

电磁兼容材料综述

王群 北京工业大学

摘要：围绕电磁兼容设计中的材料解决方案，提出了电磁兼容材料的基本概念，涉及到电磁屏蔽材料、电磁骚扰抑制材料、电磁波吸收材料、电磁密封材料四方面的内容。文中简要论述了电磁兼容材料的发展、材料种类与构成以及材料的主要应用领域，同时还系统地分析了不同种类的电磁兼容材料的基本工作原理、材料性能表征及测量方法。

The concept of the electromagnetic compatibility material (EMCM) was put forward point to the EMC design method. This EMCM includes four kinds of materials such an EM shielding material, EM wave absorber, EMI suppression material and EM seal material. In this paper, the development, category and the application of EMCM were illustrated. Further more, the basic principle and the methods of the performance token and its measurement were analyzed.

关键词：电磁兼容材料、屏蔽、干扰抑制、吸波、电磁密封

Keywords: electromagnetic compatibility material, EM shielding, EM absorber, EMI suppression, EM seal

一、引言：

电磁兼容是各种电气设备、系统在一定空间、时间和频谱条件下，能够协调工作而不发生超过允许的降级。电磁兼容目标可以有多种方法实现，包括：电磁兼容标准制定、电磁兼容设计、电磁兼容性测量等。本文将围绕电磁兼容技术方法针对实际电磁兼容问题从材料科学的角度提出材料的解决方案，并对其基本原理加以

论述。

二、电磁兼容的材料解决方案

电磁兼容设计中除采用屏蔽、滤波、优化电路以及合理布线的技术方法外，还应用了大量的电磁兼容材料来解决问题，各种方案如下表所列。

表1 电磁兼容的材料解决方案

现象	问题	基本方案	电磁兼容材料
辐射骚扰超标 辐射骚扰敏感	机箱问题 电缆问题	金属机箱	电磁屏蔽材料 电磁密封材料
		非金属机箱屏蔽	
		线缆屏蔽	
传导骚扰超标 传导骚扰敏感	电缆问题	线缆屏蔽	电磁屏蔽材料
		套装滤波元件	骚扰抑制材料
电路模块互扰	模块问题	模块去耦隔离	骚扰抑制材料

表2 电磁防护工程材料

应用领域	主要内容	电磁防护工程材料
电磁应用工作室	电波暗室	电磁屏蔽材料 吸波材料 电磁密封材料 骚扰抑制材料
	电磁屏蔽室	
军事应用	目标特征控制	
	电磁加固	
	电子对抗	
信息安全	保密室	
	设备防电磁泄露	
电磁辐射安全	辐射源屏蔽	
	目标防护	

可以看出，在实际电磁兼容技术实施过程中，所涉及的材料类型大体分为四种：电磁屏蔽材料、电磁骚扰抑制材料、吸波材料、电磁密封材料。实践证明，一名优秀的电磁兼容设计工程师除应该掌握电磁兼容标准、电子电路以及电磁波的基本理论外，还需对上述四类电磁兼容材料的工作原理、种类、应用方法有充分地了解。应该认识到，电磁兼容材料的正确使用一方面是减少电磁兼容整体设计压力、降低成本的有效方法，另一方面也是电气设备、系统实现电磁兼容性的最后途径。

三、电磁屏蔽材料

1、电磁屏蔽类型

电场屏蔽：采用良导体制成的腔体对电场源与受扰设备进行隔离，从而阻止电力线的内外传输，达到抑制电场耦合骚扰的目的。包括静电屏蔽和交变电场屏蔽。

磁场屏蔽：利用磁力线低磁阻分路传输或感生涡流反向磁场的排斥作用来抑制磁场耦合骚扰的目的。包括低频磁场屏蔽和高频磁场屏蔽。

电磁场屏蔽：利用低阻抗界面面对辐射电磁波的强反射作用实现抑制电磁辐射干扰目的。

2、电磁屏蔽材料

按照材料使用形式进行分类，电磁屏蔽材料可以分为：金属板带材料、表面金属沉积材料、导电高分子材料、电磁屏蔽涂料和电磁屏蔽织物。

2.1金属板带材料

电磁屏蔽室、微波暗室一直以来都是电磁屏蔽材料的主要应用领域，所使用的屏蔽材料是钢铁工业生产的

轧制板材。伴随着钢铁工业的发展，电磁屏蔽钢铁材料的力学性能及屏蔽性能得到了很大程度地提高。虽然屏蔽性能并非轧制钢板的主要追求目标，但板材综合性能的提高对屏蔽工程的技术进步起到了巨大的推动作用，主要表现在硅钢和铁镍合金两种材料上。这两种材料在宽频电磁屏蔽性能特别是低频磁屏蔽性能方面所具有的优越性是目前任何一种工程屏蔽材料都不具有的。

电场屏蔽：采某些合金熔体通过快速冷却的方法，能够获得非晶态金属带材^[1]。同金属轧制板材相比，非晶态带材的宽度较窄，目前国内生产的非晶带宽度普遍在40cm以下。小尺寸规格使材料的工程化应用受到一定的限制，然而非晶态金属材料以其优良的磁导率和饱和磁化强度特性为解决磁干扰问题提供了一个很好的技术方案。

电场屏蔽：采2.2表面金属沉积材料^[2, 3]

