

# 点阵结构工艺参数对透波平板电磁波谱的影响

迟百宏<sup>1</sup> 贺敬文<sup>2</sup>

(1 北京卫星信息工程研究所, 工艺与机械工程技术研究室, 北京 100095)

(2 北京卫星信息工程研究所, 天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100095)

**文 摘** 为研究点阵结构工艺参数对透波平板电磁波谱的影响, 基于体心立方结构(BCC)点阵基本构型, 建立透波平板仿真模型, 运用 CST 仿真软件分别从孔隙率、蒙皮厚度、胞元尺寸、入射角度 4 方面探究不同结构工艺参数对透波平板共振频率及透射率的影响。并运用选区激光烧结(SLS)制备点阵透波平板结构, 用于 2~18 GHz 透射率对比测试。结果表明, 仿真数据与实验结果高度一致; 透波平板共振频率随孔隙率增大, 第一频率点向低频偏移, 第二频率点向高频偏移; 随着蒙皮厚度的增加, 透射率降低; 胞元尺寸与蒙皮厚度决定透射谱的通带共振频率, 孔隙率影响较小; 入射角增大时, 水平极化入射波透射率均大于 75%, 影响较小; 竖直极化入射波透射率在高频处逐渐降低。

**关键词** 透波平板, 增材制造, 点阵结构, 电磁波谱

中图分类号: TN820. 81

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2021.01.013

## Influence of Lattice Structure Parameters on Electromagnetic Spectrum Characteristics of Wave Transmission Plate

CHI Baihong<sup>1</sup> HE Jingwen<sup>2</sup>

(1 Process and Mechanical Engineering Technology Laboratory, Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 10095)

(2 State Key Laboratory of Space-ground Integrated Information Technology, Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 10095)

**Abstract** In order to research the influence of lattice structure parameters on electromagnetic spectrum characteristics of wave transmission plate, the simulated models are built based on the model of body centered cube(BCC), and the lattice structure parameters such as porosity, skin thickness, cell size and incidence angle are analyzed on the influence of band-pass resonance frequency and transmittance using CST software. Besides, a wave transmission plate structure with lattice structure is fabricated by the technology of selective laser sintering (SLS), and its electromagnetic transmittance is measured at the frequency from 2 GHz to 18 GHz. The results show that the simulation results are in good agreement with the test results. With the increase of porosity, the first frequency point shifts to low frequency, and the second frequency point shifts to high frequency. With the increase of skin thickness, the transmission decreases. The cell size and skin thickness determine the passband resonance frequency of transmission spectrum, and the effect of porosity is small. When the incident angle increases, the horizontal polarization incident wave transmittance is greater than 75%, while the vertical polarization incident wave transmission rate decreases gradually at high frequency.

**Key words** Wave transmission plate, Additive manufacture, Lattice structure, Electromagnetic spectrum

### 0 引言

天线罩是典型的集整流、防热、透波、承载等多

种功能一体化的部件<sup>[1-2]</sup>。随着通信、雷达技术的发展以及在航天等领域的应用, 宽带无线电发射接收

收稿日期: 2020-06-12

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1106705); 国家自然科学基金(51803010, 62005020)

第一作者简介: 迟百宏, 1988 年出生, 博士, 工程师, 主要从事功能结构复合增材制造技术研究工作。E-mail: baihong1988@163.com

设备越来越多,透波、承载、轻量化等性能要求越来越高,这对天线罩的综合性能设计及制造产生了很大的挑战。目前,对于天线罩结构的研究已经取得了很大发展,为了提高天线罩的透波性能,通常采用介电常数极低及损耗角正切小的介质材料制备天线罩。为了降低天线罩的介电常数,可通过提高材料孔隙率来制备天线罩。常用夹层结构获得高孔隙率,目前天线罩的结构主要以单层、A夹层、B夹层、C夹层以及多层结构为主<sup>[3]</sup>,但由于中间芯层(如泡沫或蜂窝状结构材料)的孔隙率难以精确控制,给天线罩的透射率的精确仿真设计造成了很大困难。且随着共形化天线罩的广泛应用,不同位置的天线罩厚度可能发生改变,传统的多层叠加的工艺方式,存在加工误差,从而影响天线罩的透波性能。

