记录介质能快速升温和冷却；

⑥ 磁光盘的载噪比直接和极克尔旋转角 θ_K 和低的动态噪声相关，要求材料有大的 θ_K，成膜后膜面光滑平整，晶粒大小在纳米量级，非晶薄膜最佳；

⑦ 热稳定性好，在记录/擦除激光光束反复作用下（要求 100 万次以上），材料的结构不发生变化；

⑧ 优良的抗氧化，抗腐蚀性能强，要求存储介质经长期存放后性能不变；

⑨ 能使用廉价的塑料衬底，要求制备盘片的衬底温度或成膜后的热处理温度不高于塑料衬底的软化温度，不然，需用玻璃衬底，其价格昂贵；

⑩ 容易大面积成膜。为了能大批量生产，要在连续通过型溅射设备上成膜，因此往往采用合金材料或烧结材料。

（1）MnBi 多晶材料　铁磁性的 MnBi 合金薄膜因其存在较高的磁光效应，在早期曾被作为磁光材料研究过。通常使用的 MnBi 合金低温相居里温度较高，约 360℃；当使用高温相时，合金部分转变为顺磁性，磁光效应较小，不利于磁光记录，但居里温度较低，约 180℃，这对磁光记录有利。可是 MnBi 合金的高温相不稳定，易向低温相转变，虽然通过掺杂的方式，如用 Ti 替代部分的 Mn，取得了较好的结果，但还没有达到实用化的程度。

（2）非晶态材料　第一代磁光盘样机选用稀土-过渡族金属（RE-TM）非晶态合金薄膜作为存储介质，发展到今天的 4 倍密度磁光盘（5.25in 双面容量 2.6GB）和将付之实用的 10 倍密度磁光盘存储介质仍使用这种材料，可见它的魅力非同一般，这主要归结于非晶态合金的特性。非晶态合金，从结构上看，和液态金属相似，原子分布是一种长程无序或短程有序的排列，从热力学观点看非晶态是亚稳定相，但众多的非晶态合金在室温下是稳定的。非晶态合金的独特优点是其成分可以连续变化，而不会像晶态合金一样会出现某种特定的相，从而可获得成分连续变化的均匀合金系，这对磁光存储介质十分重要，这样可以在较大范围内调节磁光存储介质的磁性能，如饱和磁化强度（M_s）、补偿温度（T_{comp}）和矫顽

力（H_c）等，对设计磁光存储介质的磁性和磁光性能十分有利，特别是磁光多层耦合膜的设计，可通过不同磁性膜层间的磁耦合作用，制备可直接重写的高密度磁光记录盘。

RE-TM 非晶薄膜存储介质的记录原理是热磁记录，所以在使用过程中必然要经历上万次反复擦写，记录和擦除的激光作用温度一般都超过介质的居里温度。非晶物质在热力学上是亚稳态，在一定温度和时间作用下，其非晶结构易于晶化，即使在室温下，也存在弛豫过程。不过，对于磁光盘使用的 RE-TM 存储介质，其弛豫过程十分缓慢，在室温下放置几十年也不影响其使用的要求。另外，稀土元素在空气中极易氧化，从而改变其磁性和磁光特性。因而，研究 RE-TM 非晶态薄膜的结构稳定性和抗氧化性能尤其重要。

典型的 RE-TM 薄膜由三层组成，分别称为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ层。外层（Ⅰ层）为 Gd＋Tb 和 Fe 的高价氧化物，其厚度为纳米量级。Ⅱ层为宽的氧化区域，厚度几十纳米，由 Gd、Tb、Fe 和 O_2 组成。Ⅲ层是 GdTbFe 非晶态薄膜，还有沉积薄膜过程中残留下来的少量氧存在。

稀土-过渡族金属非晶态材料有较大的极向克尔效应。图 10-30 表示 RE-TM 薄膜的克尔旋转角 θ_K 和波长的关系。稀土元素在短波长时，对 θ_K 贡献大，过渡族金属 Fe，Co 则在长波长时磁光效应显著。重稀土元素的 θ_K 符号在短波长时为负，长波长时为正，Fe，金属 Co 从可见光到紫外线范围内的 θ_K 符号皆为负，所以 RE-TM 亚铁磁非晶态材料在短波长范围内重稀土元素和 Fe，Co 的 θ_K 符号相异，互相补偿，θ_K 降低。轻稀土-过渡族金属为铁磁体，磁化强度矢量叠加，因而磁光效应随波长变短而增大。图 10-31 给出了

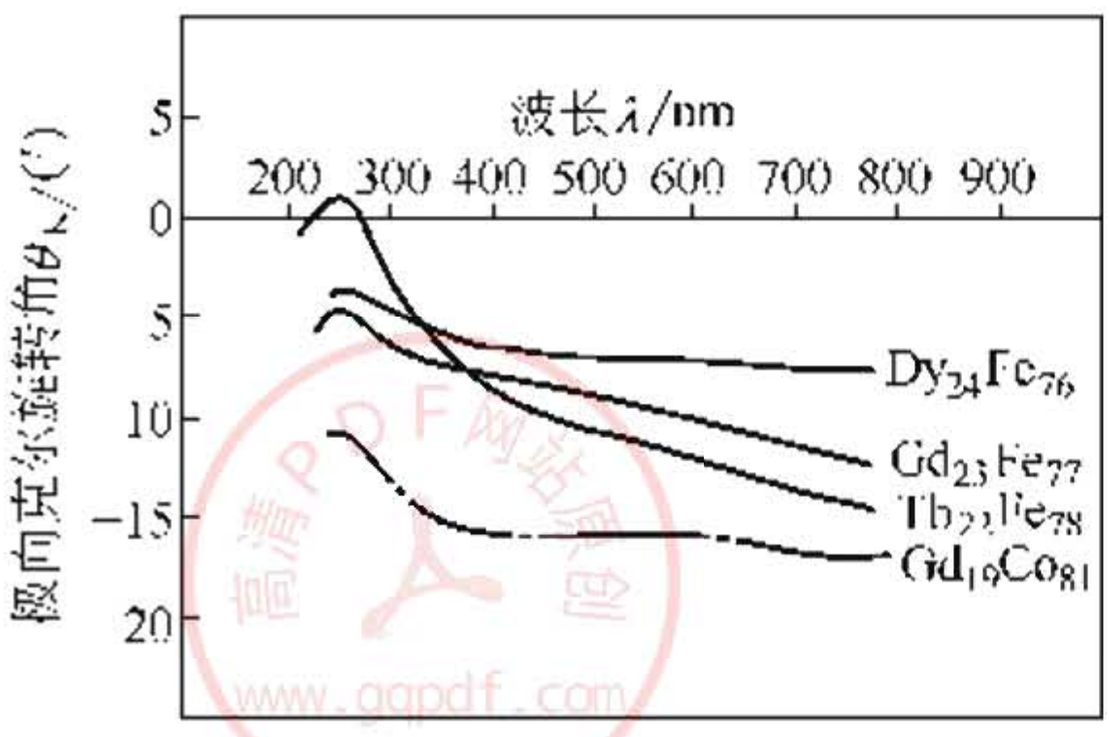


图 10-30　某些 RE-TM 非晶态合金薄膜的 θ_K 和波长的关系

Nd、Ce 轻稀土元素和 Gd、Tb、Y 重稀土元素分别与 Co 组成的非晶态薄膜的 θ_K 和波长的关系。但这类合金的 $4\pi M_s$ 不大，易获得各向异性垂直于膜面的薄膜，可在重 RE-TM 合金中适当添加轻稀土，如 Nd、Pr 等，既可以有大的各向异性常数，又可在短波长下使用，从而提高 RE-TM 光盘的记录密度。

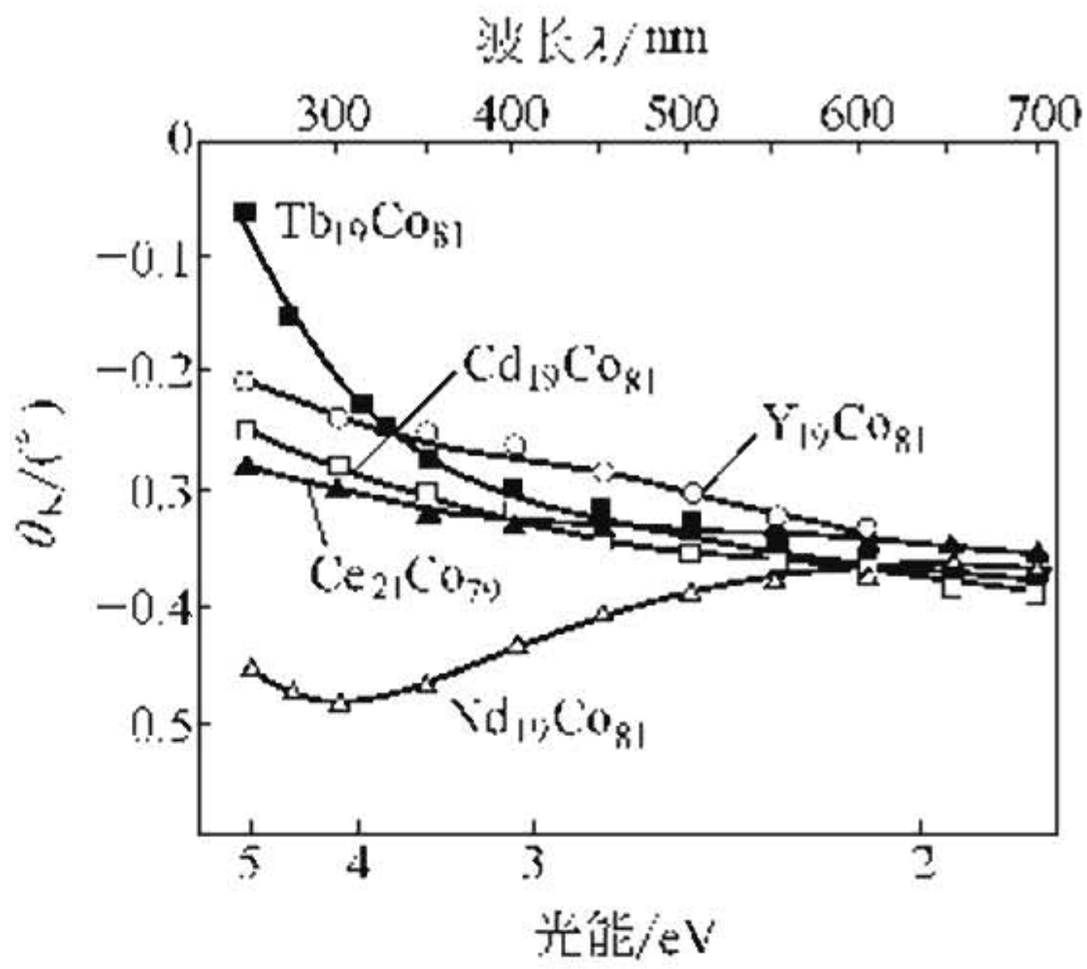


图 10-31　轻 RE（Nd，Ce）-Co 和重 RE（Gd，Tb，Y）-Co 非晶态合金薄膜 θ_K 和激光波长变化关系的比较

（3）石榴石薄膜　20 世纪 70 年代初，液相外延石榴石单晶薄膜成功地用于磁泡器件。这是一种不挥发，全固态存储器。80 年代初期石榴石薄膜磁光盘的研究成了热门课题。

石榴石薄膜的基本磁光性能参见前面的相关内容。目前用射频磁控溅射方法制备石榴石薄膜，生长在钆镓石榴石（GGG）衬底上的石榴石薄膜，其表面要比在玻璃衬底上的表面光滑，从而降低动态噪声，提高 C/N 比。溅射制备态的石榴石表面一般是非晶态，通过热处理使其晶化。

石榴石薄膜的抗氧化性能强，短波长处磁光效应大，利于资料的长期保存和提高存储密度，使其处于十分有利的竞争地位。

10.3　磁光材料的应用

虽然，早在 1845 年法拉第就发现了磁光效应，但在相当长一段时期内并未获得应用，只是不断发现了新的磁光效应和初步建立了磁光理论。直到一百多年以后，人们才开始应用磁光效应来观察、研究磁性材料的磁畴结构。随着激光和光电子学领域的开拓，才使磁光效应的研究向应用领域发展，出现了新型的光信息功能器件——磁光器件，并将磁光效应应用到信息存储领域。

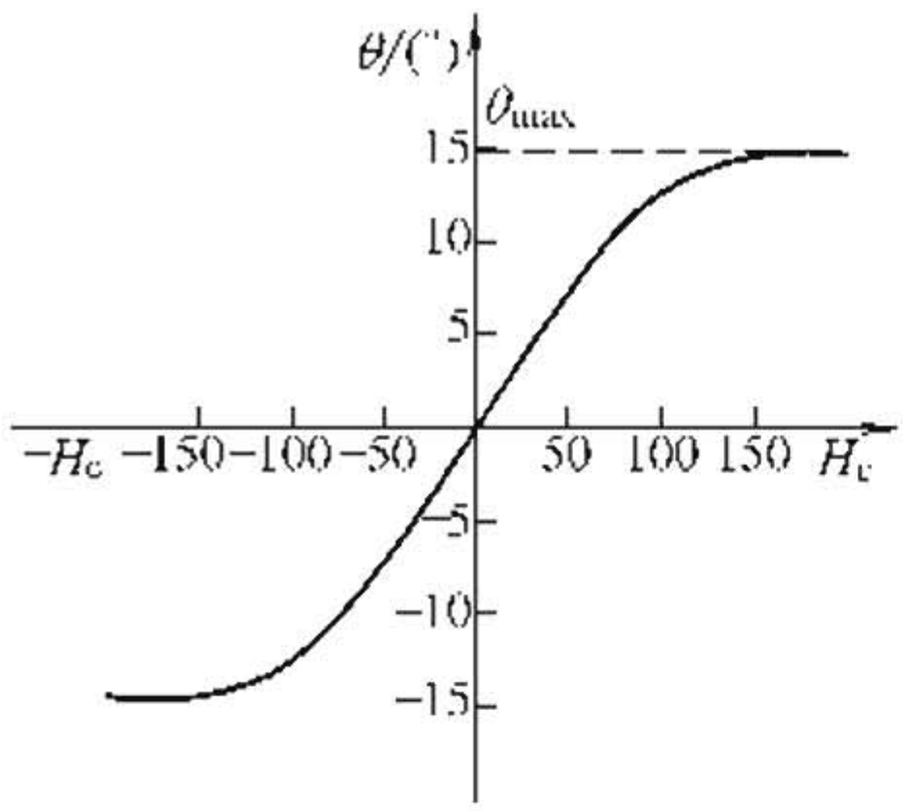


图 10-32　法拉第旋转角 θ 与外磁场 H 的关系

10.3.1　磁旋光材料的应用

（1）磁光调制　对于钇铁石榴石等矫顽力很小的磁光材料，其法拉第旋转 θ 随外加磁场 H_c 的变化近似呈线性关系；达到磁饱和时，比法拉第旋转趋于最大值 θ_{max}，H_c 继续增大，比法拉第旋转基本不变。当介质反向磁化并忽略介质损耗时，θ 与 H_c 关系近似如图 10-32。

在两个偏振器之间插入一个由磁化线圈交变磁化的磁光单晶或单晶薄膜，例如石榴石单晶薄膜，可以构成一个简单的低频磁光调制器，如图 10-33 所示。设由交变电流产生的交变磁场 H 引起的法拉第旋转角为 θ_t，则如图 10-33 系统的输出光强为

$$I(\beta+\theta_t)=I_0\cos^2(\beta+\theta_t)=(I_0/2)[1+\cos2(\beta+\theta_t)] \tag{10-10}$$

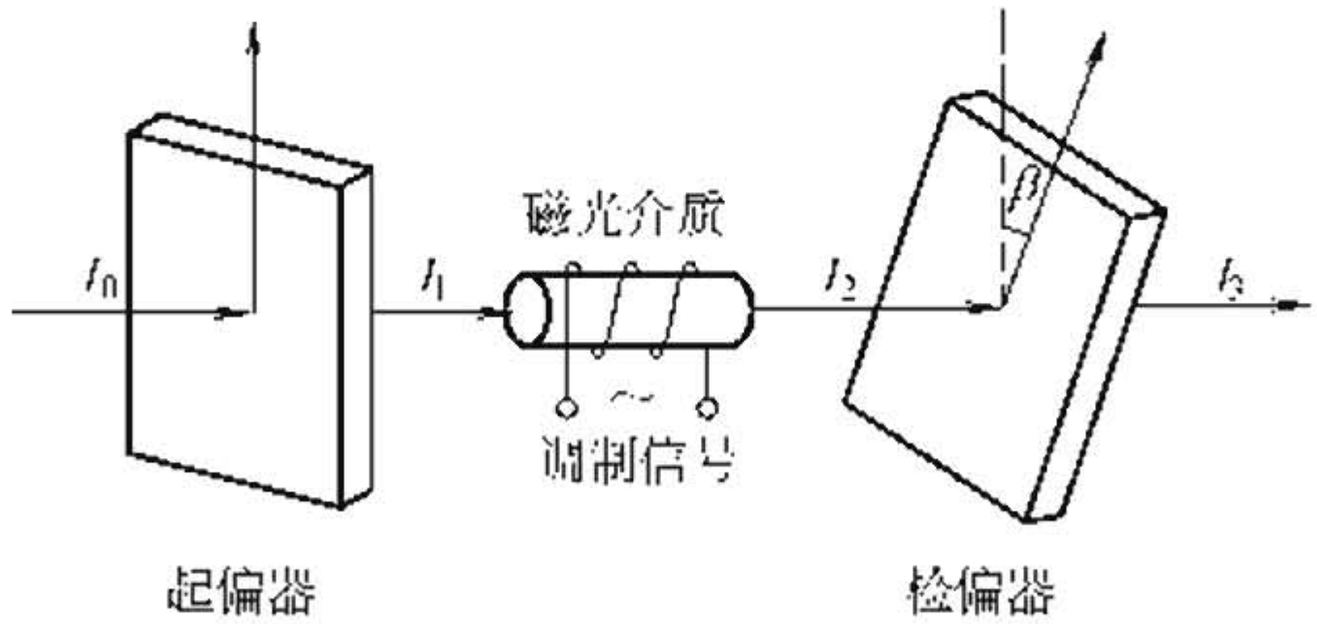


图 10-33　低频磁光调制器示意图

当用正弦波电流输入调制线圈时，则在垂直石榴石单晶薄膜平面的方向上产生一个正弦变化的交变磁场，由此引起的交变法拉第旋转角 θ_t 为

$$\theta_t=\theta_{t0}\sin\Omega t \tag{10-11}$$

式中 θ_{t0} 是交变法拉第旋转 θ_t 的幅度，称为调制幅度。由上可知，当 β 一定时，输出光强 I 仅随 θ_t 变化，而 θ_t 是受磁场 H 控制的，因此 I 随 H 而变化，这就是光强的磁光调制。显然，由于交变磁场 H 引起的法拉第旋转使输出光强幅度变化（磁光调制幅

