

文章编号:1001-2486(2011)01-0025-06

单层结构陶瓷天线罩材料的宽频透波性能设计*

邹晓蓉^{1,2},张长瑞²,李斌²,莫锦军³,王思青²,曹峰²

(1. 国防科技大学理学院,湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学航天与材料工程学院,湖南长沙 410073;
3. 国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:依据天线罩对宽频带透波性能的要求,采用传输线理论,建立了单层结构天线罩平板材料透波率的计算方法。对单层结构天线罩材料的介电性能参数进行了优化设计,确定了在2~18 GHz频带,0~40°入射角范围内满足透波率要求的最优介电性能参数。设计结果表明,当材料的介电常数 $\epsilon \leq 3.0$,损耗角正切 $\tan\delta \leq 0.02$ 时,具有最佳厚度的材料在2~18 GHz频带,0~40°入射角范围内透波率大于60%。根据优化设计结果,兼顾天线罩材料的力学和热学性能等要求,确定了单层结构天线罩材料体系为空心石英纤维增强氮化物陶瓷基复合材料。根据所选材料体系的介电性能($\epsilon = 2.8, \tan\delta = 0.005$),进一步对其结构参数(厚度)进行了优化计算,确定了满足宽频带透波性能要求的最佳厚度为7mm。对满足壁厚设计要求的单层结构天线罩平板材料进行了宽频带透波性能测试。结果表明,该单层平板材料在2~18 GHz频带范围内透波率大于60%。

关键词:天线罩材料;单层结构;宽频带;传输线理论;透波率

中图分类号:TN82 **文献标识码:**A

Broadband Design of Ceramic Radome Material with Single-layer Structure

ZOU Xiao-rong^{1,2}, ZHANG Chang-rui², LI Bin², MO Jin-jun³, WANG Si-qing², CAO Feng²

(1. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:Based on the requirement of broadband radome, by using the transmission line theory, the calculation method of transmission efficiency of single-layer structure was conducted when the frequency varied from 2GHz to 18GHz and the incidence angle changed from 0 to 40°, the dielectric properties were optimally designed. The results suggest that when the dielectric constant is no more than 3.0 and the loss angle tangent value is no more than 0.02, the transmission efficiency of single-layer structure material with the suitable wall thickness is more than 60%. According to the design results, considering the mechanical and thermal properties, the hollow silica fiber reinforced BN-Si₃N₄ matrix composites (SiO₂/BN-Si₃N₄ composites) are selected as single-layer structure radome material. According to the dielectric properties of the composites ($\epsilon = 2.8, \tan\delta = 0.005$), the structural parameter (thickness) was optimally designed, and the optimal wall thickness was 7mm. The broadband properties of SiO₂/BN-Si₃N₄ single-layer structure radome material in agreement with the wall thickness requirement were tested. The results suggest that the transmission efficiency for single-layer structure radome material is more than 60% when the frequency is 2~18 GHz.

Key words: radome material; single-layer structure; broadband; transmission line theory; transmission efficiency

导弹天线罩既是导弹弹体的结构件,又是雷达制导系统的重要组成部分,是导弹在高速飞行条件下实现精确制导的重要保证^[1]。为了提高制导系统的抗电子干扰能力,发展反辐射、突防电子干扰等高性能导弹弹头,导弹制导系统中已经采

用了种种新技术,如频率捷变技术,多模工作方式等^[2],这些技术要求天线罩具有宽频透波特性和需要覆盖一个或者数个波段的频带,比较典型的如1~18GHz频段,这给天线罩的设计和材料的选择提出了严峻的挑战。为了实现宽频透波,天线罩

* 收稿日期:2010-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(90916019)

作者简介:邹晓蓉(1975—),女,讲师,博士生。

的制备可以采用具有极低介电常数的介质材料,或者在天线罩罩壁形式上采用薄壁结构、夹层结构、多层结构等^[3-4]。低速导弹天线罩的应用环境相对温和,采用有机物制备宽频带天线罩即可满足使用要求,此种天线罩应用最多,在罩壁形式上多采用夹层或者多层结构。然而,有机材料耐热性能差,高温下裂解形成自由碳,不能满足高速导弹飞行过程中防热和透波要求。相比之下,陶瓷材料耐热性好、强度高,具有适宜的介电性能,逐渐成为高速导弹天线罩的首选,但陶瓷夹层或多层结构天线罩的制备相当困难^[4-5]。相对而言,单层结构陶瓷天线罩的制备在工艺上较易实现。

