

# 结构吸波材料多层阻抗渐变设计及应用

赵宏杰 宫元勋 邢孟达 欧秋仁 林海燕

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

**文 摘** 对多层阻抗渐变的吸波结构设计思想进行了分析,介绍了多层阻抗渐变思想在吸波层板和泡沫两类结构吸波材料设计上的应用。理论计算与试验验证结果均表明,采用多层阻抗渐变设计能够使吸波层板和泡沫的吸波带宽向低频拓展,同时显著提高吸波泡沫的吸收强度。具有三个阻抗渐变吸收层的4 mm厚吸波层板在5~18 GHz频段反射率小于-10 dB;具有六个阻抗渐变吸收层的22 mm厚吸波泡沫在2~18 GHz频段反射率小于-10 dB,其中在6~18 GHz频段反射率小于-20 dB,8~12 GHz频段反射率小于-30 dB。多层阻抗渐变设计是提高结构吸波材料吸波性能的有效手段。

**关键词** 结构吸波材料,多层阻抗渐变,吸波层板,吸波泡沫

中图分类号:TB33

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.005

## Design and Application of Multilayer Graded Impedance in Structural Radar Absorbing Materials

ZHAO Hongjie GONG Yuanxun XING Mengda OU Qiuren LIN Haiyan

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

**Abstract** The design theory of absorbing structure with multilayer graded impedance is summarized and its application in design of absorbing laminate and foam is introduced in this paper. Both calculation and experiment show that design of multilayer graded impedance can extend absorbing bandwidth of the laminate and foam to low frequency and enhance absorbing efficiency of the foam. Reflectivity of the 4 mm thick laminate with three layers of graded impedance is less than -10 dB between 5 GHz and 18 GHz. Reflectivity of the 22 mm thick foam with six layers of graded impedance is less than -10 dB between 2 GHz and 18 GHz, is less than -20dB between 6 GHz and 18 GHz, and is less than -30 dB between 8 GHz and 12 GHz. Design of multilayer graded impedance is an effective method for enhancing the absorbing properties of structural radar absorbing materials.

**Key words** Structural radar absorbing materials, Multilayer graded impedance, Absorbing laminate, Absorbing foam

### 0 引言

吸波材料从结构上看,可以分为单层、双层及多层吸波材料。为了展宽吸收频带、提高吸收强度,人们提出了多层阻抗渐变的吸波材料设计理论<sup>[1-2]</sup>,并将其用于包括吸波涂层和结构吸波材料在内的各类吸波材料研制。

吸波涂层最多采用双层或三层阻抗渐变设计,层数越多,层与层之间的阻抗突变就越小,阻抗渐变设计的优点就越能充分发挥,材料的吸波性能就越好,但吸波涂层由于本身厚度受到限制,因此进一步增加层数将给设计和工艺带来极大难度。何燕飞等人<sup>[3]</sup>研究了由阻抗匹配层和吸收层构成的具有阻抗渐变

特征的双层吸波涂层材料的吸波特性,结果表明,通过调节匹配层的电磁参数和厚度,能够有效提高涂层的吸波性能;何燕飞等人<sup>[4]</sup>又设计了由面层、中间层和底层组成的三层阻抗渐变吸波涂层材料,1 mm厚该涂层在8~18 GHz频段反射率均在-8 dB以下。

与吸波涂层相比,结构吸波材料(包括吸波层板、吸波泡沫、吸波蜂窝等)允许的厚度空间较大,因此更有利于通过多层的结构设计达到拓宽吸波带宽、提高吸波强度的目的。目前研究较多的仍然是经过阻抗渐变设计的双层、三层和四层结构。例如日本电气公司研制了一种双层吸波层板,阻抗匹配层为铁氧体/环氧树脂复合材料,吸收层为铁氧体/黄铜短纤

收稿日期:2015-04-28

作者简介:赵宏杰,1979年出生,工学博士,研究员,主要从事吸波材料及复合材料的研究工作。E-mail:zhaohj01@126.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第4期