度）为

$$I_0\cos^2(\beta-\theta_{t0})-I_0\cos^2(\beta+\theta_{t0})=I_0\sin2\beta\sin2\theta_{t0} \quad (10\text{-}12)$$

由式（10-10）、式（10-12）两式可知：

（a）当 θ_{t0} 为定值时，磁光调制幅度随 β 而变化。$\beta=45°$时，磁光调制幅度最大，如图 10-34（a）所示。此时由式（10-10）得

$$I(45°+\theta_t)=(I_0/2)(1-\sin2\theta_t) \quad (10\text{-}13)$$

I 随 θ_t 作正弦变化。

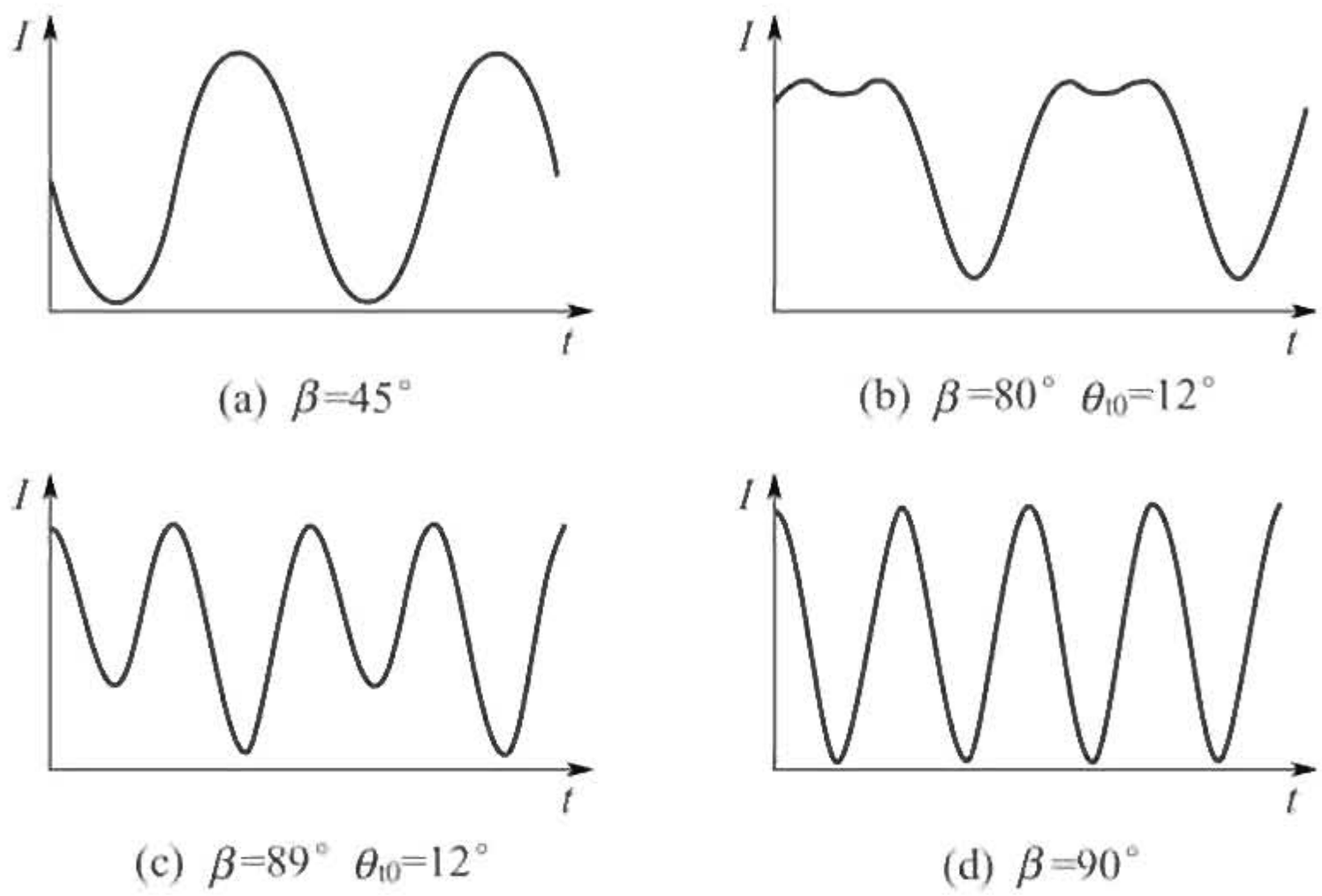


图 10-34　波形的变化

（b）当 $\beta=45°$时，$\theta_{t0}=45°$磁光调制幅度最大。由式（10-13）可以看出，当 $\theta_{t0}>45°$时，调制波形将产生畸变，如图 10-34（b）、（c）所示。

（c）当 $\beta\neq45°$时，I 不仅与 θ_t 有关，而且与 β 的变化也有关，因此调制波形及其幅度将随起偏器和检偏器相对位置 β 值而变化，$\theta_{t0}<45°$也会引起调制波形的畸变。

（d）当 $\beta=90°$，即两偏振器处于正交位置时，输出光强为

$$I(90°+\theta_t)=I_0\cos^2(90°+\theta_t)=(I_0/2)(1-\cos2\theta_t) \quad (10\text{-}14)$$

此时，I 是 θ_t 的偶函数，输出光强仅与 θ_t 的大小有关，即与交变磁场 H 的大小有关，与磁场的方向无关。显然，此时输出调制信号的频率是输入调制信号频率的一倍，如图 10-34（d）所示。由此可见，当我们检测到输出光强的倍频信号时，即可确定两偏振

器处于正交（“消光”）位置。

当 $\beta=0°$ 时，输出光强为：

$$I(\theta_t)=I_0\cos^2\theta_t=(I_0/2)(1+\cos2\theta_t) \tag{10-15}$$

输出光强 I 的变化情况与 $\beta=90°$ 时相类似。从式（10-14）、式（10-15）两式可以看出，在 $\beta=0°$、$90°$ 情况下，磁光调制（倍频信号）幅度随 θ_{t0} 的增大而增大，而 $\theta_{t0}=90°$ 时，其幅度最大[40]。

① 钇铁石榴石单晶磁光调制器　YIG 单晶在 1.1～6μm 波长区有高的光透过率和较大的比法拉第旋转 θ_F，θ_F 近似与波长的 λ^{-2} 成正比，$\lambda=1\mu m$ 时，θ_F 为 300°/cm，$\lambda=5\mu m$ 时，θ_F 为 60°/cm。在饱和磁化强度以下的磁场 H 范围内，θ_F 与磁场 H 近似的成线性关系，因此，这种单晶适宜做成 1～6μm 波长区域内的磁光调制器。其缺点是磁饱和磁场较高，约在 10^5 A/m(1200Oe) 以上。为了降低磁化场，常选用掺 Ga 的 YIG 单晶做磁光调制器。非磁离子 Ga^{3+} 取代 Fe^{3+} 后，尽管饱和磁极化强度 μ_0M_s 略有减小，比法拉第旋转 θ_F 也有所下降，但 Ga：YIG 材料的磁光优值 θ_F/α 比 YIG 要大得多，因而更适宜做成磁光调制器。

由式（10-10）可知，当 θ_{t0} 为定值时，磁光调制幅度随 β 而变化。$\beta=45°$ 时，磁光调制幅度最大，当旋转角较小时，$I\sim\sin2\theta_t$，I 与 θ_t 之间几乎呈线性关系。磁光调制器在这种状态下工作具有相当大的优越性，其调制特性类似于众所周知的电子管的伏安特性，如图 10-35 所示。

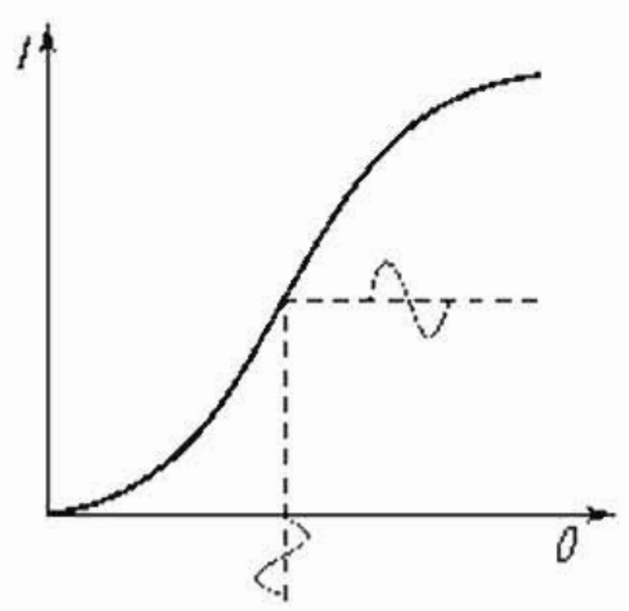


图 10-35　光强 I 与旋转角 θ 的关系

若选用成分为 $Y_3Ga_{1.15}Fe_{3.85}O_{12}$ 的 Ga：YIG 单晶作为磁光调制器材料，该材料的 $\mu_0M_s\approx10mT$，在 300K、1.15μm 波长时的 $\theta_F=165°/cm$，要得到 45°的旋转角，晶体的厚度应为 2.7mm。由于 θ_F 随波长增大而减小，因此在较长波长处，单晶的厚度就需要适当的增加。

通常晶体沿〈111〉易磁化方向切割，晶体切割的方向稍偏一些影响不大。误差大于 10°，则将明显增加所需的磁化场。

用 YIG 单晶做磁光调制元件时，磁光调制器的结构设计就要

复杂得多，因为 YIG 的饱和磁场比 Ga-YIG 大得多。这意味着对于同样的励磁线圈，要得到同样的调制性能，YIG 所需的驱动电流就要比 Ga：YIG 大得多。为克服这一缺点，常采用磁轭以构成封闭磁路，从而通过减小磁阻的途径来达到所需的高磁场。不过，由于磁轭的涡流损耗的限制，调制频率存在着一个上限。

磁光调制器的频率上限主要有以下两个原因造成的：随着调制频率的增加，调制线圈的电感也相应增加，为了驱动调制器，线圈需要的驱动电压也随之升高；磁性（光）材料中的磁滞损耗等可以导致磁光元件的过热。第一点可以用减小调制器元件的孔径，从而减小线圈直径及所需要的匝数来克服。第二点可用一个偏置的静磁场，使材料总处于磁化状态而减少磁滞效应等引起的热损耗。

② 石榴石单晶薄膜磁光调制器　掺铋稀土磁光石榴石单晶薄膜具有很高的比法拉第旋转 θ_F，通常比 YIG 单晶高一个数量级以上。其光吸收系数易随波长变化，在 1.1～6μm 的近红外区域，光吸收系数 α 很小，其中大部分区段 $\alpha<2\text{cm}^{-1}$。在 0.6～1.1μm 波长范围内光吸收系数 α 较为适中，因而具有相当大的磁光优值 θ_F/α。改变掺铋量可以调节薄膜的饱和磁化强度 $\mu_0 M_s$，这些特性表明，石榴石单晶薄膜适于制作可见光至近红外波段的磁光调制器。两种典型材料的性能参数列入表 10-18。

表 10-18　两种磁光石榴石单晶薄膜的性能参数（$\lambda=630\text{nm}$）

种类	膜厚 h /μm	μM_s /($\times10^{-4}$T)	居里温度 T_c/℃	易磁化方向	折射率 n	θ_F /(°/cm)	α /cm^{-1}	θ_F/α /(°/dB)
$(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$	7.38	150	145	垂直膜面	2.30	8130	649	2.90
$(BiPrGdYb)_3(FeAl)_5O_{12}$	5.06	200	185	平行膜面	2.34	9320	529	4.05

通常磁光调制器的最大磁光调制深度 $\eta=(I_{max}+I_{min})/(I_{max}-I_{min})$ 与磁光样品的磁光优值 θ_F/α 有关，θ_F/α 越高，所需样品越薄。材料一定时，样品越厚，其比法拉第旋转越大，调制深度 η 也越大。

考虑到材料的交流磁损耗随频率的升高而增大，因此磁光调制器存在使用频率的上限。

③ 玻璃磁光调制器　磁光玻璃大多为顺磁性物质，铽玻璃是一种典型的磁光玻璃，在 $\lambda=0.6328\mu m$ 和 $T=23℃$ 处，其费尔德常数 $V=-3.0\times10^{-5'}/A$。显然其磁光效应比铁磁性和亚铁磁性物质弱得多。但铽玻璃在 $0.4\sim2.0\mu m$ 波长范围内的光吸收系数 α 很小，因此在可见光区域有其独到的用处。磁光玻璃不会磁饱和，但玻璃磁光调制器要达到大的调制深度，必须要有大的法拉第旋转 θ，故所需的外加磁场 H_c 也必须很大。例如 $\lambda=0.6328\mu m$ 情况下，若要 η 达到 0.2，样品的长度为 5cm 时，H_c 约需 2.20×10^4 A/m (277Oe)；若要 η 达到 0.5，则约需 5.73×10^4 A/m(720Oe) 的磁场。显然，玻璃磁光调制器的体积和功耗要比石榴石单晶薄膜磁光调制器的大得多。尽管如此，在可见光区，对于不适宜使用电光、声光调制器和石榴石单晶薄膜磁光调制器的场合，或者对 η_0 要求不高的场合，仍然需要使用玻璃磁光调制器。例如，在有些高脉冲场调制场合，工业用磁光仪和量计糖，目前大多采用玻璃磁光调制器。又如在多路激光聚热装置（瞬时达 10000℃以上）等高能量激光脉冲系统中，也应用玻璃磁光调制器。

④ 薄膜波导磁光调制器　随着使用磁性石榴石薄膜材料的光学器件的不断出现，基于这些材料的集成光学器件的研究也逐步受到重视。最早的磁光石榴石波导调制器是采用蛇形电路来控制 TE 模和 TM 模之间的模式转换，以此来达到磁光调制的目的[41]。蛇形元件的周期性被用来补偿 TE 和 TM 模间的相位不匹配，但这种调制器的带宽受到蛇形元件滞后效应的限制。后来利用静磁波和导波模之间的相互作用，波导型磁光调制器的带宽增至 1GHz[42]。随后又出现了根据周期性磁畴结构振荡特性做成的高频光调制器[43]，带宽由磁畴结构的共振频率决定。但到目前为止，还没有出现较实用的波导型磁光调制器。下面主要介绍一种带宽可达到 3GHz 的波导型磁光调制器[44]。

在有些薄膜材料中，由于形状和应力导致的双折射补偿效应，TE 和 TM 模之间存在着较大的模式转换现象，该效应也常被用于

光隔离器的设计。将这样的薄膜与一条状载流换能器接触，会引起磁化强度的进动，从而产生模式转换的调制现象，由于进动的非共振性，这种现象具有很大的调制带宽。

图 10-36 为磁光波导调制器的示意图，该调制器采用外加微波信号实现导波模的非共振调制。具有静态 TM↔TE 模式转换功能的亚铁磁性石榴石薄膜与条状换能器物理接触，一束 TM 偏振态的光束在换能器附近从边缘耦合进入薄膜，输出端将获得调制后的 TE 偏振态的光强。

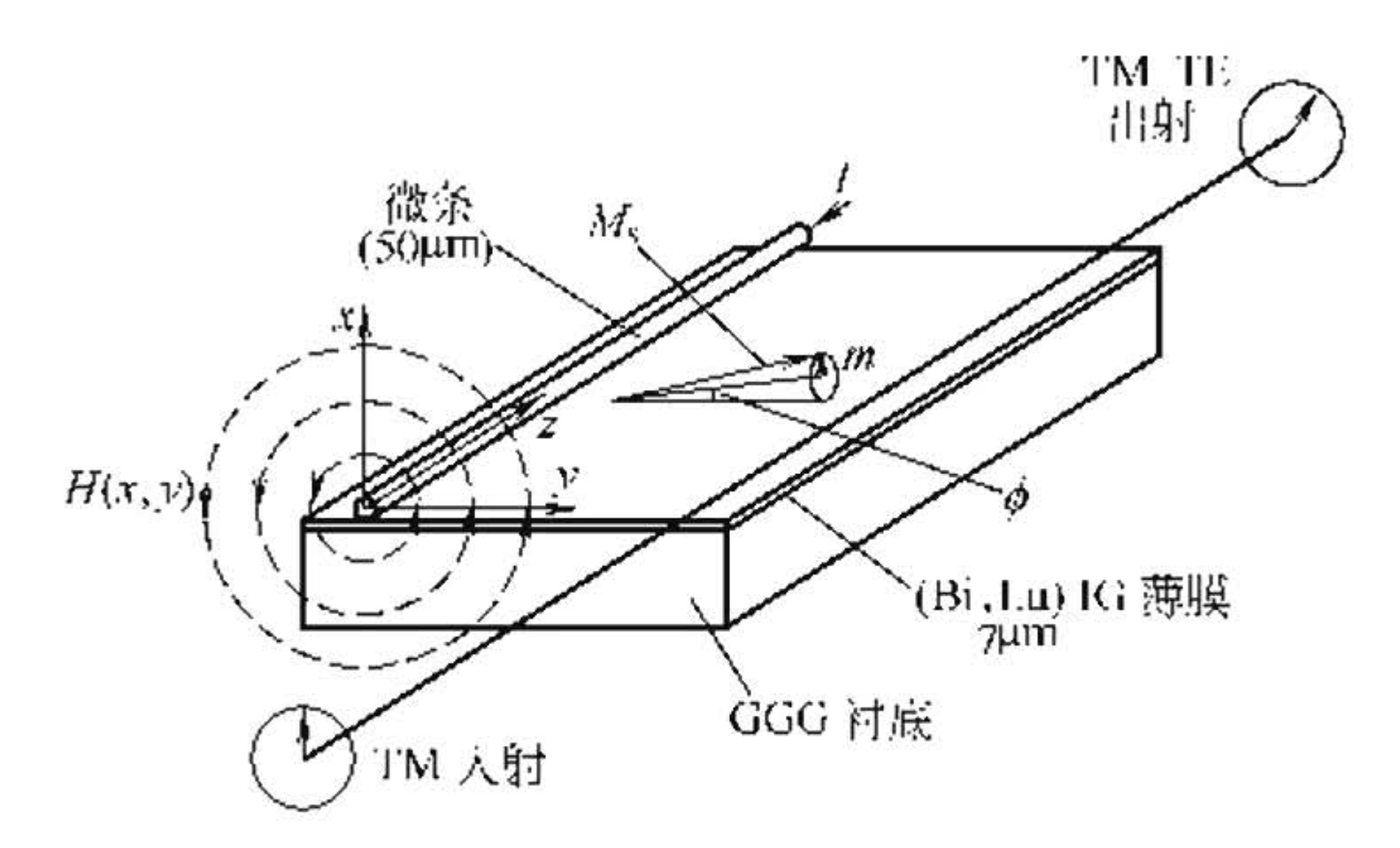


图 10-36　磁光波导调制器原理图

假定垂直于薄膜表面的平均磁化强度分量为零的平均磁化强度没有垂直于薄膜表面的分量，也就是说平均磁化强度完全在 yz 平面内，如果光束离换能器较远（约 100μm），则可认为 $\phi\to 0$，且 H 几乎垂直于薄膜表面，饱和磁化强度 M_s 则在薄膜内绕平均磁化强度 M 方向发生进动。将平均磁化强度表示为静态和动态分量之和，$M=M_s+me^{i\omega t}$，并利用 Landau-Lifshitz 方程可得

$$i\omega m=\gamma\mu_0 M_s\times H+O(m\times H) \tag{10-16}$$

式中　γ——旋磁比，$\gamma=-2\pi(28\text{GHz}\cdot\text{T})$；

μ_0——真空磁导率。

在弱磁场中，式（10-16）中的修正项 O（$m\times H$）可忽略。介电常数张量的非对角分量 ε_{yx} 决定了 TM→TE 模的耦合，对 ε_{yx} 的贡献来源于法拉第旋转，输出端 TE 模的光强 I_{MO} 正比于 $|\varepsilon_{yx}|^2$，

