

微波屏蔽材料及其性能*

微波吸收材料组

(中国科学院物理研究所)

微波吸收材料是反雷达侦察的一种武器。同时,在提高雷达的性能方面,它也起着重要的作用。它可以屏蔽雷达机身、机架以及雷达天线附近一切干扰微波发射的物体,使雷达更灵敏、更准确地发现敌方目标。因此,随着雷达技术的发展,微波屏蔽材料的研究日益受到了人们广泛的注意^[1-3]。

微波屏蔽材料与微波暗室用的吸收材料有很大的不同。屏蔽材料应该是重量轻、厚度薄,经得起恶劣的自然条件的考验:如在一45°C—+60°C的温度范围内,在相对湿度为98%的条件下,材料对雷达电波的吸收性能的变化应不超过允许值。有时还要求材料有更高的使用温度或某些机械性能如耐冲击抗振动等。

屏蔽材料是贴敷于金属物件上的,其最简单结构如图1所示。在金属板上贴一层薄的均匀的吸收材料,对于垂直入射的电磁波,材料的相对输入阻抗由下式给出:

$$\frac{z}{z_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon} \tanh\left(2\pi i \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon\mu}\right)}. \quad (1)$$

式中 $z_0 = 377$ 欧姆是电磁波在真空中传播的特性阻抗;
 $\varepsilon = |\varepsilon|e^{-i\varphi}$ 是材料的相对介电常数;
 $\mu = |\mu|e^{-i\psi}$ 是材料的相对磁导率;
 d 为屏蔽材料的厚度;
 λ 为电磁波在真空中的波长。而材料对电磁波的电压反射系数与相对输入阻抗的关系如下:

$$\Gamma = \left| \frac{\frac{z}{z_0} - 1}{\frac{z}{z_0} + 1} \right|. \quad (2)$$

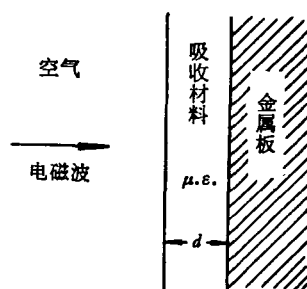


图1 单层屏蔽材料的结构

很明显,当相对输入阻抗 $z/z_0 = 1$ 时,材料具有最小的电压反射系数。

由方程(1)可知,要寻找高吸收性能的屏蔽材料,必须对各种材料的介电常数 ε 和磁导率 μ 做仔细的测量。在厘米波段,参量的测试是在波导系统内或同轴测量系统中进行的。测量方法采用终端短路“开路”法。材料的参量测出后,在给定一个频率的条件下,利用公式(1)和(2),就可算出材料在不同厚度时的电压反射系数。

