

引用格式:孙鹏程,王良模,王陶,等. 双层吸波蜂窝复合材料结构优化设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(4): 58-64.

SUN PengCheng, WANG LiangMo, WANG Tao, et al. Structural optimization of the design of a double-layer absorbing honeycomb composite[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(4): 58-64.

双层吸波蜂窝复合材料结构优化设计

孙鹏程¹ 王良模^{1*} 王陶¹ 黄健² 沙小伟² 陈威²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 苏州江南航天机电工业有限公司, 苏州 215300)

摘要:为探究不同吸波特性和材料之间的组合规律,以在更宽频段范围内达到最佳雷达波吸收效果,选用两种不同吸波剂浸渍的纸蜂窝结构型吸波材料板(分别命名为FW10和FW20),以石英纤维板为外侧蒙皮,制备出一种具有较好雷达波吸收能力的复合板件,该板件可与常规壁板结合使用。采用时域有限差分法计算不同材料厚度组合下的材料雷达散射截面(RCS)值和反射率,并采用正交设计法对最优厚度组合进行进一步的探究,结果表明:复合结构的吸波效果与各层材料组合及其厚度分布有关,所得最优复合板件厚度组合方案从外向内依次为1 mm 石英纤维板,15 mm FW10和15 mm FW20。最优方案复合板件在0~18 GHz频段范围内反射率低于-10 dB的吸收频段宽度为13.1 GHz,最大吸收峰可达-29.5 dB。最后进行实物测试,验证了仿真分析的有效性。

关键词:吸波材料;雷达散射截面(RCS);反射率;时域有限差分法;正交设计

中图分类号: TJ03 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.04.009

引言

雷达隐身技术又称雷达低可探测技术或目标雷达特征控制技术,是装备隐身领域的重要研究内容^[1]。目前较为常见的雷达都是利用微波进行感知的主动传感器^[2]。雷达隐身技术可以分为无源隐身技术和有源隐身技术。无源隐身技术包括整形法、吸波材料法和无源对消(阻抗加载)法等,有源隐身技术包括有源欺骗、有源对消、智能材料和等离子体烟雾等,其中吸波材料法又分为涂层隐身和结构隐身两大类,而结构隐身是兼具隐身性能与结构承载功能于一体的隐身方式。在众多结构型吸波材料中,蜂窝吸波材料具有一定的代表性,其结构具有高抗压强度、高比强度以及高比刚度等特点,是优异的轻质高强结构材料,既可以作为主体承力结构的一部分,又可作为吸波材料及吸波介质的载体。

鉴于蜂窝吸波材料的优越性,国内外对其进行

了较多的理论研究,同时也积极研制相关的产品,利用试验实测对理论加以验证,并取得了较为理想的结果。Quiévy等^[3]以碳纳米管泡沫复合材料填充蜂窝孔格,用玻璃纤维复合材料作为面板,制备了具有优良吸波性能和力学性能的多功能建筑吸波材料;Johansson等^[4]采用周期结构材料均质化方法,分析得出蜂窝状复合材料的有效电磁材料性能表达式;武志红等^[5]以竹炭为原料制备出一种类蜂窝结构复合材料,并研究了其吸波性能;冀志江等^[6]则研究了蜂窝结构边长和高度对吸波性能的影响。以上这些研究的关注点都在于吸波材料本身,然而在实际使用过程中,还需要考虑如下因素:首先,为保证壁板的强度及外壁的防水防腐性,一般会在板件最外侧添加外蒙皮,外蒙皮的添加对整体结构的动态性能包括吸波性能有着较大的影响^[7];其次,不正确的材料搭配方案会极大削弱复合材料整体的吸波性能。

本文选取了两种采用不同类型吸波剂浸渍的芳纶纸蜂窝结构型吸波材料FW10和FW20作为夹层,选用石英纤维板为外侧蒙皮,铝合金板件为内侧蒙皮(即测试底板),着重研究整体的最优厚度组合以获取最佳组合方式。本文的研究目的在于为隐身材料的实际应用提供理论基础的同时,进一步挖掘