电场屏蔽：采表面金属沉积材料是采用金属熔射、真空蒸镀、阴极溅射、电化学沉积的方法使非导电材料的表面覆盖一层导电薄膜。例如真空镀铝、化学镀铜/镍等都是电磁屏蔽材料或元件经常采用的技术手段。

电场屏蔽：采2.3导电高分子材料^[4, 5, 6]

电场屏蔽：采导电高分子材料按其组成和导电机理可分为本征型和复合型两种。本征型导电高分子主要有： π 共轭型、金属螯合物型、电荷转移络合物型等，由于这类导电聚合物成本较高，电磁屏蔽效能较低，其应用范围受到很大限制，目前仍处于试验室研究阶段。复合型导电高分子材料已进入实际应用，这种材料是将不同的导电填料分散复合于高分子基材中制成导电复合材

料，如普遍使用的导电塑料、导电橡胶等。

电场屏蔽：采2.4电磁屏蔽涂料^[7, 8, 9]

电场屏蔽：导电涂料是由合成树脂、导电填料、溶剂和助剂组成的一种半液态混合物，使用过程中将其涂敷于基材表面，固化后形成的导电膜发挥电磁屏蔽的功能。成膜树脂主要有醇酸树脂、丙烯酸树脂、聚氯乙烯、聚苯乙烯等；导电填料包括石墨、银、铜、镍导电粉料，目前人们正在开发、推广Ag/Cu/Ni三种金属的包覆粉料，被覆粉体有石墨、空心玻璃微珠、片型矿物粉体等。

2.5电磁屏蔽织物^[10, 11, 12]

电磁屏蔽织物是一类具有织物网络结构的电磁屏蔽材料。目前，电磁屏蔽织物包括：化纤布表面金属沉积织物、金属纤维编织物、金属纤维无纺布、导电纤维与化纤的混纺织物，涉及的金属材料有Cu、Fe、Ni、Al、不锈钢纤维。同其他电磁屏蔽材料相比，屏蔽织物有质地柔软、易于剪裁、便于贴装的特点。屏蔽效能的高低

取决于织物使用的金属类型和织物的制造方法。上述四种屏蔽织物中除混纺织物的屏蔽效能较低外，前三种织物材料的电磁屏蔽效能均能够达到60dB以上，满足多数电磁屏蔽的技术要求。

3、材料屏蔽效能与测量方法

3.1 屏蔽效能

材料的屏蔽效能SE是指空间某点未加屏蔽时的电场强度E0（或磁场强度H0、能量场强度P0）与加屏蔽后该点的电场强度E1（或磁场强度H1、能量场强度P1）的比值，对于实际屏蔽材料，屏蔽效能SE可表示为：SE=A+R+B，A、R、B三项表达式如表3所示。

其中，R——电磁波通过屏蔽体表面时，由阻抗突变引起的反射损耗；

A——电磁波在屏蔽体内部传输时，电磁能量被吸收的损耗；

B——电磁波在屏蔽体的两个界面间多次反射损耗

表3 各种电磁场的屏蔽效能表达式^[13]

电磁场类型	吸收的损耗 A	反射损耗 R	多次反射损耗 B
平面电磁场	$A = 131 / \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$	$R = 168 + 10 \lg \frac{\sigma_r}{\mu_r f}$	$B = 20 \lg (1 - e^{-2l/\delta})$
电 场	$A = 131 / \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$	$R = 322 + 10 \lg \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2}$	B 忽略
交变磁场	$A = 131 / \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$	$R = 322 + 10 \lg \frac{f r^2 \sigma_r}{\mu_r}$	$B = 20 \lg (1 - e^{-2l/\delta})$ (A<15dB) B 忽略 (A≥15dB)

上表各式中：f—频率、 σ_r —电导率、 μ_r —磁导率、r—与场源的距离、l—屏蔽体厚度

3.2 低频磁场屏蔽基本原理

低频磁场（100KHz以下）屏蔽与远场的电磁屏蔽机理完全不同。高导电材料银、铜、铝等金属材料可以对高频电磁场进行有效屏蔽，但这些材料对低频磁场几乎没有任何屏蔽作用。根据电磁波原理，低频磁场因频率低，所以吸收损耗小；因空间波阻抗低，所以反射损耗小。因此电磁场的吸收和反射屏蔽机制不适合于低频磁场屏蔽。有效的办法就是使用高磁导率材料（如纯铁、

硅钢片、玻莫合金等）为磁场提供一条低磁阻通路，使空间中的磁力线汇集在高磁导率屏蔽体中，达到隔离磁场的目的。

低频磁场屏蔽效能[13、14]：

球型屏蔽体：

$$SE = 20 \lg \frac{(2 + \mu)(1 + 2\mu) - 2(\mu - 1)^2 (\frac{r}{a})^3}{9\mu} \quad (1)$$

磁场方向垂直于空心长圆管轴：

$$SE = 20 \lg \frac{(\mu^2 + 1)(p-1) + 2\mu(p+1)}{4\mu p} \quad (2)$$

磁场方向与柱轴平行，忽略两端边缘效应：

$$SE = 20 \lg \frac{\mu(b^2 - a^2) + a^2}{b^2} \quad (3)$$

式中：a、b分别为内、外半径， μ 为磁导率

3.3 屏蔽效能测量方法[15、16]