近年来,国内外关于天线罩电性能设计的发展十分迅速,不仅为天线罩材料的选择和制备提供了重要的理论依据,而且在缩短天线罩研制周期,降低研制成本方面发挥了重要作用。目前普遍采用微波传输线理论和电磁波透射与反射理论对天线罩的宽频带透波性能进行优化设计,并将工作重点放在夹层或多层罩壁结构厚度的优化方面^[6-11]。其中基于罩壁局部平面近似,根据传输线模拟求传输矩阵的方法,相对而言,较为简单通用,可以方便准确地计算单层、夹层和多层结构罩壁的电性能参数^[12]。

1 单层天线罩罩壁传输特性的计算方法^[13-15]

在天线罩的电性能设计中,首先要了解罩壁的反射、传输等特性。最简单常用的方法是把罩壁局部近似为介质平板结构,把天线发出的电磁波与罩壁的相互作用近似为平面波与介质平板之间的作用,它基于以下假设:(1)电磁波在天线近区内为平面波,它从口径出发沿直线传播;(2)天线罩的曲率半径远大于波长。以上述假设为基础,天线罩罩壁的传输特性可相对独立地按介质平板理论计算,而无需考虑具体的天线罩外形和天线特性。

当均匀平面波以一定的角度入射到两种介质的分界面时,除了入射波还有反射波和折射波。入射波的传输方向与分界面的法线确定的角度为入射角,确定的平面为入射平面。入射波可以分解为两个线极化波,其中电场在入射平面内的分量称为水平极化波,电场在入射平面法线方向的分量称为垂直极化波。这两种极化波通过介质的

分界面时规律不同。

基于电磁波传播理论和电磁场的边界连续性条件,可以导出在不连续介质区域场的关系:

$$\begin{bmatrix} E_{0t} \\ H_{0t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2t} \\ H_{2t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, E 、 H 分别表示电场和磁场;下标 t 表示介质分界面上场的切向分量;下标 0 、 1 、 2 表示三层介质板沿电磁波传播方向的次序关系。对照传输线理论可见,介质平板两边的场通过一个传输矩阵 $\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}$ 联系。因此,每一层介质平板可以等效为一段传输线。对于单层介质平板,电磁波的传输是从自由空间到介质再从介质到自由空间传播的。若令 $A = A_1$ 、 $B = B_1$ 、 $C = C_1$ 、 $D = D_1$,则单层介质平板的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch} \gamma d & Z_{c1} \operatorname{sh} \gamma d \\ \operatorname{sh} \gamma d / Z_{c1} & \operatorname{ch} \gamma d \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0} \quad (3)$$

对水平极化波和垂直极化波分别有

$$Z_{c1}^{\parallel} = Z_0 \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0} \quad (4)$$

$$Z_{c1}^{\perp} = \frac{Z_0}{\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0}} \quad (5)$$

式中, d 为介质平板的厚度; λ_0 为自由空间波长; ϵ_0 为自由空间的介电常数, ϵ_1 为介质的复介电常数, $\epsilon_1 = \epsilon_1 (1 - j \tan \delta_1)$, $\tan \delta_1$ 为介质的损耗角正切; θ_0 为电磁波对介质的入射角; Z_0 为自由空间的特性阻抗, Z_{c1} 为介质平板的等效特性阻抗。由此可得单层平板的透过系数和反射系数分别为

$$T = \frac{2}{(A + B/Z_{c0}) + (Z_{c0} C + D)} \quad (6)$$

$$R = \frac{(A + B/Z_{c0}) - (Z_{c0} C + D)}{(A + B/Z_{c0}) + (Z_{c0} C + D)} \quad (7)$$

单层平板的功率传输系数(或称为透波率)可表示为 $|T|^2$ 。式中,水平极化时, $Z_{c0}^{\parallel} = Z_0 \cos \theta_0$;垂直极化时, $Z_{c0}^{\perp} = \frac{Z_0}{\cos \theta_0}$ 。

