

XPJ 型 微波 吸 收 材 料

六二一所吸波材料组

本文介绍了一种新的微波吸收材料——XPJ型吸波材料的研制及其在提高机载雷达战术性能上的应用；同时对吸波材料的作用原理、结构及特点也作了简要叙述。

一、研制原理与性能特点

迄今，微波吸收材料的研制都是建立在电磁波传输线理论基础之上、从阻抗匹配角度进行的。下面简述一下吸波材料的作用原理。

1. 干涉型吸波材料

在这类材料中，电磁波在材料表面的反射波，与进入材料并在其中多次反射后的出射波总和相叠加而使反射波消失（图1）〔1,2〕。

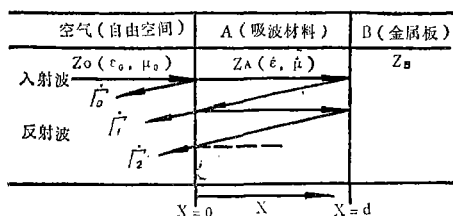


图 1 干涉型吸波材料的微波反射形式

各反射波 $\left(\sum_{N=0}^{\infty} \Gamma_N\right)$ 总合成振幅 R 〔3〕可表示为：

$$R = \frac{\dot{\Gamma}_0 + e^{-g}(\cos\varphi + i \sin\varphi)}{1 + \dot{\Gamma}_0 e^{-g}(\cos\varphi - i \sin\varphi)} \quad \dots\dots (1)$$

$\dot{\Gamma}_0$ 为电磁波从空气垂直入射到材料表面的反射系数，

$$\dot{\Gamma}_0 = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} = \frac{\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} - 1}{\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} + 1}$$

g 与 φ 为电磁波在材料中往返一次的阻尼和相位变化。

显然，当 $\sin\varphi = 0$ 和 $\cos\varphi = -1$ 时可得到

最小反射（即 $R = 0$ ）。由此得到：

$$\begin{cases} \varphi = (2P - 1)\pi \\ d = (2P - 1)\lambda_0 / 4n \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

式中， $P = 0, 1, 2, \dots\dots$ ； λ_0 —入射波波长； n —折射率； d —吸波材料厚度。

（1）式与（2）式说明：为了达到最小反射，电磁波相位变化必须为 π ，而材料厚度必须为 $\lambda/4$ 波长的奇数倍。

严格从传输线理论考虑时，所得到的无反射条件为〔1〕：

$$\tanh(X \angle \delta) = Y \angle \psi \quad \dots\dots (3)$$

$$\begin{cases} X = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} d & \delta = \frac{\pi}{2} - \frac{\delta_\mu + \delta_\epsilon}{2} \\ Y = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} & \psi = \frac{\delta_\mu - \delta_\epsilon}{2} \end{cases}$$

（3）式说明：为了得到最小反射，除了吸波材料的层厚之外，对其介质性能也有要求，它们之间必须相互协调才行。

干涉型吸波材料结构简单，厚度小，重量轻；但对厚度要求严，工艺上难以实现，而且吸收频带很窄，故使用上受到限制。

2. 吸收型吸波材料

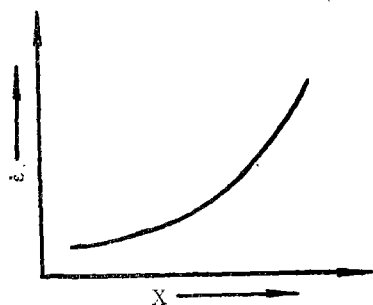
这类材料是通过吸收入射电磁波并使其全部衰减掉而达到吸收目的。

由（1）式可知，当 $Z_A = Z_0$ （即 $|\dot{\mu}| = |\dot{\epsilon}|$ ）时，可达到很小的反射，但是一般材料在微波频率下的导磁率 $|\dot{\mu}| \rightarrow 1$ ，而介电常数 $|\dot{\epsilon}| > 1$ ，

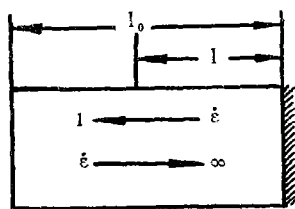
即 $|\vec{\mu}| \neq |\vec{\epsilon}|$, 因而考虑利用阻抗渐变的方法, 使表层的 $|\vec{\mu}| = |\vec{\epsilon}| = 1$, 而以后各层的 $|\vec{\epsilon}|$ 或 $|\vec{\mu}|$ 逐渐增加, 这样既保证表面反射小又使内部损耗递增以达到全部吸收。