— 19 —

维/环氧树脂复合材料,4 mm 厚该材料在 X 波段反射率 $<-20$  dB 的带宽达到 4 GHz<sup>[5]</sup>;黄远等设计了一种双层吸波层板,阻抗匹配层为炭黑/环氧树脂复合材料,吸收层为碳纤维毡/铁氧体/金属粉末/环氧树脂复合材料,5.1 mm 厚该材料在 8~18 GHz 频段反射率 $<-10$  dB<sup>[6-7]</sup>;谢炜等在设计以中空多孔碳纤维为吸收剂的吸波层板时也采用了“阻抗匹配层+吸收层”的双层阻抗渐变吸波结构设计,获得了较好的宽频吸波效果<sup>[8]</sup>;邹春田等人以活性碳纤维为吸收剂设计了双层以及四层吸波层板,4 mm 厚该材料在 7~18 GHz 反射率均 $<-8$  dB<sup>[9]</sup>;车孟刚等设计了由三层电阻片和三层 Nomex 蜂窝组成的多层吸波蜂窝,其中电阻片采用阻抗渐变设计,总厚度约 16 mm,在 4~18 GHz 频段反射率 $<-10$  dB<sup>[10]</sup>;何山等人采用阻抗渐变设计研制了三层吸波泡沫,10 mm 厚该材料在 8~18 GHz 频段反射率 $<-15$  dB<sup>[11]</sup>。随着吸波材料不断向超宽频带、超强吸收以及薄型化等需求方向发展,现有层数较少的阻抗渐变吸波结构设计不能满足结构吸波材料不断提高的性能要求。利用相对宽松的厚度空间进行更多分层的阻抗渐变设计,进一步减小层与层之间的阻抗突变,进而减小界面处的电磁波

反射,获得吸波带宽更宽、吸收强度更大的结构吸波材料成为当前一个新的研究热点。

本文在对多层阻抗渐变设计原理进行分析的基础上,采用阻抗间断渐变结构设计了吸波层板和吸波泡沫两类结构吸波材料,通过理论计算与试验验证,对比研究了阻抗渐变设计的层数对吸波层板及吸波泡沫吸波性能的影响。

### 1 阻抗渐变设计原理

常见的阻抗渐变结构有两种:一种是阻抗连续渐变结构,如图 1(a)所示;另外一种为阻抗间断渐变结构,如图 1(b)所示。对于阻抗连续渐变结构,沿着电磁波传播方向吸收层的阻抗由自由空间阻抗(377  $\Omega$ )逐渐减小到金属反射层的阻抗(0  $\Omega$ ),由于各吸收层彼此相邻,总厚度较小,因此适合用于吸波涂层和吸波贴片等薄型吸波材料的阻抗渐变设计;对于阻抗间断渐变结构,多个吸收层被多个透波层间隔开来,仅仅各吸收层的阻抗沿着电磁波传播方向形成阻抗渐变,透波层仅提供电磁波传输的通道,同时作为吸收层的载体,由于总厚度较大,因此适合用于结构吸波材料的阻抗渐变设计。

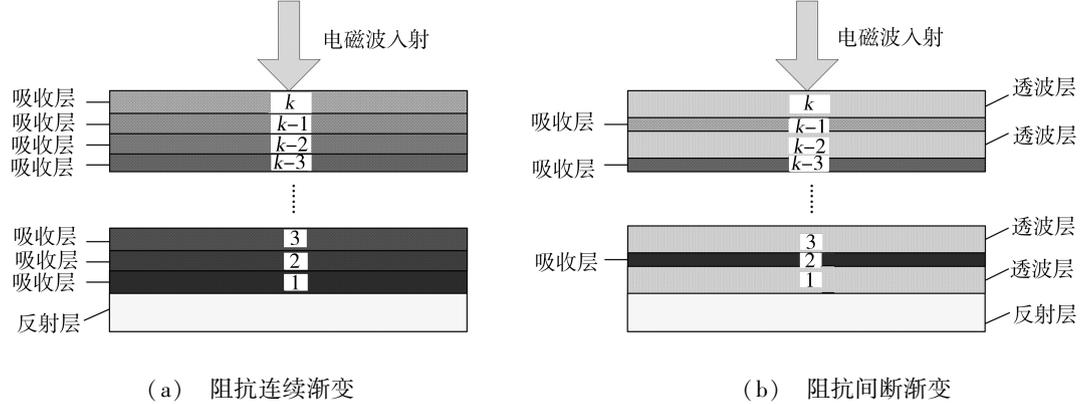


图 1 多层阻抗渐变结构示意图

Fig. 1 Schematic of multilayer graded impedance

本文采用阻抗间断渐变结构对吸波层板和吸波泡沫进行设计。如果透波层为玻璃钢复合材料层板,则图 1(b)演化为多层吸波层板,如果透波层为透波泡沫板,则图 1(b)演化为多层吸波泡沫。

当一束电磁波从自由空间垂直入射到多层吸波材料时,在自由空间与材料的分界面上,电磁波反射率  $R$  表示为<sup>[12]</sup>:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_k - \eta_0}{Z_k + \eta_0} \right| \quad (1)$$