2 计算结果与分析

透波率是各种天线罩的重要电性能指标,它

直接影响天线罩的整体插损,进而决定雷达作用距离的减小程度。其他电性能参数(如瞄准误差和旁瓣特性等)的优化都是在保证天线罩有足够的透波率的前提下进行的。天线罩的透波率不但与罩壁结构、介质的特性(介电常数、损耗角正切和厚度等)有关,还受电磁波的频率、极化和入射角的影响。对于频带较宽且连续变化的导引波,为使天线罩具有较理想的宽频透波性能,其中最小透波率的指标不能定得太高,必要时可以降低为60%^[9,16]。因此,本文将针对天线罩材料在2~18 GHz频带透波率大于60%的要求,重点讨论材料介电常数、损耗角正切和厚度的优化。

2.1 极化方式对透波率的影响

以介电常数为2.9,损耗角正切为0.003,厚度为5mm的单层结构平板材料为例,计算其在2~18 GHz频带,0~85°入射角范围内,不同极化方式下的透波率。图1(a)和(b)分别给出了水平极化和垂直极化时材料透波率的计算结果。可见,两种极化形式下材料的传输特性有很大差别。水平极化波存在一个界面反射系数为零的布儒斯特角,当入射角等于布儒斯特角时,材料的透波率接近于最大;当入射角小于布儒斯特角时,透波率随入射角的增大变化不大;当入射角大于布儒斯特角时,透波率随入射角的增大而逐渐减小。在垂

直极化情况下,材料的透波率随入射角增大而减小,尤其是大角度入射时下降很快。水平极化时的透波率整体上要优于垂直极化时的透波率。因此在进行天线罩的透波性能设计时,其主要矛盾来自垂直极化,只要垂直极化能够满足,水平极化一般都能满足^[17]。为便于计算,在下面的讨论中均只考虑垂直极化情况。

2.2 材料介电常数对透波率的影响

材料的介电性能(介电常数和损耗角正切)直接影响天线的电性能,是选择材料的主要依据。图2所示为单层结构平板材料介电常数对其在2~18 GHz频带,0~85°入射角范围内透波率的影响。在计算时假设材料的损耗角正切为0.005,厚度为5mm。可以看出,材料的介电常数越大,谐振带(高透波率对应频率的范围)越窄,适宜的电波入射角范围也越小。当介电常数从2.0增大到2.5时,透波率大于90%的谐振带明显变窄,同时在2~18GHz宽频内透波率大于60%的入射角范围由0~57°缩小为0~50°。当介电常数增大至3.0时,透波率大于80%的谐振带明显变窄,同时在2~18GHz内透波率大于60%的入射角范围缩小为0~40°。当介电常数继续增大至3.5时,透波率大于70%的频带范围明显变窄,同时在2~18GHz内透波率大于60%的入射角范围缩小为0~32°。因此,从电性能的角度来看,介电常数越小,材料的宽频透波性能越好。

2.3 材料厚度对透波率的影响

天线罩罩壁厚度决定了电磁波的反射和透射比例,是透波性能关键影响因素之一。图3给出了2~18 GHz频带,0~85°入射角范围内,介电常数为3.2,损耗角正切为0.005,不同厚度时单层结构平板材料的透波率。可以看出,厚度越大,谐振带越向低频位置移动,谐振带的数目也在增多,从而导致谐振带宽度也同时变窄。按电磁理论,理想谐振点发生在半波长的整数倍处^[14],当厚度较大时,会有不止一个的频率点满足此条件,总体上厚度越大,满足的频率点越多,相应也就产生了谐振带增多现象。而谐振带变窄则归因于此条件下工作频率会更快地偏离谐振点。显然,从电性能角度来看,厚度过大对天线罩是不利的。但天线罩的厚度也不宜过小,否则难以满足天线罩的承载和隔热要求。