所以

$$I_{MO} \propto |m_z|^2 \Rightarrow I_{MO} \propto \cos^2\phi \tag{10-17}$$

TE 偏振光的强度与磁化强度的变化量有关，当 M_s 的取向垂直于光的传播方向时，I_{MO}达到极大值。

上述分析是基于 TM 和 TE 模相位匹配基础上的，如存在较大的相位失配，静态 TM↔TE 模式转换效率就会降低，从而会明显限制器件的工作效率。

（2）磁光开关　利用法拉第旋转及其磁饱和特性，可以制作1×2磁光开关，图 10-37 所示为偏振无关磁光开关的基本结构，其中 PBS1～PBS5 为不同方向的偏振分束器，PBS1 的主要功能是将任意偏振态的入射光分解成两个振动方向互相垂直的线偏振光，FR 为 45°法拉第旋转器，PBS2～PBS5 的功能是将经法拉第旋转器 FR 旋转后的两束线偏振光再合为一束从输出端输出。

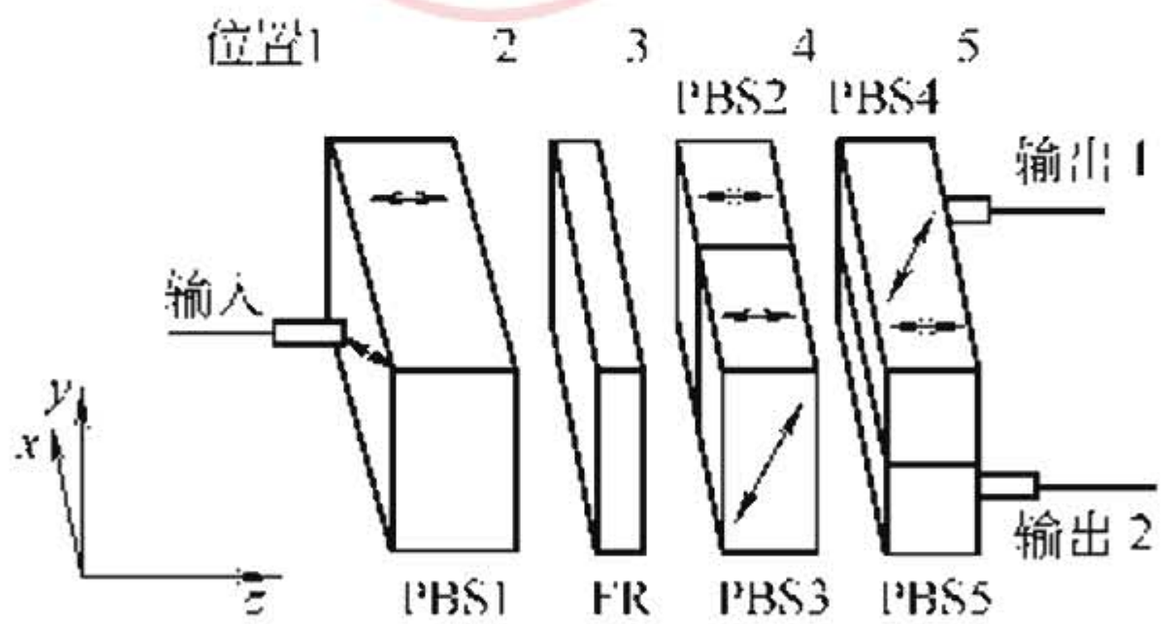


图 10-37　磁光开关结构原理

当 FR 加上正向饱和磁场时，磁光开关的光路如图 10-38（a）所示，图中的位置 1 至 5 分别对应图 10-37 中相应位置出射光的振动方向和光斑位置，最终的出射光从输出端口 1 输出；当 FR 加上反向饱和磁场时，磁光开关的光路如图 10-38（b）所示，出射光将从输出端口 2 输出，从而实现开关的功能。

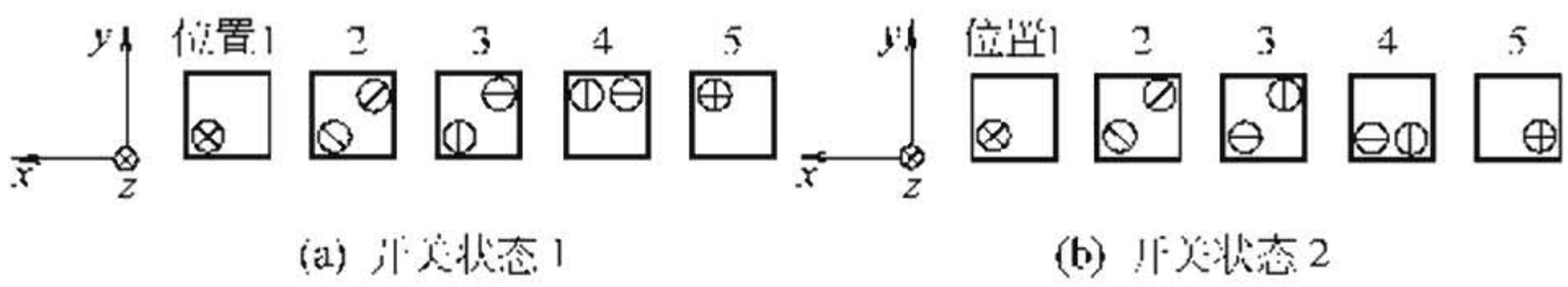


图 10-38　磁光开关光路图

如果将这种 1×2 的开关进行级联，则可实现 1×N 的磁光开关。

（3）磁光传感　利用法拉第效应可以制成磁光传感器，磁光传感器相对传统的磁场或电流传感器具有一些潜在的优点，前者是对磁场大小的直接反映，不同于后者通常是对磁场的时间导数的反映。磁光传感器探头与处理信号的电子设备可以有较长的距离，并有良好的抗电磁场干扰等性能。由于传输光纤良好的绝缘性，故这类传感器被认为是最具前途的一种高压大电流测量装置。

根据法拉第效应原理，当一束线偏振光通过置于磁场中的逆磁性或顺磁性磁光材料时，偏振方向将发生一定的旋转。法拉第旋转 θ 可表示为

$$\theta = V\int H \cdot \mathrm{d}l \tag{10-18}$$

式中　V——材料的费尔德常数；

H——磁场强度；

l——光在磁光材料中通过的长度。

对于 $\theta \sim H$ 呈线性关系的铁磁性和亚铁磁性磁光材料，式（10-18）同样适用。由式（10-18）可知，测得 θ，即可求出 H，亦可求解出产生磁场 H 的电流。探测法拉第旋转 θ 的方法有两种：光强探测和光能相位探测。

光强探测如图 10-39 所示，光源发出的光经光纤传送，由起偏器变成线偏振光，经过磁光材料时，待测电流产生的磁场对线偏振光进行磁光调制，然后由检偏器检出偏转角度，最后由探测器转变成电信号进行信号处理。设光源光强为 I_0，起偏器与检偏器偏振轴夹角为 45°，则马吕斯定律可得：

$$I = I_0 \cos^2(45° - \theta) = \frac{I_0}{2}(1 + \sin 2\theta) \tag{10-19}$$

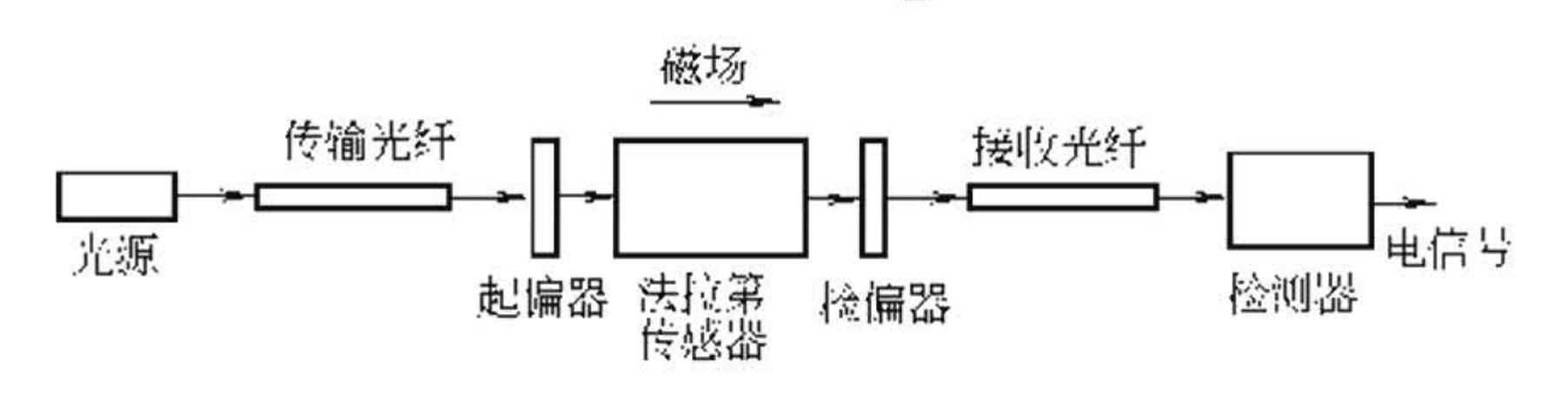


图 10-39　光强探测的基本原理

通过光强的变化可间接测出电流的大小。为了消除光源功率波动的影响，可采用相对光强进行测量。

相位探测原理如图 10-40 所示[45]，起偏器的透光轴以 $\omega/2$ 的角速度旋转，由于法拉第效应，从磁光材料中出射的是偏离了 θ 角的旋转着的线偏振光，由光电管转变成电信号后，出射信号 I_s 是被 2θ 调制的正弦信号

$$I_s=\alpha I_o[1-\sin(\omega t+2\theta)] \tag{10-20}$$

其中 α 为小于 1 的常数。

从光源中选出参考信号

$$I_r=\sin\omega t \tag{10-21}$$

则两者相位角差

$$\phi=(\omega t+2\theta)-\omega t=2\theta \tag{10-22}$$

这种方法使相位差在 $|2\theta|\leqslant 180°$ 内能被线性探测。

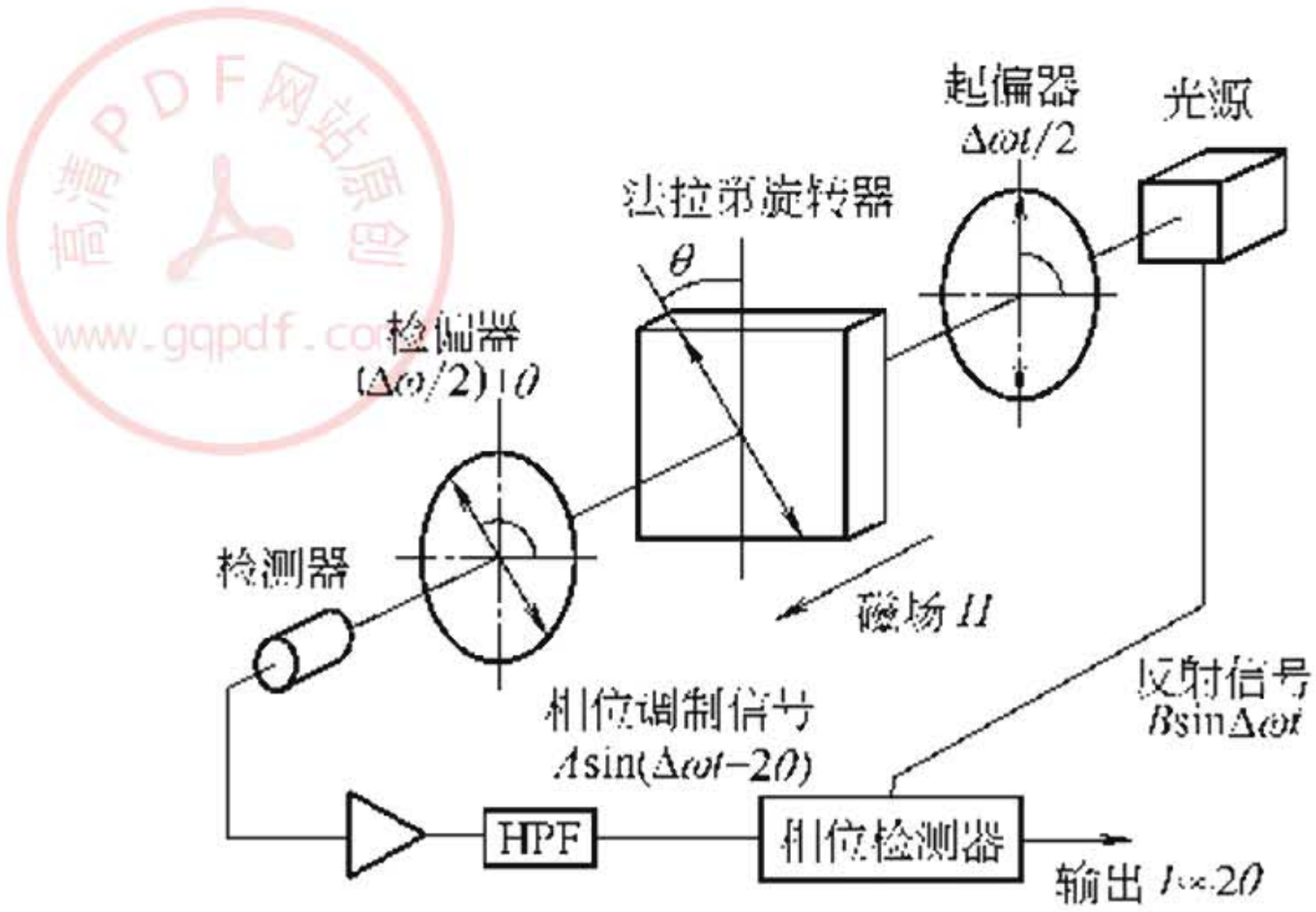


图 10-40　光相位探测原理

常用的传感头有以下几种。

① 正方形传感头　正方形传感头如图 10-41 所示，通常选择火石玻璃作为制作传感头的材料，主要是因为火石玻璃是抗磁性的，费尔德常数受温度的影响很小，且不会产生磁饱和，便于制作较大尺寸及复杂结构的传感头[46]。光束从第一个直角射入传感头后，将在正方形的另外三个直角的每一个角经过两次 45°的全反