收稿日期:2019-04-02

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0806405)

第一作者:男,1996年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: liangmo@njust.edu.cn

蜂窝材料的吸波潜力。

1 雷达隐身指标与理论分析方法

1.1 雷达散射截面与反射率

雷达散射截面(RCS)表征物体表面感应电流的远区辐射场,是表征目标雷达隐身性能的重要指标^[8],其数学表达式为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{2} \sqrt{\pi r} \frac{\mathbf{E}_s \hat{e}_r}{\mathbf{E}_0} e^{-jkr} \quad (1)$$

式中, $\sqrt{\sigma}$ 为物体 RCS 的复数平方根, \hat{e}_r 为极化方向, k 为自由空间波数, \mathbf{E}_s 及 \mathbf{E}_0 分别为反射电场矢量与入射电场矢量, r 为物体到雷达的距离。一般将数值 S 表示成对数形式,以 $\text{dB} \cdot \text{m}^2$ 为单位,其含义为每平方米的分贝数,即

$$S = 10 \lg \sigma \quad (2)$$

式中 σ 为物体雷达波散射截面面积, m^2 。为进一步表征采用吸波措施前后复合板件的吸波效果,利用反射率作为吸波效果的重要参考指标。反射率数值为采用吸波措施后与未采用措施时 RCS 值的差值,单位为 dB。

1.2 电磁场理论分析方法

利用有限元方法计算电磁场问题,实际上是近似求解给定边界条件下微分形式的麦克斯韦方程组,其中采用时域有限差分法直接离散时域波动方程不需要任何形式的导出方程,故不会因数学模型而限制其应用范围。因此本文选用三维电磁仿真平台 CST 中的时域有限差分法进行仿真试验,力求获取较为准确的 RCS 数值。

2 仿真分析模型及正交试验

本文选用两种成分不同的铁氧体系列吸波剂浸渍的纸蜂窝结构型材料,两者均采用相同的芳纶纸蜂窝作为基本构架,蜂窝结构为正六角蜂窝,边长 5 mm,厚度 0.2 mm。将最终得到的蜂窝结构型吸波材料分别命名为 FW10 和 FW20。由材料试验结果可知,当以反射率 -10 dB 作为参考指标时,两者能达到的有效吸波频段宽度都较窄,不能在较宽频段范围内达到良好的吸波效果。基于现有文献可知,由匹配层和吸收层组成的双层吸波材料相较于单层材料具有更好的吸波性能^[9]。根据现有两种材料的不同吸波特性,将两者进行合理搭配,制备阻抗渐变的吸波材料,力求得到一种能够显著拓宽吸波带宽以及增强吸波效果的方案。通过材料的复合来提

升吸波效果,无疑比改进材料本身要简单,其应用成本也会大大降低。此外,FW10 和 FW20 材料还具有较低的导热性能和较好的机械性能,包括高比强度和 high 比刚度,这些因素对保证壁板的各项性能指标良好都是非常有利的。