下面分析一下怎样的参量才具有最小的反射。由公式(1)可知,要得到 $z/z_0 = 1$, 则有

* 1972年6月28日收到。

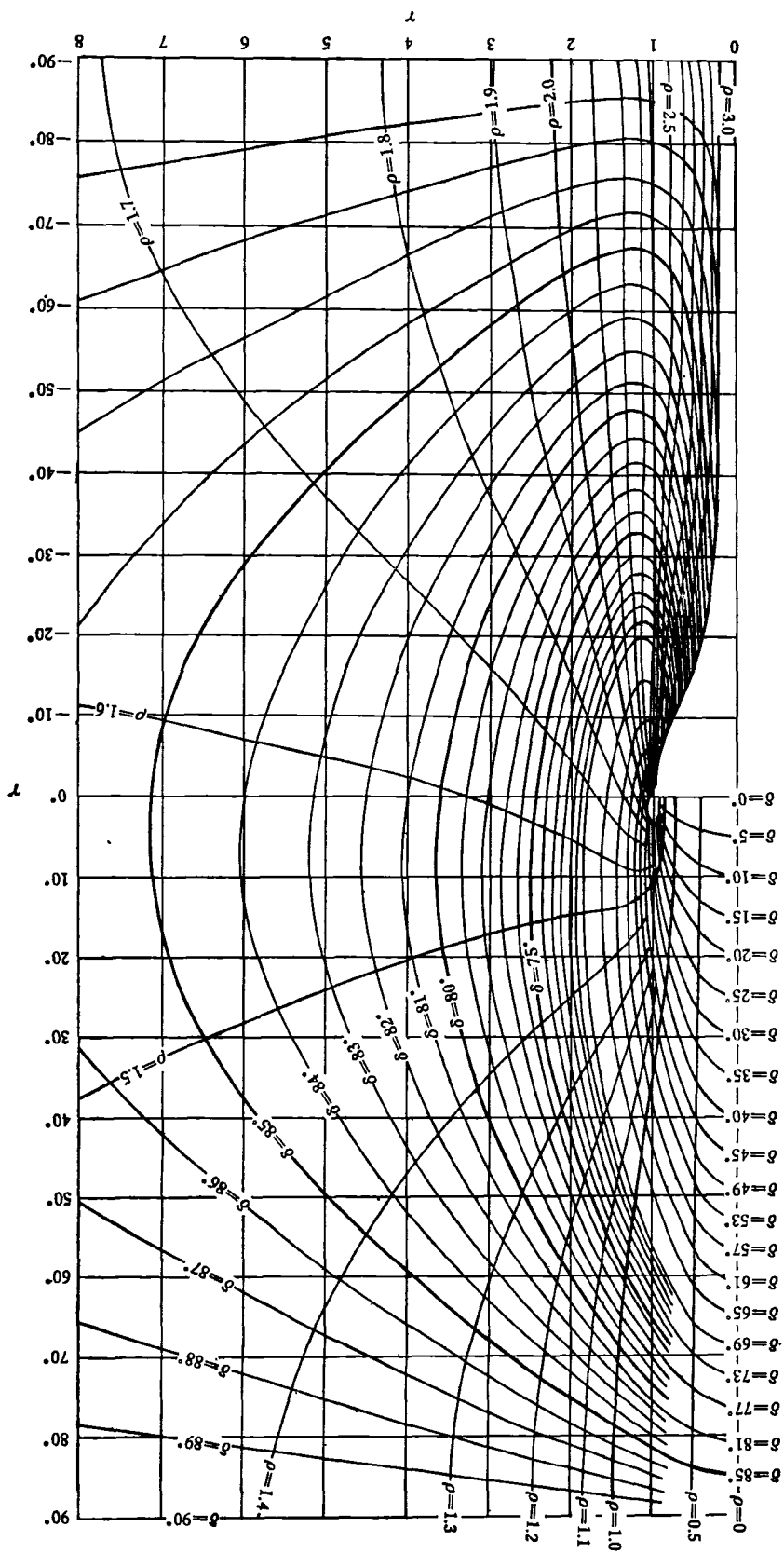


图 2 双曲正切函数图

$$\tanh\left(\frac{2\pi id}{\lambda}\sqrt{\mu\varepsilon}\right) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \quad (3)$$

式(3)是双曲函数方程。为了便于讨论,图 2 给出了双曲正切函数的曲线^[4]。图中四个量的关系是

$$\tanh(\rho e^{i\theta}) = r e^{i\gamma} \quad (4)$$

对于给定的频率和材料,方程(3)中的 $\varepsilon, \mu, \lambda$ 都有确定值,只有材料的厚度 d 是可变的。此时方程(3)的右边在图 2 上是某一个固定的点 M ; 而式(3)左边的宗量中唯一的变量是实数 d , 因此这是一条固定 d 改变 ρ 的曲线。如果这条曲线通过定点 M , 则方程(3)有解,在 M 点处的 ρ 值所对应的 d 便是材料的最佳厚度。很明显,若想在改变 d 时得到的曲线通过定点 M , $|\varepsilon|, |\mu|, \varphi_\varepsilon$ 和 φ_μ 必须满足一定的条件。由方程(3)及图 2 可知, $\left|\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\right|$ 越大,则要求 $|\varphi_\varepsilon|, |\varphi_\mu|$ 越小,这种材料的频宽较小; 如果 $\left|\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\right|$ 较小,则要求 $|\varphi_\varepsilon|, |\varphi_\mu|$ 较大,并且能在较大的频率范围内得到较好的吸收性能。由于在微波范围内,现有材料的 $|\mu|$ 接近于 1, 所以频率范围窄的屏蔽材料可以做得较薄; 如要求材料的使用频率较宽,那时材料一定比较厚。