式中,  $Z_k = \eta_k \frac{Z_{k-1} + \eta_k \text{th}(iK_0 d_k n_k)}{Z_{k-1} \text{th}(iK_0 d_k n_k) + \eta_k}$ ,  $Z_1 = \eta_1 \text{th}(iK_0 d_1 n_1)$ ,  $Z_1, \dots, Z_k$  分别为第 1,  $\dots, k$  层输入阻抗,  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}, \dots, n_k = \sqrt{\epsilon_k \mu_k}$  分别为第 1,  $\dots, k$  层折射率,  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$  为自由空间本征阻

抗,  $\eta_1 = \sqrt{\mu_1 / \epsilon_1}, \dots, \eta_k = \sqrt{\mu_k / \epsilon_k}$  分别为第 1,  $\dots, k$  层本征阻抗,  $K_0 = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  为自由空间波数,  $d_1, \dots, d_k$  分别为第 1,  $\dots, k$  层厚度,  $\epsilon_0, \mu_0$  分别为自由空间  $\epsilon$  和  $\mu$ ,  $\epsilon_1, \mu_1, \dots, \epsilon_k, \mu_k$  分别为第 1,  $\dots, k$  层的相对  $\epsilon$  和  $\mu$ ,  $f$  为频率。

由(1)式可见,多层吸波材料的设计原则就是尽量使材料最表面的输入阻抗  $Z_k$  与自由空间的本征阻抗  $\eta_0$ (377  $\Omega$ )相等而达到阻抗匹配,同理要求第  $k$  层与第  $k-1$  层界面处的输入阻抗  $Z_{k-1}$  与第  $k$  层的本征阻抗  $\eta_k$  尽量相等,直至要求第 1 层与反射界面处的输入阻抗  $Z_0$ (0  $\Omega$ )与第 1 层的本征阻抗  $\eta_1$  尽量相等。阻抗渐变思想就是尽量减小相邻层之间本征阻抗的突变,从而减小各界面对电磁波的反射。

### 2 多层阻抗渐变吸波层板

#### 2.1 吸波结构设计

对于多层阻抗渐变吸波层板,图 1(b)中的透波层为玻璃布树脂基复合材料(T), $\epsilon$  为 4.7 左右, $\text{tg}\delta < 0.02$ ;吸收层为含有电损耗吸收剂的吸波胶膜,按照吸收剂含量由低到高代号依次为 A、B、C、D、E、F,采用波导法对不同吸收剂含量的吸波胶膜电磁参数进行了测试,测试结果如图 2 所示。

分别设计了“两层吸收层+三层透波层”(A1<sup>#</sup>)和

“三层吸收层+四层透波层”(A2<sup>#</sup>)两种多层阻抗渐变吸波层板,总厚度均为 4 mm。其中 A1<sup>#</sup>只采用两种规格的吸波胶膜进行阻抗渐变设计,相当于具有两个有效的阻抗渐变吸收层;A2<sup>#</sup>采用三种吸波胶膜进行阻抗渐变设计,相当于具有三个有效的阻抗渐变吸收层。并根据(1)式各自进行了反射率计算与优化,最终优化的结构组成如表 1 所示。

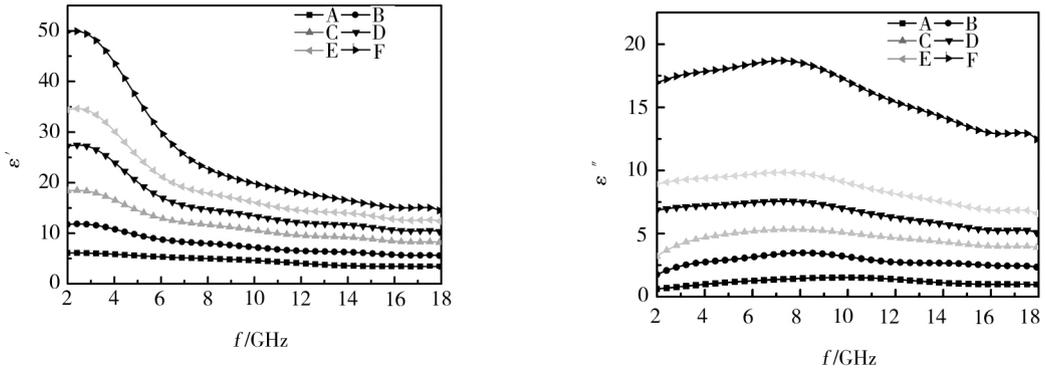


图 2 吸波胶膜  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$

Fig. 2 Complex permittivity of absorbing adhesive film

表 1 多层阻抗渐变吸波层板组成

Tab. 1 Components of absorbing laminates with multilayer graded impedance

吸波层板	结构	备注
A1 <sup>#</sup>	1.2mm T+0.2mm B+1.2mm T+0.2mm F+1.2mm T	采用 B、F
A2 <sup>#</sup>	0.8mm T+0.2mm A+0.8mm T+0.2mm D+0.8mm T+0.4mm F+0.8mm T	采用 A、D、F

