

雷达吸波材料表面波抑制性能测试技术

王超^{1,2} 李恩^{1,2} 郑虎^{1,2}

(1 电子科技大学电子工程学院,成都 611731)

(2 电子科技大学,国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心,成都 610054)

文 摘 分析了雷达吸波材料对表面波抑制性能的作用机理并设计测试系统来测试材料对表面波的抑制性能。在 X 波段(8~12 GHz)利用喇叭天线发射电磁波,以掠入射角度投射到金属板上形成表面波,覆盖于金属板上的聚四氟乙烯将反射的电磁波束缚在介质中并沿金属板向前传播。利用电场探针来检测接收到的电磁能量,对比放置吸波材料前后的结果,以此来评估吸波材料对表面波的抑制性能。并对两种吸波材料进行测试,取得了良好的效果,说明了该测试方法的可行性和有效性。

关键词 高效表面波,吸波材料,行波抑制测试,电探针,行波法

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.03.017

Technology of Surface Wave Suppression Performance Testing for Absorbing Material

WANG Chao^{1,2} LI En^{1,2} ZHENG Hu^{1,2}

(1 School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

(2 National Engineering Research Center of Electromagnetic Radiation Control Materials, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract This paper analyzes the mechanism of surface wave suppression for absorbing material and proposes a novel test system to measure the suppression effectiveness of the absorbing material. Horn antenna is used for radiating electromagnetic energy to the conducting plane in a grazing angle range from 8 GHz to 12 GHz, and electric field probe is produced to detect received electromagnetic energy. By comparing test curves which is covered and uncovered the absorbing material sample, the surface wave suppression effectiveness of the absorbing material can be obtained. Two kind of radar absorbing materials are measured by the novel test system, demonstrating the reliability of the system.

Key words Surface wave, Radar absorbing material, Suppression effectiveness, Coupling probe, Traveling wave method

0 引言

表面波包含爬行波和表面行波,表面行波是沿导体长度方向传播的一种电流行波,通常产生于有一定电长度的平滑表面或细长体^[1]。在磁极化平面波入射下,由于电场有一分量与表面相切,因而激励出表面电流行波,沿导体条带横向传播,并在条带的末端产生反射,形成反向行波,在小角度入射的情况下,这一反向行波能在回波方向产生较强的散射,这就是通常所说的行波散射^[2]。显然,雷达电磁波在飞机外表面蒙皮也存在着行波散射,影响飞机的隐身性能。

随着现代无线电技术和雷达探测系统的迅猛发展,传统的飞行器所受到的威胁越来越严重。作为雷达吸波材料应用^[3-4]基础的一部分,准确测量材料对于表面行波的抑制性能,特别是研究导体表面涂覆吸波材料对表面行波的影响,具有越来越重要的现实意义。本文分析了涂覆介质金属板的表面波传播的机理及衰减常数计算方法,并测试了吸波材料对表面波的抑制性能。

1 表面波传播机理及衰减常数

当电磁波掠入射到金属表面时,大部分电磁波被

收稿日期:2016-01-26

基金项目:国家电磁辐射控制材料工程技术研究中心项目(ZYGX2013K001-6);长江学者和创新团队发展计划项目

作者简介:王超,1986年出生,博士,主要从事表面波的抑制及天线间去耦合的研究工作。E-mail:chaowang-alvin@outlook.com

反射,同时在金属表面激励起表面电流,从而产生表面行波,表面行波沿着导体表面传播^[5]。

如图1所示,在 xOz 平面上有一理想导体,TM表面波沿涂有厚度为 t 薄层介质的导电平面传播,薄层涂覆介质后,场集中于表面,相对复数介电常数见式(1)。在自由空间内,磁场表达式见式(2),介质中含有分别向正负 x 方向传播的电磁波,磁场表达式见式(3)^[6]。

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

$$H_y = A \exp(jk_1 x - j\beta z), \quad x > t \quad (2)$$

$$H_y = [B \exp(jk_2 x) + C \exp(-jk_2 x)] \cdot \exp(-j\beta z) \quad (3)$$

$$0 \leq x \leq t$$

式中, k_1, k_2 分别为自由空间和介质中的横向波数, β 为相移常数,

$$k_1^2 + \beta^2 = k_0^2, k_2^2 + \beta^2 = k^2 = \varepsilon k_0^2, k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}。$$