本文仅对材料屏蔽效能测量方法（SJ 20524—1995）中规定的平面电磁波法兰同轴测量方法进行说明，如图1所示。该同轴装置内的电场与磁场相互正交，且垂至于电磁波的传播方向，相当于空间的平面电磁波，因此测量结果是试样对垂直入射平面波的屏蔽效能。用法兰同轴测试装置进行材料的屏蔽效能测试时，常用的系统测量方式有：信号源/电磁干扰测量仪（干扰接收机）测量方式、跟踪信号源/频谱分析仪测量方式、网络分析仪测量方式。

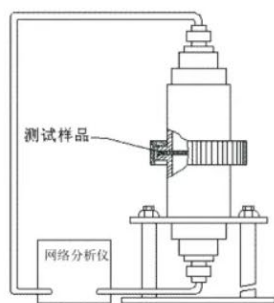


图1 法兰同轴装置的网络分析仪屏蔽效能测量方法

四、电磁骚扰抑制材料

电磁干扰的产生是通过电磁骚扰耦合来实现的，因此为抑制电磁骚扰，首先就是要了解可能出现的各种耦合途径，从电路设计、屏蔽、接地等方面加以解决。实践中，技术人员也在大量使用电磁骚扰抑制材料和元件来解决包括线路传导与空间耦合的实际问题，所对应的材料包括抑制传导骚扰的滤波元件和抑制空间耦合的近场抑制材料。

1、铁氧体电磁骚扰抑制材料

1.1 铁氧体电磁骚扰抑制材料简介

据统计，80%以上的电磁骚扰问题都与线缆作用有关。无论线缆的骚扰方式如何多变，其根本原因都是由线缆中的骚扰电流引起。目前电子设备正朝着高频化、数字化、集成化方向发展，这种趋势使得骚扰电流的频谱向高频方向延伸，已进入微波频段。因此，采取有效措施来抑制或去除线缆中的宽频骚扰电流是解决由线缆引起电磁兼容问题的重点，更是整个电磁兼容工程的关键。

一直以来，使用铁氧体磁性滤波元件是抑制线缆电磁骚扰的重要手段之一，滤波元件以套装、夹装或组合成接插件的形式被方便地应用到各类线缆上，且其价格低廉，故倍受电磁兼容设计人员的青睐。

国际上于70年代甚至更早一些时候就开始了铁氧体电磁骚扰抑制材料的研制，目前已能生产系列化、标准化的电磁骚扰抑制材料和器件。主要生产公司有：TDK、NEC-TORKIN、FAIR-RITE、STEWART、FILTER CONCEPTS等。国内在本领域的研究起步较晚，约在上世纪80年代，899厂，绵阳9所等单位开始进行电磁骚扰材料的研究开发，并且能够生产部分电磁兼容材料及元件。上世纪90年代以后，国内又有许多单位加大了电磁骚扰抑制材料的研发力度，相继开发出许多性能良好的电磁兼容材料及元件。与国际同类产品相比，目前国内产品的标准化、系列化水平还存在一定的差距^[17、18、19]。

1.2 铁氧体电磁骚扰抑制材料的性能要求

●工作频段对材料性能的要求

随着工作频段的变化，铁氧体材料选择类型有很大不同：在相对低频（1M以下）情况下，铁氧体电磁骚扰抑制元器件一般采用高磁导率的MnZn铁氧体；当频率超过1M时一般多使用NiZn铁氧体；而当频率在GHz以上时，则需要使用六角晶型铁氧体。

●滤波方式对材料性能的要求

铁氧体抑制元件滤波方式包括三种：低频时以感抗机制为主的反射型滤波元件；高频时以吸收损耗机制为主的吸收型滤波元件；宽频时以反射和吸收共同作用机制的复合型滤波元件。造成这种差别的主要原因是由于滤波元件等效电路的阻抗表达式中包含的损耗电阻R与储能电感L，两者的作用权重存在差异。但是，不论何种滤波元件，对铁氧体材料性能的要求都有其共性，即：高磁导率、高饱和磁化强度、低矫顽力、高居里温度、高截止频率。

1.3 铁氧体电磁骚扰抑制元件的性能表征

铁氧体元件的滤波性能是由插入损耗IL (Insertion Loss) 来表征, 如式 (4) :

$$IL = 20 \log \left| \frac{Z_s + Z_L + Z}{Z_s + Z_L} \right| \quad (4)$$

式中: Z_L 为负载阻抗, Z_s 为源端阻抗; Z 为滤波元件在线缆上形成的等效阻抗, 为频率的函数, 其等效电路可表示为损耗电阻 R 与储能电感 L 的复数串联形式:

$$Z = R + j\omega L$$

式中: $j\omega L (L = \mu' L_0)$ 项代表了元件的反射滤波机制、而 $R (R = \omega \mu'' L_0)$ 项代表了元件的吸收损耗滤波机制、 L_0 为与元件尺寸有关的空芯电感常数。(4)、

(5) 式反映出: 插损IL与材料磁导率实部 μ' 与虚部 μ'' 存在一特定的函数关系。显然, 材料的 μ' 和 μ'' 越高, 则滤波元件的阻抗模越高, 因而插入损耗值就越大。

1.4 铁氧体滤波元件插入损耗IL测量方法^[20]

目前国际上还没有制定滤波元件的插入损耗标准测量方法。本文结合国内外研究成果, 提出了传输线加载滤波元件的S参数测量方法。以下是该方法的简要说明, 如图2所示:

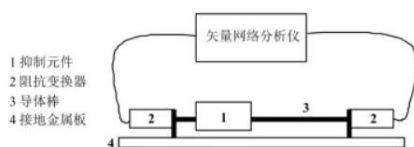


图2 插入损耗测试装置示意图

在平行线传输线上加载滤波元件, 通过测量网络传输参数 S_{21} 来表征插损。被测元件加至传输线后, 等效构成一二端口网络。元件的插入损耗可表示为:

$$IL = \left| \frac{S_{a21}}{S_{b21}} \right| (dB)$$

其中, S_{a21} 为放入元件后的 S_{21} 测试值, S_{b21} 为未

放元件时的 S_{21} 测试值。若阻抗变换器、连接电缆与平行线传输线三者之间阻抗完全匹配, 则上式可简化为:

$$IL = S_{21} (dB)。$$

2、近场耦合抑制材料

2.1 近场耦合抑制材料简介

由于电子设备产生的电磁骚扰向高频化 (300MHz ~ 3GHz) 发展, 传统的抑制材料对此频带的骚扰抑制已突显不足, 通过在骚扰源或敏感源附近放置骚扰抑制材料可获得很好的骚扰抑制效果。由于材料通常放置在骚扰源的近场范围内, 因此, 这种材料也被称为近场吸收体, 以区别于通常的远场吸波材料。

电路模块之间的电磁骚扰和电子元件的辐射发射, 大部分是来自于有源器件产生的射频电流, 印刷电路板上的布线充当着天线进行辐射发射, 辐射的能量正比于射频电流的大小、线路辐射效率、以及线路与线路及线路与元件之间的噪声耦合系数。为解决这种噪声藕合现象, 设计中采用了模块去耦隔离的办法, 即在不同的模块之间加入近场耦合抑制材料, 通过同侧噪声去耦或异侧噪声去耦的方式, 发挥抑制噪声电流和降低辐射的功能。

目前, 这类材料主要有: 1) 磁性金属复合材料, 将软磁金属粉末填充于各类高分子体材料中获得片状胶板; 2) 铁氧体复合材料, 在基体材料中填充铁氧体软磁粉末获得磁性胶板; 3) 磁性薄膜材料, 在基体或器件上用蒸镀或溅射的方法形成磁性薄膜, 如非晶膜或铁氧体膜等, 膜厚只有几 μm 至几百 μm , 具有很好的高频磁性能, 能对高频干扰起到显著的抑制作用。

2.2 近场耦合抑制材料工作原理

近场耦合抑制材料的使用方式是贴近于印刷电路板或电路布线处, 属于波源的近场范围。因此, 其工作原理主要是近场电磁波的吸收损耗, 包括三部分损耗机制: 材料的介电损耗 P_{die} 、材料磁损耗 P_{mag} 、微带线介质层的介质损耗 P_{MSL} , 产生的总损耗

为三者之和:

总损耗:

$$P_{loss} = P_{die} + P_{mag} + P_{MSL} \quad (7)$$

印刷电路板上布线电流多为环形电流，波源属于低阻抗的近场磁场源，因此贴近场源的抑制材料对电磁场的损耗主要为磁损耗，这种损耗是由材料的磁导率虚部产生。

与铁氧体磁性材料相比，金属软磁材料具有更高的磁导率和饱和磁化强度，这对于抑制磁场源的骚扰是十分有利的。然而，金属软磁材料受感生涡流的影响，导致磁场无法透入材料内部，使材料不能充分磁化，因而材料磁损耗的作用不能发挥出来。实践证明，采用结构分割的方法，对消除感生涡流及闭合磁畴是十分有效的。工业上采取的具体方法就是将金属粉末颗粒扁平化处理获得片状粉末，然后同各种基体材料复合，在复合过程中控制加工条件实现片状粉末颗粒的定向排列，最后获得具有取向分布微观结构特征的复合材料^[21、22、23]。如图3所示。

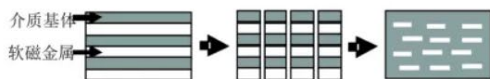


图3 近场耦合抑制材料设计原理图

2. 3近场耦合抑制材料测量方法^[21]

2006年颁布的IEC62333专门对近场耦合抑制材料测量方法进行了介绍，针对噪声抑制体在电路板中的实际应用，IEC62333推荐采用微带线方法进行抑制效果的测量。微带线结构如图4所示，它是由介质基片的一边为中心导带，另一边为接地板所构成。

试样的抑制作用通过微带线传输参数 S_{21} 与反射参数 S_{11} 来表征，由于校准时将微带线作为传输线的一部分校准，故由微带线带来的误差可去除，放置试样后的 S_{21} (dB) 即表示了材料对微带线上传输能量的损耗，值愈小衰减性能愈佳。而 S_{11} (dB) 则表示材料对传输能量的反射，其值愈小说明骚扰能量进入材料内部愈多。

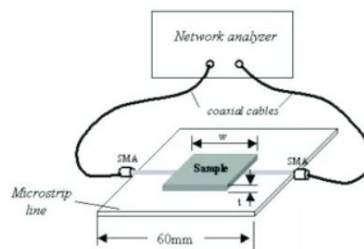


图4 微带线测试装置示意图

骚扰抑制性能可用材料对骚扰能量的吸收功率比 ΔP ，即，材料对骚扰能量的损耗功率与入射的总能量的比值来表示。

$$\Delta P = P_{\text{loss}} / P_{\text{in}} = 1 - (S_{11}^2 + S_{21}^2) \quad (8)$$