2.1 复合材料的组合形式选择与软件仿真模型

2.1.1 复合材料的组合形式选择

通过材料测试,得到厚度相同(20 mm)的石英纤维板、FW10 及 FW20 材料的反射率曲线,如图 1 所示。

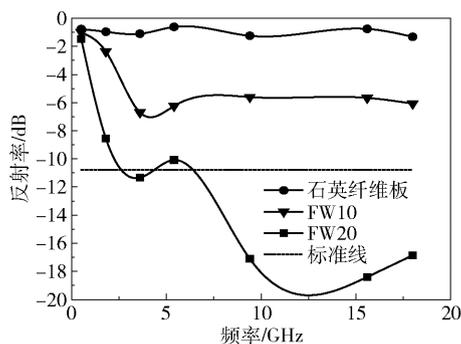


图 1 等厚材料反射率曲线

Fig. 1 Reflectivity curves for materials of equal thickness

由图 1 对比可得,石英纤维板基本上没有吸波效果,而所选取的两种材料具有不同的峰值吸波频段,同等厚度下 FW10 的峰值吸波频段要低于 FW20 的峰值吸波频段,且 FW10 的平均吸波能力要低于 FW20。根据电磁波阻抗渐变理论易知,靠近表层的吸波材料一般为阻抗与空气更为接近的材料,具体表现为吸波能力较差,内侧沿着电磁波传播路径采用电磁损耗较大的材料,具体表现为吸波性能较好,故外侧选用 FW10 材料,内侧选用 FW20 材料。吸波结构最外层应当具有良好的透波性能,故选用透波性能较好的石英纤维板作为外蒙皮。此外,石英纤维板不仅具有良好的机械性能,还能有效地防水、防腐蚀和抗氧化。测试底板应为全反射层,故选用电磁波全反射材料铝合金作为底板^[10],同时铝合金也是常用的普通壁板材料,有着较为优良的机械性能。当复合板件与实际壁板结合时,复合结构贴附于壁板外侧。

2.1.2 仿真模型的建立

本文选用的仿真软件为 CST STUDIO SUITE。由于本文选取的吸波材料为吸波剂浸渍的纸蜂窝结构型材料,其制备方法对材料特性有着极其重要的影响,且芳纶蜂窝内部可能出现多次反射,因此在测

量及仿真分析过程中均采用垂直于蜂窝开口方向的入射电磁波,最大限度地减少反射现象。通过建立实际蜂窝模型进行仿真分析可知,在软件中无法模拟吸波剂浸渍的过程,进而导致仿真模拟的失败,故对材料进行简化。所选用的两种蜂窝材料都是以 5 mm 的厚度加工的,易得两种吸波材料都是周期性结构,因此可以根据均匀化方法推导出它们的等效介电常数和等效磁导率^[11],进而在时域有限差分方法下进行较为准确的仿真计算。Smith 等^[12]就将蜂窝吸波材料等效为相应参数的平板模型,进行了材料反射系数的求解。本文通过试验的方法得到纸蜂窝结构型材料整体的材料属性,在建模过程中忽略具体的蜂窝结构,直接以板件形式的实体代替,利用整体结构材料属性对实体进行定义。仿真所需的材料属性主要包括 0 ~ 18 GHz 内不同测试点的电导率和磁导率,其中表 1 中给出的 FW10 与 FW20 蜂窝结构型材料属性是吸波剂浸渍的芳纶纸蜂窝整体的电磁参数,测试电磁波的入射方向与蜂窝的开口方向是垂直的。

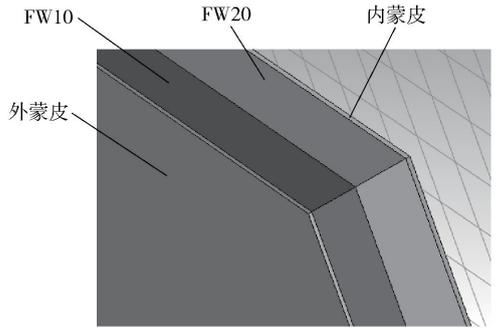


图 2 CST 仿真模型图

Fig. 2 CST simulation model diagram

达波较为典型的 L 波段(长波段),S 波段(短波段),C 波段(折中波段),X 波段以及 Ku 波段^[13]。

2.2 正交试验优化设计

2.2.1 正交试验设计

根据 2.1 节确定的结构组合形式,通过改变厚度形成多种方案。由于内蒙皮为常规壁板的一部分,不属于吸波结构,且为全反射材料,故不考虑内蒙皮厚度造成的影响,因此本文主要对两种蜂窝材料以及石英外蒙皮的厚度进行优化设计。利用正交表设计试验是一种高效、快速且经济的多因素试验设计方法,因此根据正交设计流程进行试验设计。

反射率作为 RCS 的差值能直观地展现吸波效果,故将其作为本文试验的考核指标。由于仿真试验的结果存在多个测试频段结果,故运用综合评分法,使每种试验方案都能对应单一评分。首先作出结构在全频段下的反射率曲线,并设定 -10 dB 为反射率的标准线,用来衡量结构在全测试频段下的综合吸波效果,再在曲线图中测出低于标准线的频段带宽占全频段带宽的分数,以该数值作为最终综合评分的依据。定义某次试验反射率曲线在标准线之下部分的频段带宽占全频段带宽的分数数值为 Y%,则其综合评分为 1.3Y。