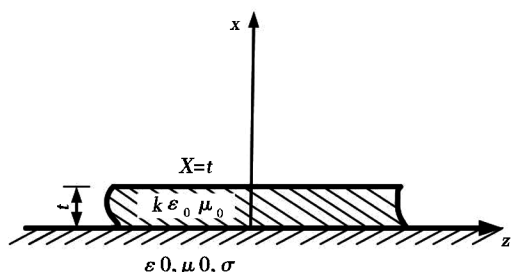


图1 涂有薄层介质的导电平面

Fig.1 Conducting plane with thin layer media

利用匹配空气、介质交界面上的切向分量及导体平面上边界条件,可求出 k_1, k_2 和 β 。沿 x 向传播的等效传输线电路,可推得本征值方程。波在自由空间和介质内的波阻抗分别是 $Z_1 = \frac{Z_0 k_1}{k_0}$ 和 $Z_2 = \frac{Z_0 k_2}{\varepsilon k_0}$,导体的归一化阻抗则是

$$Z_s = R_s + jX_s = (1 + j) \left(\frac{k_0}{2\sigma Z_0} \right)^{1/2}, Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

图2为沿 x 向传播的等效传输线电路,介质面 ab 上归一化输入阻抗等于 Z_1/Z_0 时,表面波有解,且不会在表面上发生反射。

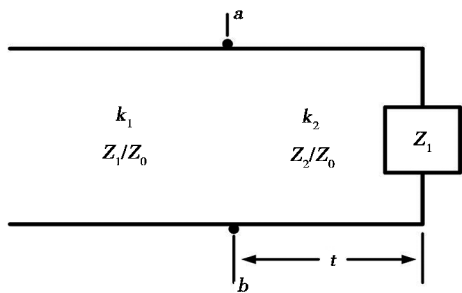


图2 涂有介质导电平面的等效传输线电路

Fig.2 Equivalent transmission line circuit with a dielectric conducting plane

从传输线理论可得式(4)

$$\frac{Z_1}{Z_0} = Z_\lambda = \frac{Z_2}{Z_0} \frac{Z_s + j \left(\frac{Z_2}{Z_0} \right) \tan k_2 t}{\frac{Z_2}{Z_0} + j Z_s \tan k_2 t} \quad (4)$$

射频频段中的 Z_s 很小,且厚度 t 使得 $k_2 t$ 极小,将 Z_1, Z_2 代入式(4),可近似求得 k_1 为

$$k_1 \approx k_0 \left[Z_s + j \left(\frac{k_2^2 t}{\varepsilon k_0} \right) - j Z_2^2 \varepsilon k_0 t \right] \quad (5)$$

将 $k_2^2 = k_1^2 + (\varepsilon - 1)k_0^2, Z_s^2 = j2R_s^2$ 代入公式(5)可得

$$k_1 = k_0 \left[R_s + 2R_s^2 \varepsilon k_0 t + j \left(\frac{k_2^2 t}{\varepsilon k_0} \right) + j k_0 t \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right) + j X_s \right] \quad (6)$$

式中, k_1, k_2 满足关系式 $k_1^2 + \beta^2 = k_0^2, k_2^2 + \beta^2 = \varepsilon k_0^2$ 。对于小损耗介质材料, β 极为接近 k_0 ,故 k_1^2 很小。 k_2 和 k_0 数量级相同,由于 $k_2 t$ 极小, $k_0 t$ 也极小。故可略去含有 R_s^2 和 k_1^2 的各项,而得出简单的方程

$$k_1 = k_0 \left[R_s + j k_0 t \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right) + j X_s \right] \approx k_0 \left[\left(R_s + \frac{\varepsilon'' k_0 t}{\varepsilon'^2} \right) + j \left(X_s + \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon'} k_0 t \right) \right] \quad (7)$$

由式(7)可知,表面电阻有效地增加了一个较小的项 $\frac{\varepsilon'' k_0 t}{\varepsilon'^2}$,有效表面电抗增加了一个较大的项 $\frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon'} k_0 t$ 。

