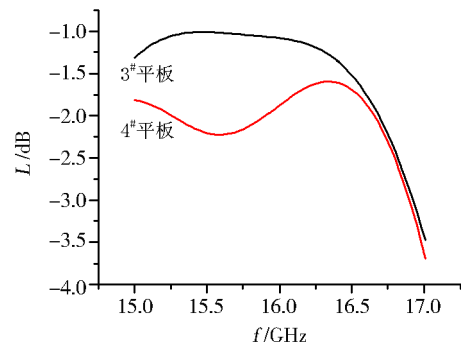


图9 3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>平板入射角0°通带损耗  
Fig. 9 The in-band transmission loss of slab (0°)

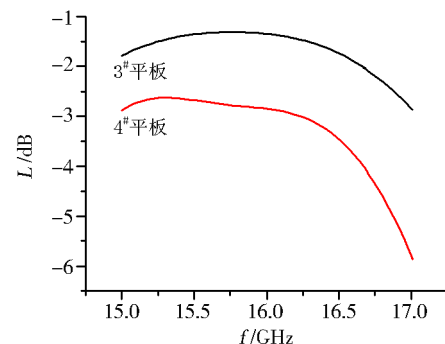


图10 3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>平板入射角60°通带损耗  
Fig. 10 The in-band transmission loss of slab (60°)

由图9和图10可以看出,0°入射角时,3<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.08 dB,4<sup>#</sup>FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.85 dB,通带

损耗增大0.77 dB。60°入射角时,3#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.31 dB,4#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-2.86 dB,通带损耗增大了1.55 dB。在0°和60°入射角,4#FSS平板在谐振频率16 GHz左右通带损耗均高于3#FSS平板,4#FSS平板4小块FSS屏每一块周期性均完整、连续,但4小块FSS屏在拼接后形成的大FSS屏周期不再完整、连续,因此4#FSS平板在谐振频率16 GHz时仍然具有一定的透波率,但透波率低于拼接后形成的周期完整、连续的3#FSS平板,并且随入射角增大透波率下降更大。

### 2.3 FSS屏对称性的影响

研制了两种不同对称方式的FSS平板,编号分别为5#和6#,5#FSS平板上下两层FSS屏周期相同并且上下对称,6#FSS平板上下两层FSS屏周期相同但上下两层错开不对称。5#和6#FSS平板的对称方式如图11和图12所示。

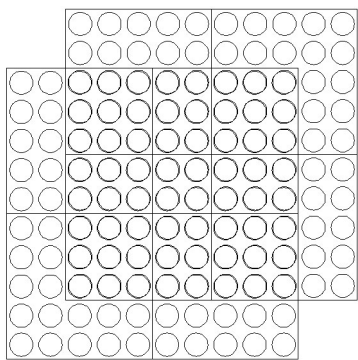


图11 上下FSS屏周期结构对称方式  
Fig. 11 The splice of symmetrical FSS

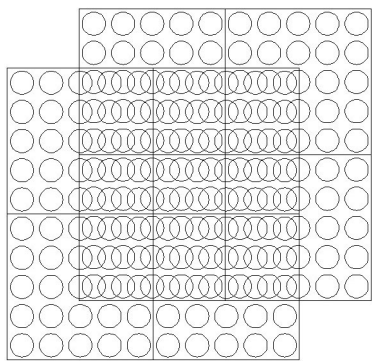


图12 上下FSS屏周期结构不对称方式  
Fig. 12 The splice of anisomeric FSS

5#FSS平板和6#FSS平板不同入射角下通带损耗测试结果对比如图13、图14所示。由图13和图14可以看出,0°入射角时,5#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.2 dB,6#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-1.5 dB,通带损耗增大0.3 dB。60°入射角时,5#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时

损耗为-1.7 dB,6#FSS平板在中心谐振频率16 GHz时损耗为-2.75 dB,通带损耗增大了1.05 dB。在0°和60°入射角,6#FSS平板在谐振频率16 GHz左右通带损耗均高于5#,5#FSS平板上下两层FSS屏周期单元对称,6#FSS平板上下两层FSS屏周期单元不对称,结果表明多层FSS屏不对称将导致通带损耗增大。

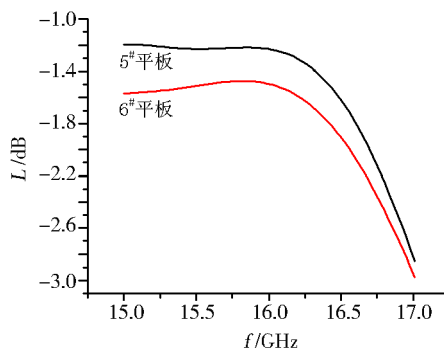


图13 5#和6#平板入射角0°通带损耗  
Fig. 13 The in-band transmission loss of slab(0°)

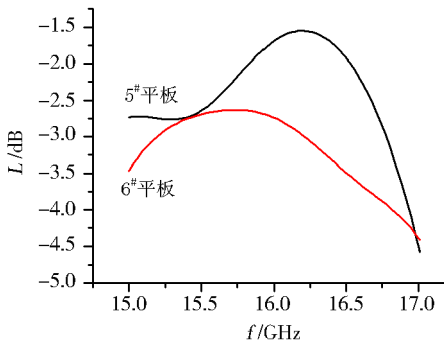


图14 5#和6#平板入射角60°通带损耗  
Fig. 14 The in-band transmission loss of slab(60°)