正交设计中主要影响因素有 3 个,分别为吸波材料 FW10、FW20 和石英纤维板的厚度(定义为 δ_A 、 δ_B 、 δ_C)。鉴于材料加工特性,取 FW10 和 FW20 材料的加工厚度间隔为 5 mm,石英纤维板的加工厚度间隔为 0.5 mm;考虑复合板件的实际应用,复合结构的整体厚度不宜过大,以不超过 35 mm 为宜。综合以上考虑,每个因素取 3 个水平,得出因子水平如表 2 所示。

本文正交试验为三因素三水平试验,故采用正

表 1 FW10 与 FW20 蜂窝结构型材料属性

Table 1 Attributes of FW10 and FW20 honeycomb structural materials

频率/GHz	$\epsilon'^{(a)}$	$\epsilon''^{(a)}$	$\mu'^{(a)}$	$\mu''^{(a)}$	$\epsilon'^{(b)}$	$\epsilon''^{(b)}$	$\mu'^{(b)}$	$\mu''^{(b)}$
1.8	1.354	0.741	1	0	2.727	4.779	1	0
3.6	1.295	0.618	1	0	2.066	2.974	1	0
5.4	1.266	0.389	1	0	1.803	2.076	1	0
9.4	1.245	0.226	1	0	1.632	1.223	1	0
15.6	1.239	0.133	1	0	1.574	0.774	1	0

a—FW10 样品;b—FW20 样品; ϵ' 和 ϵ'' 为介电常数的实部和虚部, μ' 和 μ'' 为磁导率的实部和虚部。

复合板件的长度和宽度均为 300 mm,外蒙皮采用石英纤维材料,内蒙皮即为测试底板,采用铝合金材料,仿真模型如图 2 所示。

选择六面体网格对模型进行网格划分,由于模型较为简化,网格的质量也较好。将模型边界条件设置为 add space,即将模型隔绝在无其他反射物干扰的暗室中;在外蒙皮的外侧设置一个平行于板面的无限大平面波,平面波极化方式选用水平极化,仿真精度为 -40 dB;设置输出为 far fields,即远场输出;设定 7 个标准的监测频率,这里选取的频率(单位 GHz)为 0.5、1.8、3.6、5.4、9.4、15.6 和 18,其中 1.8、3.6、5.4、9.4、15.6 这 5 个频率点分别对应雷

交表 $L_9(3^4)$ 。根据正交设计原理及正交表可知,共需做 9 次试验就能较全面地反映出试验结果。

表2 因子水平表

Table 2 Table of factor level

水平	$\delta_A(A)/\text{mm}$	$\delta_B(B)/\text{mm}$	$\delta_C(C)/\text{mm}$
1	5	5	1
2	10	10	1.5
3	15	15	2

2.2.2 试验结果分析

根据 2.2.1 节试验设计方案进行仿真试验,得到各试验的 RCS 值数据,对数据进行进一步的处理可得到反射率曲线,再根据 2.2.1 节提及的综合评分方法进行评分,评分依据及结果列于表 3。从仿真结果可以看出,双层组合蜂窝结构吸波材料的组合形式及厚度选取都对整体结构的吸波性能有着很大的影响,正确的组合方式和厚度选取方案能够显著提升复合板件的吸波性能。

表3 评分依据及结果

Table 3 Scoring basis and results

试验	因素水平			Y%	评分
	A	B	C		
1	1	1	1	0.2018	26.23
2	1	2	2	0.4872	63.34
3	1	3	3	0.2943	38.26
4	2	1	2	0.2402	31.23
5	2	2	3	0.0863	11.21
6	2	3	1	0.653	84.89
7	3	1	3	0	0
8	3	2	1	0.7361	95.69
9	3	3	2	0.6619	86.04