在远离表面三个波长处,场衰落到表面场值的10%。涂上一薄层介质,衰落常数增高,将涂有薄层介质的导体看成一个阻抗面,其归一化表面阻抗 Z_d 可表示为

$$Z_d = R_s \left(1 + \frac{\varepsilon'' k_0 t}{R_s \varepsilon'^2} \right) + j \left(X_s + \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon'} k_0 t \right) \quad (8)$$

因为 $k_1' \ll k_2' \ll k_0$,相移常数 β 可以近似为 $\beta = \beta' - j\beta'' = k_0^2 - k_1'^2 = (k_0^2 - k_1'^2 + k_1''^2 - j2k_1' k_1'')^{1/2} \approx (k_0^2 + k_1''^2)^{1/2} - j \frac{k_1' k_1''}{k_0} \quad (9)$

将(7)式的 k_1', k_1'' 代入式(9)可得

$$\beta' \approx k_0 \left[1 + \left(X_s + k_0 t \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon'} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\beta'' \approx k_0 \left(R_s + \frac{\varepsilon'' k_0 t}{\varepsilon'^2} \right) \left(X_s + k_0 t \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon'} \right) \quad (11)$$

即 β' 为沿金属表面传播的衰减系数。 β'' 引起的损耗包含电损耗 α_e 和磁损耗 α_m ,可分别定义为

$$\alpha_e = \frac{P_e}{2P_z}, \alpha_m = \frac{P_m}{2P_z} \quad (12)$$

式中, P_e 和 P_m 分别是 z 方向上单位长度内的电损耗功率和磁损耗功率^[7-9]。

由此可见,表面行波在吸波材料中传播时,会产生衰减和损耗,具有将电磁能转化为热能消散掉的作用。宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第3期

用,从而对表面行波产生抑制作用。

为表征材料对行波的抑制性能,可以定义空间某点上未加载吸波材料(电场值 E_0) 和加载吸波材料(电场值 E_s) 时的电场强度的比值为抑制系数^[10-12] (SC)来评估其性能。

$$SC = 20 \lg \left| \frac{E_0}{E_s} \right| \quad (13)$$

当材料对行波产生抑制作用时,式(13)为正值。

2 材料行波抑制性能测试系统

表面波的传播和场分布复杂,不能用理论公式计算去评估吸波材料对表面行波的抑制性能。因此,研究材料行波的抑制性能的测试技术具有极其重要的意义。图3为一材料表面行波抑制性能测试系统图,喇叭天线以一定角度照射到金属板上,使电磁波掠入射到金属表面产生表面行波,透波材料聚四氟乙烯紧贴金属板层,减小金属板反射的电磁波直接辐射到自由空间^[13-15],且使表面波被束缚在介质层内沿轴向传播。接收电探针天线从金属板底部穿入,置于聚四氟乙烯介质层内。

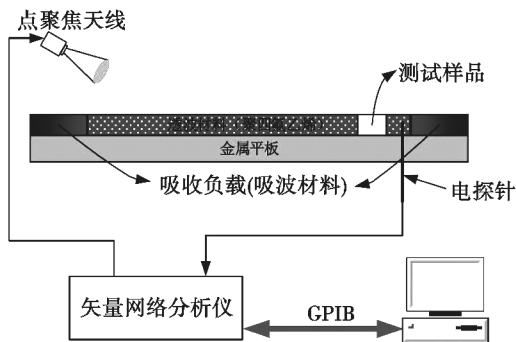


图3 材料表面行波抑制性能测试系统图

Fig.3 Test system diagram of surface travelling wave suppression performance

为避免环境及系统本身电磁波影响测试结果,材料表面波抑制性能测试需要在微波暗室中进行。

3 材料表面波抑制性能测试结果

1#、2#样品尺寸均为 100 mm×40 mm×2 mm。将样品覆盖在金属板上,电探针接收天线放置在样品的正后方,尽量贴合金属板表面。在 8~12 GHz,以未放置样品为基准,测试样品后 S_{21} 参数的变化来检测吸波材料对表面波的抑制性能。从图4可以看出,放置透波介质材料之后,接收的表面波电磁能量增加了 2 dB 左右。说明增加介质材料后能更有效的激励表面波,使表面波被束缚在介质层内,并沿轴向传播,能更有效的对吸波材料行波抑制性能做出评估。图5为放置聚四氟乙烯作为测试基准,1#、2#样品对表面波抑制性能的测试结果。从测试结果可以看出,1#样品随着频率的增大,对表面波的抑制程度增强。2#样品在整个测试频段对表面波的抑制程度几乎一样,有 5 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第3期

dB 左右的抑制。说明不同吸波材料对表面波的抑制程度不同,同一吸波材料在不同测试频率对表面波的抑制性能也有差异。从上图可知,两个样品在 11.9 GHz 左右抑制系数波动较大,可能是金属板边缘反射或是外界干扰所致,使测试结果不稳定。