## 2.2 试样制备

玻璃布采用 SW100a 高强玻璃布,树脂采用自制的 3068 中温固化环氧树脂,吸收剂为电损耗类吸收剂。通过热熔法制备 SW100a/3068 玻璃布预浸料,通过将吸收剂与 3068 树脂混合及涂膜工艺制备 A~F 六种吸波胶膜。将玻璃布预浸料和吸波胶膜剪裁成 180 mm×180 mm,然后按照表 1 设计的结构进行铺层,最后将其装模,采用模压工艺在 130℃ 下固化 120 min 成型,获得吸波层板试样。试样最终厚度为

4 mm。

## 2.3 吸波性能测试

采用 GJB2038—2011A 规定的弓形法对吸波层板试样的反射率进行测试,测试频段为 2~18 GHz。

## 2.4 结果与讨论

图 3 为 A1<sup>#</sup>和 A2<sup>#</sup>两种结构吸波层板的反射率计算与试验曲线,电磁波沿低吸收剂含量吸波胶膜向高吸收剂胶膜含量的方向入射。

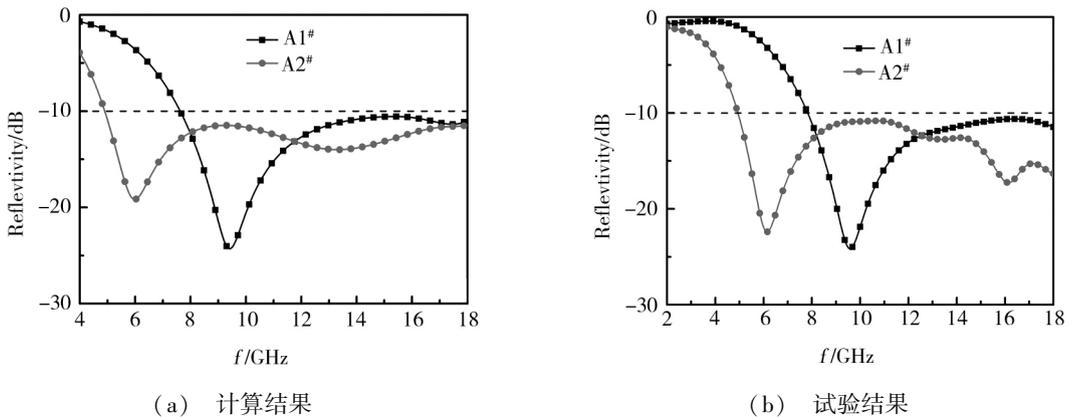


图 3 A1<sup>#</sup>和 A2<sup>#</sup>吸波层板反射率曲线

Fig. 3 Reflectivities of absorbing laminates of A1<sup>#</sup> and A2<sup>#</sup>

可以看出,A1<sup>#</sup>结构和 A2<sup>#</sup>结构的-10 dB 吸收频

带分别为 8~18 GHz 和 5~18 GHz,由此说明,在总

厚度不变的情况下,在进行阻抗渐变优化设计的前提下,吸收层的增加能够显著拓宽材料的吸波带宽,使材料的有效吸波频带向低频扩展。经过阻抗渐变设计的 A2<sup>#</sup>结构吸波性能较好,已经达到实用的基本要求。

### 3 多层阻抗渐变吸波泡沫

#### 3.1 吸波结构设计

对于多层阻抗渐变吸波泡沫,图 1(b)中的透波层为聚氨酯泡沫(PU), $\varepsilon$  为 1.1 左右, $\text{tg}\delta < 0.01$ ;吸收

层为多种规格的吸波胶膜,其  $\varepsilon$  如图 2 所示。

采用“9 层吸收层+10 层透波层”基本结构分别设计了 B1<sup>#</sup>和 B2<sup>#</sup>两种多层阻抗渐变吸波泡沫,总厚度均为 22 mm。其中 B1<sup>#</sup>只采用两种规格的吸波胶膜进行阻抗渐变设计,相当于具有两个有效的阻抗渐变吸收层;B2<sup>#</sup>采用图 2 所示的全部 6 种吸波胶膜进行阻抗渐变设计,相当于具有 6 个有效的阻抗渐变吸收层。并根据(1)式各自进行了反射率计算与优化,最终优化的结果如表 2 所示。

