

# 毫米波涂层隐身材料吸波性能 性能的测试研究\*

娄国伟 李兴国 汪敏

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

~~FB34~~ TB34  
~~FA~~ TN015  
~~FM25~~

**摘要** 忽略物体的透射率, 并根据毫米波隐身材料反射率与发射率归一化的原理, 提出一种新的测试方法, 即采用毫米波扫描式辐射计测量吸波材料的发射率与反射率. 本文报导了该方法的计算公式, 并给出了部分测试结果.

**关键词** 毫米波, 辐射率, 隐身, 测试.

材料. 吸波性能

## THE WAVE ABSORBING PROPERTY TESTING AND ANALYSIS OF THE MMW COATING STEALTH MATERIAL \*

LOU Guo-Wei LI Xing-Guo WANG Min

(Research Institute of Millimeter Wave and Light Wave Near-sensing Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** Based on the normalization principle of reflectivity and emissivity of millimeter wave stealth material with its transmissivity being neglected, a new method was proposed to test the reflectivity and emissivity of wave-absorbing material using a MMW scanning radiometer. The formula of calculation of this method was derived, in addition, some results of the testing were given.

**Key words** millimeter, radiometer, stealth, measurement.

### 引言

毫米波隐身材料特性的测量对研究隐身材料和改造隐身材料的生产工艺有着重要的意义. 隐身技术作为电子战与信息化战争的重要组成部分, 已受到高度重视. 本文提出一种新的测试方法, 这种方法的特点是: 采用毫米波辐射计直接测量隐身材料的发射率, 在忽略透射率的条件下, 根据发射率与反射率的归一化关系, 得出隐身材料的反射率. 与目前应用的测试方法比较, 这种方法测试方便, 测试系统价格相对便宜, 具有广阔应用前景.

### 1 吸波材料反射率与吸收率的关系

当电磁波照射吸波材料涂覆的平面时, 一部分电磁波被反射, 一部分被吸收, 另一部分被透射, 根据能

量守恒定理, 入射功率  $W_i$  的平衡条件是<sup>[1]</sup>:

$$W_i = W_r + W_a + W_t, \quad (1)$$

式(1)中下标  $\rho, a, \tau$  分别表示反射、吸收和透射. 将  $W_i$  归一化可得:

$$\frac{W_r}{W_i} + \frac{W_a}{W_i} + \frac{W_t}{W_i} = \rho + a + \tau = 1, \quad (2)$$

式(2)中  $\rho = \frac{W_r}{W_i}$  为反射率;  $a = \frac{W_a}{W_i}$  为吸收率;  $\tau = \frac{W_t}{W_i}$  为透射率;

如果忽略透射率, 则

$$\rho + a \approx 1, \quad (3)$$

根据基尔霍夫定律, 物体的发射率等于吸收率, 即  $a = \epsilon$  时, 则根据式(3)可得:

$$1 - \rho = \epsilon, \quad (4)$$

\* 国防预研基金(编号:98J10.1.3BQ02)资助项目  
稿件收到日期 1999-11-25, 修改稿收到日期 2000-03-20

\* The project supported by the Preliminary Research Foundation of National Defense (No. 98J10.1.3BQ02).  
Received 1999-11-25, revised 2000-03-20

从式(4)可见,只要测出吸波材料的反射率  $\rho$ ,即可得出发射率  $\epsilon$ .反之,只要测出发射率  $\epsilon$ ,即可求出材料的反射率  $\rho$ .

## 2 采用毫米波辐射计测量吸波材料的基本原理

吸波材料的发射率可表示为<sup>[2]</sup>

$$\epsilon(\theta, \varphi) = T_{ap}(\theta, \varphi) / T_0. \quad (5)$$

式(5)中  $T_{ap}(\theta, \varphi)$  为吸波材料在毫米波波段的表观温度,  $T_0$  为吸波材料的物理温度.从式(5)可见,只要测出吸波材料的表观温度  $T_{ap}(\theta, \varphi)$ ,即可测出材料的发射率  $\epsilon(\theta, \varphi)$ .

当天线是线极化及只接收一个极化方向的能量时,天线接收的总功率为:

$$W = \frac{\lambda^2}{8\pi} \int_f^{f+\Delta f} \int_n L_m(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega df, \quad (6)$$

式(6)中  $L_m(\theta, \varphi)$  是物体的亮度;  $G(\theta, \varphi)$  是归一化的功率增益天线方向图.

天线有效接收面积为:

$$A_e(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{\lambda^2}{4\pi}, \quad (7)$$

设接收机的带宽  $\Delta f \gg f^2$ , 并忽略天线旁瓣影响,则根据式(6)和式(7)可得天线接收的功率为:

$$W = \frac{\Delta f}{2} \int_n L_m A_e d\Omega = \frac{1}{2} L_m \Delta f A_e \Omega_T, \quad (8)$$

式(8)中  $\Omega_T = A_T / R^2$ ;  $A_T$  为辐射物体的面积.辐射计天线的有效接收面积  $A_e$  值还可表示为:

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \frac{\lambda^2}{\Omega_A}, \quad (9)$$