式中： P_{loss} 为损耗电磁能量； P_{in} 为入射总能量； S_{11} 、 S_{21} 分别为放置材料后的反射与传输参数（dB）。

五、电磁波吸收材料

电磁波吸收材料（简称吸波材料）是以军事目的为背景而产生发展起来的。最早的吸波材料出现在二战时期的德国。德国人为了保护潜艇不被联军的机载搜索雷达发现，在潜艇外壳包覆了一层泡沫塑料，内有七层含碳粉的纸。在七十年代，Jauman提出了吸波材料理论模型，由此引发了为提高吸波效能而开展的阻抗匹配、电磁参数设计等内容的吸波材料计算学。八十年代中期，美国率先在这一领域取得了重大突破。在八十年代末，大量采用吸波材料的F117A轻型战斗机和B2重型轰炸机被装备于美国空军。在随后的年代当中，吸波材料逐渐渗透到导弹、舰艇、战车、坦克等许多军事应用领域，研制出适合于不同应用目标的多种新型吸波材料，成为军事现代化不可缺少的高新技术。

除军用外，吸波材料还广泛用于民用领域，其中，电波暗室是吸波材料的重要应用场合。按照吸波材料在电波暗室内表面的贴覆方式区分，电波暗室分为全电波暗室和半电波暗室，主要区别在于：全电波暗室的内部全部装有吸波材料，而半电波暗室除地面外都

装有吸波材料。

1、电磁波吸收材料的分类

按照材料与电磁波的交互作用机制，吸波材料可以分为：

电损耗型吸波材料：在电磁波的作用下，材料内自由电子的运动形成传导电流，而传导电流产生的焦耳热将使电磁波的能量不断损耗。以电损耗为主的吸波材料，其吸收率强烈依赖材料电导率的变化。当材料的电导率 $\sigma < 10^{-4} \text{S/m}$ 时，无明显的吸波特性；当 $10^{-4} < \sigma < 100 \text{S/m}$ 时，材料呈半导体特性，有较好的吸波特性。

磁损耗吸波材料：材料的复数磁导率表达式中实部

μ' 代表材料对磁能的存储，虚部 μ'' 代表材料对磁能的损耗。磁损耗吸波材料具有高的磁损耗正切 ($\tan \frac{\mu''}{\mu'}$)，依靠磁滞损耗、畴壁共振、自然共振等磁极化机制衰减材料中传输的电磁波。

介电损耗吸波材料：材料的复数介电常数表示式中实部 ϵ' 代表材料对电能的存储，虚部 ϵ'' 代表材料对电能的损耗。介电损耗吸波材料具有高的介电损耗正切 ($\tan \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$)，电介质的损耗主要是由材料中电荷的极化现象引起，通过电子极化、取向极化、离子极化等极化方式使电磁场能量损耗。

表4 吸波材料实例^[24, 25]

序号	吸波材料	原理简述
1	六角型铁氧体吸波材料的设计和工艺	六角型铁氧体化学通式为：MeFe12O19，具有六角对称结构，内部有较高的各向异性场与自然共振频率，它们受(TiZn)联合取代量的影响，最终影响吸波性能
2	新型结构吸波材料设计、制备	从单层、多层结构吸波材料计算公式入手，研究厚度、反射层及添加适量碳黑的透波层对材料吸波性能的影响。透波层中加入碳黑可以改善阻抗匹配；吸波层加入金属颗粒以及将碳纤维毡处理成带立状绒毛，改善介电常数，拓宽吸收频带
3	短切碳化硅纤维微波电磁参数改性研究	对碳化硅纤维进行改性处理以调节电磁参数—复介电常数、复磁导率，并使它们较好匹配，可以使之具有较好的吸波性能
4	SiC-C 纤维结构吸波材料	碳纤维是良导体，是电磁波反射材料；碳化硅纤维是半导体，是电磁波透过材料；将两者合理配比设计，控制电阻率，制成阻抗渐变材料，改进吸波效果
5	纳米吸波剂对电磁波的吸收特性	纳米材料有特殊的磁、电性能，颗粒度的减小，一方面能够改变材料的宏观电磁参数，另一方面能够因量子效应产生新的吸波机理。
6	新型导电聚合物微波吸收剂研究	电阻率在一定范围内的导电聚合物呈半导体态，对微波有较好的吸收；磁损耗介质的加入提高了衰减
7	视黄基席夫碱及其金属络合物吸波材料研究	视黄基席夫碱络合物为半导体型顺磁性物质；视黄基席夫碱属半导体物质。视黄基席夫碱存在较强的吸收，由于芳香族大 π 键参与共振，电子离域增大，使电损耗增大
8	铁氧体复合吸波材料	铁氧体是依赖于成份的共振型吸波材料，有用的频带窄，采用分层结构改变铁氧体中心频率，与单独铁氧体相比，铁氧体—介电体层状吸波材料可获得-20dB 或更大衰减
9	聚吡咯吸波材料	调整导电聚吡咯量获得合适的介电常数获得满意的吸波性能：2.5mm 厚<-10dB 带宽为 6GHz。制备更宽带吸波材料时，需要与磁性材料相配合
10	层复合吸波材料	通过不同的配比设计获得具有电、磁损耗的双层吸波材料

2、电磁波吸收材料现状

表4列举了国内外吸波材料研究情况，总体上是围绕以下两方面的内容：

1) 新型吸波剂：研制新的材料或对已有材料的改性，改变材料的电磁参数，达到提高吸波效能的目的，主要有，铁氧体材料、碳素材料、导电高分子材料、陶瓷材料、纳米材料、铁族金属材料等；