采用方差分析法对试验结果进行处理,得到结果分析如表 4 所示。由表可知,对于因素 A 而言,水平三最优,水平二最差;对于因素 B 而言,水平三最优,水平一最差;对于因素 C 而言,水平一最优,水平三最差。此外还可以看出,因素 C 对指标有着显著影响,因素 B 对指标也有着显著影响,但相较而言,因素 C 对指标的影响更大,因素 A 对指标的影响最小。因素 C 和因素 B 中以 C1B3 为最佳,A 的最优值为 A3,因此理论最优方案为 C1A3B3,即为 1 mm 石英外蒙皮,15 mm FW10 以及 15 mm FW20。

表4 方差结果分析表

Table 4 Analysis of variance results

来源	T_1	T_2	T_3	F 比	分析结果
A	127.84	127.33	181.73	2.22	不显著
B	57.46	170.25	209.19	14.13	显著
C	206.81	180.61	49.48	16.16	最显著
e	123.49	148.23	165.18		
R	9822.11	$F_{0.95}(2,2) = 19.0, F_{0.90}(2,2) = 9.0$			

e 为误差因素; T_i 分别对应每一水平的试验结果总和;R 为计算误差的总偏差平方和;F 比为显著性检验系数。

由于因素 A 对指标影响不显著,为了减小整体厚度,同时考虑节约成本,取因素 A 的最小值(方案为 C1A1B3),即 1 mm 石英外蒙皮,5 mm FW10 以及 15 mm FW20,此为最小厚度方案;或者取中间值(方案为 C1A2B3),即试验 6。可以看出试验 6 的吸波性能也较为优秀,其评分在所有试验中排名第三。

对理论最优方案和最小厚度方案进行仿真试验验证,并得到相关数据,通过处理得到反射率随频率变化的曲线如图 3 所示。可以看出,理论最优方案性能非常优越,在 1.722 GHz ~ 14.824 GHz 内反射率均在 -10 dB 以下;最小厚度方案在 2.283 GHz ~ 9.080 GHz 内都能保证 -10 dB 以下的反射率;两种方案都有超过 85% 的频段反射率在 -5 dB 以下。理论最优方案有两个吸收峰,分别位于 3.63 GHz 和 10 GHz 两个频率点,其中最大吸收峰(绝对值)在 10 GHz,吸收峰峰值可达 -29.5 dB;最小厚度方案有一个吸收峰,位于 4.52 GHz 频率点,吸收峰值为 -23.7 dB。综合来看,两种方案的吸波性能都较为优秀,且有各自的特点和应用范围。理论最优方案较厚,但其吸波性能非常优良,可用于对壁厚要求不高、对吸波性能要求较高的部件上;最小厚度方案吸波性能稍次,但其厚度却比理论最优方案少了三分之一左右,可用于对壁厚有一定要求、对吸波性能要求较低或对中高频吸波性能需求较少的部件上。

为验证复合板件夹层吸波效果的优越性,将理论最优方案中间夹层材料分别更换为同等厚度的 FW10 和 FW20 材料,即将 15 mm FW10 和 15 mm FW20 组合而成的复合材料分别更换为 30 mm 的 FW10 和 FW20 材料,通过仿真计算,得出反射率曲线如图 4 所示。再将最小厚度方案中间夹层材料分别更换为同等厚度的 FW10 和 FW20 材料,通过仿真计算得出反射率曲线如图 5 所示。可以看出无论是理论最优方案还是最小厚度方案,复合板件的吸