式(9)中  $\Omega_A$  为辐射计天线孔径相对辐射物体所张的立体角,即:

$$\Omega_A = \frac{4\pi}{G}, \quad (10)$$

在毫米波波段,根据瑞利-琼斯辐射公式可得:

$$L_m = \frac{2KT}{\lambda^2}, \quad (11)$$

式(11)中  $K$  为波尔兹曼常数,  $T$  为物体的辐射温度,将式(11)及式(9)代入式(8)得:

$$W = K\Delta f T_T \frac{\Omega_T}{\Omega_A}, \quad (12)$$

式(12)中  $T_T$  为被测物体的表观温度.另外,接收机天线上接收的功率  $W$  可用天线温度  $T_a$  来表示,即:

$$W = KT_a \Delta f, \quad (13)$$

根据式(12)和式(13)可得:

$$T_a = T_T \frac{\Omega_T}{\Omega_A} = T_T F_B, \quad (14)$$

式(14)中  $F_B = \Omega_T / \Omega_A$  为被测物体与辐射计天线波束立体角之比,  $F_B$  称作占空比,还可表示为:

$$F_B = \frac{S_T}{S_A}, \quad (15)$$

式(15)中  $S_T$  和  $S_A$  分别是被测物体面积和天线波束的投影面积.根据式(14)和式(5)可得:

$$\epsilon = \frac{T_a}{T_0} = \frac{T_T F_B}{T_0}, \quad (16)$$

当辐射计天线波束在被测物体与天空之间扫描时,目标与背景之间的温度变化量  $\Delta T_T$  为:

$$\Delta T_T = T_r - T_s, \quad (17)$$

式(17)中  $T_s$  为天顶的毫米波辐射温度.根据式(16)与式(17)可得:

$$\epsilon = \frac{\Delta T_T + T_s}{T_0} F_B. \quad (18)$$

当天线波束角投影面积与被测物体面积相同时,即  $\Omega_T = \Omega_A$  或  $S_T = S_A$ , 此时辐射计的天线温度  $T_a$  就等于被测物体的表观温度,即式(16)可表示为:

$$\epsilon = \frac{T_T}{T_0} = \frac{T_a}{T_0}, \quad (19)$$

式(18)可表示为

$$\epsilon = \frac{\Delta T_T + T_s}{T_0}. \quad (20)$$

由上述分析可知,将被测物体换成涂覆隐身材料的平板,采用非扫描辐射计时,从式(16)或式(19)可知,只要测出隐身物体的表观温度  $T_r$ ,则可测出该物体的毫米波发射系数  $\epsilon$ .若采用扫描式辐射计测量<sup>[2]</sup>,当以天空作背景时,根据式(18)或式(20)可知,只要测出物体与天空之间的表观温度差,即可测得该材料的毫米波发射系数  $\epsilon$ .测出  $\epsilon$  后,则可根据式(4)得到该材料的反射系数  $\rho$ .

## 3 表面涂层隐身材料性能测试

测试表面涂层隐身材料性能的框图如图1所示,为了旋转具有稳定性,选用了两块相同大小的铝板,并按实际工艺涂上微波吸波材料.由电机带动涂层平板在辐射计上方旋转.

设被测平板充满天线波束,以天空为冷背景,对辐射计来说涂层隐身平板成为“热”目标.涂层吸收材料的发射系数  $\epsilon$  越大,它本身的辐射信号就越大,辐射计检

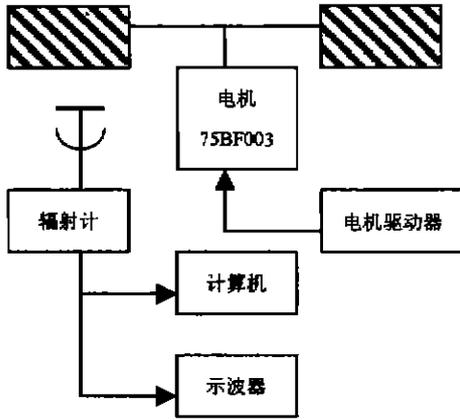


图1 吸波性能测试框图

Fig. 1 Block diagram of wave absorbing property measurement

测温度就越高. 将辐射计接收到的天空和被测吸波材料的温度差异代入式(20), 求出吸波材料的发射系数  $\epsilon$ .

当环境绝对温度  $T_0 = 303\text{K}$  时, 吸波材料 1 和 2 的性能参数测试结果如表 1 所示.

表 1 表面涂层隐身性能测试结果  
Table 1 The measured results of the stealth property of surface coating

材料	电压峰值 /V	发射系数 $\epsilon$	反射系数 $\rho$	隐身材料反射衰减量/dB
吸波材料 1	4	0.999	0.01	-30
吸波材料 2	2.9	0.76	0.24	-6.2

## REFERENCES

- [1] LI Xin-Guo, *Millimeter Wave Near-sensing Technique and Application*, Beijing: National Defense Industry Publishing House (李兴国, 毫米波近感技术及其应用, 北京: 国防工业出版社), 1991, 22-51
- [2] LU Si-Hua, *Physical Basis of Remote Sensing*, Beijing: The Business Press (吕斯骅, 遥感物理基础, 北京: 商务印书馆), 1982, 258-364
- [3] LOU Guo-Wei, LI Xing-Guo, NING Jun, Total power MMW radiometer system with high-speed scan, *J. Infrared Millim. Waves*, (娄国伟, 李兴国, 宁军, 高速扫描全功率毫米波辐射计研究, 红外与毫米波学报), 1998, 17(4): 241-246