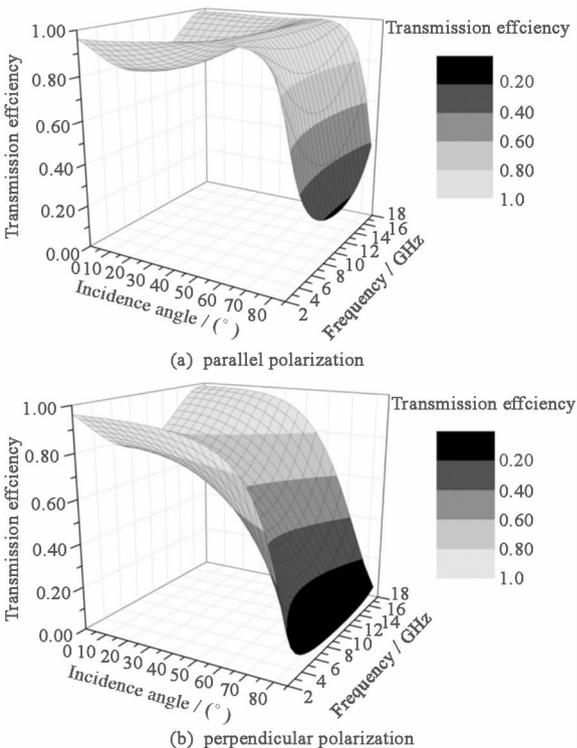


图1 极化方式对透波率的影响

Fig.1 Effect of polarization mode on transmission efficiency

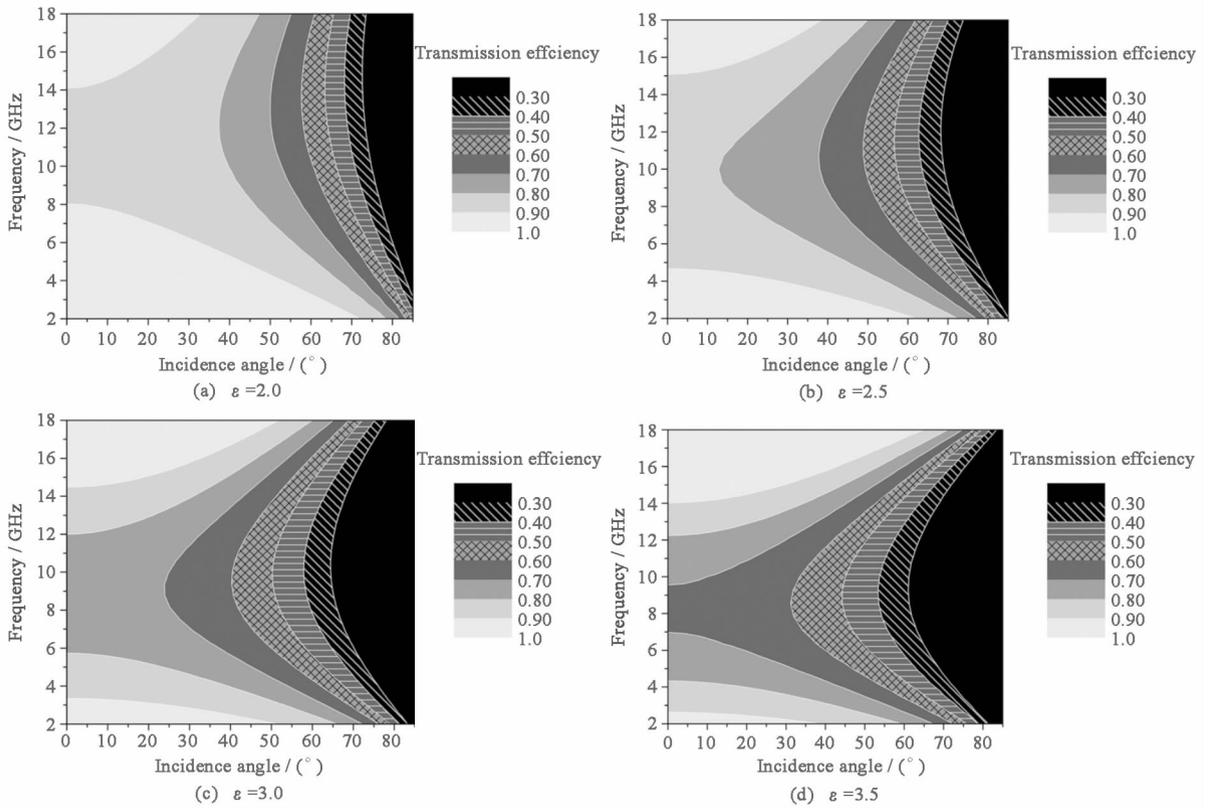


图2 材料介电常数对透波率的影响

Fig.2 Effect of dielectric constant on transmission efficiency

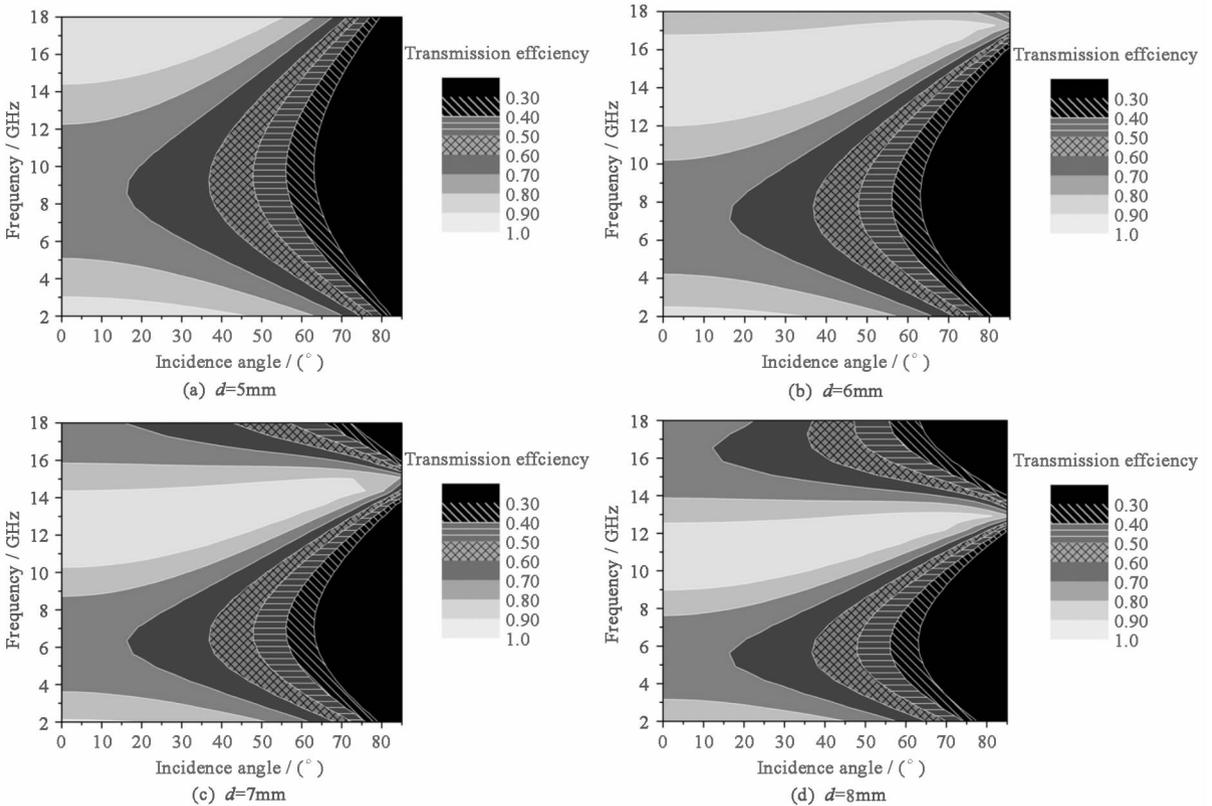


图3 材料厚度对透波率的影响

Fig.3 Effect of wall thickness on transmission efficiency

从图 3 还可以看出,当入射角范围为 $0 \sim 40^\circ$, 材料厚度为 5mm 时,透波率大于 60% 时的频率范围大约分布在 $2 \sim 7.4$ GHz 和 $10.8 \sim 18$ GHz 两个频段,带宽约为 12.6 GHz。随着厚度的增大,透波率大于 60% 时的带宽呈起伏变化,如图 4 所示。