若 $\vec{\epsilon}$ 随深度坐标的变化 (图 2) 满足场方程的解^[1] 即 $\epsilon' = 1 + k_1 e^{k_2(l_0 - l)}$ 与 $\epsilon'' = k_1 e^{k_2(l_0 - l)}$, 则将出现较佳的吸收效果。

它的具体作法是: 1. 电气上的过渡一使渗入材料中的电磁损耗物质浓度由小到大逐渐



a. $\vec{\epsilon}$ 随深度坐标的变化



b. 材料构成方式

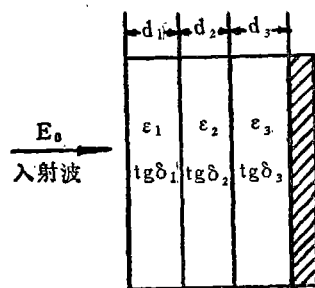
图 2 吸收型吸波材料的设计

增加, 电磁波从浓度较低的一面几乎无反射地进入材料内部然后全部转化为热能 (图 3a)。

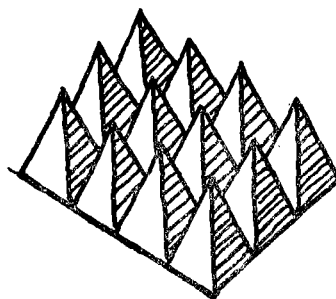
2. 几何形状上的过渡一用机械方法制造截面渐变的吸收体, 如棱锥形、圆锥形、竖井形等 (图 3b)。

吸收型材料的吸收频带宽, 斜入射性能好, 但其厚度较大, 物理机械性能较差。

由上所述可知, 微波吸收材料是一种能够



a. 多层型



b. 棱锥型

图 3 吸收型吸波材料的结构形式

吸收入射电磁波而反射、散射及透射都很小的材料。

3. XPJ型微波吸收材料

1) 制备原理

干涉型材料或吸收型材料直接应用于航空技术中都存在一定缺陷, 诸如厚度与重量大, 吸收频带窄, 斜入射性能差, 必须有金属反射基底等。新研制的XPJ型吸波材料是一种改进的吸收体, 它兼有以上两类材料的优点。其基本原理是用非金属背衬取代金属反射基底, 然后再配置“ $\lambda/4$ 吸收层”。

在选用液态聚硫胶作基料、乙炔炭黑作填料 (重量百分比为 100:40) 而制备非金属背衬层时, 它具有如下的吸收性能: $\vec{\epsilon} = 71.7 \angle -64^\circ$, $\vec{\mu} = 1.06 \angle 0^\circ$ 。当胶层厚度为 1.6 毫米时, 材料的隔离衰减值可达 20 分贝。

由以上参数可以计算出“ $\lambda/4$ 吸收层”的

介质参数 ε/μ 允许的最大值^[4]以及厚度 d :

$$\varepsilon/\mu = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{\mu}\right)}_{\text{背衬}}$$

$$d = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

从传输线原理可知^[5], “ $\lambda/4$ 吸收层”的反射系数可由下式计算:

$$\Gamma_v = |\Gamma| e^{j\varphi} = \frac{R_i/Z_0 - 1}{R_i/Z_0 + 1} \dots\dots (3)$$

$$\text{式中 } \frac{R_i}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh\left(2\pi j \frac{d}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\right) \dots\dots (4)$$

当 $|\varepsilon\mu| = 8.5$ 时, 按(3)式计算出 $\Gamma_v = 0$ 时的几组理论介质参数见表1。

表1 $|\varepsilon\mu| = 8.5$ 时产生无反射的理论介质参数

介质参数 材料类型	ε	μ	$\delta\varepsilon$	$\delta\mu$
电损耗材料	8.5	1.0	24°	0°
磁损耗材料	7.1	1.2	28°	0°
			0°	32°
	6.1	1.4	32°	0°
			0°	38.5°
	4.7	1.8	38°	0°
			0°	50.5°

但是, 材料的基本参数测量表明: 在满足 $|\varepsilon\mu| = 8.5$ 条件下, 纯磁损耗材料或纯电损耗材料都无法达到表1中所要求的值(参见表3)。因此, 我们考虑将二者结合起来, 在工艺上制成一个整体。这种结构既保持了磁性材料的宽频特性又减轻了材料总重量, 其厚度也很小。实测说明, 两层材料之间是比较匹配的, 它们的功率反射系数列于表2中。