2) 结构吸波：根据阻抗匹配和电磁波损耗机制，开展包括层复合结构、手征材料、纤维复合，微结构复合等研究内容，达到拓宽吸波频段、提高吸波效能的目的。

3、材料的吸波效能

根据电磁场理论，入射电磁波 I_1 由阻抗为 Z_0 的自由空间垂直入射到阻抗为 Z 的介质材料表面时，将有部分波被反射回来 I_2 ，部分进入材料体内 I_3 ，部分透出材料 I_4 ，如图5所示。可以看出， $I_1=I_2+I_3+I_4$ ，为便于确定材料对 I_3 电磁波吸收的能力，在材料背面加衬一层全反射金属背衬，此时， $I_1=I_2+I_3$ 。因此，通过比较 I_1 和 I_3 ，即材料对电磁波的反射能力，就可以确定材料的吸波效能。

表征材料对电磁波反射特性的物理参数是由反射系数 Γ 来确定： $\Gamma = \frac{Z-Z_0}{Z+Z_0}$ ，式中，材料的本征阻抗

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{、自由空间的波阻抗} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi\Omega。$$

当 $Z=Z_0$ 时， $\Gamma=0$ ，表明电磁波无反射全部进入介质中，这是理想的阻抗匹配条件；当 $Z=0$ 时， $\Gamma=-1$ ，表明电磁波被介质界面全部反射回自由空间，这是理想的全反射条件；材料的波阻抗总是介于0到 Z_0 之间，因此，反射系数是在 $[-1, 0]$ 间变化。



图5 吸波材料对电磁波的反射特征

对于上图所示情况，材料的吸波效能可表示为：

$$AE = -20\lg|\Gamma| \quad (9)$$

可以看出，材料吸收电磁波必须具备两个基本条件：

1) 阻抗匹配条件——尽量使材料的本征阻抗接近自由空间的波阻抗，以减少电磁波的反射；2) 电磁参数匹配条件——正确选择材料的电磁参数，充分发挥材料的各种损耗机制，使电磁波在材料内部迅速衰减。

4、吸波效能测量

我国先后颁布了三个关于吸波材料测量方法标准，包括：射频辐射吸收（微波吸收材料）的通用规范（SJ20155-92）、雷达吸收材料反射率测量方法（GJB2038-94）、射频吸波材料吸波性能测量方法（GJB5239-2004）。本文对GJB5239-2004测量方法进行简要说明。

4.1 低频同轴反射法——适用频率范围

30MHz~600MHz^[26]

利用终端贴覆有吸波材料的立式方形同轴装置对材料的吸波性能进行测试。如图6（a）所示，测试装置的内、外导体横截面均为正方形，其中外导体的内表面尺寸为内导体外表面尺寸的三倍，被测吸波材料位于同轴装置低部，装置可同时容纳八块标准试样。由同轴装置输入端口的反射系数得到吸波材料的吸波性能。

4.2 波导法——适用频率范围600MHz~1GHz^[26、27]

如图6（b）所示，波导一端由一个特殊设计的仅限TE10模的探针激励，另一端由被测吸波材料封闭。能量由探针向吸波材料所在的波导终端传输，其中一部分被材料吸收，其余部分被反射。如果认为波导无损耗，则反射与入射能量在激励端口的比值即等于两部分能量在吸波材料表面的比值。因此，系统输入端的反射率或驻波比即反映了吸波材料的吸波性能。

4.3 拱形法——适用频率范围1GHz~18GHz^[26]

如图6（c）所示，矢量网络分析仪的输出端与发射天线相连接，激励信号经被测吸波材料或金属板反射后再由接收天线所接受，并送入与之相连的矢量网络分析仪的输入端；发射天线与接收天线可以再拱形架上独立移动且均指向圆心；被测试样的反射电平与金属板的反射电平之比即为吸波材料的反射率。

射频吸波材料吸波性能测量方法（GJB5239-2004）的系统连接图如图6所示。

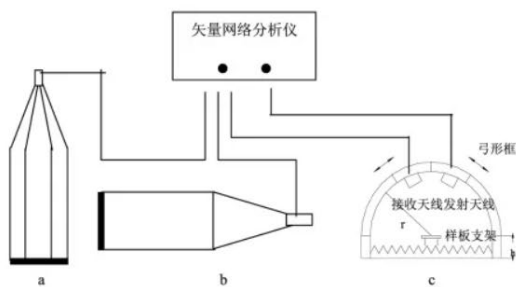


图6 吸波效能测量方法示意图

六、电磁密封材料

为防止电磁波内部溢出或外部进入，在电气产品的设计中普遍采用了屏蔽技术，采用屏蔽材料对空间电磁波进行物理隔离。但是受结构所限，屏蔽体总会存在各

种形式的开孔或缝隙，使整个屏蔽体导电性不连续，因而在缝隙处产生电磁泄露。为解决这一问题，在电磁兼容设计中使用了电磁密封材料。

1、电磁密封材料简介

电磁密封材料是一类表面导电的弹性材料，通过在屏蔽体之间提供低阻抗的导电通路实现结构整体屏蔽的目的。电磁密封材料在使用时处于导电体的结合处或屏蔽结构体的缝隙处，以消除导电不连续性。