图 4 主要列出了不同介电常数材料在 $0 \sim 40^\circ$ 入射角内透波率大于 60% 时的带宽与厚度的关系曲线。可以看出,介电常数越大,带宽随着厚度增加的变化越敏感。由此可见,低介电常数的材料不仅可以拓宽天线罩的频带,还能放宽壁厚公差,增大罩壁厚度,提高结构强度,改善加工性能^[18]。图 4 还表明,在 $0 \sim 40^\circ$ 入射角内,只有当介电常数 $\epsilon \leq 3.0$ 时,具有适宜厚度的材料的带宽才能达到 16GHz,也就是说材料才可以在 $2 \sim 18$ GHz 宽频带内满足透波率大于 60% 的要求。当材料体系确定以后,材料的最佳厚度可以进一步通过电性能优化设计来得到。图 4 也列出了介电常数为 3.0 的材料在 $0 \sim 60^\circ$ 入射角内,不同厚度下透波率大于 60% 时的带宽。可以看出,入射角范围较大时,带宽随厚度的变化更明显,进行厚度的优化更有利。随着厚度的增加,带宽会间隔出现极大和极小值,图 4 表明了这种变化趋势。对单层天线罩来说,设计厚度一般都会取最佳值,处于波峰位置^[19]。而且介电常数不同,材料的最佳厚度通常也不同。

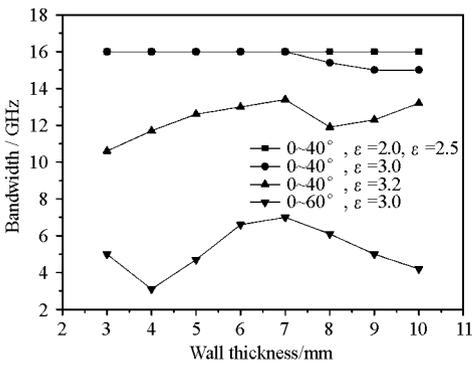


图 4 不同介电常数材料透波率大于 60% 时的带宽与厚度变化曲线

Fig.4 Effect of wall thickness on bandwidth of transmission efficiency of more than 60% for the material with different dielectric constant

2.4 材料损耗角正切对透波率的影响

图 5 所示为损耗角正切对材料透波率的影响。在计算时假设材料的介电常数为 3.0,厚度为 7mm。可以看出,随着损耗角正切的增大,谐振带逐渐变窄,适宜的电波入射角范围也逐渐缩小。此外,在 $0 \sim 40^\circ$ 入射角内,不同介电常数材料透波率大于 60% 时的带宽与损耗角正切的关系

曲线列于图 6,其中材料的厚度均取优化值。结果表明,随着损耗角正切的增大,介电常数越大的材料,透波率大于 60% 时的带宽下降越快。对于介电常数 $\epsilon \leq 3.0$ 的材料,当损耗角正切 $\tan \delta \leq 0.02$ 时,材料在 $2 \sim 18$ GHz 频带内均能够满足透波率大于 60% 的要求。