点阵结构是三维有序多孔结构的一种,由周期性的点阵桁架组成,可以通过桁架单胞的构型和几何尺寸设计实现其功能性的调控,被认为是最有前景的新一代先进轻质超强韧材料<sup>[4]</sup>。三维点阵结构由哈佛大学的EVANS等<sup>[5]</sup>于2000年首先提出,其结构形式与空间桁架结构类似。常见的三维点阵芯材构型有四面体、金字塔、Kagome、体心立方型(Body Centered Cube, BCC)、X型等<sup>[6]</sup>。国内外专家针对点阵结构在轻量化、力学、热控、吸能、消音降噪等性能方面<sup>[7]</sup>进行分析及优化。涉及的点阵结构的电磁性能方面,J. Mei<sup>[8]</sup>将点阵结构引入到频率选择天线罩的设计中,并分析了四面体点阵结构相关参数对天线罩透波性能的影响。但目前国内学者利用点阵结构制备天线罩及性能分析的相关文献较少,限制了点阵结构天线罩在相关领域的应用。目前,点阵结构常用的制备方法有熔模铸造法、挤压法、切槽方法、冲孔网冲压-钎焊法、三维编织法等<sup>[9]</sup>,但均存在成形技术复杂、精度低等缺点。近年来增材制造技术的发展,给三维点阵结构的制造带来新的变革。使用增材制造的工艺方法制造复杂的点阵结构并对其进行性能测试和研究逐渐成为国内外学者新的研究焦点,但目前以轻量化及力学综合性能分析为主<sup>[10-11]</sup>,点阵结构相关几何参数对电磁波谱影响的研究较少。

本文首先通过仿真数据与实验测试数据对比,验证其仿真数据的准确性,然后基于天线罩基本性能要求,综合分析点阵结构几何参数对透波平板电磁波谱的影响,拟为增材制造制备点阵结构天线罩在航空航天等领域取得应用奠定基础。

## 1 参数设定

### 1.1 透波平板点阵结构模型设定

对透波平板点阵结构的电磁波谱进行分析之前,需确定三维点阵结构模型,选用的三维点阵结构模型是BCC结构作为芯层,芯层的上下两面是蒙皮,

如图1所示。从图中可以看出,BCC结构可调整的参数包括:芯杆直径( $\phi$ )、蒙皮厚度( $h$ )、胞元尺寸( $a$ )、芯杆与蒙皮平面夹角( $\omega$ ),由于胞元为正方体,夹角 $\omega$ 等于 $35.4^\circ$ 。因此可由芯杆直径( $\phi$ )和胞元尺寸( $a$ )近似计算出点阵结构的相对密度( $\bar{\rho}_c$ )和孔隙率 $P$ 。孔隙率 $P$ 与上述参数的关系如公式(1)所示<sup>[12]</sup>:

$$P=(1-\bar{\rho}_c)\times 100\%=(1-\frac{3\pi}{4\sin\omega}\left(\frac{\phi}{a}\right)^2)\times 100\% \quad (1)$$

公式(1)常用于计算细芯杆BCC结构孔隙率,而对于较粗芯杆,由于芯杆结构重叠度过高,计算误差较大,可通过三维软件直接测量相对密度比值获得孔隙率。

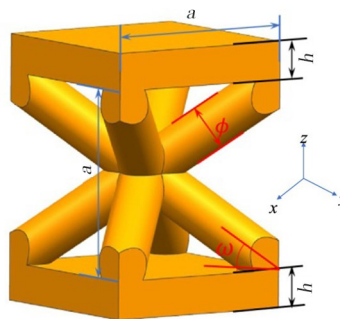


图1 体心立方结构参数示意图

Fig. 1 Diagram of BCC structure parameters

### 1.2 耗材参数设定

选取选区激光烧结(SLS)技术常用的尼龙12为耗材(牌号:FS 3300PA,湖南华曙高科技有限责任公司),通过带状线谐振腔法测得1~20 GHz内变化较小,为方便仿真,选定介电常数 $\epsilon$ 为2.56,损耗角正切 $\tan\delta$ 为0.008,并作为数值仿真材料参数值。