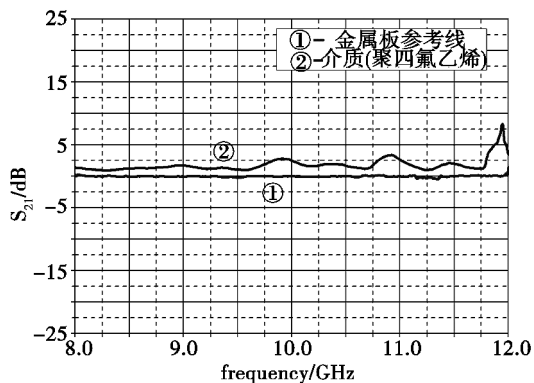
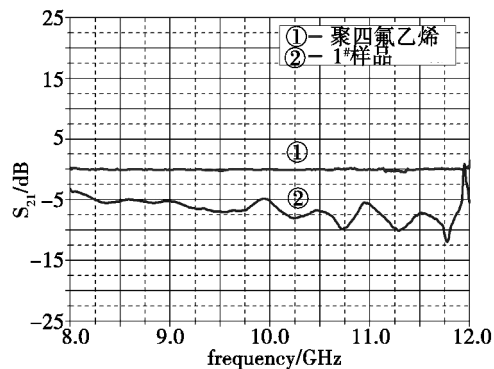
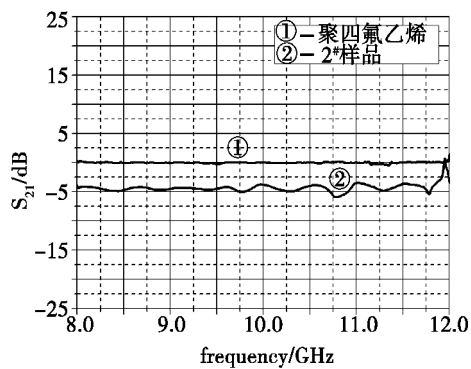


图4 增加介质材料高效激励表面波

Fig.4 Medium material to increase surface wave



(a) 1#样品



(b) 2#样品

图5 吸波材料样品测试结果

Fig.5 Test results of sample

通过测试,获得了两种材料对表面行波的抑制效果。从测试结果可以看出,2#样品的抑制效果总体上优于1#样品,在整个测试频段对表面波的抑制程度几乎是一致的,不受不同频率对表面波抑制性能的影响。所测结果由于测试系统本身不完善再加上外界干扰等因素的影响,精度不高,还需对系统进行优化。另外,由于材料有限,本文没有考虑厚度对抑制性能的影响。

由于本测试系统中样品是嵌入到聚四氟乙烯介质中进行测试的,测试过程中存在不连续性,会造成表面行波的反射,而需要得到的是在样品中表面行波的衰减程度。因此必须把反射造成的衰减的影响从总的衰减中扣除出去。测试过程中反射示意图见图6。 L_1 和 L_2 为同一种吸波材料不同长度的测试样品。假设在聚四氟乙烯介质和样品的分界面上由反射等造成的衰减量相同,那么,样品的测试结果的差异便是由样品长度的不同造成的衰减量不同。

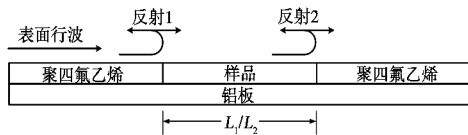


图6 不同样品长度反射示意图

Fig.6 Reflection diagram for samples of different length

由上述实验可知,2#样品在整个测试频段对表面波抑制程度有较好的一致性。因此,选取长度为40和60 mm的2#号样品,测试的部分频点对表面波的抑制结果见表1。

表1 不同长度部分频点行波抑制测试值

Tab.1 Test value of traveling wave at different frequency points

频率/GHz	样品长度为40 mm/dB	样品长度为60 mm/dB
8	-3.92846	-4.43809
9	-4.51503	-6.86068
10	-3.80042	-5.00662
11	-3.46782	-4.4053
12	-3.3436	-3.42315

