

单层雷达吸波材料研究

Study of Single Layer Radar Wave Absorbing Materials

周永江, 程海峰, 曹 义, 陈朝辉, 才鸿年
(国防科技大学, 长沙 410073)

ZHOU Yong-jiang, CHENG Hai-feng, CAO Yi, CHEN Zhao-hui, CAI Hong-nian
(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

摘要: 通过数值分析确定了单层电损耗吸波材料理想电磁参数, 探讨了单层吸波材料的吸波机理。分析表明: 单层吸波材料要实现宽频吸收, 其电磁参数必须具有频散效应, 即随电磁波频率的升高电磁参数有规律的降低, 其中 $\epsilon' \cdot \mu'$ 与 f^2 成反比。以羰基铁粉/聚氯乙烯吸波贴片为实例验证了理论分析结果, 讨论了常规单层吸波材料性能的影响因素。

关键词: 单层; 宽频带; 雷达吸波材料; 吸波机理

中图分类号: TB34 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)04-0008-04

Abstract: The optimal complex permittivity of single layer ohmic lossy radar wave absorber was explained in theory. The explanation revealed the absorbing mechanism of single layer radar wave absorbing materials(RAM). Single layer materials' electromagnetic parameters must decrease with frequency by rule to acquire strong absorption in wide wave band. Iron powder/PVC RAM were tested and the results accorded with the theoretical analysis. The factors which influenced the performance of conventional single layer RAM are discussed.

Key words: single layer; broad band; radar wave absorbing material; RAM mechanism

雷达吸波材料的薄、轻、宽、强是研究者追求的主要目标。单层吸波材料在某一频率的吸波性能由其厚度及电磁参数决定。然而计算材料反射率涉及复杂的复数运算, 无法直接给出材料在一定厚度和频率下零反射时的最佳电磁参数。即使对于最简单的单层均匀涂层吸波材料, 迄今较少有文献报道获得了材料的普适设计曲线和等式^[1]。确定材料的最佳电磁参数可以直接指导吸波材料的研制, 具有非常重要的意义。为此, 选取单层吸波材料为研究对象, 以参数相对简单的非磁性电损耗吸波材料为突破口, 求出其最佳电磁参数, 并对其作出理论解释, 再以羰基铁粉/聚氯乙烯吸波贴片为实例, 通过测试验证了理论分析的可靠性。

1 实验

1.1 原料

羰基铁粉(CIP): 陕西兴平化工厂生产, 规格 LDT50, 灰色粉末。聚氯乙烯(PVC): 湖南省塑料研究所提供, 白色粒料。

1.2 实验过程

为验证理论分析结果, 采用加热混炼-压延法制备吸波贴片。把羰基铁粉与 PVC 粒料及适量塑料助剂按预定质量比混合, 在 XK-150 开放式双辊炼胶机(青岛亚东橡胶集团有限公司生产)上加热混炼, 使羰基铁

粉在 PVC 基体中分散均匀; 根据所需厚度调整炼胶机双辊间距, 压延, 冷却得到 PVC 基体吸波贴片。

用模压法制备电磁参数测试样。为保证电磁参数测试样品与贴片组成一致, 取吸波贴片剪碎, 放入模具中, 加热到约 100℃, 加压, 脱模得电磁参数同轴测试样, 厚约数毫米, 内径为 3.04mm, 外径为 7.00mm^[2]。

1.3 性能测试

吸波材料电磁参数采用 Agilent8720ET 网络分析仪测定。测试 2~18GHz 频率范围的等效相对介电常数($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)和相对磁导率($\mu = \mu' - j\mu''$), j 是虚数单位; ϵ' , ϵ'' 是介电常数实部和虚部; μ' , μ'' 是磁导率实部和虚部。

采用弓形架法测定材料的反射率^[3]。网络分析仪型号为 Agilent8720ET, 宽带天线等装置由航天科工集团某所研制。把吸波贴片裁剪成 180mm × 180mm 的正方形, 用相同尺寸的平整铝板校准, 再把贴片粘在铝板上, 使之恰好完全遮住铝板, 测试其反射率。

2 结果与讨论

2.1 电损耗吸波材料的理想电磁参数数值分析

研究者选取简单的单层吸波材料为研究对象, 通过反射率的计算, 已经得出了一些结论: (1) 磁损耗为 0 的介电材料用作薄层吸波材料是可行的^[1,4,5]; (2) 非