### 1.3 仿真分析设定

基于全波电磁仿真方法,对这种周期性三维点阵结构的传输特性开展研究。利用电磁仿真工具(CST MWS)中的频域求解器对不同结构参数的周期性点阵结构进行仿真计算,研究孔隙率、蒙皮厚度以及胞元尺寸对电磁波透过率、反射率以及吸收系数的影响规律。导入CST软件中如图1所示的仿真模型,水平和垂直两种极化方式的入射波垂直于蒙皮入射,即沿着z向入射,仿真的频率范围为2~20 GHz。在仿真模型的x和y向上采用周期性边界条件。由于该结构具有对称性,因此两种极化方式下得到的频率响应特性是一致的。在下面研究正入射情况时,将只给出一种极化方式下得到的电磁波谱;对于多角度入射问题将分别讨论水平和垂直两种极化方式的电磁波入射的情况。通过仿真计算可得到经过该模型之后电磁波谱的S参数,其中 $S_{11}$ 为结构的反射率( $R$ )曲线, $S_{21}$ 为结构的透射率( $T$ )曲线,结构的吸收率( $A$ )可以由 $A=1-R-T$ 来获取。

## 2 结果与讨论

### 2.1 点阵结构透射率对照实验

为验证仿真结果的准确性,特选取芯杆直径 $\phi=3\text{ mm}$ 、蒙皮厚度 $h=1.5\text{ mm}$ 、胞元尺寸 $a=10\text{ mm}$ 的周期性结构进行仿真与实验测试对比。经模拟仿真后得到在2~20 GHz内的反射率和透射率曲线,如图2(a)所示。可以看出,该结构在2~9.69 GHz和12.6~17.35 GHz这两个频段内,透过率均大于80%,在这两个频段内出现共振频率点分别为6.31和15.17 GHz。图2(b)给出了该结构的吸收曲线,可以看出,吸收率随着电磁波频率的增加而增大,但仍然低于5%,造成的能量损耗相对较小。

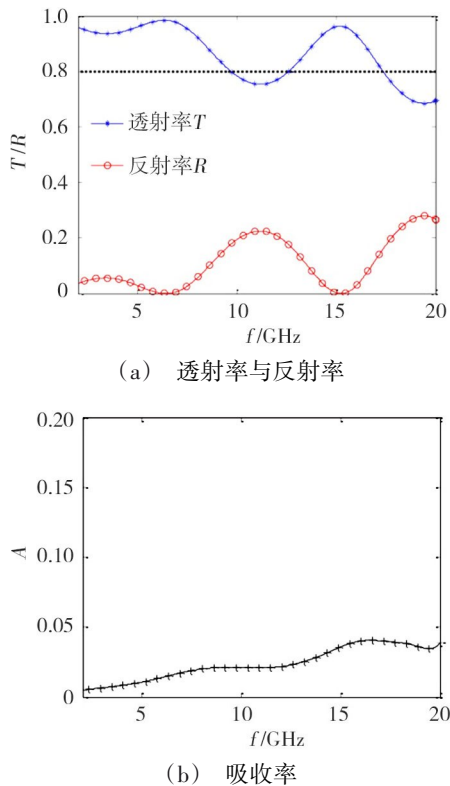
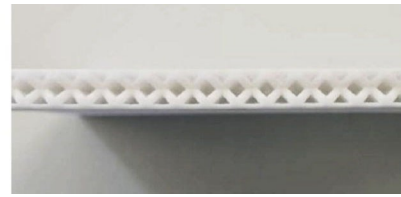