表2 损耗层的介面反射系数

名称 反射系数	磁损耗层	电损耗层	组合层
功率, %	9.8	15.6	11.2

由磁损耗层、电损耗层与非金属背衬层组成的三层结构吸收体的输入阻抗计算式为^[6]:

$$\frac{R_i}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \tanh \left\{ 2\pi j \frac{d_1}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1 \mu_1}} + \right.$$

$$\left. \tanh^{-1} \left[\sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_1}{\mu_1 \varepsilon_2}} \tanh \left(2\pi j \frac{d_2}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_1}{\mu_1 \varepsilon_2}} \right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_2}} + \tanh^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_3 \mu_2}{\mu_2 \varepsilon_3}} \right] \right\} \dots\dots (5)$$

(5)式中包含15个变量, 想要得出所要求的各层介质参数是较为繁琐的。因此, 我们在配制材料的同时, 测量了各层的介质参数(表3)并按(1)式与(3)式计算反射系数。实测结果与理论计算基本相符(表4), 获得了较为满意的结果。

表3 三层型吸波材料的各层介质参数

名称 介质参数	磁损耗层	电损耗层	非金属背衬层
ε	5.9 $\angle -3.5^\circ$	4.44 $\angle -50^\circ$	71.7 $\angle -64^\circ$
μ	1.42 $\angle -14.5^\circ$	1.005 $\angle -0.5^\circ$	1.06 $\angle 0^\circ$

表4 各层反射系数的理论计算值与实测值

名称 反射系数 结果	磁损耗层	电损耗层	非金属背衬层	三层型 吸波材料
理论值 按(5)式计算	72.0	33.6	62.9	4.8
实测值	70.0	35.4	66.9	≤ 2.0

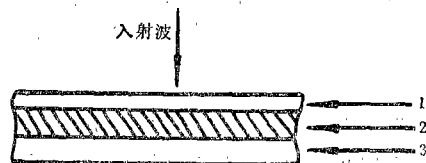


图4 XPJ吸波材料结构

2) 性能特点

XPJ型微波吸收材料具有如下结构(图4):

第1层为磁损耗层:由磁性铁粉与橡胶组成,厚度约0.5毫米;第2层为电损耗层:由导电碳黑与塑料组成,厚度约2.0毫米;第3层为非金属背衬层,厚度约2.0毫米。

XPJ型微波吸收材料既具有吸收型材料的表面反射小(功率反射系数 $\leq 2\%$,背面反射系数 $\leq 70\%$)、内部衰减大(隔离衰减 ≥ 25 分贝)、吸收频带宽(适用于整个X波段)的特点,又具有干涉型材料的厚度薄(厚度 ≤ 5 毫米)、重量轻(每米 $^2 \leq 3.5$ 公斤)的特点。表5是它与国外同类型材料性能比较。

XPJ型吸波材料还具有较好的机械强度和耐老化性能,柔软而有弹性,便于粘贴。由于其吸收性能与被粘附物表面性质无关,因此适用范围宽广。使用时,只要采用一般的粘接方法即可。

二、应 用

微波吸收材料在微波和雷达技术中有着十分重要的应用^[7~10],例如用吸波材料制成的伪装材料可作为空中或地面军事目标(如飞机、导弹、坦克等)的防雷达侦察伪装;用吸波材料屏蔽雷达机身、机架、雷达仓等,可以有效地提高雷达战术性能;用吸波材料建造的微波暗室,可以进行飞机、导弹有效散射截面测试,进行雷达天线方向图、天线增益、阻抗以及雷达整流罩对天线性能影响的测定;用吸

表5 XPJ型吸波材料与国外同类材料性能比较

牌 号	适用波段 厘米	反射系数 功率, %	衰减值 分贝	重 量 公斤/米 ²	厚 度 毫米	特 点
XPJ	3	≤ 2	≥ 25	3.5	4.5 ± 0.3	具有较小反射,较大衰减,吸收频带宽,吸收性能与反射基底无关
T(美)	3	0.2~3	10~15	1.4	4	重量轻,但衰减小,吸收频带窄,须有金属反射基底
JT-1(苏)*	3	≤ 3	< 10	7.6	2	厚度薄,但衰减小,重量较大,吸收频带窄,本身带有金属反射网