磁性 RAM 的宽带吸收要求 ϵ' 随频率升高而下降^[1,5]; (3) 与较厚的 RAM 相比, 薄层 RAM 要求较高的 ϵ' ^[4]; (4) 宽频带吸波材料的电磁参数均应随频率的增加而降低^[1]; (5) 非磁性吸收剂欲使低频吸收性能好, 或者 ϵ' 大, 或者厚度 d 大, ϵ'' 对峰值大小影响明显, 对位置则影响较小^[5]。

这些结论只能给出定性的描述, 远不能满足 RAM 研究的需要。理想吸波材料的电磁参数需要满足的条件为 $\epsilon = \mu$, 同时具有较大的损耗角正切值^[6-8]。但目前没有找到满足这种条件的材料。材料的最佳电磁参数应该具有其他的形式。

单层吸波材料的反射率按下式计算^[9]:

$$R = 20 \lg |(Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0)| \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tanh\left\{j(2\pi f \cdot d/c) \sqrt{\mu_r/\epsilon_r}\right\} \quad (2)$$

式中: R 是反射率; Z_{in} 是输入阻抗; Z_0 是空气阻抗; c 是光速; f 是电磁波频率; d 是厚度。

非磁性电损耗吸波材料的 $\mu_r \approx 1$, 公式可简化为:

$$R = 20 \lg \left| \frac{\tanh\left[\frac{2\pi j f \cdot d \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}{c}\right] - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}{\tanh\left[\frac{2\pi j f \cdot d \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}{c}\right] + \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}} \right| \quad (3)$$

公式中 $f \cdot d$ 以乘积形式出现。

令:

$$f \cdot d = k$$

令 k 为常数 2GHz, 厚度为 1mm, $k = 2 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$, 计算得出的 R - ϵ' - ϵ'' 空间如图 1 所示。

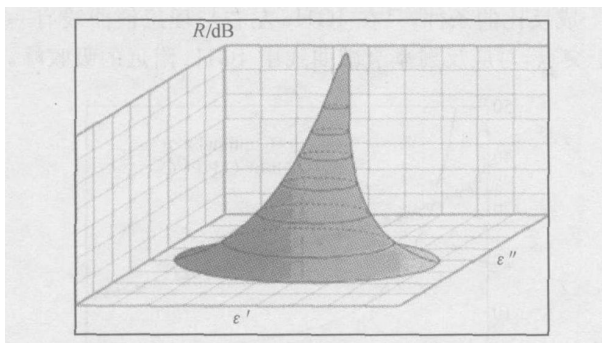


图 1 $f \cdot d = k$ 时的 R - ϵ' - ϵ'' 空间

Fig. 1 $f \cdot d = k$, R change as function of ϵ' and ϵ''

R 存在极小值, 极小值对应一个坐标 $(\epsilon'_k, \epsilon''_k)$ 。依次取不同的 k 值, 得到一系列的 $(\epsilon'_k, \epsilon''_k)$ 坐标, 考察 $\epsilon'_k(f \cdot d)$, $\epsilon''_k(f \cdot d)$ 的关系, 可以得到:

$$\epsilon'_k |_{R=R_{\min}} = K_1^n (f \cdot d)^{-2} \quad (4)$$

$$\epsilon''_k |_{R=R_{\min}} = K_2^n (f \cdot d)^{-1} \quad (5)$$

式中: $K_1^n = K_0 + 22467.5 \cdot n \cdot (n+1)$, $K_0 = 5618 \text{ GHz}^2 \cdot \text{mm}^2$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$; K_2^n 与 K_1^n 有关, $n = 0$

时, $K_2^0 = 78.508 \text{ GHz} \cdot \text{mm}$ 。

对于单层均匀电损耗吸波材料, d 是固定的, 式 (4) 和 (5) 表明: 在每个频率下都达到最好吸收时, 即实现宽频带吸收时, 要求 ϵ' 与 f^2 成反比, ϵ'' 与 f 成反比, 同时 ϵ' , ϵ'' 之间满足一定的关系。 n 取值分立, 对于每个 n 值, 都有一组 (ϵ', ϵ'') 使 R 取极小值。