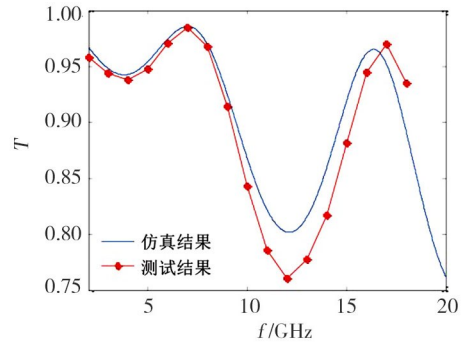
图2 芯杆直径 $\phi=3\text{ mm}$ 、蒙皮厚度 $h=1.5\text{ mm}$ 、胞元尺寸 $a=10\text{ mm}$ 的点阵结构的仿真结果  
Fig. 2 Simulation results of lattice structure with  $\phi=3\text{ mm}$ ,  $h=1.5\text{ mm}$ , and  $a=10\text{ mm}$

利用SLS技术加工得到的样品如图3(a)所示,样品的结构参数与上述仿真数据相同。

为了验证仿真结果的有效性,利用矢量网络分析仪测试得到样品在 $0^\circ$ 角入射时的透射率。图3(b)为仿真与测试得到的透射率对比图。经过对比发现,实验结果与仿真结果在2~9 GHz频段处吻合很好;在9~16 GHz频段内透射率的数值有略微的差别,但透射率的最低的频率点均为12 GHz,在第二个共振频率处有少许偏差。这一偏差处于高频,通常由于样品加工过程中,在精细结构处引入的微小误差造成。



(a) 加工样品照片



(b) 样品透射率测试与仿真结果对比

图3 样品及电磁波透射率

Fig. 3 Photo of sample and the transmissivity

### 2.2 孔隙率对点阵结构频率响应特性的影响

孔隙率被定义为在一个单元结构中孔隙体积与单元体积的比值。在一个单元尺寸固定的结构中,芯杆直径的大小直接决定孔隙率。这里选取一组蒙皮厚度为2 mm,胞元尺寸为10 mm,芯杆直径分别为2、3、4、5 mm,即孔隙率分别为82.15%、62.26%、44.29%、25.22%的点阵结构单元作为研究对象,经过仿真计算之后得到的透射谱、反射谱以及吸收谱如图4所示。

为了对比,对一个同样厚度的同介质平板的电磁波谱特性进行了仿真,可以认为其孔隙率为0,如图中虚线所示。从图4(a)中可以看出,当点阵结构的孔隙率从0增加到82.15%时,透过率略有增大。在6.2 GHz附近的第一个谐振频率 $f_1$ 随着孔隙率的增大向低频方向发生了微小的移动;在15.5 GHz附近的第二个谐振频率 $f_2$ 随着孔隙率的增大会向高频方向发生偏移。不同孔隙率的点阵结构的共振频率及相应的透射率、反射率以及吸收系数如表1所示。

从表1中可以看出,当孔隙率从0增加到82.15%时,第一个通带谐振频率处的透过率均大于97%,反射率均为0,吸收率也没有明显的增加;在第二个通带谐振频率处的透过率均大于95%,反射率均为0,吸收率逐渐增大。点阵结构中孔隙率的变化对透射谱的峰位影响较小;吸收率会随着孔隙率的增大略微降低,但影响较小。因此,与同样厚度的无结构平板相比,点阵结构在共振频率处的透过率会略有提高,吸收率也会有所降低,适合应用于天线罩设计中。