以三厘米频段的吸收材料为例说明屏蔽材料的参量是如何选择的。例如,我们要找一种厚度为 2 毫米左右的屏蔽材料,使用频率是 9300 兆赫。先假设一系列的参量,每种参量事实上对应着一种吸收材料。然后利用式(1)和(2)计算出当频率 $f = 9300$ 兆赫时各种材料在不同厚度下的反射系数。此时会发现有的材料在某个厚度时有极小的反射,有的材料则无论选取什么厚度都得不到较小的反射。如果设计要求屏蔽材料的厚度约为 2 毫米,那么就按厚度在 2 毫米左右有最小的反射,而且其最小反射的值应小于 10%。图 3 所示的是 $|\varepsilon| = 16, |\mu| = 1, \varphi_\varepsilon = 19^\circ, \varphi_\mu = 0^\circ$ 的材料,频率在 9300 兆赫时反射系数与厚度的关系。由图可知此材料的最佳厚度为 2.1 毫米。接着再来计算这种材料有多大的使用频宽。为计算简单,设在所考虑的频段内,材料的参量保持不变。其反射系数与频率的关系如图 4 的虚线所示。由图可知,在 9300 兆赫附近约有 600 兆赫的频率范

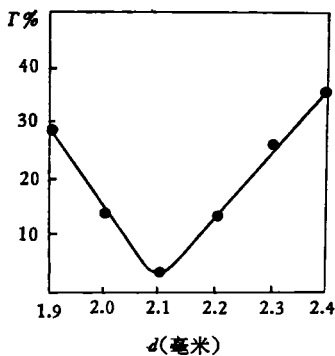


图 3 单层屏蔽材料反射系数与厚度的关系 $f = 9300$ 兆赫, $|\varepsilon| = 16, |\mu| = 1, \varphi_\varepsilon = 19^\circ, \varphi_\mu = 0^\circ$ 。

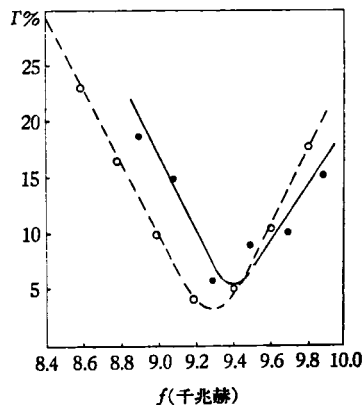


图 4 单层屏蔽材料反射系数与频率的关系 $d = 2.1$ 毫米

围内材料具有相当好的吸收性能(电压反射系数小于等于 10%)。据此,我们配制了一批塑料吸收材料,调整吸收体的含量,使材料的参量达到假设的条件。图 4 的实线为 2.1 毫米厚材料的测试曲线。它和理论曲线基本上是一致的。

用这样的方法,把炭黑、羰基铁、铁氧体等按一定的含量填入塑料,就可以制成较好的窄频带的微波吸收材料。在厘米波段内,屏蔽材料的厚度一般约在 2—5 毫米,在电压反射系数小于 10% 的范围内,可有几百兆周的频宽。为了使材料具有较好的机械性能或耐高温性能等,还可以把这些吸收体填入橡皮、玻璃钢或其它物体内部,做成特殊用途的屏蔽材料。

本工作是在北京墨汁厂的协作下做成的,特此致谢。

参 考 资 料

- [1] Я. А. Шнейдерман, *Заруберная радиоэлектроника*, 6 (1969), 101.
- [2] D. A. Colling, E. B. Littlefield and L. Lesensky, *Science of Advanced Materials and Process Engineering Proceedings*, 14 (1968), II-3A-3.
- [3] H. W. Helberg, *Zeits. Angew. Phys.*, 26 *3 (1969), 228.
- [4] A. E. Kennelly, "Chart Atlas of Complex Hyperbolic and Circular Functions," University Press, Cambridge Mass, 1924.