隐身材料频率范围一般为 2~18GHz, 隐身涂料薄层化的发展要求其厚度在数毫米量级, 较为严格的要求 $d < 1\text{mm}$, 对于公式的讨论, 取 $d = 2\text{mm}$ 。根据式 (4) 和 (5), 取 $K_1^0 = 5618$, $K_2^0 = 78.508$, 计算出 2~18GHz 的最佳电磁参数典型取值, 并计算反射率, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 在每个频率点对雷达波的吸收几乎都达到 99%, ϵ' 随频率升高迅速下降; ϵ'' 与 ϵ' 相比有较小的值, 而且下降趋势也较缓。

表 1 $d = 2\text{mm}$ 时 ϵ' , ϵ'' 最佳取值与对应反射率

f/GHz	ϵ'	ϵ''	R/dB
2	351	19.6	-20.1
6	39.0	6.54	-19.8
10	14.0	3.93	-19.3
14	7.20	2.80	-19.1
18	4.40	2.20	-19.2

通过以上数值计算分析, 得出了单层雷达吸波材料在不同频率下的最佳介电常数近似值。

2.2 数值分析结果的理论解释

从电动力学原理可知, 吸波材料对雷达波具有好的吸收性能不仅取决于材料具有大的电磁损耗, 还决定于雷达波能否从介质进入材料内部^[10]。注意到干涉型吸波材料的原理和电磁波在介质中的波长由电磁参数决定, 可以找到这种单层吸波材料的吸波机理。

材料的 ϵ' 随着频率变化, 使得在每个频率点其厚度都为该频率下电磁波在材料中波长的 $1/4$ 的奇数倍, 从而得到最小的反射。

电磁波在介质中的波长为^[11]:

$$\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon' \cdot \mu'} \quad (6)$$

式中: λ 是介质波长; $\lambda_0 = c/f$ 是真空中波长。

令 $d = (2n+1)\lambda/4$, 其中 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, 此时材料厚度是介质波长 $1/4$ 的奇数倍。

即有:

$$\lambda = \frac{4d}{2n+1} \quad (7)$$

把 (7) 代入 (6) 可得:

$$\epsilon \cdot \mu = \frac{c^2 \left(\frac{2n+1}{4} \right)^2}{f^2 \cdot d^2} \tag{8}$$

当 $\mu \approx 1$ 时, 即有:

$$\epsilon = \frac{c^2 \left(\frac{2n+1}{4} \right)^2}{f^2 \cdot d^2} \tag{9}$$

令:

$$L_1^n = c^2 \left(\frac{2n+1}{4} \right)^2 \tag{10}$$

即有:

$$\epsilon = L_1^n (f \cdot d)^{-2} \tag{11}$$

将式(11)与式(4)比较, 只要 $K_1^n = L_1^n$, 二者即吻合。取 $c = 2.998 \times 10^{11} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $n = 0, 1, 2$, 比较结果如表 2 所示。

表 2 L_1^n 与 K_1^n 比较
Table 2 L_1^n compare with K_1^n

n	$L_1^n / (\text{GHz}^2 \cdot \text{mm}^2)$	$K_1^n / (\text{GHz}^2 \cdot \text{mm}^2)$
0	5617.5	5618
1	50557.5	50553
2	140437.6	140423

由表 2 可知, 二者吻合得相当好, 存在的微小差异应该是数值拟合带入的误差。从而证明了上述讨论的单层吸波材料是一种干涉型的宽频吸波材料。

两列波要干涉相消, 除了频率相同、振动方向相同、相位相反之外, 还需要振幅相等。式(8)使其相位相反, ϵ 的取值要使两列波的振幅相等, 才能获得最小的反射。需要说明的是, 干涉相消并不是入射波能量凭空消失, 根据能量守恒, 消失的能量被吸波材料损耗转化成其他形式的能。材料厚度是介质波长 1/4 的奇数倍和 ϵ 取值的条件使电磁波较好地进入材料内部。

2.3 实际单层吸波材料的吸波性能

羰基铁粉是性能较好的传统吸收剂, 制备 CIP/PVC 吸波贴片, 用同轴法测试贴片的电磁参数, 根据电磁参数计算贴片的反射率, 并比较反射率计算值与实测值。一方面评价通过计算预测反射率的可靠性; 另一方面分析实际吸波材料吸波性能的特点。羰基铁粉与 PVC 质量比为 4 5 : 1, 混炼得到的贴片部分电磁参数如表 3 所示。