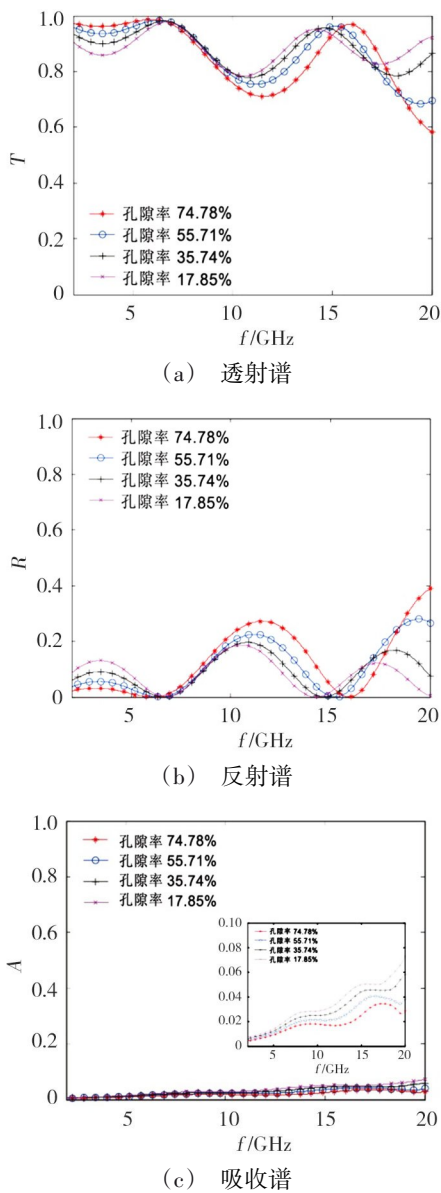


图4 不同孔隙率的点阵结构的电磁仿真结果  
Fig. 4 The simulation results of the lattice structure with various porosities

表1 点阵结构不同孔隙率对应的通带共振频率及相应的透射率、反射率、吸收率

Tab. 1 The pass-band resonance frequency, transmittance, reflectivity, and absorptivity of the lattice structure with various porosity

圆柱直径 /mm	孔隙率/%	$f_1$ /GHz	$T_1$	$R_1$	$A_1$	$f_2$ /GHz	$T_2$	$R_2$	$A_2$
2	82.15	5.93	0.99	0	0.012	15.89	0.97	0	0.031
3	62.26	6.34	0.98	0	0.015	15.17	0.96	0	0.037
4	44.29	6.57	0.98	0	0.019	14.67	0.96	0	0.043
5	25.22	6.76	0.98	0	0.023	14.23	0.95	0	0.048
无结构平板	0	6.63	0.97	0	0.027	13.25	0.95	0	0.052

### 2.3 蒙皮厚度对点阵结构频率响应特性的影响

为探究蒙皮厚度对点阵结构频率响应特性的影响,这里选取一组蒙皮厚度分别为0.5、1、1.5、2、2.5 mm的点阵结构单元,同时固定其胞元尺寸为10 mm,芯杆直径为3 mm。经过仿真计算,在垂直入射波照射下得到的透射谱、反射谱以及吸收谱如图5所示。

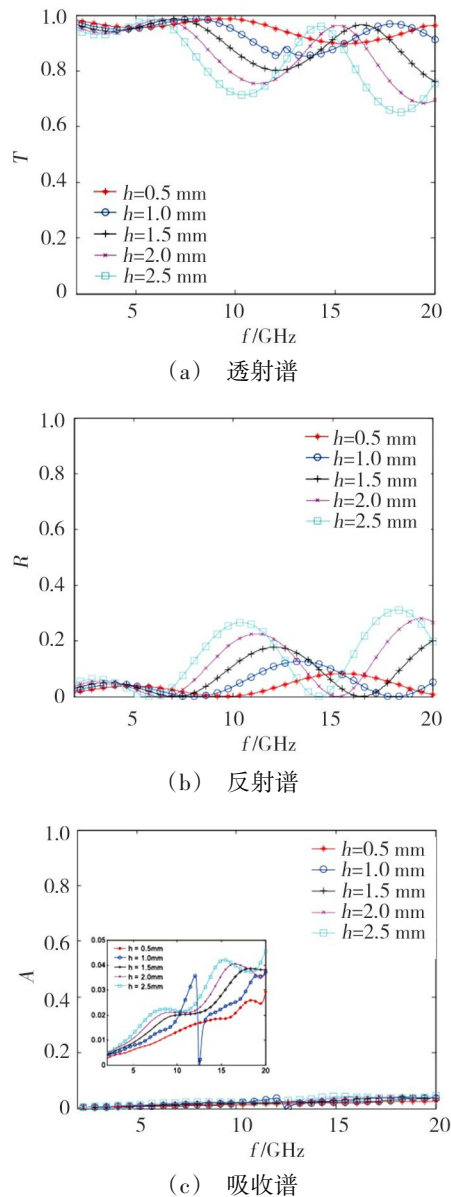


图5 不同蒙皮厚度的点阵结构的电磁仿真结果  
Fig. 5 The simulation results of the lattice structure with various skin thicknesses.