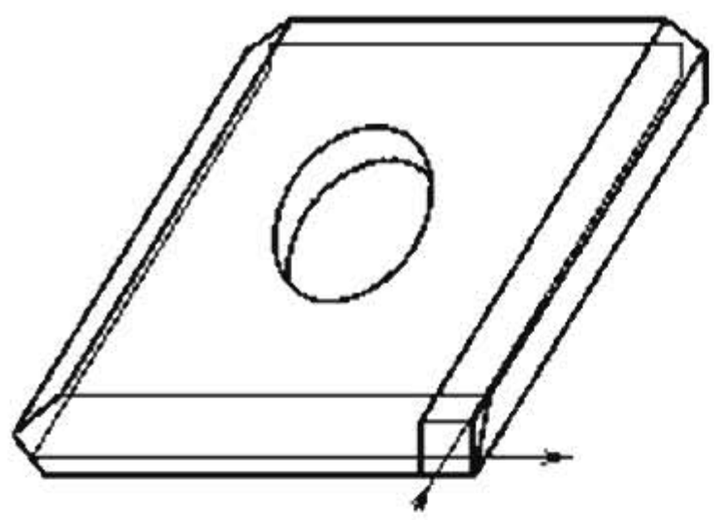


图 10-41　正方形传感头结构

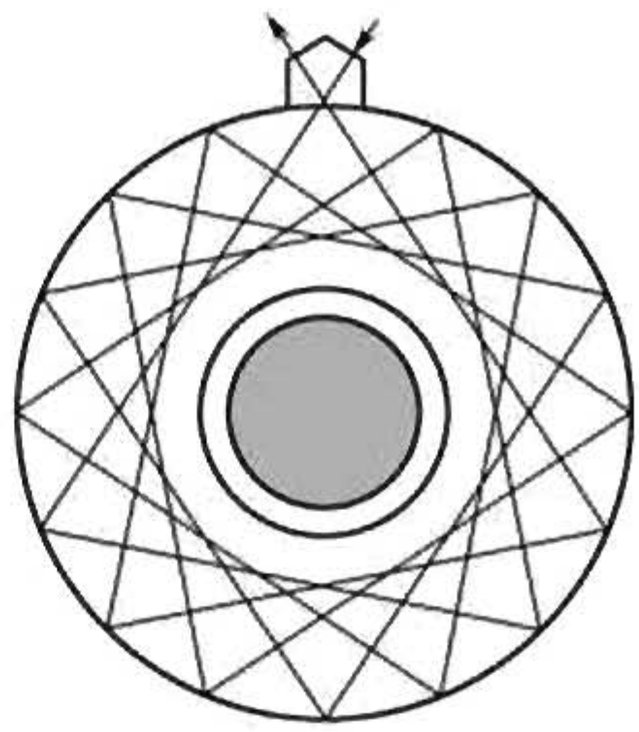


图 10-42　圆环状传感头结构

射，然后构成一个封闭的光学环路。由于每两次反射的反射面是正交的，由第一次反射产生的位相差可以在第二次反射中抵消，从而可以达到消除反射位相差、维持光线偏振状态的目的。在传感头中尽量采用闭合光路，则测量可不受导体位置变化及外界磁场的影响。根据这个原理，亦可设计成光环绕两周或多周的传感头，以进一步提高传感头的灵敏度[47]。还可采用三角形的环路结构，这样可使光路完全闭合[48]。

② 圆环状传感头　圆环状传感头如图 10-42 所示。当光从顶端入射后，在环内进行一系列全反射，经 15 次全反射后，最终再从顶端出射，形成 5 个环路，从而使测量精度提高 5 倍。

③ 全光纤传感头　典型的全光纤电流传感头结构如图 10-43所示，其中传感光纤线圈由低双折射 Lo-Bi 光纤和扭曲光纤构成，两端的偏振光纤的偏振方向互成 45°角。对于无损耗双折射光学系统的琼斯矩阵

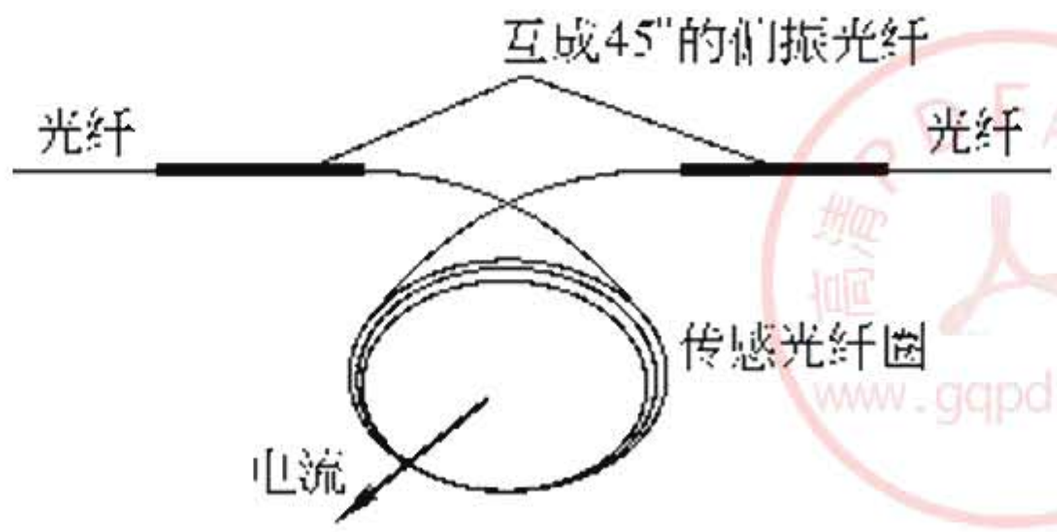


图 10-43　全光纤传感头结构

$$M_{\pm}=\begin{bmatrix} A_{\pm} & -B_{\pm}^{*} \\ B_{\pm} & A_{\pm}^{*} \end{bmatrix} \tag{10-23}$$

其中矩阵元 $A_{\pm}$ 和 $B_{\pm}$ 中±号分别表示传播方向，星号表示复共轭，对于无损耗系统，$|M|=1$。在互易系统中，有 $A_{+}=$

$A_- = A$ 和 $B_+ = B_-^* = B$。可定义这种传感器的正向强度传递函数为

$$T_+ = \frac{1}{2}[\mathrm{Re}(A_+) + \mathrm{Re}(B_+)]^2 + \frac{1}{2}[\mathrm{Im}(A_+) - \mathrm{Im}(A_+)]^2 \quad (10\text{-}24)$$

反向强度传递函数则为

$$T_- = \frac{1}{2}[\mathrm{Re}(A_-) + \mathrm{Re}(B_-)]^2 + \frac{1}{2}[\mathrm{Im}(A_-) + \mathrm{Im}(B_-)]^2 \quad (10\text{-}25)$$

其中不失普遍性，假定一个偏振器的偏振方向沿坐标轴，另一偏振器的相对偏振方向角为 φ，通过计算反向传播的传播系数，可得系统的强度传递函数

$$T_+ = T_- = \frac{1}{2}|A\cos^2\varphi - B\sin\varphi\cos\varphi|^2 \quad (10\text{-}26)$$

由于两个传递函数相等，这个简单的旋光系统是互易的。对于一个由多个偏振器和双折射元件组成的系统，整个系统可以等效为前后几个互易简单子系统，而每个偏振器可考虑成两个互相平行的偏振器。既然每个子系统是互易的，整个系统的强度传递函数也是互易的。

简单的基于强度互易不灵敏的补偿结构形式见图 10-44，其中使用了三个 3dB 单模光纤耦合器，一个光源和二个光探测器。若耦合器的插入损耗可以忽略，二个光探测器的接收光强可以表示为

$$I_1 = \frac{I_o(1-L)T_+}{8} \quad (10\text{-}27)$$

和

$$I_2 = \frac{I_o(1-L)T_-}{8} \quad (10\text{-}28)$$

式中 I_o——从光源出射的光强；

L——光纤的总损耗；

T_+, T_-——二个相反方向的强度传递函数，因子 $\frac{1}{8}$ 来源于耦合器耦合损耗。

互易补偿信号定义为

$$S = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} = \frac{T_+ - T_-}{T_+ + T_-} \quad (10\text{-}29)$$

很明显，不管传递函数怎样变化，在互易系统（$T_+ = T_-$）中，补偿信号仍然为零。

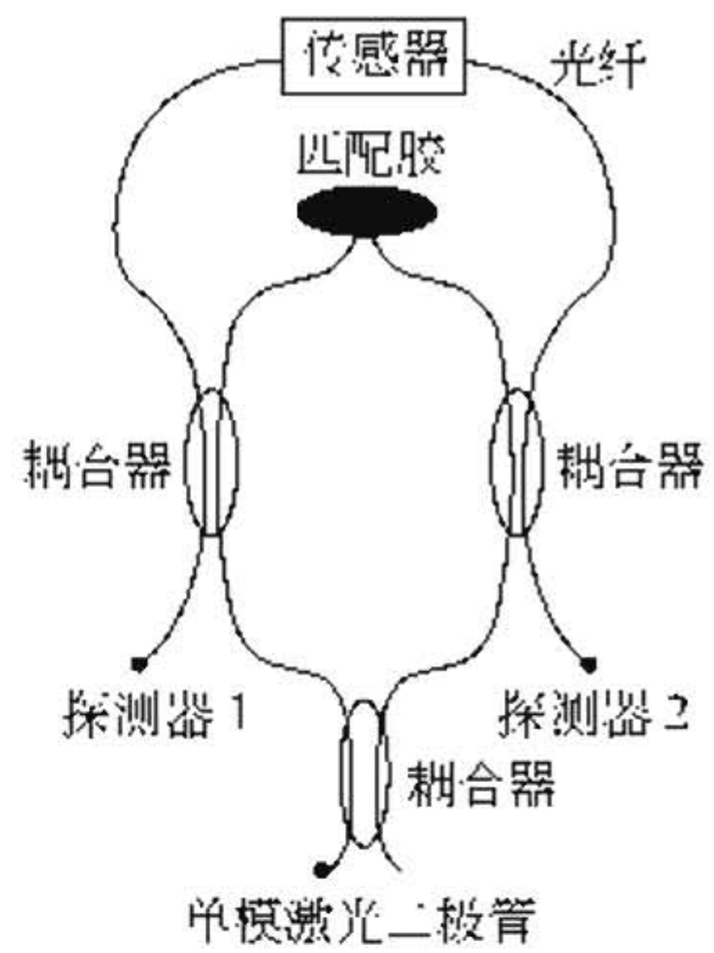


图 10-44　简单的基于强度互易不灵敏的补偿结构

当必须考虑非互易的法拉第效应时，系统不再互易，二个强度传递函数不再相等，补偿信号 S 将随着非互易的法拉第效应的大小而变化。对于如图 10-43 所示的传感器，强度传递函数为

$$T_+ = \frac{1}{2}[\mathrm{Re}(A_+) + \mathrm{Re}(B_+)]^2 + \frac{1}{2}[\mathrm{Im}(A_+) - \mathrm{Im}(B_+)]^2 \quad (10\text{-}30)$$

和

$$T_- = \frac{1}{2}[\mathrm{Re}(A_-) + \mathrm{Re}(B_-)]^2 + \frac{1}{2}[\mathrm{Im}(A_-) + \mathrm{Im}(B_-)]^2 \quad (10\text{-}31)$$

其中 $\mathrm{Re}(x)$ 和 $\mathrm{Im}(x)$ 分别表示 x 的实部和虚部。当传感光纤的琼斯矩阵给出时，补偿信号 S 可从式（10-29）获得。

10.3.2　磁光材料非互易性的应用

（1）磁光隔离

① 偏振相关磁光隔离器　偏振相关磁光隔离器基本结构如图 10-45 所示，沿轴向磁化的永久磁铁和置于其中的磁光材料构成一个 45°法拉第旋转器（FR），起偏器与检偏器的通光方向亦成 45°角。当光正向入射时，从起偏器出射的线偏振光经 45°-FR 后，恰能完全透过检偏器；当反向入射时，从检偏器进入的光再经 45°-FR 后，根据非互易性原理，其振动方向与起偏器成 90°，无法通

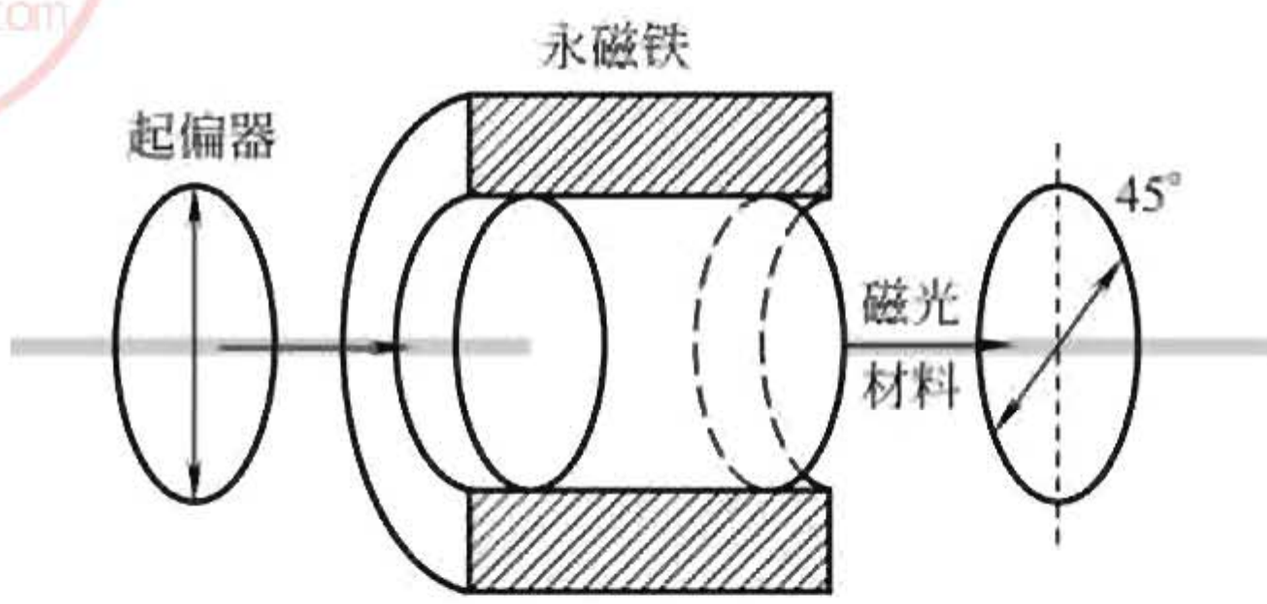


图 10-45　磁光隔离器基本结构

过起偏器，从而达到正向通过，反向隔离的目的。

由于这种隔离器的插入损耗与入射光的偏振状态有关，故称为偏振相关磁光隔离器，主要用于半导体激光器中，以避免外界的反射光对其工作状态的影响。

② 偏振无关近红外磁光隔离器　这是一类对光的偏振方向变化不敏感的磁光隔离器，是目前在光纤通信中应用得最多的一种磁光隔离器。

磁光隔离器的基本结构如图 10-46 所示，由一对准直器、一对双折射楔（W1 和 W2）和一个 45°法拉第旋转器（FR）组成。

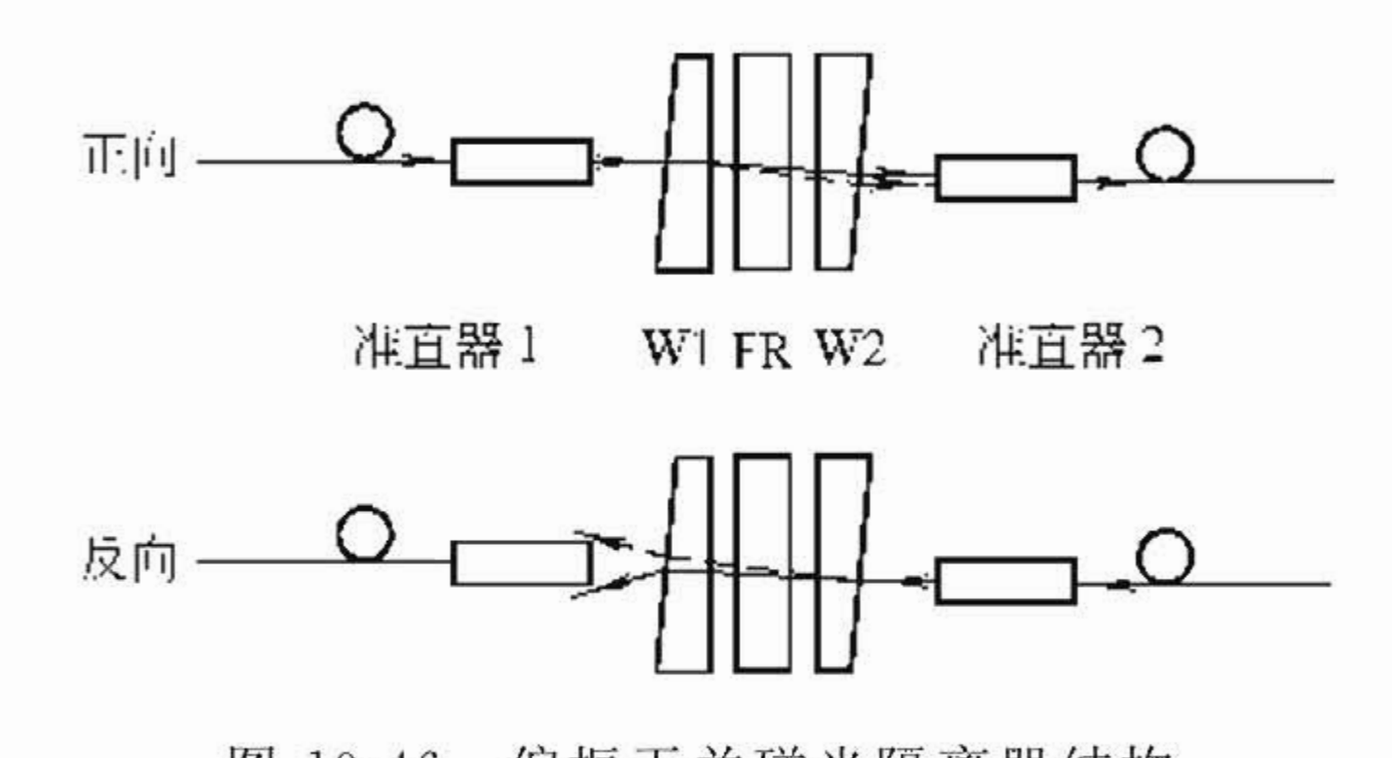


图 10-46　偏振无关磁光隔离器结构

准直器是与光纤连接在一起的渐变折射率透镜（GRIN-Lens）或玻璃透镜（G-Lens），使光路中的光以平行光进行传播，可以有效地降低耦合损耗。

双折射楔通常可用金红石、方解石或钒酸钇晶体制成，厚度约 0.3mm，楔角约 1°～6°，视不同的晶体材料和光纤而定。通常单模光纤所需的楔角较小，光轴与侧边成 22.5°角，见图 10-47。对于