厚度为 3.2mm 的吸波贴片反射率 R 的计算值与实测值如图 2 所示。

由图 2 可知, 反射率计算值与实测值吻合得比较好, 这说明在保证电磁参数测试样品与反射率测试样品一致的情况下, 通过计算来预报吸波材料的吸波性能是可靠的。

表 3 羰基铁粉/PVC 部分频率下的电磁参数

Table 3 Electromagnetic parameters of iron powder/ PVC

f/GHz	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
2	12.46	0.29	3.11	1.54
6	12.35	-0.02	2.24	1.17
10	12.06	-0.45	1.86	1.31
14	11.83	-0.92	1.44	1.42
18	11.35	-1.07	1.17	1.51

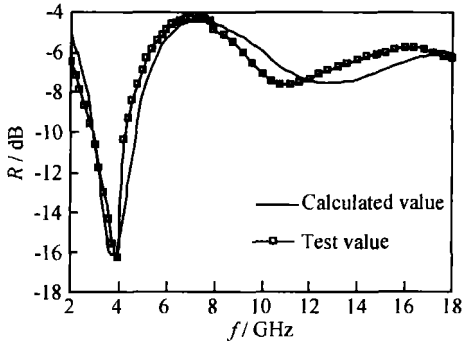


图 2 羰基铁粉/PVC 贴片 R 计算值与实测值比较

Fig. 2 The reflection attenuation curves of calculated and test value of iron powder/ PVC materials

羰基铁粉/PVC 贴片不能在宽频带内实现强吸收, 其反射率曲线呈现两个吸收峰。这是由于其 $\epsilon \cdot \mu$ 不能满足式(8)的要求。按式(8)计算厚度 $d = 3.2\text{mm}$ 时, 理想 $(\epsilon \cdot \mu) - f$ 曲线与实际 $(\epsilon \cdot \mu) - f$ 曲线比较如图 3 所示。由图 3 可知, 羰基铁粉/PVC 吸波贴片的 $\epsilon \cdot \mu$ 值随频率升高而降低, 但不能满足与 f^2 成反比的条件, 只在 4GHz 左右与理想值曲线有一个交点, 对应反射率衰减曲线中 4GHz 附近的吸收峰。

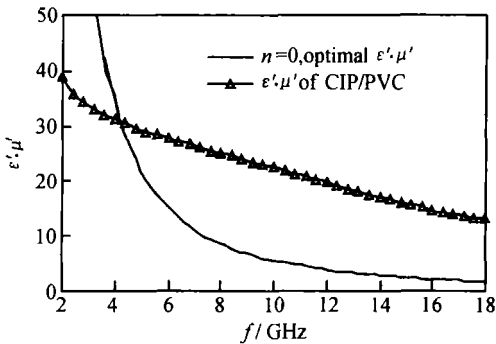


图 3 羰基铁粉/PVC $(\epsilon \cdot \mu) - f$ 曲线与理想值比较

Fig. 3 $(\epsilon \cdot \mu) - f$ curves of iron powder/ PVC compared with optimal values

由以上分析, 单层吸波材料要实现宽频带吸收, 必须满足 $\epsilon \cdot \mu$ 值与 f^2 成反比。同时, 式(8)可变形为:

$$d = \frac{(2n+1)c}{4f \sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \tag{12}$$

在给定频率下, $\epsilon \cdot \mu$ 值越大, 达到良好吸收所需的材料厚度越小, 这与文献[4]的结论相吻合。

3 结论

(1) 单层电损耗吸波材料属于干涉型, ϵ 与 f^2 成反比使其在某厚度下在全频段厚度都为介质 $1/4$ 的波长的奇数倍。 ϵ 的取值与 f 成反比, 且大小合适才能获得最小的反射。

(2) 对于磁性材料, $\mu > 1$, 要求 $\epsilon \cdot \mu$ 与 f^2 成反比, 材料达到宽频吸收。

(3) 在给定频率下, $\epsilon \cdot \mu$ 值越大, 达到良好吸收所需的材料厚度越小。

(4) 实际使用的吸波材料, 其 $\epsilon \cdot \mu$ 值达不到理想频散效应, 所以在其单层材料一定厚度下反射率曲线都是吸收峰型, 只能在一定频段达到好的吸收, 峰值出现的位置主要由 $\epsilon \cdot \mu$ 值和材料厚度 d 决定。

参考文献

[1] 甘治平, 官建国, 王维. 单层均匀吸波材料电磁参数的匹配研究[J]. 航空材料学报, 2003, 22(2): 37- 40.