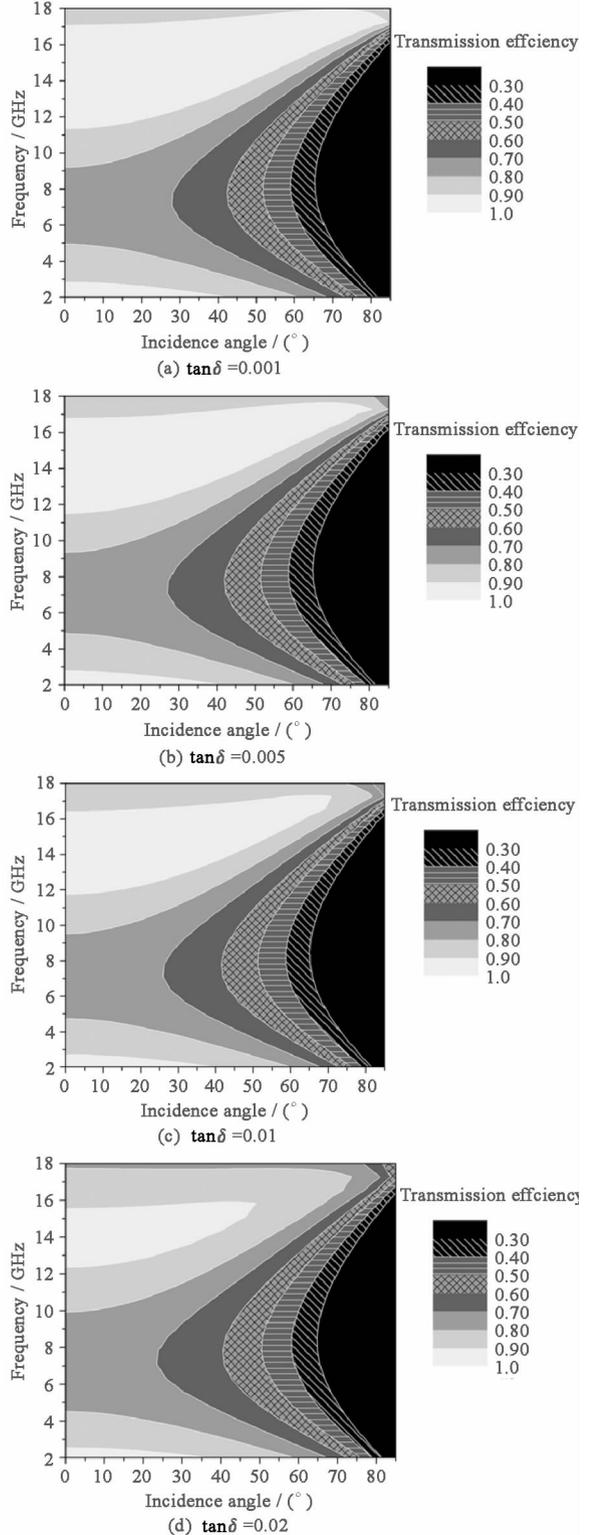


图 5 材料损耗角正切对透波率的影响

Fig.5 Effect of loss angle tangent on transmission efficiency

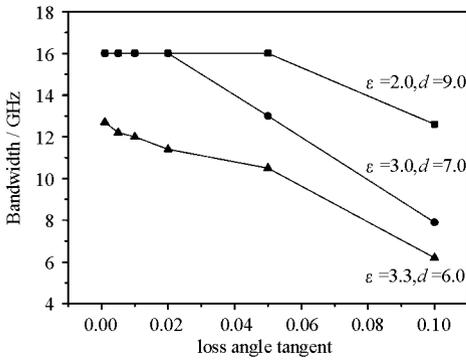


图6 不同介电常数材料透波率大于60%时的带宽与损耗角正切变化曲线

Fig.6 Effect of loss angle tangent on bandwidth of transmission efficiency of more than 60% for the material with different dielectric constant

3 单层结构天线罩平板材料的宽频透波性能

通过前述优化设计得出单层结构陶瓷天线罩材料的最佳介电性能参数为:介电常数 $\epsilon \leq 3.0$, 损耗角正切 $\tan \delta \leq 0.02$, 此时在 2 ~ 18 GHz 频带、0 ~ 40° 入射角内, 材料透波率大于 60%。根据宽频透波优化设计结果, 兼顾天线罩材料的力学和热学性能等要求, 本文确定了以空心石英纤维增强氮化物陶瓷基复合材料^[20] 作为天线罩材料。根据该材料体系实测的介电性能 ($\epsilon = 2.8, \tan \delta = 0.005$) 对罩壁厚度进行了优化计算, 确定了满足宽频带透波性能要求的最佳厚度为 7mm, 制备了满足壁厚设计要求的单层结构天线罩平板材料, 并对其宽频透波性能进行了测试, 结果如图 7 所示。可以看出, 在 2 ~ 18 GHz 的测试频率范围内, 材料的透波率均大于 60%, 部分频段甚至超过了 90%, 表现出良好的宽频透波性能。可见, 实测结果与理论计算结果比较吻合, 这说明天线罩透波性能设计对天线罩材料的选择、制备起到了有益的指导作用。