表 2 多层阻抗渐变吸波泡沫组成

Tab. 2 Components of absorbing foams with multilayer graded impedance

吸波层板	结构	备注
B1 <sup>#</sup>	2mm PU+0.2mm B+2mm PU+0.2mm B+2mm PU+0.2mm B+2mm PU+0.2mm B+2mm PU+0.2mm F+ 2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.4mm F+2mm PU	采用 B、F
B2 <sup>#</sup>	2mm PU+0.2mm A+2mm PU+0.2mm B+2mm PU+0.2mm C+2mm PU+0.2mm D+2mm PU+0.2mm E+ 2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.2mm F+2mm PU+0.4mm F+2mm PU	采用 A~F

#### 3.2 试样制备

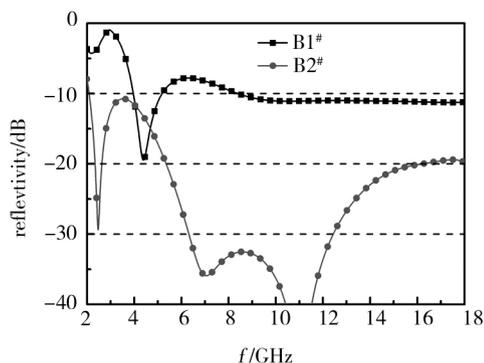
聚氨酯泡沫采用 PU110 硬质聚氨酯泡沫,密度为  $110 \text{ kg/m}^3$ ,树脂采用自制的 3068 中温固化环氧树脂,吸收剂为电损耗类吸收剂。通过切片加工,获得厚度为 2 mm 的聚氨酯泡沫板,通过将吸收剂与 3068 树脂混合及涂膜工艺制备 A~F 六种吸波胶膜。将聚氨酯泡沫板和吸波胶膜剪裁成  $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ ,然后按照表 2 进行铺层,最后将其装模,采用真空袋工艺在  $130^\circ\text{C}$  下固化 120 min 成型,获得吸波泡沫试样。试样最终厚度为 22 mm。

#### 3.3 吸波性能测试

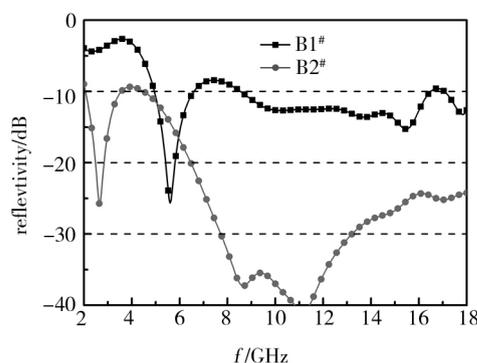
采用 GJB2038—2011A 规定的弓形法对吸波泡沫试样的反射率进行测试,测试频段为 2~18 GHz。

#### 3.4 结果与讨论

图 4 为 B1<sup>#</sup>和 B2<sup>#</sup>两种结构吸波泡沫的反射率计算与试验曲线,电磁波沿低吸收剂含量吸波胶膜向高吸收剂胶膜含量的方向入射。从图中可以看出,B1<sup>#</sup>和 B2<sup>#</sup>的 -10 dB 吸收频带分别为 5~18 GHz 和 2~18 GHz;同时可以看出,B2<sup>#</sup>的吸收强度也显著高于 B1<sup>#</sup>,B2<sup>#</sup>在 6~18 GHz 频段反射率  $< -20 \text{ dB}$ ,其中在 8~12 GHz 频段反射率达到  $-30 \text{ dB}$  以下。由此说明,在总厚度不变的情况下,在阻抗渐变优化设计的前提下,吸收层的增加既能够显著拓宽吸波泡沫的吸波带宽,使有效吸波频带向低频扩展,又能够显著提高吸波泡沫的吸收强度。B2<sup>#</sup>吸收强度高,可以满足某些较高的使用要求。



(a) 计算结果



(b) 试验结果

图 4 B1<sup>#</sup>和 B2<sup>#</sup>吸波泡沫反射率曲线

Fig. 4 Reflectivities of absorbing foams of B1<sup>#</sup> and B2<sup>#</sup>

无论对于吸波层板还是吸波泡沫,建立在精细化阻抗渐变设计基础上的吸收层数的增加能够显著提高材料的吸波性能。这是因为吸收层数的增加能够

减小吸收层之间的阻抗突变,从而减小界面反射,使电磁波得以更多地传输到材料内部,电磁波能量在材料内部损耗的距离增加。(下转第 34 页)