* 该材料为仿苏产品,早已用于国产飞机上。

波材料制成的吸收负载、衰减片等广泛应用于微波设备中。

XPJ型微波吸收材料由于其性能优异,可以使用在许多场合。下面举出它在机载雷达中作为吸收屏蔽材料的一个应用实例^[11]。

1. “假截获”现象及其产生原因

一部性能合格的雷达装机使用后,在雷达作用范围内,雷达的瞄准天线不去截获真正的目标,而是截获由进气道产生的干扰信号,这种现象称为“假截获”。

国产某型飞机安装雷达后(图5),由于其瞄准天线本身具有较高的前瓣和后瓣电平,而由天线侧向及后向辐射的电磁波进入进气道中,由进气道产生了干扰信号。当进气道干扰信号大于目标信号时,雷达不再跟踪目标回波信号而跟踪进气道的干扰信号,产生丢失目标而截获进气道干扰信号的现象。这个现象大家称之为雷达“抓”进气道。

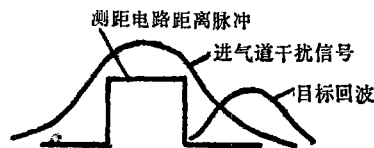


图5 某型飞机进气道干扰信号破坏跟踪情况

2. 应用XPJ型吸波材料消除“假截获”现象

1) 基本试验

将XPJ型吸波材料粘贴于雷达天线的适当部位后(图6)测试瞄准天线和路大角度方向图(图7)。

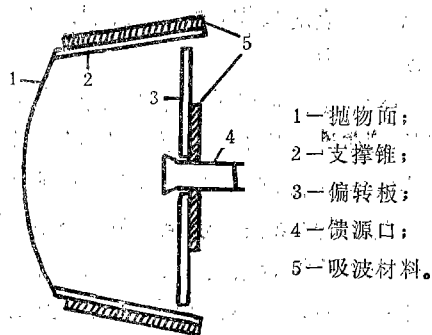


图 6 雷达瞄准天线和吸波材料粘贴部位

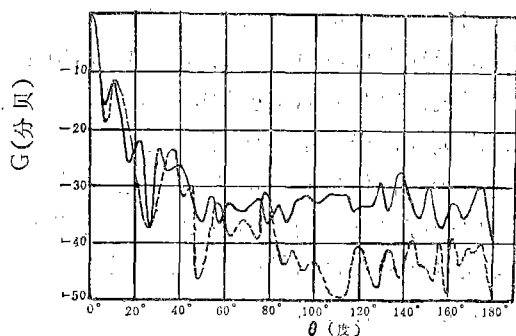


图 7 粘贴吸波材料前后天线和路大角度方向图

—— 粘贴前 粘贴后

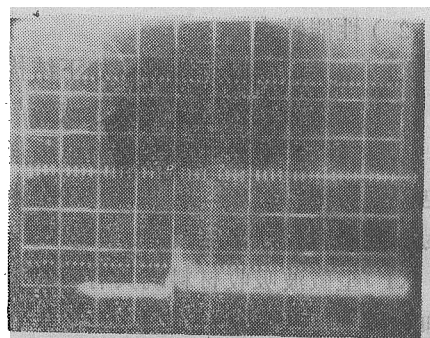
由图 7 可以看出, 由于在天线附近适当部位粘贴了 XPJ 型微波吸收材料, 使 H 面方向图中大角度旁瓣电平与粘贴前比较降低了 7~8 分贝。

2) 地面装机试验

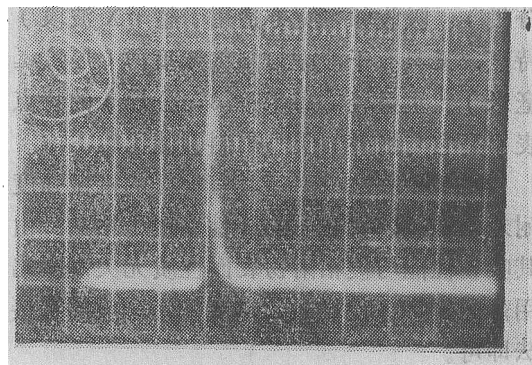
在上述两个部位粘贴 XPJ 型吸波材料之后, 观察雷达接收机的视频输出。这时测得的某机进气道脉冲波形如图 8 所示, 它与未装吸波材料相比可以看出: 由于粘贴了吸波材料进气道干扰信号脉冲已降低到杂波电平以下, 从而排除了“假截获”现象。