从图5(a)的透射谱可以看出,当点阵结构只改变蒙皮厚度时,两个通带共振频率均会随着蒙皮厚度的增大而向低频偏移,在共振频率处的透射率没有明显的变化,均可达到98.5%。在6~12 GHz之间,点阵结构的透射率会随着蒙皮厚度的增大而降低。从图5(c)可以发现,当蒙皮厚度从0.5 mm增大到2.5 mm时,点阵结构的吸收率不会随着蒙皮厚度的增大而发生明显的变化。

## 2.4 胞元尺寸对点阵结构透射率的影响

点阵结构的胞元尺寸实际上是指仿真模型在  $x$  和  $y$  方向的周期,这里选择的模型结构为正方形,因此认为两个方向上的周期一样,可以认为是胞元尺寸。以胞元尺寸为 10 mm、芯杆直径为 3 mm、蒙皮厚度为 2 mm 的点阵结构为基准进行尺寸缩放,得到胞元尺寸为 3、5、7、10 mm 的点阵结构,并分别分析相对频率响应特性,图 6 为仿真计算得到的透射谱、反射谱以及吸收谱。从图 6 的透射谱中可以看出,当

点阵结构的胞元尺寸从 3 mm 增加到 10 mm 时通带谐振频率会明显向低频移动,同时会出现多个谐振频率。这主要是由于电磁波与这种周期性电介质结构相互作用产生电磁共振,而谐振波长直接与结构周期成正比。因此,当周期增大时,相应的谐振波长会随之增大,因此谐振频率会相应地减小。在谐振频率处,电磁波的透过率仍可达到 98% 以上。从图 6 中的吸收谱也可以看出,随着胞元尺寸的增大,吸收率会发生轻微的增大。

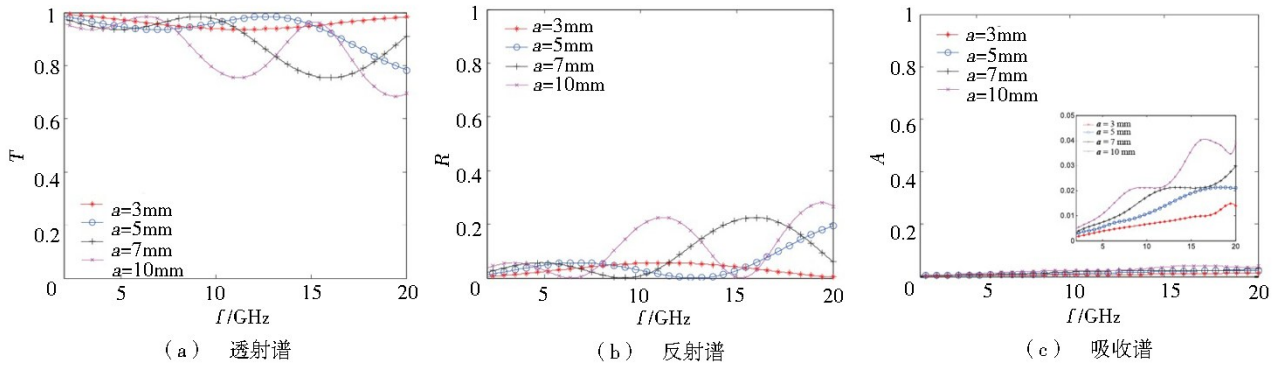


图 6 不同胞元尺寸的点阵结构的电磁仿真结果

Fig. 6 The simulation results of the lattice structure with various cell sizes.