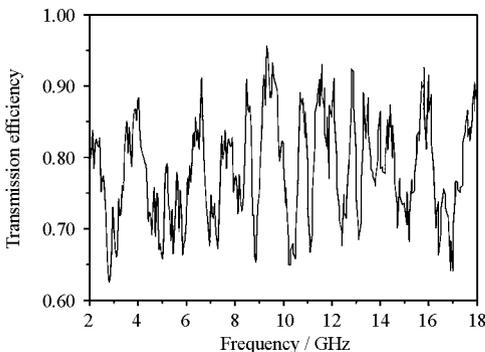


图7 单层结构天线罩平板材料透波率的测试结果

Fig.7 Transmission efficiency test of single-layer structure radome material

4 结论

(1) 采用传输线理论, 建立了单层结构天线罩平板材料透波率的计算方法。

(2) 对单层结构天线罩材料的介电性能参数进行了优化设计。优化设计结果为: 当材料的介电常数 $\epsilon \leq 3.0$, 损耗角正切 $\tan \delta \leq 0.02$ 时, 具有最佳厚度的材料在 2 ~ 18 GHz 频带, 0 ~ 40° 入射角内透波率大于 60%。

(3) 确定了单层结构天线罩材料体系为空心石英纤维增强氮化物陶瓷基复合材料, 根据其介电性能参数对单层壁厚进行了优化计算, 得出满足宽频带透波性能要求的最佳厚度为 7mm。

(4) 对满足壁厚设计要求的单层结构天线罩平板材料进行了宽频带透波性能测试。结果表明, 该单层结构天线罩平板材料在 2 ~ 18 GHz 频带内透波率大于 60%。

参考文献:

- [1] 李斌, 张长瑞, 曹峰, 等. 高超音速导弹天线罩设计与制备中的关键问题分析[J]. 科技导报, 2006, 24(8): 28-31.
- [2] 王笃祥, 彭望泽. 快速有效的宽带天线罩电气性能三维分析方法[J]. 电子对抗, 1990, 110(3): 29-33.
- [3] 姜勇刚, 张长瑞, 曹峰, 等. 宽频天线罩结构设计及制备工艺进展[J]. 材料导报, 2006, 20(8): 1-4.
- [4] 雷景轩, 施志伟, 胡伟, 等. 高温宽频带陶瓷导弹天线罩研究进展[J]. 陶瓷学报, 2007, 28(2): 144-149.
- [5] 齐共金, 张长瑞, 胡海峰, 等. 陶瓷基复合材料天线罩制备工艺进展[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(5): 632-638.
- [6] 闫法强. 夹层结构天线罩材料的设计、制备及其宽频透波性能[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 16-35.
- [7] Chen F, Shen Q, Zhang L M. Preparation of Silicon Nitride Multilayer Ceramic Radome Material and Optimal Design of the Wall Structure [C]//Multiscale and Functionally Graded Materials 2006, New York, America, 2008: 889-894.
- [8] 张鑫. 毫米波天线罩的设计研究[J]. 火控雷达技术, 2005, 34(1): 51-53, 60.
- [9] 张志斌. 某型号天线罩的电气结构设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 7-34.
- [10] 袁乃昌, 莫锦军. 多频段天线罩功率传输系数的优化设计[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 378-383.
- [11] 张曼, 陈章友, 陈飞. 宽带天线罩和雷达吸波材料的优化计算[J]. 微波学报, 2007, 23(2): 47-50.
- [12] 周卫来. 宽带天线罩与雷达吸波结构的优化技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 6.
- [13] 莫锦军. 介质天线罩电气特性分析与研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000: 7-10.
- [14] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 131-140.
- [15] 陈国平, 张弘, 杜建春. 多层天线罩功率系数和插入相移的仿真计算[J]. 电子信息对抗技术, 2006, 21(1): 45-48.
- [16] 朱全忠. 反舰导弹天线罩设计的几个主要问题[J]. 制导与引信, 1997, 18(2): 18-25.
- [17] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京: 宇航出版社, 1993: 62.
- [18] 程莲娣. FBC 钝型毫米天线罩的研究[J]. 宇航材料工艺, 1993, 23(4): 55-58.
- [19] 杨鲜锋. 影响天线罩性能的主要工艺因素[J]. 纤维复合材料, 2007, 24(2): 30-33.
- [20] 邹晓蓉, 张长瑞, 王思青, 等. 空心石英纤维增强氮化物基低介电复合材料的制备及其性能[J]. 航空材料学报, 2010, 30(3): 51-55.