3) 空中试飞

先后在十三架装雷达的飞机上装置 XPJ 型微波吸收材料后进行试飞。结果表明: 由于粘贴吸波材料, 雷达在高、中空均能可靠地自动截获目标, 截获距离均能达到规定公里, 跟踪距离最近可到规定米数, 飞机在作大机动时也未发生丢失目标现象。



a. 粘贴吸波材料后的波形图



b. 粘贴吸波材料前的波形图

图 8 雷达瞄准天线粘贴吸波材料前后接收机视频输出波形

4) 其它试验

在雷达天线附近粘附微波吸收材料后可能对天线的其它性能产生不良影响。但经实验表明: 贴吸波材料后瞄准天线差波瓣的零深变化很小, 可以忽略不计; 而雷达的空中跟踪精度判读数据表明跟踪精度仍符合雷达使用要求。同时进行了粘贴吸波材料后瞄准天线驻波系数、主波瓣电平及天线方向图测量, 结果各项参数都没有变化。

三、结论与讨论

1. XPJ 型微波吸收材料具有良好的电性能 (对电磁波反射小、背面反射也小、衰减大、吸收频带宽) 与物理机械性能 (厚度小、重量轻、有一定的强度与耐老化性能等), 是一种比较理想的吸收屏蔽材料。

(下转第 12 页)

项 目	无苯稀释剂			X-1硝基稀释剂		
	马口铁	铝	镁	马口铁	铝	镁
耐煤油性	7	7	7	7	7	7
耐汽油性	昼夜无变化	昼夜无变化	昼夜无变化	昼夜无变化	昼夜无变化	昼夜无变化
耐水性						
耐盐水性						

由上表看出，同一个漆（H04-2环氧硝基漆）分别用无苯稀释剂和X-1稀释剂调配，在不同金属上耐腐蚀性能都很好。

2. 施工中的刺激性对比

通过实验室内的物理机械性能和耐腐蚀性能试验以后，我们又在车间机床设备上进行三

次施工试验。第一次是喷机床，直接用无苯稀释剂调环氧漆，参观的人很多，预先也没告诉是什么溶剂，很多同志都说：“怎么今天喷漆不太呛人了呢？”第二次是喷一个试验台，先用X-1稀释剂调底漆喷涂，后用无苯稀释剂调面漆喷涂，在场的同志对其气味感到有明显的区别。第三次是喷两台机床，其中一台以无苯稀释剂调漆，另一台以X-1稀释剂调漆喷涂，同样得到在场的同志对无苯稀释剂的好评。

环氧硝基漆无苯稀释剂的应用，考核时间尚短，有待今后继续改进，使之更加完善。

（魏化贤 执笔）

× × × ×

（上接第10页）

2. 应用XPJ型微波吸收材料可以有效地解决某型飞机雷达的“假截获”问题，充分发挥了雷达的战术性能。XPJ型吸波材料也可以应用于其它希望减少或消除干扰信号的场合，例如减小天线辐射的旁瓣或后瓣，减小天线图的强度起伏，屏蔽直接回到天线的反射，消除地面杂乱回波，减少或消除高度线等。

3. XPJ型微波吸收材料是在满足规定的机载雷达使用条件下，根据理论计算与实际测量相结合而研制出的一种性能优异的吸波材料。只要使用条件允许，通过调整各层的介质参数和厚度，还可能获得性能更好的吸收体结构。而作为屏蔽用吸波材料，今后的研制方向主要是在减小反射、展宽频带的同时进一步减小材料的厚度与重量。

主要参考资料

- 〔1〕四〇一会议文件。
- 〔2〕USP 3568195, USP 3680107。
- 〔3〕达雷总体工程，1965年，P.75。
- 〔4〕雷达手册，第六分册。
- 〔5〕Z. Angew Physik XI Band Heft 2-1959。
- 〔6〕Z. Angew Physik XV Band Heft 3-1963。
- 〔7〕国外航空，1977年第1期，P.35。
- 〔8〕AD 786689。
- 〔9〕Зарубежная радиоэлектроника，1974年第12期。
- 〔10〕电子材料（日），1976年8月号，P.64。
- 〔11〕航空技术资料，1977年增刊15号。

（刘俊能 执笔）