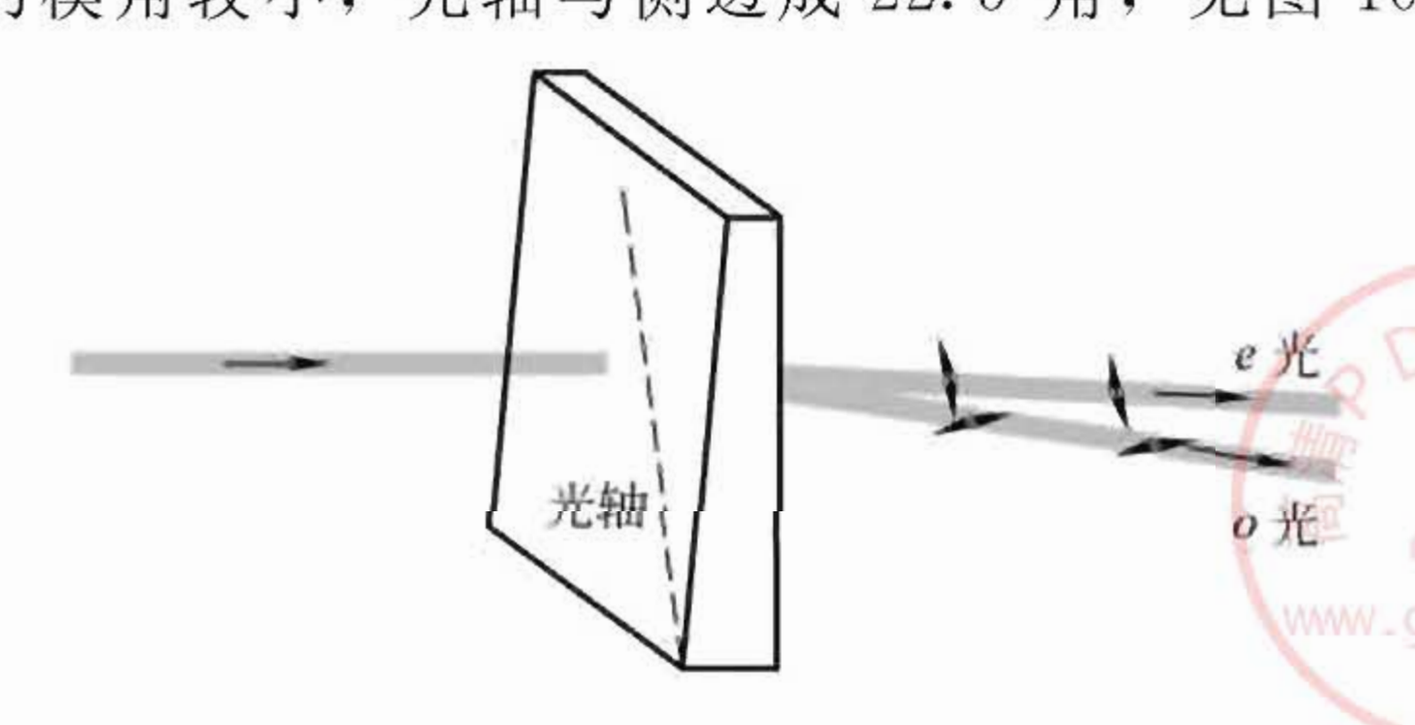


图 10-47　双折射楔

入射自然光，出射后分解为寻常光（o 光）和非寻常光（e 光）传播，楔角则使两出射光的传播方向有一小的夹角。

在图 10-46 光路中，两个双折射楔颠倒放置，两个光轴的夹角为 45°。当光正向传播时，入射光经准直器 1 后成为平行光，W1 将其分解为二束振动方向互相垂直但传播方向不再平行的偏振光，两束偏振光经过 45°-FR 至 W2 时，原来的 o 光成为 e 光，原来的 e 光成为 o 光，这样从 W2 出射的两束偏振光又成为平行光，由准直器 2 耦合至输出光纤。当光反向传播时则不同，从 W2 出射的 o 光和 e 光到达 W1 时还是相应的 o 光和 e 光，结果使两束光的夹角进一步加大，无法被准直器 1 耦合至光纤，从而起到了反向隔离的效果。

（2）磁光环行　近十年来，在通信领域，光纤通讯技术得到了越来越多的应用。波分复用技术和基于光纤的双向网络不断出现，全光网的概念已经得到了普遍的接受，并已经在有些国家和地区实施，双向通信和放大技术被广泛应用于全光网中。利用光环行器可在一根光纤内传输两个不同方向的信号，从而大为减小系统的体积和成本。

① 三端口不完全光环行器　不完全光环行器的结构如图 10-48 所示，这类环行器只能实现端口 1→2→3 的环行功能。其中 PBS1、PBS2、PBS3 为偏振分束器，PBS1、PBS2 的作用是对入射光进行分光、对出射光进行合光，其中 o 光和 e 光传播方向在 zx 平面内。PBS3 的作用是进行光束引导，实现部分环行功能，其中 o 光和 e 光的传播方向在 yz 平面内。FR1、FR2 为 45°法拉第旋转器。P1

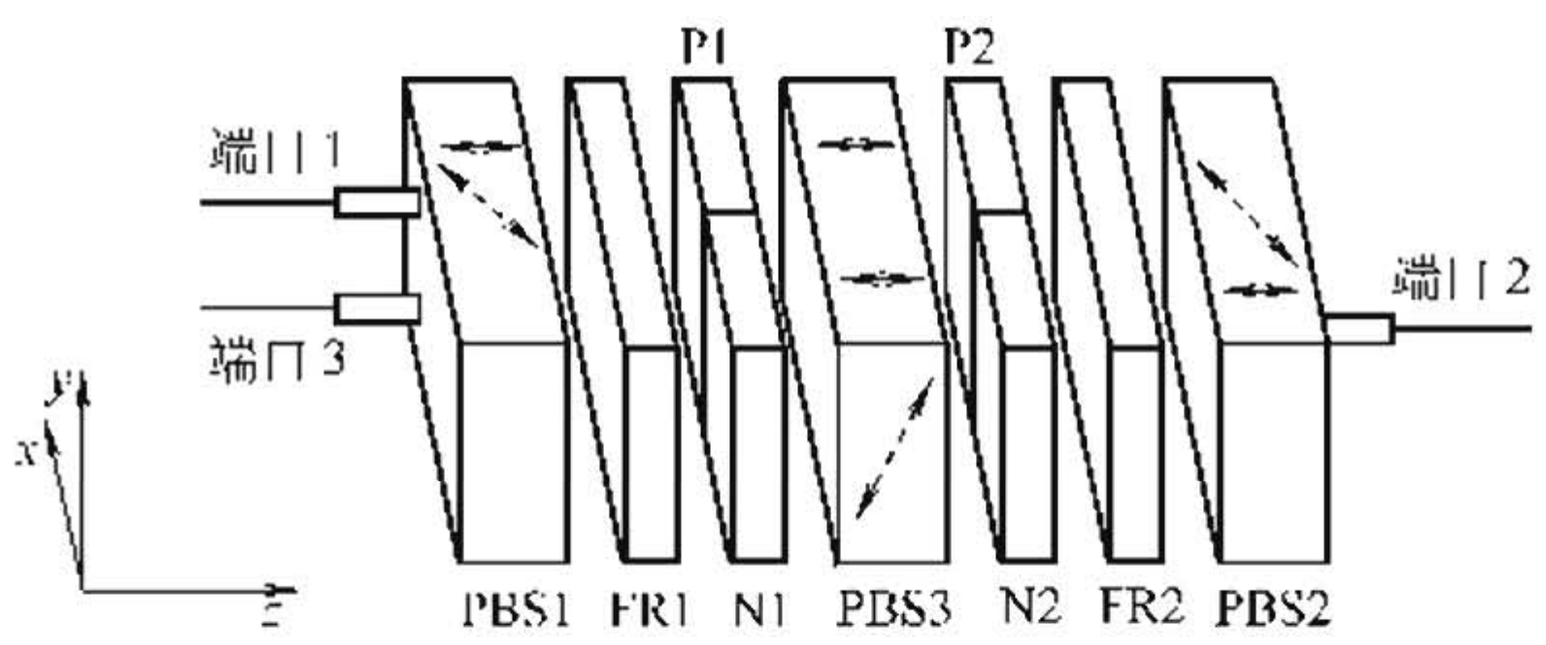


图 10-48　不完全光环行器

和 P2、N1 和 N2 分别为左、右旋 45°互易旋转器。图 10-49、图 10-50 给出了具体光路和光束在各个位置所处的偏振态。

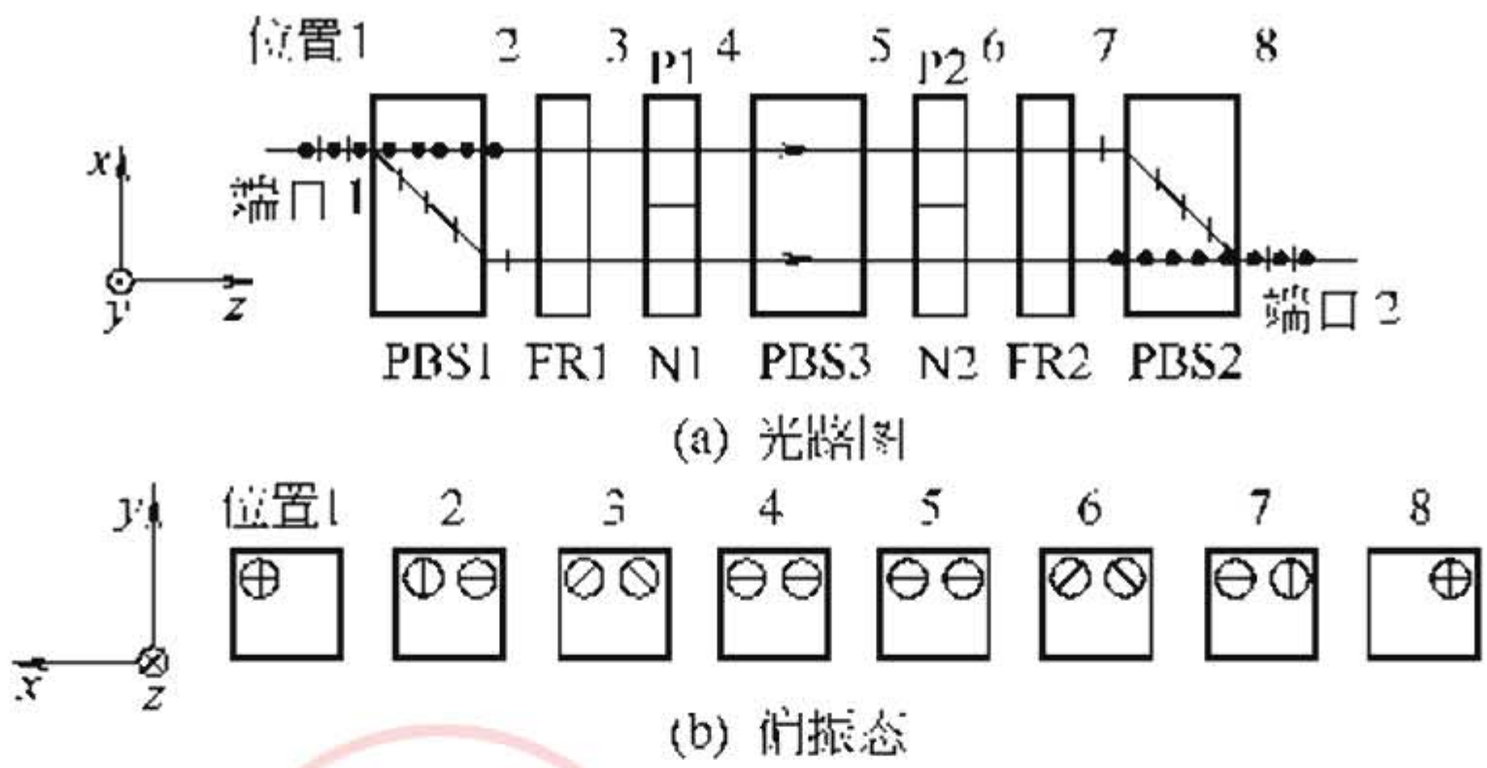


图 10-49　端口 1 到端口 2 的光路图

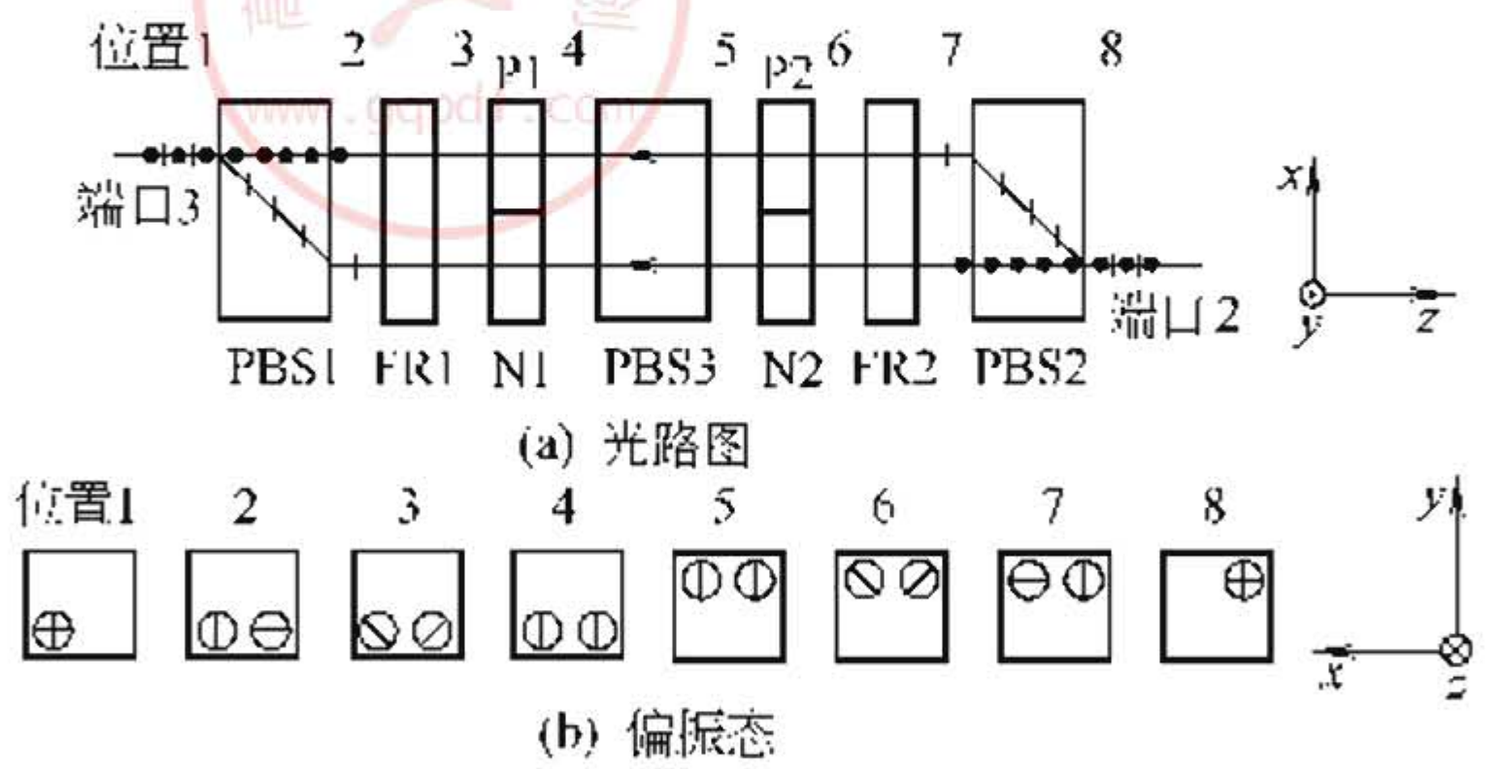


图 10-50　端口 2 到端口 3 的光路图

从端口 1 入射的任意偏振光通过 PBS1 后被分解为两束偏振方向互相垂直的线偏振光，这两束均被 FR1 旋转 45°，振动方向再分别被 P1 和 N1 绕相反方向旋转 45°，成为两束振动方向互相平行的线偏振光［见图 10-49(a) 中的位置 4］，由于该振动方向在 PBS3 中对应的是 *o* 光，故传播方向不发生偏转，接着又被 P1 和 N1 绕相反方向旋转 45°，再次成为两束振动方向相互垂直的线偏振光，经 FR2 旋转 45°后，被 PBS2 合成为一束光从端口 2 输出。

从端口 2 入射的任意偏振光经过 FR2、P2 和 N2 后，也成为两束振动方向互相平行的线偏振光，但由于法拉第旋转的非互易效应，这两束光在 PBS3 中对应的是 *e* 光，所以传播方向发生偏折，

再由 P1 和 N1 将它们转换为两束相互垂直的线偏振光，经 FR1、PBS1 合成一束光从端口 3 输出。

② 四端口完全环行器　四端口完全环行器可实现光从端口 1→2→3→4→1 的传输功能。四端口高隔离度光环行器的示意图如图 10-51 所示，每个端口由光纤（F）、透镜（L）、偏振分束器（PBS）、±45°非互易旋转器（NRR）、＋45°互易旋转器（RRP）和－45°互易旋转器（RRM）组成。