[2] SUGIMOTO S, MAEDA T, BOOK D. GHz microwave absorption of a fine α -Fe structure produced by the disproportionation of $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ in hydrogen[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, (330- 332): 301- 306.

[3] 何山. 雷达吸波材料性能测试[J]. 材料工程, 2003, (6): 25- 28.

[4] 吴明忠. 介质材料和磁性材料的射频和微波电磁参数的测量方法研究[R]. 2000.

[5] 王相元, 钱鉴, 朱航飞, 等. 非磁性吸收剂构成的单层吸波材料性能分析[J]. 隐身技术, 2000, (1): 14- 17.

[6] 房晓勇, 曹茂盛, 秦世明. 单层吸波材料设计的一般方程及其可能解[J]. 纺织高校基础科学学报, 2000, 13(4): 356- 359.

[7] 施冬梅, 邓辉, 杜仕国, 等. 雷达隐身材料技术的发展[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(1): 64- 67.

[8] 王立群, 余大书, 何聚, 等. 吸波材料电磁参数的理论设计[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2005, 25(2): 54- 57.

[9] TORU MAEDA, SATOSHI SUGIMOTO, TOSHIO KAGOTANI. Effect of the soft/hard exchange interaction on natural resonance frequency and electromagnetic wave absorption of the rare earth iron boron compounds[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, (281): 195- 205.

[10] 王军, 陈革, 宋永才, 等. 以异型碳化硅纤维为吸收剂的结构吸波材料设计[J]. 材料工程, 2000, (7): 27- 29.

[11] 黄爱萍, 冯则坤, 葛建华, 等. 干涉型吸波材料研究[J]. 材料导报, 2003, 17(4): 21- 24.

收稿日期: 2005-04-25; 修订日期: 2005-12-08

作者简介: 周永江(1976-), 男, 博士研究生, 主要从事雷达隐身材料的研究工作, 联系地址: 长沙国防科技大学航天与材料工程学院重点实验室(410073)。

(上接第7页)

(2) 经复合改性剂改性后, 纳米 CaCO_3 活化指数可达 99.69%, 吸油量降为 35.01mL/100g, CaCO_3 /DOP 糊粘度显著降低, 其亲油性得到显著提高。

(3) 改性后的纳米 CaCO_3 在二甲苯中能够稳定分散, 为其在涂料中的应用奠定了基础。

(4) FTIR 分析表明, 钛酸酯偶联剂与纳米 CaCO_3 形成了化学键, 改性后其表面存在许多有机基团, 因此改性纳米 CaCO_3 具有较好的亲油性。

(5) 改性纳米 CaCO_3 应用于环氧改性丙烯酸底漆中, 其耐水性、耐盐水性、耐盐雾性和贮存稳定性明显改善。

参考文献

[1] 王训道, 蒋登高, 周铭, 等. 纳米 CaCO_3 在丙烯酸树脂中的分散及其复合涂料的制备[J]. 化工进展, 2005, 24(4): 391- 394.

[2] ERIKA F. Surface modification and characterization of particulate mineral fillers[J]. J Colloid and Interf Sci, 1990, 135(1): 200- 208.

[3] CHAN Chirning, WU Jing-shen, LI Jian-xiong, et al. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites[J]. Polymer, 2002, 43(10): 2981- 2992.

[4] WU Wei, MANFRED H WAGNER, XU Zhong-de. Surface treatment mechanism of nanoscale SiO_2 and the properties of PP/ SiO_2 composite materials[J]. Colloid Polym Sci, 2003, 281: 550- 555.

[5] SHUI Miao, YUE Lir-hai, XU Zhur-de. The mechanical and NIR studies on ultrafine calcium carbonate treated by four surface modifiers[J]. Spectrochimica Acta A, 2004, 60: 441- 447.

[6] 郑水林. 粉体表面改性[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995. 25- 26.

[7] GB5211- 88, 颜料吸油量的测定[S].

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2005-12-06

作者简介: 王训道(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事纳米材料改性、纳米涂料和分离工程方面的研究, 联系地址: 郑州市文化路 97 号郑州大学化工学院(450002)。