## 2.5 多角度入射对点阵结构透射率的影响

图 7 为当入射波为水平极化和竖直极化时,电磁

波以不同角度入射时点阵结构的透射率。

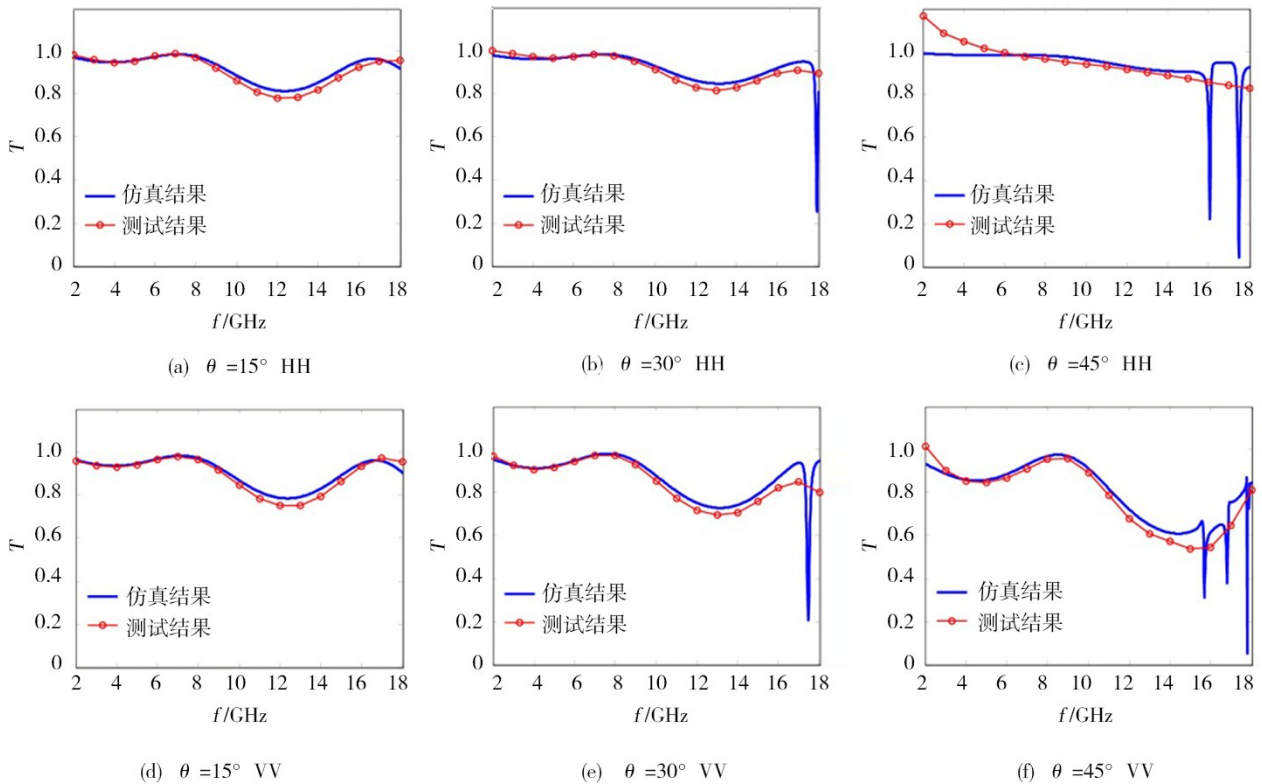


图 7 两种极化方向的电磁波多角度入射时,点阵结构透射谱的仿真与实验结果

Fig. 7 The simulation and experimental results of transmission spectrum of the lattice structure when two kinds of polarized electromagnetic waves with various incident angles

点阵结构材料将来作为天线罩使用时,必定会面临多角度透射问题。选取芯杆直径 $\phi=3$  mm、蒙皮厚度 $h=1.5$  mm、胞元尺寸 $a=10$  mm的周期性结构为研究对象。

从图7可以看出,对于水平极化的入射电磁波,尽管入射角度增大,但电磁波在2~18 GHz内,透过率均大于75%;对于竖直极化的入射波,随着入射角度的增大,点阵结构的透过率在高频逐渐降低。测试和仿真结果基本一致。当入射角为 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 时,两种极化情况下的仿真结果在高频处的某些频率点会出现一些跳变,而实验结果中没有出现。这些跳变可能是由于点阵结构中的一些精细结构的电磁共振造成,但由于测试过程中的采样点较少,无法体现这些跳变;也有可能由于加工过程中的细节误差导致没有出现这些频率点的跳变。