定义在单位长度上的传输系数 S_{21} 的差值为抑制系数,将 ΔS_{21} 除以两种吸波材料的长度差便能得到单位长度上吸波材料对表面行波的抑制系数,测试结果见图7。

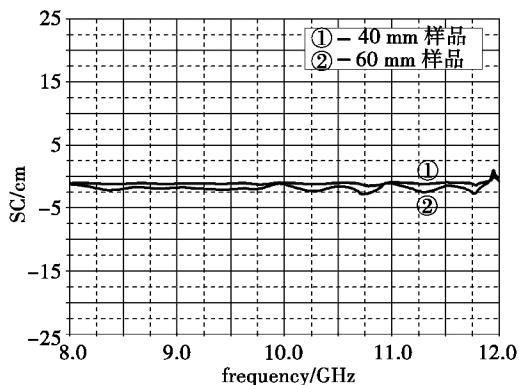


图7 不同长度样品抑制系数

Fig.7 Suppression coefficient for samples of different length

从测试结果可以看到,60 mm长的吸波材料抑制系数与40 mm长的基本一致,验证了测试系统测试

结果的准确性。由于电磁波在传播过程中,会向空间少量的辐射能量,因此较长的吸波材料样品向空间辐射的能量就多一些,电探针接天线接收到的电磁能量就少一些,因此,造成了60和40 mm长的吸波材料抑制系数不是完全的一样。

4 结论

研究了吸波材料对表面行波抑制性能的测试方法以及如何获取高效率的表面波,并组建了8~12 GHz行波抑制测试系统,对材料的行波抑制性能进行了测试,取得了较好的效果,在文章最后对误差来源进行了分析。

参考文献

- [1] 沈丽英,卿显明,冯永成,等.表面波的测量[J].宇航材料工艺,1996(5):50-54.
- [2] 曾智勇,宁焕生,王宝发.飞机座舱缝隙结构行波分析[J].北京航空航天大学学报,2001,27(5):507-510.
- [3] 林炽森,唐军武.介质覆盖曲表面上的行波效应[J].上海大学学报,1999,5(1):1-4.
- [4] JOSEPH B K,FRANK C K J.Surface wave excitation and propagation[J].Journal of Applied Physics,2004,31(6):1039-1046.
- [5] 饶克谨,高正平.利用平面上表面波模型研究吸收材料对表面波的作用[J].宇航材料工艺,1991,30-36.
- [6] 林炽森,倪维立.电磁混合介质覆盖对行波散射的抑制[J].应用科学学报,1995,13(2):163-168.
- [7] ROBERT PAKNYS,DAVID R J.The relation between creeping waves,leaky waves,and surface wave[J].IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2005,53(3):898-907
- [8] 黄志洵,姜荣.表面电磁波与表面等离子波[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2001,18(2):1-13.
- [9] 桑建华,周海.飞行器表面电磁缺陷及雷达吸波材料应用[J].航空材料学报,2003,23(2)51-55.
- [10] 林炽森,许国庆.抑制系数及其在评估雷达吸波材料对行波散射抑制作用中的应用[J].上海大学学报,1995,1(3):333-337.
- [11] MARINCIC A,BENSON F A,Tealby J M,et al.Measurements of permittivity by the use of surface waves in open and closed structures[J].IEE Proceedings,1986,133(6):441-449.
- [12] 沈丽英,卿显明,冯永成,等.微波吸收材料的开场测试技术—表面感应电流的测量[J].宇航材料工艺,1992(6):22-29.
- [13] KEE SEONG-HOON,ZHU JINYING.Effects of sensor locations on air-coupled surface wave transmission measurements across a surface breaking crack[J].IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control,2011,58(2):427-436.
- [14] FITZGERRELL R G.Surface wave propagation constant measurements[J].Electronics Letters,1968,4(12):286-287.
- [15] LI YANG,ANDREA ALU,HAO LING.Simulation and measurement of surface wave propagation along a metal cut-wire array[J].IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2010(9):179-182.