### 3 结论

(1)对于圆环型FSS单元特征,FSS屏拼接缝数量的增加,导致受影响的边缘周期单元数量增加,使单元电流分布偏离谐振频率基准电流,从而使通带损耗增加,因此成型过程中应尽量采用大尺寸柔性FSS屏来减少FSS屏拼接造成的通带损耗增加。

(2)在FSS屏拼接过程中,FSS屏单元结构周期性被破坏会导致通带损耗增大,通带透波率降低,因此在FSS屏拼接成型中应尽量使拼接处的周期单元对齐,保持周期单元连续一致。

(3)对于圆环型FSS单元特征,多层FSS屏之间存在较强的电流耦合现象,影响谐振电流,从而影响通带损耗,多层之间周期单元结构不对称,层间耦合作用较弱,谐振电流较弱,通带损耗高,因此成型过程中应采用工艺手段保证各层FSS屏周期单元上下位置对齐。

#### 参考文献

[1] MUNK B A. Frequency selective surfaces: Theory and 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第3期

design[M]. New York: John Wiley, 2000.

[2] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

YUAN Yingzhen. Radar cross section and stealth technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.

[3] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces—a review [J]. Proceeding of the IEEE, 1988, 76(12): 1593–1615.

[4] AMITAY N, GALINDO V, WU C P. Theory and analysis of phased array antennas [M]. New York: Wiley-Interscience, 1972.

[5] 王季立. 频率选择表面在天线隐身技术中的应用 [J]. 南京航空学院学报, 1992, 24(6): 692–702.

WANG Jili. Frequency selective surface in application to antenna stealth technique [J]. Journal of Nanjing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992, 24(6): 692–702.

[6] CHAKRAVARTY S, MITTRA R. Design of a frequency selective surface (FSS) with very low cross-polarization discrimination via the parallel micro-genetic algorithm (PMGA) [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(7): 1664–1668.

[7] 张耀锋. 频率选择表面分析与优化设计[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2003.

ZHANG Yaofeng. Optimization design and analysis for FSS [D]. Xi'an: Master Dissertation of Northwestern Polytechnical University, 2003.

[8] EOM J S, KIM S H. Plasma surface treatment of polyimide for adhesive C11 / 80Ni20Cr / PI flexible copper clad laminate [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(14): 4530–4534.

[9] YANG C H, LEE S C, WU J M, et al. The properties of copper films deposited on polyimide by nitrogen and oxygen plasma pretreatment [J]. Appl. Surf. Sci., 2005, 252(5): 1818–1825.

[10] BRECL K, TOPIC M. Simulation of losses in thin-film silicon modules for different configurations and front contacts [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008, 16(6): 479–488.

[11] WILLIAMS V G, MACFARLAND A B, SALADIN E C, et al. Thermoformed frequency selective surface [Z]. Google Patents, 2008.

[12] GREGOIRE D J. 3-D Conformal metasurfaces [J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2013, 12:

233–236.

[13] MUNK B A, Janning D S, Pryor J B, et al. Scattering from surface waves on finite FSS [J]. Antennas and propagation, IEEE Transactions on, 2001, 49(12): 1782–1793.

[14] 陈强, 杨仕林, 付云起. 曲面天线罩宽带频率选择表面设计 [C] // 全国微波毫米波会议, 2017.

CHEN Qiang, YANG Shilin, FU Yunqi. A wideband frequency selective surface of curved radome [C] // National Microwave and Millimeter Wave Conference, 2017.

[15] 王立超. 频率选择表面设计与应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

WANG Lichao. Study on the design and application of frequency selective surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science Technology, 2012.

[16] 马鑫, 万国宾, 郭云. 多元随机误差对频率选择表面电磁特性的影响 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1238–1242.

MA Xin, WAN Guobin, GUO Yun. Effect of multivariable random manufacturing errors on electromagnetic characteristics of frequency selective surface [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2014, 36(7): 1238–1242.

[17] 黄敏杰, 吕明云, 黄俊, 等. 单元形状的微小改变对频率选择表面电性能的影响 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1611–1615.

HUANG Minjie, LYU Mingyun, HUANG Jun, et al. Influence of element shape's tiny change on electrical performance of frequency selective surface [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2009, 31(7): 1611–1615.

[18] 沃西源. 预浸料的类型、特性与制造技术 [J]. 航天返回与遥感, 1998(3): 36–40.

WO Xiyuan. Manufacturing and properties of prepregs [J]. Space Return and Remote Sensing, 1998(3): 36–40.

[19] 董树义. 微波测量技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991: 329–330.

DONG Shuyi. Microwave measurement technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991: 329–330.

[20] KO W L, MITTRA R. Scattering by a truncated periodic array [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1988, 36(4): 496–503.

[21] MUNK B A, JANNING D S, PRYOR J B, et al. Scattering from surface waves on finite FSS [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2001, 36(4): 496–503.