由此可知,设计的点阵结构的透射特性在入射波为水平极化时,受到入射角度的影响较小;当入射波为竖直极化时,随着入射角度的增大,其高频分量的透过率会逐渐降低。

### 3 结论

(1)通过对点阵结构的孔隙率、蒙皮厚度、胞元尺寸对电磁波频率响应特性的研究,可发现点阵结构的胞元尺寸与蒙皮厚度均能够决定透射谱的通带共振频率,而孔隙率对其影响较小。

(2)点阵结构与同介质无结构平板相比,其共振频率会随着孔隙率的增大,其第一个频率点向低频偏移,其第二个频率点向高频偏移;在共振频率点处的透过率也随之提高,吸收率有所降低。

(3)蒙皮厚度的增大会直接降低电磁波的透过率,这是由于点阵结构的等效介电常数也随着增大,也增加了材料对电磁波的吸收。

(4)通过SLS技术制备透波平板点阵结构并进行了2~18 GHz透射率测试,实验结果与仿真数据具备高度一致性。对于水平极化的入射波,当入射角增大时,结构的透射率均大于75%,受角度影响较小;对于竖直极化的入射波,当入射角增大时,透射率在高频处会逐渐降低。

(5)需结合工艺水平、力学性能以及实际的频率选择需求,选择最优的结构设计方案。

### 参考文献

[1] 余娟丽,陈磊,吕毅,等. 天线罩用宽频透波材料的发展现状[J]. 宇航材料工艺,2013,43(2):1-7.

YU J L, CHEN L, LYU Y, et al. Progress of broadband wave-transparent materials for radome [J]. Aerospace Materials & Technology, 2013, 43(2): 1-7.

[2] NARAYAN S, GULATI G, SANGEETHA B, et al. Novel metamaterial-element-based FSS for airborne radome applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and

Propagation, 2018, 66(9): 4695-4707.

[3] 吴秉横,顾昊,冯红全,等. 一种新型双频天线罩设计[J]. 上海航天,2015,32(1):45-47,67.

WU B H, GU H, FENG H Q, et al. Design of a novel dual-frequency radome [J]. Aerospace Shanghai, 2015, 32(1): 45-47, 67.

[4] 李楠. 点阵复合材料结构设计与力学性能分析[D]. 哈尔滨理工大学,2011.

LI N. Design and mechanical analysis of lattice composite materials [D]. Harbin University of Science and Technology, 2011.

[5] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46(3-4): 309-327.

[6] 易长炎,柏龙,陈晓红,等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应用现状综述[J]. 功能材料,2017,48(10):10055-10065.

YI C Y, BO L, CHEN X H, et al. Review on the metal three-dimensional lattice topology configurations research and application status [J]. Journal of Functional Material, 2017, 48(10): 10055-10065.

[7] 张奎晓,贾芸,储逸然. 基于增材制造点阵结构特性及建模方法[J]. 机械工程与自动化,2019(5):221-222,226.

ZHANG K X, JIA Y, CHU Y R, et al. Characteristic and modeling method of lattice structure based on additive manufacturing [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(5): 221-222, 226.

[8] 梅家赫. 基于点阵结构的频选天线罩设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.

MIE J H. Frequency selective radome design based on lattice structure [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

[9] 王向明,苏亚东,吴斌等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术,2018,61(10):16-25.

WANG X M, SU Y D, WU B, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(10): 16-25.

[10] 郑权,冀宾,李昊,等. 基于增材制造的多层金字塔点阵夹芯板抗压缩性能[J]. 航空材料学报,2018,38(3):81-86.

ZHENG Q, YING B, LI H, et al. Compressive behavior of sandwich panels with multilayer pyramidal truss cores by additive manufacturing [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(3): 81-86.

[11] 王健. 激光增材制造点阵结构力学性能研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

WANG J. Study on the mechanical properties of the structure of lattice based on laser additive manufacturing [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[12] 郑华勇,吴林志,马力,等. Kagome点阵夹芯板的抗冲击性能研究[J]. 工程力学,2007,24(8):86-92.

ZHENG H Y, WU L Z, MA L, et al. Research on impulse-resistant performance of sandwich panels with Kagome truss core [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(8): 86-92.