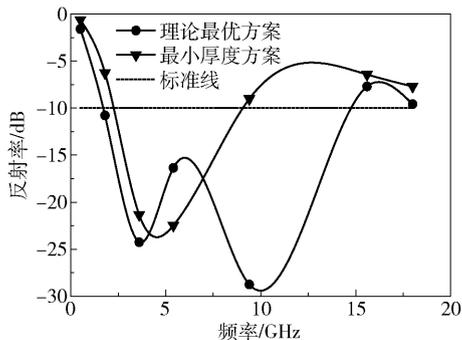


图3 优化方案反射率曲线

Fig. 3 Reflectivity curves of optimized schemes

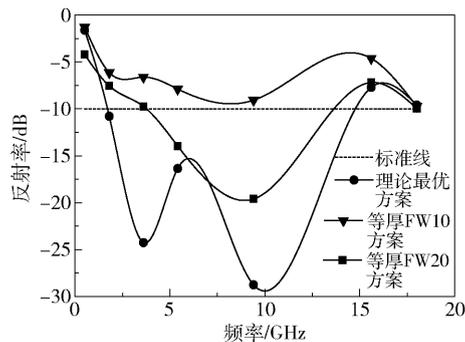


图4 理论最优方案反射率对照曲线

Fig. 4 Reflectivity contrast curves for the theoretical optimum scheme

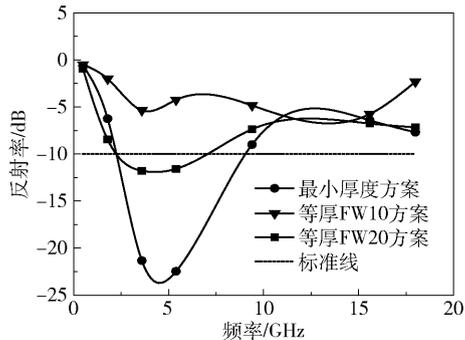


图5 最小厚度方案反射率对照曲线

Fig. 5 Reflectivity contrast curves for the minimum thickness scheme

波性能都要优于单一的 FW10 材料和 FW20 材料。

3 实测结果与仿真验证

由于实物试验条件的限制,制作的实物样件未添加石英纤维板作为外蒙皮。实物样件如图 6 所示,中间为蜂窝结构夹层板件,方案为外侧 5 mm FW10 与内侧 15 mm FW20 的材料组合。为了防止杂质进入蜂窝夹芯中影响整体的吸波性能,在样品

板件两面添加 0.2 mm 的聚丙烯板,并在整体板件边缘填充聚氨酯泡沫。由于聚氨酯泡沫的透波性极好,且为边缘填充,故可以完全忽略其对整体的影响;聚丙烯介电常数为 2.0,透波性能较强,对整体板件吸波性能的影响也极小。根据实物样件,利用简化方法建立相应的仿真板件模型,即外侧 5 mm FW10 与内侧 15 mm FW20 的夹层材料组合,两端面为 0.2 mm 的聚丙烯板件。通过试验实测样件反射率随频率的变化曲线,并将其与对应的仿真结果曲线整合,得到反射率随频率的变化曲线如图 7 所示。

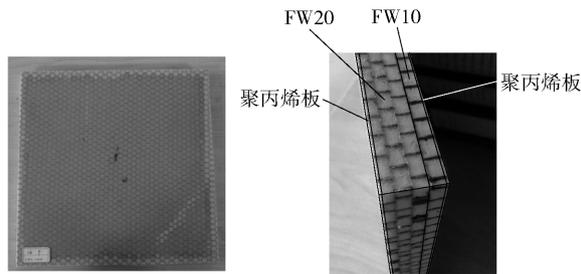


图6 实物样品图

Fig. 6 Physical sample chart

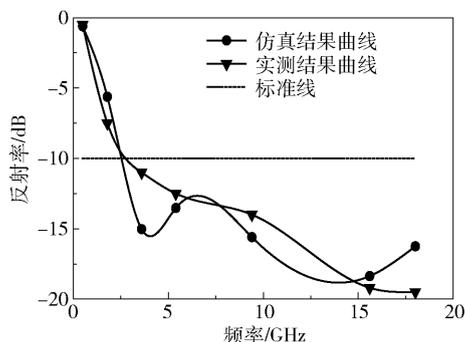


图7 仿真与实测反射率对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of simulated and measured reflectivity