在使用电磁密封材料之前，需要注意的几点是：当波长远大于缝隙尺寸时，电磁泄露并不明显；当缝隙尺寸等于半波长的整数倍时，泄露最大；电磁密封设计时，一般要求屏蔽体的缝隙小于 $\lambda/10 \sim \lambda/100$ 。表5列出了目前普遍使用的电磁密封材料（元件）

表5 常用的电磁密封材料（元件）

衬垫种类	结构	特点
镀铜指形簧片	通过冲压、热处理工艺方法制成的各种形状的高弹性镀铜簧片	屏蔽高、弹性好、压缩形变量大、允许滑动接触。
导电橡胶	将银、铝镀银、铜镀银、玻璃镀银等导电粉末掺入橡胶中	用于电磁密封和环境密封、压缩形变量小、安装方便。
金属丝网屏蔽条	由金属丝网编制的弹性导电衬垫，常用金属材料有：镀锡磷青铜、镀锡铜包钢、蒙乃尔合金、铍铜。	低频屏蔽较高，高频屏蔽较低；使用压力较小、不能环境密封。
橡胶芯金属丝网条	外层是金属丝网屏蔽条，内芯为高分子弹性体。具有良好的弹性和表层导电性。	低频屏蔽较高，高频屏蔽较低；弹性好、不能环境密封。
螺旋管	由镀铜/不锈钢条卷制成的螺旋管，具有优良的弹性和抗永久压缩变形的能力。	屏蔽效能高、弹性好、过量压缩容易损坏。组合型有环境密封性。
导电布衬垫	采用电化学沉积方法在化纤布上镀铜、镍获得的导电布，包裹高分子泡沫材料制成的条状导电衬垫。	高、低频屏蔽较高、柔软、具有一定的环境密封作用、频繁摩擦会损坏表面导电层。
定向金属丝橡胶衬垫	许多独立的细金属丝垂直于接触面方向嵌入橡胶中，使上下接触面导电。	高、低频屏蔽较高，有环境密封作用，防潮性和满足烟雾实验。
导电化合物	一类由导电填料与高分子基料复合而成的材料。导电填料包括银、镍、石墨、银包铜、银包铝、镍包石墨等。导电化合物种类有：导电胶、导电腻子、导电涂料等。	使用方便，针对具体部位独立实施电磁密封。

2、电磁密封材料的屏蔽效能

金属弹性屏蔽衬垫通用规范 (SJ20598-96)、电磁屏蔽衬垫屏蔽质量的测量方法 (SJ20672-1998) 两项标准分别对电磁密封材料 (元件) 屏蔽效能测量方法进行了说明。

电磁密封材料的屏蔽效能可以用转移阻抗衡量。当电磁波入射到一端屏蔽体上时会产生感生电流, 感生电流通过电磁密封材料时会在另一个屏蔽体面上产生电压, 进而形成新的辐射源。显然, 电磁密封材料导电性越好, 转移阻抗越低, 则端面电

压越低, 电磁泄露越少, 屏蔽效能越高。

电磁密封材料 (元件) 屏蔽质量的测量方法原理图如图7所示^[28、29]。测量夹具分为驱动舱和接受舱两部分, 之间用金属板和被测电磁密封材料隔离。驱动电流 I 由隔离金属板一端表面流经电磁密封材料, 从驱动舱的外壳流回到信号源。在隔离金属板的另一端面测量电压 V , 测得的 V 与 I 之比就是转移阻抗 Z_T 。很明显, 被测电磁密封材料越长, 则转移阻抗越小。为统一测量条件, 标准中采取了归一化方法: $Z_T = \frac{V}{I}$, 式中, l 为密封材料的长度。因此, 电磁密封材料的屏蔽效能可表示为:

$$SE = 20 \lg \frac{Z_0}{Z_T} \quad (10)$$

在实际测量时, 一般都是采用平面波方式进行分析测量, 此时, $Z_0 = 120\pi\Omega$ 。

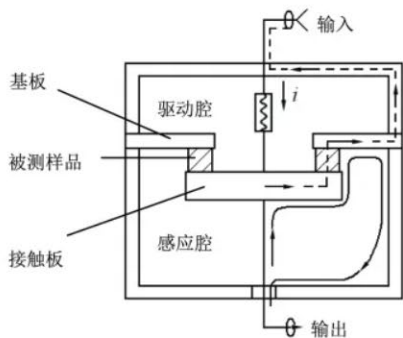


图7 电磁屏蔽衬垫屏蔽质量的测量方法原理图

七、结束语

材料是现代工业的基础, 是高技术产业的先导。材料的分类方法有很多种, 其中最传统的是按物质组成进行分类, 包括: 金属材料, 无机非金属材料, 高分子材料及复合材料四大类。根据实际需要, 材料还可以按照性能或应用领域进行分类。在电磁兼容领域中, 通常的材料分类方法是: 磁性材料, 导电材料, 介电材料, 等, 这些材料分属于材料领域中的不同分支学科, 具有更加广阔的应用背景。

随着电子工业的发展, 电磁兼容技术已成为当代高技术范畴的重要组成部分。人们已经认识到新材料的产生对电磁兼容技术的进步具有重要的促进作用, 开展电磁兼容技术与材料学的交叉性研究对电磁兼容材料学科的形成、发展和完善意义重大。

电磁兼容材料概念的提出是基于以下三方面事实:

1) 电磁兼容材料的理论体系日趋完善——以电磁场理论和材料学原理为理论基础, 研究电磁场在材料中的传输行为; 2) 电磁兼容材料的表征方法已经建立——通过材料的电磁参数 (电、磁、介电) 测量获得材料的基础数据, 指导材料设计和制备加工, 同时根据应用目标建立起材料电磁性能的测量平台, 包括屏蔽, 吸波, 传导等性能; 3) 电磁兼容材料的工业体系和应用体系已经形成——大量的材料和元件正在电磁兼容技术中发挥着重要作用, 现代材料制造业能够满足电磁兼容材料及元件生产的需要。

电磁兼容材料学科体系的形成、发展和完善需要广大业界人士的密切合作、广泛交流, 需要大家共同营造一个良好的信息平台。我们很高兴地看到《安全与电磁兼容》期刊自创刊以来对电磁兼容材料给予了足够的关注和支持, 在以往出版的多期刊物中都设立了有关的专题或栏目。不论是科技人员, 还是企业人士都能够从期刊中获取到许多有益于自己的信息, 也都能够通过这一信息平台将各自的成果宣传出去, 为电磁兼容技术的发展做出贡献。

参考文献

1. 王新林, 非晶和 纳米晶软磁合金从研究到产业化[J], 金属功能材料, 1996 (6), 205-210
2. 周美玲、谢建新、朱宝泉, 材料工程基础[M],

北京, 北京工业大学出版社, 2001

3. 周绍民, 金属电沉积[M], 上海, 上海科学技术出版社, 1987

4. 曹镛、叶成、朱道本译, 导电高分子材料[M], 北京, 科学出版社, 1989

5. 曾汉民, 高分子导电复合材料, 高技术新材料要览[M], 北京, 科学出版社, 1995

6. 潘成, 方鲲, 周志飏, 毛卫民, 郭志猛, 导电高分子电磁屏蔽材料研究进展[J], 安全与电磁兼容, 2004 (3), 1-4

7. 毛健, 陈家钊, 涂铭旌, 黄婉霞, 刘颖, 偶联剂和固化工艺对电磁波屏蔽用Ni涂料导电性能的影响[J], 功能材料, 1997 (2), 137-139

8. 陈锦宏、李玮, 电磁屏蔽导电涂料[J], 广州化学, 2002 (1), 44-47

9. 林硕、李志章, 吴年强, 电磁屏蔽导电复合涂料[J], 材料导报, 1996 (3), 72-76

10. 沈冬娜, 化学与电化学沉积电磁屏蔽织物技术与性能研究[M], 北京, 北京工业大学硕士学位论文, 2003

11. 张碧田、李国勋、翟俊英、杨松青, 电磁屏蔽织物的制备与应用[J], 环境工程, 1995 (5), 38-39

12. 王瑄, 蔡普宁, 金属纤维混纺织物防微波辐射性能测试方法的探讨[J], 棉纺织技术, 2001 (7), 418-420

13. 袁岩兴, 低频磁屏蔽材料的制备与研究[M], 北京, 北京工业大学硕士学位论文, 2004:

14. 聂士东, 低频磁屏蔽膜的制备与性能研究[M], 北京, 北京工业大学硕士学位论文, 2007

15. 材料屏蔽效能的测量方法, 中华人民共和国电子行业军用标准, 电子工业部标准化研究所出版, SJ20524-1995

16. 平面材料屏蔽效能的测试方法, 中国航天工业总公司航天行业行业标准, 中国航天工业总公司第七〇八研究所出版, QJ2809-96

17. 阳开新, 抗EMI用软磁铁氧体[J], 磁性材料与器件, 1994 (1), 18-21

18. 陈荣晓、张怀武、苏桦, 抗电磁干扰铁氧体

材料及抑制扼流圈[J], 磁性材料与器件, 2004 (4), 32-34

19. 苏华、唐晓莉、杨怀武, 抗电磁干扰(EMI)磁性材料及元器件技术[J], 世界科技研究与发展, 2001 (4), 18-20

20. 孙宏亮, 线缆EMI抑制元件的宽带设计及其用高频材料研究[M], 北京, 北京工业大学硕士学位论文, 2005

21. 王添文, 宽频电磁干扰抑制材料[M], 北京, 北京工业大学硕士学位论文, 2006

22. 冯则坤、李海华, 何华辉, 扁平金属磁性微粉的工艺与抗电磁干扰特性[J], 磁性材料及器件, 2001 (4) 41-44

23. 张晓宁, 新型电磁吸收复合材料的设计与制备[M], 北京, 北京工业大学博士学位论文, 2003

24. 葛凯勇, EMC用电磁波吸收材料的研究[M], 北京, 北京工业大学博士学位论文, 2002

25. 赵振声、张秀成, 冯则坤、何华辉, 六角晶系铁氧体吸收剂磁损耗机理研究[J], 功能材料, 1995 (5), 401-404

26. 射频吸波材料吸波性能测量方法, 中华人民共和国国家军用标准, 总装备部军标出版发行部出版, GJB5239-2004

27. 袁力、蒋全兴, 射频吸波材料波导测试法装置转换接头的仿真分析[J], 安全与电磁兼容, 2007 (1), 50-53

28. 电磁屏蔽衬垫屏蔽质量的测量方法, 中华人民共和国电子行业军用标准, 信息产业部电子工业标准化研究所出版, SJ20672-1998

29. 朱敏波、邱扬、田锦, 导电衬垫材料的屏蔽效能研究[J], 功能材料, 1998 (6), 645-647