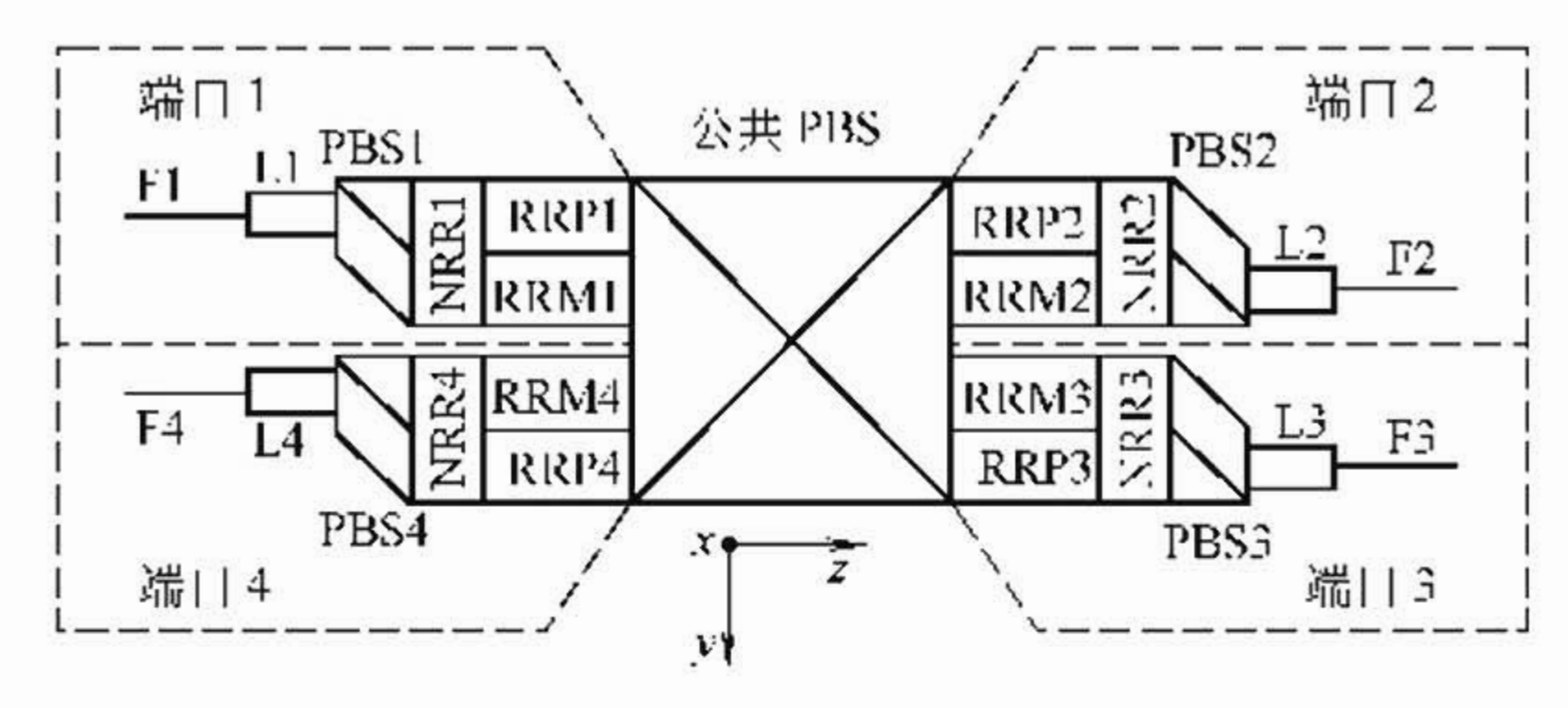


图 10-51　四端口高隔离度光环行器

来自 F1 的光束经 PBS1 后分为两束线偏振光，其中一束光（光束 1）的振动面垂直于 yz 平面，直接通过 PBS1，另一束光（光束 2）的振动面平行于 yz 平面，被 PBS1 折射。光束 1 通过 NRR1 和 RRP1 后，偏振态不发生变化，而光束 2 通过 NRR1 和 RRM1 后，振动面旋转－90°，这样当两束光进入公共 PBS 时，它们的振动面均垂直于 yz 平面，直接通过中央 PBS。光束 1 的振动面在通过 RRP2 和 NRR2 后旋转了 90°，被 PBS2 折射，光束 2 的振动面在通过 RRM2 和 NRR2 后不发生变化，可直接通过 PBS2，从而两束光又合为一束经 L2 耦合进入 F2。

来自 F2 的光束被 PBS2 分为两束线偏振光，一束光（光束 3）的振动面平行于 yz 平面，被 PBS2 折射，另一束光（光束 4）的振动面垂直于 yz 平面，直接通过 PBS2，既然 RRP2 和 RRM2 的位置与 RRP1 和 RRM1 相反，两束偏振光进入中央 PBS 时的振动面均与 yz 平面平行，它们都被中央 PBS 折射，光束 3 经过 RRP3 和 NRR3 后振动面旋转 90°，直接通过 PBS3，光束 4 经过 RRM3 和

NRR3 后偏振态不变，故被 PBS3 折射，从而两束光均被耦合进入 F3。

端口 3 到端口 4、端口 4 到端口 1 的传输过程与上述相似。

10.3.3 磁光存储材料的应用

磁光记录的研究工作始于 1957 年，当时由 Willianms 等人使用蒸发的 MnBi 薄膜作为记录材料，用一只加热笔进行写入实验，通过磁光效应来观察磁畴的写过程。此次实验奠定了磁光记录的基础，但由于相关技术（如激光技术、精密加工技术、信号处理技术等）研究没有跟上，使得磁光记录技术在此期间发展缓慢。到了 20 世纪 70 年代，随着整个国际社会的生产能力和技术水平的提高，以及磁光记录技术基础研究的完善，磁光记录得到了巨大的发展。20 世纪 80 年代，第一代实用化磁光盘问世，此后十多年间，从技术性能上，磁光盘产品从第一代发展到第四代，单盘存储容量增加十多倍。从产业规模上，各种尺寸的磁光盘年产量上亿张，并成为计算机可移动外部存储的主流产品之一。

磁光存储的基本原理是利用热磁效应来改变微小区域的磁化矢量取向。磁光存储薄膜的磁化矢量必须垂直于膜面（各向异性常数 $K_\mu>0$），如果它的初始化状态排列规则，如图 10-52（a）所示一致向上，当一经光学物镜聚焦为 1μm 左右的激光束瞬时作用于该薄膜的某一点时，此点的温度急剧上升，超过薄膜的居里温度 T_c 后，其自发磁化强度消失（$M=0$）；激光作用终止后温度下降，低于 T_c 温度后，磁化矢量方向被感应生成，并与施加的偏磁场（H_b）方向相一致（向下）。因为薄膜的矫顽力（H_c）大于 H_b，所以偏场不会改变薄膜其他未经

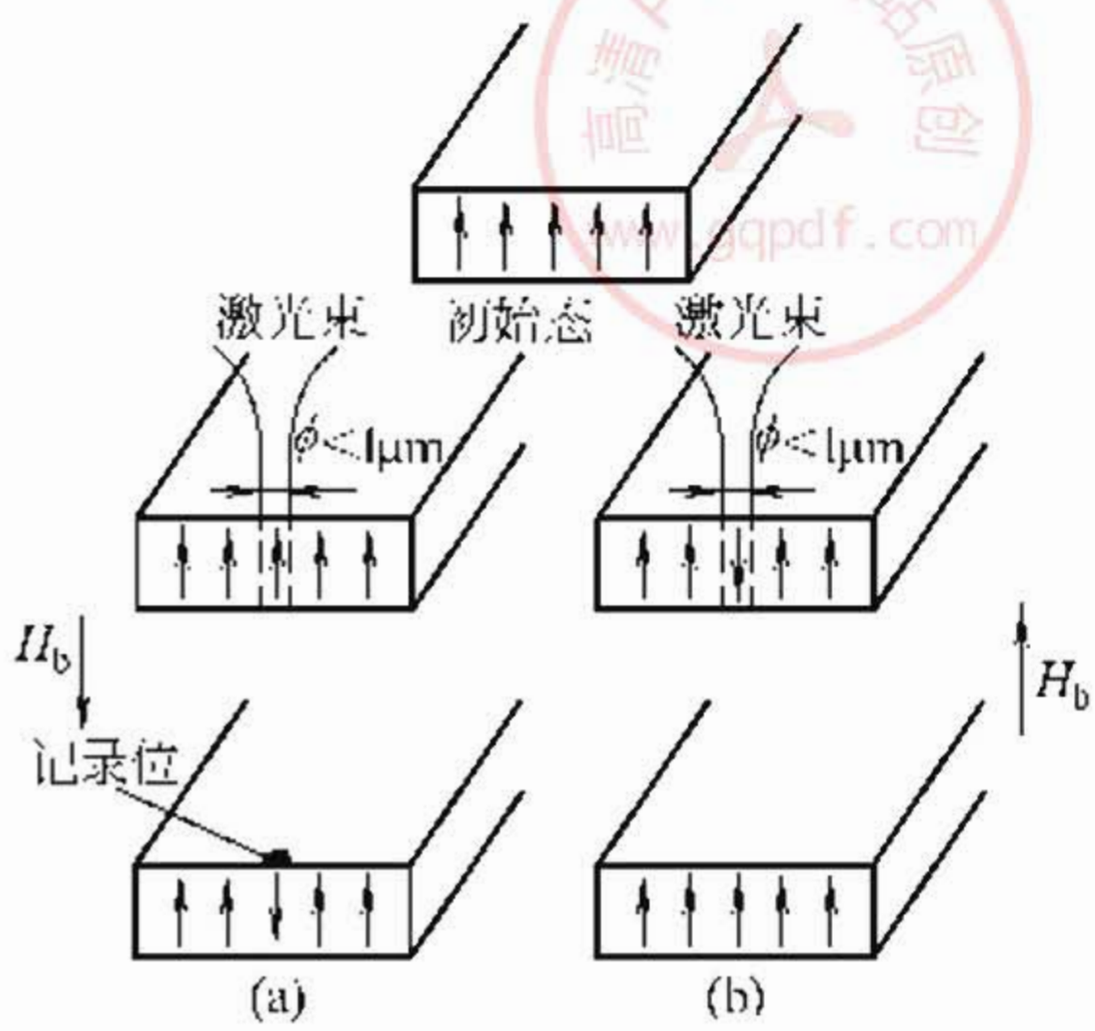


图 10-52 磁光记录（a）和擦除（b）过程示意图

记录区域的磁化矢量方向。如果定义向上排列的磁化矢量作为计算机二进制的“0”，则经激光瞬时照射后向下排列的磁化矢量就是“1”，利用热磁效应实施了二进制的数字记录。改变 H_b 方向，经同一激光作用后就可逐点擦除已被记录的信息位［图 10-52（b）］。

用极克尔效应或法拉第效应对磁光盘的记录信息进行读出。一束线偏振光入射在磁化强度垂直于磁性薄膜的表面，由于克尔效应，反射光将变成椭圆偏振光，由于左右圆偏振光的折射率不同，偏振面旋转一角度 θ_K，它正比于磁化强度（M）。法拉第效应是指一束线偏振光沿着物质的磁化方向透过时，偏振面旋转的角度 θ_F，它与物质的厚度和沿光束前进方向的磁化强度大小成正比。

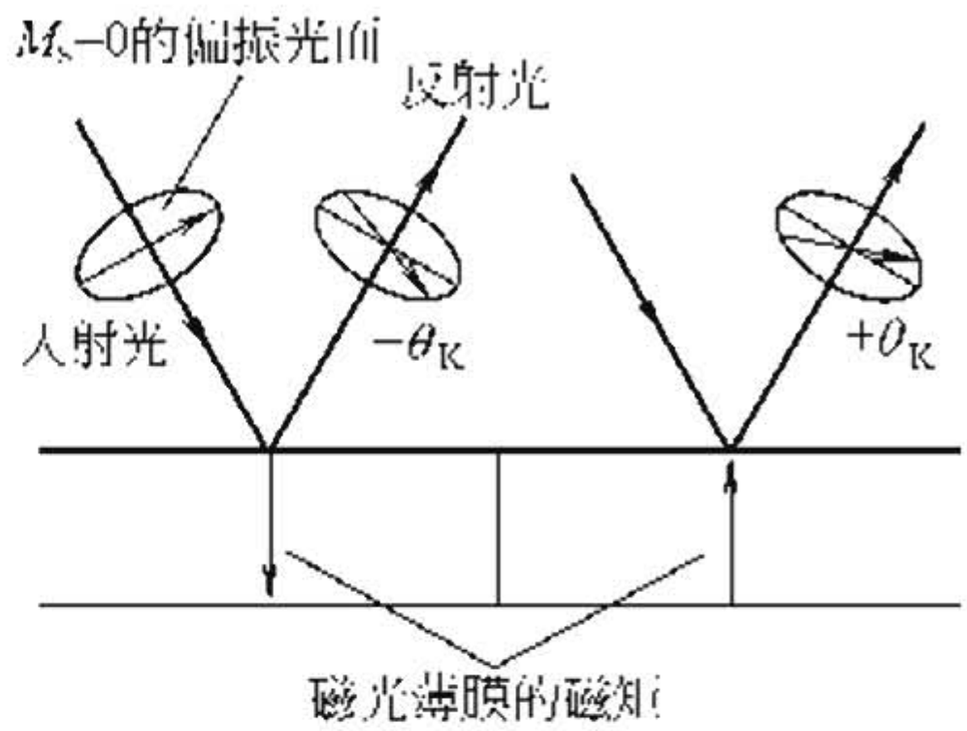


图 10-53　磁光盘的极克尔效应读出示意图

图 10-53 示出磁光盘极克尔效应读出的原理。当入射光 I_o 在记录面反射后，其偏振面对应于向上和向下的磁化方向将旋转 θ_K 和 $-\theta_K$。如薄膜的反射率为 R，其光强表示为：

$$I = I_o R \sin^2(\theta \pm \theta_K) \tag{10-32}$$

其中 θ 为起偏器的角度。代表“1”和“0”的上、下磁化方向信号差为：

$$\Delta I = I_o R[\sin^2(\theta + \theta_K) - \sin^2(\theta - \theta_K)] = I_0 R \sin 2\theta \sin 2\theta_K \tag{10-33}$$

显然，当 $\theta = 45°$ 时，ΔI 为最大。

参　考　文　献

1　S. Geschwind. *Phys. Rev.* 1961，121：363

2　S. Geller，M. A. Gilleo. *J. Phys. Chem. Solids.* 1957，3：30

3　G. P. Espinosa. *J. Chem. Phys.* 1962，37：2344

4　S. Geller，H. J. Williams，R. C. Sherwood. *Phys. Rev.* 1961，123：1692

5　S. Geller，H. J. Williams，G. P. Espinosa，R. C. Sherwood. *Phys. Rev.* 1964，136：A1650

6　M. D. Sturge，E. M. Gyorgy，R. C. LeCraw，J. P. Remeika. *Phys. Rev.* 1969，

180：413
7 S. Geller，1967，Z. Kristallogr. 125：1.
8 R. D. Shannon，C. T. Prewitt. *Acta Crystallogr*. 1969，B25：925
9 M. A. Gilleo，S. Geller. *Phys. Rev*. 1958，110：73
10 S. Geller，H. J. Williams，R. C. Sherwood，J. P. Remeika，G. P. Espinosa. *Phys. Rev*. 1963，131：1080
11 S. Geller，J. P. Remeika，R. C. Sherwood，H. J. Williams，G. P. Espinosa. *Phys. Rev*. 1965，137A：1034
12 D. L. Wood，J. P. Remeika. *J. Appl. Phys*. 1967，38：1038
13 B. Johnson. A. K. Walton. *Brit. J. Appl. Phys*. 1965，16：475
14 C. F. Buhrer. *J. Appl. Phys*. 1969，40：4500
15 K. Shinagawa，S. Taniguchi. *Japan. J. Appl. Phys*. 1974，13：1663
16 R. C. Booth，et al.，*Phys. D：Appl. Phys*. 1984，17：579
17 张志良，张守业，徐明祥．红外与毫米波学报，1996，15：469
18 H. Takeuchi，K. Shinagawa，S. Taniguchi. *Japan. J. Appl. Phys*. 1973，12：465
19 K. Shinagawa，H. Takeuchi，S. Taniguchi. *Japan. J. Appl. Phys*. 1973，12：466
20 H. Takeuchi，S. Ito，I. Mikami. S. Taniguchi. *J. Appl. Phys*. 1973，44：4789
21 G. Zamnarchi，P. F. Bongers. *J. Appl. Phys*. 1969，40：1230
22 B. T. M. Willis，H. P. Rooksby. *Proc. Phys. Soc*. 1954，B67：290
23 たとえばD. Chen，R. L. Aagard. *J. Appl. Phys*. 1970，41：2530
24 R. L. Aagard，T. C. Lee，D. Chen. *Appl. Opt*. 1972，11：2133
25 A. M. Stoffel. *J. Appl. Phys*. 1969，40：1238
26 R. L. Comstock，P. H. Lissberger. *J. Appl. Phys*. 1970，41：1397
27 A. M. Stoffel，J. Schneider. *J. Appl. Phys*. 1970，41：1405
28 E. Sawatzky. *IEEE Trans. Magn*. 1971，MAG-7：374
29 E. Sawatzky. *J. Appl. Phys*. 1971，42：1706
30 E. Sawatzky，G. B. Street. *IEEE Trans. Magn*. 1971，MAG-7：377
31 R. C. Sherwood，E. A. Nesbitt，J. H. Wermick，D. D. Bacon，A. J. Kurtzig，R. Wolfe. *J. Appl. Phys*. 1971，42：1704
32 E. Sawatzky，G. B，Street. *J. Appl. Phys*. 1973，44：1789
33 A. Balbin Villaverde，E. C. C. Vasconcellos. *Applied Optics*，1982，21：1347
34 Z. V. Shirokshina，M. N. Gromova. *Sov. J. Opt. Technol*. 1987，53（12）：727
35 Ernst Feldtkeller. *IEEE Trans. Magn*. 1972，MAG-8：481
36 片山利一，宫崎美津雄，有宗久男，芝田次男．日本应用磁气学会志．1984，8（2）：121
37 Y. Choe，S. Tsunashima，T. Takayama，S. Uchiyama. *J. Magn. Soc*. JPn. 1987，11，Supplement，No. S1：273
38 刘公强，刘湘林．光学学报，1984，4（7）：588
39 P. K. Tien，R. J. Martin，R. Wolfe，R. C. Le Craw，S. L. Blank. *Appl. Phys. Lett*.，

1972, 21 (8): 394
40 D. Young, C. S. Tsai. *Appl. Phys. Lett.*. 1988, 53: 1696.
41 K. Blanke, B. Luhrmann, U. Wallenhorst, H. Dotsch, W. Tolksdorf. *Phys. Status Solidi A*. 1991, 124: 359
42 A. Prabhakar, D. D. Stancil. *Appl. Phys. Lett.*. 1997, 71 (2): 151
43 T. Sawa, K. Kurosawa, T. Kaminishi. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1990, 5 (2): 884
44 李红斌. 光子学报, 1996, 25 (12): 1109
45 王政平, 孙维民. 光子学报, 1996, 25 (9): 831
46 盛珑, 高桦, 郭志忠. 光学学报, 1998, 18 (11): 1518
47 Y. N. Ning, B. C. B. Chu, D. A. Jackson. *Optics Letters*. 1991, 16 (24): 1996
48 X. Fang, R. O. Claus, *J. Lightwave Technol*. 1996, 14 (7): 1664

第 11 章　微波磁性材料

11.1　微波铁氧体材料

11.1.1　旋磁介质和旋磁效应

（1）旋磁介质-微波铁氧体材料　微波铁氧体材料又称为旋磁材料，可简单定义为工作于微波频段、高电阻率的磁性材料。目前其工作频率的低端已延伸到几十兆赫，高端扩展到500GHz。在微波频段，金属磁性材料因其低电阻率、趋肤效应等原因，不能作为旋磁介质用。