从图 7 的结果对比曲线可以看出,仿真与实测结果曲线在趋势上是一致的,其数值也比较接近,仅在 2.5 GHz ~ 5 GHz 这一频段范围内有较为明显的差别,具体表现为仿真结果曲线在此区间存在一个吸收峰,而实测结果曲线则为连续向下的。吸波材料的属性测试采用的是取样法,因此会导致仿真中数值模拟的非连续性,故图中曲线所出现的差别是可以接受的。综合来看,本文仿真结果在总体趋势和数据结构上都较为合理,具有较好的可靠性,由此可以证明之前仿真优化的合理性。

此外,将有无石英纤维外蒙皮的最小厚度方案反射率仿真曲线整合如图 8 所示。可以看出,外蒙

皮石英纤维板的存在对整体结构的吸波性能有着较大的影响。在 0~8 GHz 频段内,有外蒙皮的复合结构反射率均低于无外蒙皮的复合结构反射率,而在 8 GHz~18 GHz 频段内则相反。故合理的外蒙皮方案能够有效降低结构在较低频段的反射率,而在中高频段外蒙皮石英纤维板的存在会对整体吸波效果产生较为不利的影响。

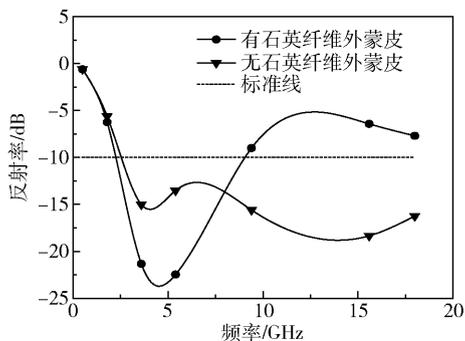


图8 有无外蒙皮反射率曲线

Fig. 8 Reflectivity curves with and without a skin

4 结论

(1)将不同吸收峰值的隐身材料合理组合,可以显著拓宽吸波带宽,并且在一定程度上增强吸波效果,克服单一吸波材料的缺陷。

(2)吸波板件结构的理论最优方案从外到内依次为 1 mm 石英外蒙皮、15 mm FW10 和 15 mm FW20,其附加在常规壁板外侧的厚度为 31 mm;理论最优方案下,在 0~18 GHz 的频段范围内,反射率低于 -10 dB 的吸收频段宽度为 13.1 GHz,反射率曲线存在两个吸收峰,在 10 GHz 附近的吸收峰可达 -29.5 dB。

(3)吸波板件结构的最小厚度方案从外到内依次为 1 mm 石英外蒙皮、5 mm FW10 和 15 mm FW20,其附加在常规壁板外侧的厚度为 21 mm;厚度最优方案下,在 0~18 GHz 的频段范围内,反射率低于 -10 dB 的吸收频段宽度为 6.8 GHz,反射率曲线在 4.52 GHz 有一个吸收峰,峰值为 -23.7 dB。

参考文献:

[1] 师俊朋,胡国平,王金龙,等. 雷达隐身技术分析及其进展[J]. 飞航导弹, 2014(2): 81-84.
SHI J P, HU G P, WANG J L, et al. Analysis and progress of radar stealth technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(2): 81-84. (in Chinese)

[2] 于春锐,张永胜,董臻,等. SAR有源压制干扰抑制

效果评估方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 725-738.

YU C R, ZHANG Y S, DONG Z, et al. ECCM effectiveness measure for SAR noise jamming[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 725-738. (in Chinese)

[3] QUIÉVY N, BOLLEN P, THOMASSIN J M, et al. Electromagnetic absorption properties of carbon nanotube nanocomposite foam filling honeycomb waveguide structures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(1): 43-51.

[4] JOHANSSON M, HOLLOWAY C L, KUESTER E F. Effective electromagnetic properties of honeycomb composites, and hollow-pyramidal and alternating-wedge absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(2): 728-736.

[5] 武志红,李好婕,张聪,等. 竹炭/SiC复合材料结构及其吸波性能[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(1): 150-155.

WU Z H, LI Y J, ZHANG C, et al. Structure and microwave absorption properties of bamboo charcoal/SiC composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(1): 150-155. (in Chinese)

[6] 冀志江,解帅,杨洋,等. 石膏填充蜂窝结构吸波材料的吸波性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 185-190, 197.

JI Z J, XIE S, YANG Y, et al. Microwave absorbing properties of honeycomb structure filled with gypsum[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 185-190, 197. (in Chinese)

[7] 孟春玲,张刚,杨生,等. 复合材料铺层角度对蜂窝板动态性能的影响[J]. 机械设计与制造, 2018(3): 150-153.

MENG C L, ZHANG G, YANG S, et al. Influence of laying angle of composite materials on the dynamic characteristic of the honeycomb panels[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(3): 150-153. (in Chinese)

[8] 贾健伟,王聪,张玉,等. 计算涂覆介质涂层飞机的雷达散射截面[J]. 微波学报, 2016(增刊1): 140-142.

JIA J W, WANG C, ZHANG Y, et al. Radar cross section(RCS) of aircraft with coating[J]. Journal of Microwaves, 2016(Suppl 1): 140-142. (in Chinese)

[9] 李佳乐,向军,叶芹,等. Ni_{0.4}Co_{0.2}Zn_{0.4}Fe₂O₄/BaTiO₃纳米纤维双层吸波涂层的微波吸收特性研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(5): 479-486.

LI J L, XIANG J, YE Q, et al. Microwave absorption

- properties of double-layer absorbing coatings based on $\text{Ni}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ and BaTiO_3 nanofibers[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, 30(5): 479–486. (in Chinese)
- [10] 王春齐, 符仲宇, 杜作娟, 等. 结构吸波复合材料透波层的研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(2): 2057–2059.
- WANG C Q, FU Z Y, DU Z J, et al. Study on wave-transparent layer of structure absorbing composite materials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(2): 2057–2059. (in Chinese)
- [11] 张永杰, 李江海, 孙秦. 复合材料结构等效电磁参数均匀化方法[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(2): 280–284.
- ZHANG Y J, LI J H, SUN Q. Homogenization method for effective electromagnetic properties of composites[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(2): 280–284. (in Chinese)
- [12] SMITH F C, SCARPA F, CHAMBERS B. The electromagnetic properties of re-entrant dielectric honeycombs[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 2000, 10(11): 451–453.
- [13] 顾乃威, 王丽伟, 苗艳红, 等. 地面设备伪装隐身评估方法研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2016(6): 86–89.
- GU N W, WANG L W, MIAO Y H, et al. Study on camouflage and stealthy capability evaluation of ground support equipments[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2016(6): 86–89. (in Chinese)

Structural optimization of the design of a double-layer absorbing honeycomb composite

SUN PengCheng¹ WANG LiangMo^{1*} WANG Tao¹ HUANG Jian² SHA XiaoWei² CHEN Wei²

(1. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094;

2. Suzhou Jiangnan Aerospace Mechanical and Electrical Industry Co., Ltd., Suzhou 215300, China)

Abstract: In order to explore the rules governing the combination of different absorbing materials and achieve the best radar wave absorption effect over a wider band, paper honeycomb structural absorbing materials impregnated with two different absorbing agents were selected, and are denoted FW10 and FW20. Quartz fiberboard was used as the outer skin to prepare a material with better radar wave absorption ability. The resulting composite plate can be combined with a conventional panel. The radar cross section(RCS) values and reflectivities of materials with different thickness combinations were calculated by the finite difference time domain method, and the optimal thickness combinations were further explored by the orthogonal design method. The results show that the absorbing effect of the composite structure is related to both the material combination and the thickness distribution of the layers. The optimal thickness combination scheme of the composite plate is 1 mm quartz fiberboard, 15 mm FW10 and 15 mm FW20 from the outside to the inside. In the range of 0–18 GHz, the absorption band width of the composite plate with reflectivity below –10 dB is 13.1 GHz, and the maximum absorption peak is –29.5 dB. Finally, physical tests were conducted to verify the validity of the simulation analysis.

Key words: absorbing material; radar cross section(RCS); reflectivity; finite difference time domain method; orthogonal design

(责任编辑:吴万玲)