微波铁氧体在微波技术中占有重要地位并得到了广泛应用。利用微波铁氧体的旋磁效应已制成了多种微波器件，如隔离器、环行器、移相器、调制器等线性器件，以及振荡器、倍频器、限幅器等非线性器件。这些器件的性能，在很大程度上取决于微波铁氧体材料的选择及其合理利用。常用微波铁氧体材料有石榴石、尖晶石、六角晶系多晶、单晶与薄膜材料。

（2）旋磁效应及有关特性

① 磁化强度的进动　电子的自旋和轨道运动形成了电子的自旋磁矩和轨道磁矩。在晶场中，电子的轨道磁矩处于“冻结”状态。所以，对旋磁性而言，一般只需考虑电子的自旋磁矩。在磁场中，自旋磁矩 $\boldsymbol{S}$ 与 $\boldsymbol{H}$ 之间的相互作用力矩 $\boldsymbol{L}=\mu_0\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{H}$ 会使得电子自旋角动量矩 $\boldsymbol{G}$ 发生变化，$\mathrm{d}\boldsymbol{G}/\mathrm{d}t=\boldsymbol{L}$，又因 $\boldsymbol{S}$ 与 $\boldsymbol{G}$ 之间有 $\mu_0\boldsymbol{S}/\boldsymbol{G}=-\gamma$ 的关系，γ 称为旋磁比［对电子自旋，$\gamma=\mu_0 g|e|/2m_e=2.21\times10^5\ \mathrm{m/(A\cdot S)}$，$g=2$］，则产生了电子自旋磁矩绕磁场所作的右旋进动

$$\mathrm{d}\boldsymbol{S}/\mathrm{d}t=-\gamma\boldsymbol{S}\times\boldsymbol{H} \tag{11-1}$$

此进动称为拉摩（Larmor）进动，进动角频率 $\omega_0=\gamma H$，频率 $f_0=\gamma H/2\pi$，$\gamma/2\pi=3.52\times10^4\ \mathrm{Hz/(A/m)}$。

物质的宏观磁性由磁化强度 $\boldsymbol{M}$（单位体积的总磁矩）来表示。铁氧体的磁矩主要来自过渡族金属阳离子未满壳层（3d）不成对电子的自旋磁矩。磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 作为自旋磁矩的集合体，在磁场中也会受到力矩 $\boldsymbol{L}=\mu_0\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}$ 的作用，因而产生绕 $\boldsymbol{H}$ 的右旋进动，见图 11-1。考虑到实际上 $\boldsymbol{M}$ 受到的是包括环境磁场在内的有效磁场 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$ 的作用，则 $\boldsymbol{M}$ 的进动方程为：

$$\mathrm{d}\boldsymbol{M}/\mathrm{d}t=-\gamma\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}} \tag{11-2}$$

式中 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}$ 包括外加稳恒磁场 $\boldsymbol{H}_0$、面退磁场 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{D}}$、体退磁场（偶极相互作用场）$\boldsymbol{H}_{\mathrm{d}}$、外加交变磁场 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}$、各向异性等效场 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{a}}$ 等。

对进动方程 Landau-Lifshits 给出了 $T_{\mathrm{D}}=-(\alpha\gamma/\omega)\boldsymbol{M}\times(\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H})$ 的阻尼项，后 Gilbert 修正为：

$$\mathrm{d}\boldsymbol{M}/\mathrm{d}t=-\gamma\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H}_{\mathrm{eff}}+\alpha\boldsymbol{M}\times\mathrm{d}\boldsymbol{M}/\mathrm{d}t \tag{11-3}$$

式中 α 为材料的阻尼系数。Gilbert 阻尼项与 L-L 的是等效的，在计算中使用起来很方便。

② 张量磁导率及铁磁共振　由进动方程式（11-3）出发，设 $\boldsymbol{H}$ 平行于 z 轴，交变场垂直于 z 轴，由对各向同性无限大介质所作出的线性解，根据交变磁场 $\boldsymbol{h}$、交变磁化强度 $\boldsymbol{m}$、交变磁感应强度 b 之间的关系式 $\boldsymbol{m}=\boldsymbol{\chi h}$ 和 $\boldsymbol{b}=\mu_0(\boldsymbol{h}+\boldsymbol{m})=\mu_0\mu\boldsymbol{h}$，可获得张量磁导率[1]

$$\mu=1+\chi=\begin{pmatrix}\mu & -i\kappa & 0\\ i\kappa & \mu & 0\\ 0 & 0 & \mu_z\end{pmatrix} \tag{11-4}$$

式中 χ 为张量磁化率，$\mu_z=1$，复数 $\mu=\mu'-i\mu''$，$\kappa=\kappa'-i\kappa''$，$\mu'=1+\chi'$，$\chi'=\omega_0\omega_{\mathrm{m}}/(\omega_0{}^2-\omega^2)$，$\kappa'=\chi_\alpha{}'=-\omega\omega_{\mathrm{m}}/(\omega_0{}^2-\omega^2)$，$\omega_0=\gamma H$，$\omega_{\mathrm{m}}=\gamma M_{\mathrm{s}}$，忽略阻尼 $\mu''=0$，$\kappa''=0$。

张量磁化率 χ 及张量磁导率 μ 的物理意义在于 x 方向的交变磁场 $\boldsymbol{h}_x$ 不仅能引起 x 方向上的交变磁化强度 $\boldsymbol{m}_x$ 和交变磁感应强度 $\boldsymbol{b}_x$ 还能引起 y 方向上的 $\boldsymbol{m}_y$ 和 $\boldsymbol{b}_y$，这就是旋磁性。

对圆偏振场 $\boldsymbol{h}_\pm$，由 $h_+=h_x+jh_y$，$h_-=h_x-jh_y$，$\boldsymbol{m}_\pm=\chi_\pm\boldsymbol{h}_\pm$ 和 $\boldsymbol{b}_\pm=\mu_0(\boldsymbol{h}_\pm+\boldsymbol{m}_\pm)=\mu_0\mu_\pm+h_\pm$ 可推得正、负圆极化磁导率[1]

高清PDF网站原创 www.gqpdf.com

$$\mu_{\pm}=\mu\mp\kappa \tag{11-5}$$

$\mu_{\pm}$已简化为一标量。复数$\mu_{+}=\mu'_{+}-i\mu''_{+}$，$\mu_{-}=\mu'_{-}-i\mu''_{-}$。$\mu'_{\pm}$和$\mu''_{\pm}$与磁场的关系示于图 11-2。$\mu'_{+}$和$\mu''_{+}$呈现共振特性，$\mu'_{-}=1$与磁场无关，$\mu''_{-}$恒等于零。$\mu_{+}$与$\mu_{-}$的差异构成了铁磁共振、法拉第旋转、场移、差相移等非互易效应的物理基础，即众多旋磁器件的物理基础。这与电子自旋磁矩绕稳恒磁场的拉摩进动是右旋的，h_{+}也是右旋的有关。

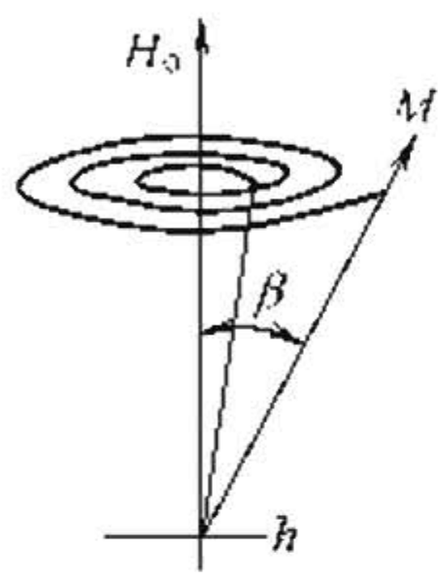


图 11-1　发生铁磁共振时 M 的进动

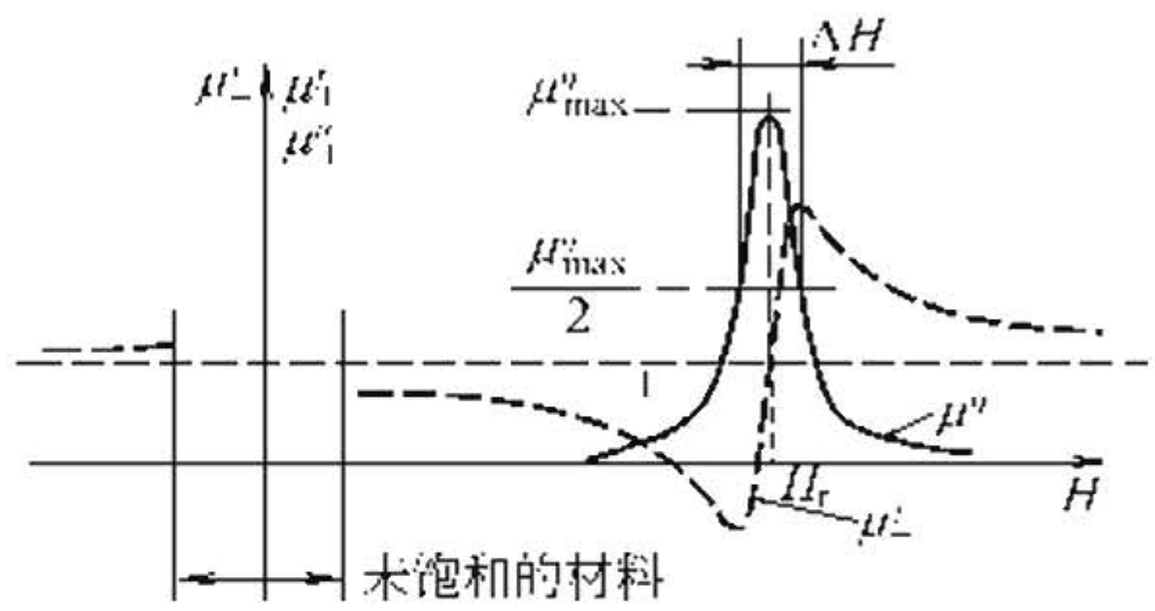


图 11-2　观测到的 μ_{+}'，μ_{+}''，μ_{-}'（$H<0$）与稳恒磁场 H 的关系，μ_{-}''恒为零[2]

铁磁共振的物理图像是：当只有稳恒磁场 $\boldsymbol{H}$ 的作用时，$\boldsymbol{M}$ 绕 $\boldsymbol{H}$ 的进动由于有阻尼，会随着能量的损耗而张角 β 逐渐减小，最后顺至 $\boldsymbol{H}$ 方向。若同时加以垂直于 $\boldsymbol{H}$ 的交变场 $\boldsymbol{h}$ 后，交变场会对进动着的 $\boldsymbol{M}$ 给予能量补充，使 $\boldsymbol{M}$ 以交变场的频率 ω 继续进动下去，作受迫进动。当 $\omega\neq\omega_0$ 时进动张角很小，当 $\omega=\omega_0$ 时，则发生能量的共振吸收，能使得进动维持一个较大的张角 β（见图11-1），发生铁磁共振。

铁磁共振的频率与样品的形状有关。由进动方程出发、计入 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{D}}$，Kittle 给出了各向同性均匀小椭球样品磁化强度的自由进动圆频率[3]

$$\omega_{\mathrm{r}}=\{[\omega_0+(N_z-N_x)\omega_{\mathrm{m}}][\omega_0+(N_z-N_y)\omega_{\mathrm{m}}]\}^{1/2} \tag{11-6}$$

其中 $\omega_0=\gamma H_0$，$\omega_{\mathrm{m}}=\gamma M_{\mathrm{s}}$，$N_x$、$N_y$、$N_z$ 分别为椭球三个主轴方向上的退磁因子。

对球型样品，$N_x=N_y=N_z$

$$\omega_{\mathrm{r}}=\omega_0=\gamma H_0 \tag{11-7}$$

③ 非一致进动与自旋波谱　自旋波的概念是于 1930 年提出来的，它是由局域自旋之间存在交换作用而引起的。低温下，由于热扰动等因素的影响，磁性物质中会有某些自旋偏离原来的有序排列方向，这些局部偏离的自旋将绕着稳恒磁场进动。由于有交换作用和磁偶极矩相互作用，局部偏离的自旋的进动将向磁有序体的其他部分传播，这种自旋进动状态的传播就是自旋波。它是磁有序体系中自旋磁矩的集体运动模式。一致进动可以看成是振幅和相位皆相同的自旋磁矩集体进动，自旋波实际上就是振幅不同或相位不同，或两者皆不同的磁矩非一致进动。

自旋波可以被热激发，也可以在线度与自旋波波长相比拟的样品中被线性激发，或在高功率信号下被非线性激发。实验中常可观测到薄膜样品中的满足一定边界条件的自旋波的共振谱。振幅为 m_k^0，波长为 λ_k，波矢为 $\boldsymbol{k}$（$k=2\pi/\lambda_k$）的自旋波可记为 $\boldsymbol{m}_k=m_k^0 e^{j(\omega_{k\cdot k}\cdot r)}$。对于 $k\neq 0$ 的自旋波，计算时必须要考虑交换作用场 H_{ex}和体退磁场 H_d（即偶极相互作用场）。这样，由进动方程出发，设 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}_0+\boldsymbol{m}_k$，略去二次以上的项，便可获得旋转椭球的自旋波本征频率 ω_k，即自旋波谱：

$$\omega_k=[(\omega_0-N_z\omega_m+\omega_{ex})(\omega_0-N_z\omega_m+\omega_{ex}+\omega_m\sin\theta_k)]^{1/2} \quad (11\text{-}8)$$

式中 $\omega_{ex}=\gamma q k^2 M$，$q=2A/M^2$，$A$ 为交换常数，θ_k 为 k 与 H 的夹角（图 11-3）。对给定的磁场 H，可给出如图 11-3 所示的 ω_k 与 k 的关系。图中 $\theta_k=\pi/2$ 和 $\theta_k=0$ 的曲线分别构成了自旋波簇的上、下限。由式（11-8）可知，随 H 的增加自旋波簇将向上移。对自旋波谱的深入研究将有助于探索材料的损耗机制及能量转换渠

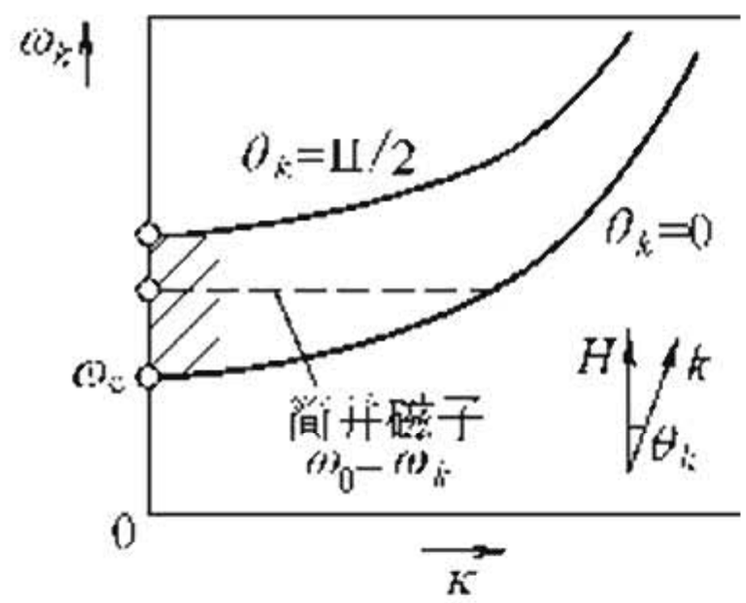


图 11-3　旋转椭球体的自旋波谱

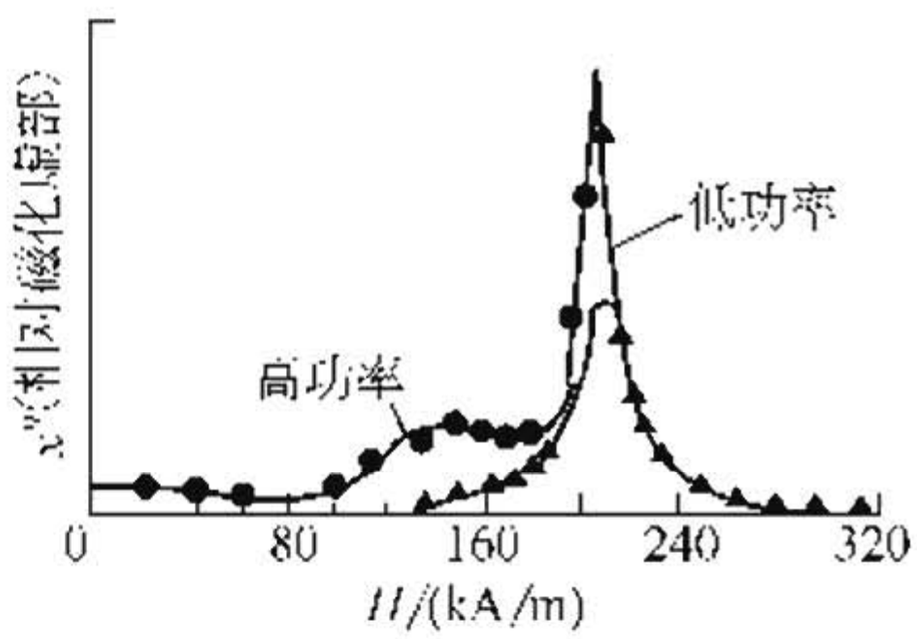


图 11-4　不同功率下的铁磁共振吸收曲线[4]

道。为反映自旋波的损耗，定义自旋波线宽

$$\Delta H_k = 2/\gamma\tau_k = 2\alpha_k\omega_k/\gamma \tag{11-9}$$

式中，τ_k 为自旋波振幅衰减至 1/e 所需的时间，称为弛豫时间；α_k 为自旋波的阻尼系数。

④ 高功率非线性效应　在弱信号下张量磁导率 μ 是不随微波磁场 $\boldsymbol{h}$ 的振幅 h 而变的，即 $\boldsymbol{b}$ 与 $\boldsymbol{h}$ 之间存在线性关系。当微波场振幅增大到超过某一临界值 h_c 以后将发生如图 11-4 所示的微波损耗非线性效应。一级非线性效应为在低场一侧出现次吸收峰，二级非线性效应为主峰饱和，峰值下降、变宽。一级非线性效应的阈值低于二级非线性效应的阈值。在环行器等器件中容易产生一级非线性效应。这时，器件损耗急剧增加或反向隔离骤减，性能恶化。

非线性效应，来自于自旋波的不稳定激发。当 $h>h_c$ 时，将发生一致进动与各种波矢 k 的自旋波的能量耦合。Suhl 的非线性理论[5]以及后来的简化推导[6]都是由保留了相关二级及三级小量的进动方程出发，获得了自旋波振幅开始成指数增长的临界场 h_c 的。计算表明，低场副峰来自于 $\omega_k=\omega/2$ 的自旋波的激发；主峰饱和来自于 $\omega_k=\omega_0=\omega$ 的自旋波的激发。平行激励下（$H/\!/h$）和垂直激励下（$H\perp h$），小球样品出现副峰的最小临界场分别为[2]：

$$h''_{c(\min)} = \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)\Delta H_k \tag{11-10}$$

$$h^{\perp}_{c(\min)} = \frac{\Delta H_k(21\omega/\omega_m)\left(1-\dfrac{\omega_0}{\omega}\right)}{\left[1-\omega_m/2\omega+\left(1+\dfrac{\omega_m^2}{4\omega^2}\right)^{1/2}\right]} \tag{11-11}$$

它们均与自旋波线宽 ΔH_k，即与自旋波运动的阻尼，密切相关。阻尼减少时，自旋波就更容易产生，h_c 就小。理论和实验研究均表明 h_c 与外场 H 有碟形曲线关系[1,2,5,6]，即在出现副峰的次共振场下 h_c 最小，在极限磁场 $H_{\lim}$ 下 h_c 达很高值，$H>H_{\lim}$ 时 h_c 急剧增加，一级非线性效应不再存在。由于 $H_{\lim}$ 小于共振场 H_r，所以在高场器件中一般不存在非线性效应问题。

11.1.2　微波铁氧体材料

（1）微波铁氧体材料的品种和类型　按照晶体结构来分，微波

铁氧体有石榴石、尖晶石和六角晶系三大类，每类又分为多晶、单晶和薄膜等。其中，石榴石型适用于 p-x 频段的器件，尖晶石型适用于 x-K_u 频段的器件，六角晶系适用于要求有高内场的毫米波谐振式器件。

从性能上，微波铁氧体又可分为：小线宽材料、低温度系数材料、高功率材料和旋矩材料等。它们分别适用于低损耗器件、宽温器件、高功率器件和锁式器件。

（2）微波铁氧体材料的主要性能参数

① 饱和磁化强度 M_s　由于材料的张量磁化率 χ 与 $\omega_m(=\gamma M_s)$ 成正比，故 M_s 越高旋磁性能越强。选用 M_s 高的材料有利于提高器件的效率、缩小体积。但 M_s 的增高有可能使低场损耗增加，见图 11-5。低场损耗是由磁晶各向异性场和不饱和磁化情况下复杂磁畴结构形成的局部退磁场所共同引发的共振吸收造成的。这一共振吸收频带的上限

$$\omega_{max}=\gamma(H_a+M_s) \tag{11-12}$$

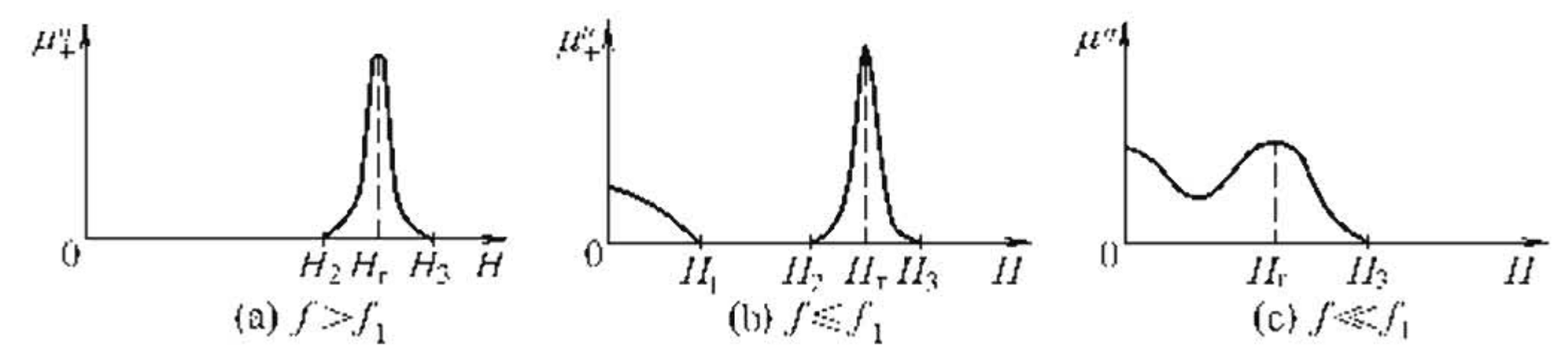


图 11-5　不同频率下微波铁氧体的损耗与磁场的关系，
其中 $f_1=\omega_{max}/2\pi=\gamma(H_a+M_s)/2\pi$

微波铁氧体的 M_s 为约 415～16000A/m。材料如果工作在频率 $\omega<\omega_{max}$ 时，则会出现低场损耗［图 11-5（b）和（c）］，如果工作频率 $\omega>\omega_{max}$ 则不会出现低场损耗［图 11-5（a）］。因此，不同频段的器件对 M_s 有不同的要求，一般取比值 $P=\omega_m/\omega\approx0.6\sim0.8$。

② 铁磁共振线宽 ΔH　μ'' 与 H 的关系曲线中的吸收峰半高宽被定义为铁磁共振线宽 ΔH（图 11-2）。ΔH 窄，则曲线尾部对插入损耗的影响就小，更便于器件将工作点选在 μ_+ 与 μ_- 差值足够大的磁场下。

铁磁弛豫理论[7]认为 ΔH 源于样品中存在着的各种磁不均匀性所引起的磁矩一致进动与自旋波之间的能量耦合，即由 $k=0$ 的磁子到简并态 $k\neq0$ 的磁子的散射。多晶线宽 ΔH_{pol} 主要来源于各向异性线宽 ΔH_a、气孔致宽 ΔH_p 以及固相反应不完全致宽 ΔH_{inc}：

$$\Delta H_{pol}=\Delta H_{int}+\Delta H_a+\Delta H_p+\Delta H_{inc} \tag{11-13}$$

式中第一项 ΔH_{int} 为内禀线宽，$\Delta H_a\approx2.07(K_1/\mu_0M_s)^2/M_s$[8]，$K_1$ 为各向异性常数，$\Delta H_p\approx1.5(4\pi M_s)p$[9]，$p$ 为气孔率，$\Delta H_{inc}\approx1.5(4\pi M_s)p_{eff}$[10]，$p_{eff}=\langle(M)^2\rangle/\langle M\rangle M$。$\Delta H_a$ 是由各个晶粒随机取向带来的磁晶各向异性内场起伏所造成的；ΔH_p 是由气孔和另相周围磁极引起的杂散退磁场造成的；ΔH_{inc} 是由固相反应不完全所带来的化学的和磁的不均匀性造成的。ΔH_{inc} 的贡献往往大于 ΔH_p 的贡献[10]，降低 ΔH_{inc} 和 ΔH_p 的共同途径是提高工艺水平。通过采用降低 K_1 的离子代换和适当的晶粒长大的方法，我国研制出了在 1.7GHz 下 $\Delta H=40$A/m（0.5Oe）、9.3GHz 下 $\Delta H=112$A/m(1.4Oe) 的小线宽石榴石材料[11,12]，为报道过的最小 ΔH[13,14]。

③ 有效线宽 ΔH_{eff}　对工作在非共振区的器件来说，为反映材料在工作磁场下的真实损耗特性，引入了有效线宽 $\Delta H_{eff}[=2\alpha(H)\omega/\gamma(H)]$ 的概念[15,16]。对给定的磁场 H，有效线宽 ΔH_{eff} 定义为：

$$\Delta H_{eff}(H)=2M_s I_m(1/\chi_+) \tag{11-14}$$

式中 $I_m(1/\chi_+)$ 表示正圆极化磁化率倒数的虚部。这就是说非共振 ΔH_{eff} 直接与 μ'' 成正比，即 ΔH_{eff} 小，则磁损耗低。

铁磁弛豫理论[7]认为，由于在自旋波簇之外，不存在一致进动到中 k 自旋波的双磁子散射，非共振 ΔH_{eff} 应与晶粒尺寸、气孔率等磁不均匀性无关，而实验结果却是密切相关[15~17]。对此我们最近提出了非共振 ΔH_{eff} 来源于晶粒表层自旋波共振激发的理论模型[18,19]，解释了有关实验结果，并指出降低 ΔH_{eff} 的主要途径是减少晶粒表层的体积分数 V_s。

④ 自旋波线宽 ΔH_k　如前所述，ΔH_k 是微波铁氧体峰值功率承受能力的度量，ΔH_k 可由测量平行激励下高功率临界场的最小值按式（11-10）来确定。提高 ΔH_k 的途径有两条：一是加入快弛

豫杂质离子，但这同时也带来了 ΔH 和 ΔH_{eff} 的增大；二是细化晶粒，但晶粒细化工艺比较复杂，实验表明 ΔH_k 与晶粒尺寸 a_0 有 $\Delta H_k \propto a_0^{-1}$ 的关系[16]。

⑤ 介电损耗 $\tan\delta_\varepsilon$ 和相对介电常数 ε_r　微波频率下的介电损耗角正切 $\tan\delta_\varepsilon=\varepsilon''/\varepsilon'$ 用来表示旋磁介质的介电损耗，其中 ε'' 和 ε' 分别为复介电常数的虚部和实部。相对介电常数 $\varepsilon_r=\varepsilon'/\varepsilon_0$，$\varepsilon_0$ 为真空介电常数。如果在铁氧体中存在有二价铁离子 Fe^{2+}，则会发生与三价铁离子 Fe^{3+} 之间的电子跳跃

$$Fe^{3+}+e \rightleftharpoons Fe^{2+} \tag{11-15}$$

造成传导和电损耗。为此必须保持微波铁氧体材料的化学成分，不出现高电导率的杂相。目前大多 $\tan\delta_\varepsilon<(2\sim5)\times10^{-4}$，这时介电损耗对材料总损耗的贡献则可忽略不计。微波铁氧体的相对介电常数 ε_r 一般为 12～16。

⑥ 居里温度 θ_f 和 M_s 的温度系数 α　M_s 在给定温度区间 $\Delta T=T_1-T_2$ 内的温度系数 α 定义为：$\alpha=\Delta M_s/M_s(\mathrm{RT})\Delta T$，其中 $\Delta M_s=M_s(T_1)-M_s(T_2)$，$M_s(\mathrm{RT})$ 为 M_s 的室温值。旋磁器件的工作温度范围及平均功率承受能力均与材料的温度系数和居里温度有关。这就要求材料的 α 小或 θ_f 高。

⑦ 剩磁比 R 及矫顽力 H_c　在锁式移相器中，材料工作于剩磁状态。因此要求磁滞回线要有良好的矩形度，即要求剩磁比 $R=B_r/B_m$ 要高，并且还要求矫顽力 H_c 要低、剩余磁感应强度 B_r 的温度系数要低等。

（3）常用微波铁氧体材料

① 石榴石型微波铁氧体材料　石榴石型微波铁氧体材料是目前在微波领域中有着广泛的应用。它具有很窄的铁磁共振线宽、低的介电损耗以及小的磁晶各向异性。通过离子代换可以较独立地改变其 M_s、ΔH、ΔH_k 等参数。表 11-1 和表 11-2 分别列出了窄线宽和高功率石榴石材料的性能。

石榴石属体心立方系的 O_h^0(Ia3d) 空间群，一个晶胞内含有 8 个分子。阳离子分别位于氧离子 O^{2-} 构成的十二面体、八面体和四面体中心，它们分别被称为 c、a、d 位。单个晶胞总共含有 24

表 11-1　窄线宽石榴石的性能

材料牌号	M_s /(kA/m)	$4\pi M_s$/G	θ_f/℃	ΔH/(kA/m)或 Oe		ε_r	$\tan\delta_\varepsilon$ /$\times10^{-4}$	$\alpha_{-55\sim85}$ /(%/℃)
19G	153	1920	245	0.8～1.2	10～15	14.2	<2	0.33
16G	127	1600	225	0.8～1.2	10～15	14.0	<2	0.30
14G	112	1400	215	0.8～1.2	10～15	13.8	<2	0.27
12G	96	1200	210	0.8～1.2	10～15	13.8	<2	0.27
10G	80	1000	205	0.8～1.2	10～15	13.5	<2	0.30
8G	64	800	190	0.8～1.2	10～15	13.0	<2	0.32
XX14C	111	1400	130	<0.32	<4	13.5	<2	—
XX12C	96	1200	120	<0.24	<3	13.5	<2	—

表 11-2　高功率复合 YGdIG 性能

材料牌号	M_s /(kA/m)	$4\pi M_s$ /G	θ_f /℃	ΔH/(kA/m) 或 Oe		ΔH_k/(kA/m) 或 Oe		ε_r	$\tan\delta_\varepsilon$ /$\times10^{-4}$	$\alpha_{-55\sim85}$ /(%/℃)
X127PI	127	1600	280	3.2	40	0.29	4	14.5	<2	0.20
X127PII	127	1600	280	6.0	75	0.76	11	14.5	<2	0.20
X112P	112	1400	265	4.0	50	0.39	5	14.5	<2	0.16
X96P	96	1200	245	4.8	50	0.52	6	14.5	<2	0.10
X80P	80	1000	245	4.8	60	0.68	9	14.0	<2	0.09
X68P	68	850	235	6.0	75	0.63	8	13.8	<2	0.11

个 c 位、16 个 a 位和 24 个 d 位。钇铁石榴石（YIG）是发现得最早（1956 年）的石榴石铁氧体，分子式是 $Y_3Fe_5O_{12}$，也可以写成 $\{Y_3\}[Fe_2](Fe_3)O_{12}$，其中｛ ｝、［ ］、和（ ）分别表示 c、a 和 d 位。实际应用的多为复合钇铁石榴石 YIG_s，其分子式可写为：

$$\{Y^{3+}_{3-r-b}R^{m+}_{r}B^{n+}_{b}\}[Fe^{3+}_{2-a}A^{p+}_{a}](Fe^{3+}_{3-d}D^{q+}_{d})O_{12} \quad (11\text{-}16)$$

式中 m、n、p 和 q 分别表示这些阳离子的价数，分子式的电价平衡条件为：

$$m\mathrm{r}+n\mathrm{b}+p\mathrm{a}+q\mathrm{d}-3(\mathrm{r}+\mathrm{b}+\mathrm{a}+\mathrm{d})=0 \quad (11\text{-}17)$$

石榴石的 d 位次晶格磁矩 M_d 与 a 位和 c 位次晶格磁矩 M_a 和 M_c 成

反平行排列。在 YIG 中 Y^{3+} 是非磁性离子，总磁矩 $M=M_d-M_a$，d 位磁矩占优势。在含有稀土离子的 $YRIG_s$ 中，$M=M_c-(M_d-M_a)$，由于 a-d 超交换作用最强，而 c-d 位的较弱，随温度的增加 M_c 比 M_d-M_a 下降的速度要快，因而有可能出现 M_s 的补偿点 θ_c，在 θ_c 处 $M_s=0$，在 $T<\theta_c$ 时 M_c 占优势，$T>\theta_c$ 时（M_d-M_a）占优势。通过适当的离子代换可在 θ_c 与 θ_f 之间获得非常低的温度系数 α。所以，常用 Gd^{3+} 取代 Y^{3+} 来改善 M_s 的温度系数。Gd^{3+} 在降低 M_s 的同时不会降低 θ_f，但却会带来 ΔH 的增大。Al^{3+}、Ga^{3+}、Ge^{4+}、V^{5+} 等非磁性离子常用来取代 d 位 Fe^{3+} 以降低 M_s，但同时由于他们对 Fe^{3+}-Fe^{3+} 相互作用的稀释而使 θ_f 有所降低。用离子半径较大的 In^{3+}、Sn^{4+}、Zr^{4+} 等取代 a 位 Fe^{3+} 可降低各向异性常数 K_1，使 ΔH 减小，但要付出 θ_f 显著降低的代价以及 M_s 的一些增加。微量 Dy^{3+}、Ho^{3+} 等快弛豫杂质离子的取代可用来提高 ΔH_k，但是 ΔH 和 ΔH_{eff} 也要加大。BiCaVIG 是一类不含 Y 的石榴石，具有低 M_s 高 θ_f 的优点。由于分子式 $Bi_{3-2x}Ca_{2x}Fe_{5-x}V_xO_{12}$ 中 $x>1.0$，它是 a 位磁矩占优势的石榴石。

② 尖晶石型微波铁氧体材料　尖晶石型铁氧体是最早（1952 年）应用于微波铁氧体器件的材料。常用的有 Ni(Zn) 系和 Li(TiZn)系铁氧体。它们的优点是磁化强度比石榴石的高，M_s 最高可达 415kA/m，而石榴石的 M_s 最高为 155kA/m，因而尖晶石材料可用于毫米波器件。尖晶石的分子式可写为 $X_x^m Y_y^n Z_z^p \cdots O_4$，其中 m、n、p 等为这些阳离子的价数。分子式应满足如下条件：

$$x+y+z+\cdots=3, mx+ny+pz+\cdots=8 \qquad (11\text{-}18)$$

尖晶石属立方晶系 O_h^7(F3dm) 空间群。每一晶胞含有 24 个阳离子和 32 个氧离子，相当于 8 个分子，构成了较复杂的面心立方结构。阳离子分布在 A、B 两种不同的晶位上。A 位为四个氧离子构成的四面体中心。B 位为由六个氧离子构成的八面体中心。A、B 位磁性离子间存在强的 A-B 超交换作用，在 0K 下 M_A 与 M_B 成反平行排列。在 Ni 系和 Li 系铁氧体中均为 M_B 占优势。用 Zn^{2+} 对 A 位 Fe^{3+} 的取代可使 M_s 增加，用 Ti^{4+} 或 Al^{3+} 对 B 位 Fe^{3+} 的取代可使 M_s 下降。NiZn 和 LiTiZn 铁氧体的离子分布为：

$$(Zn_x^{2+}Fe_{1-x}^{3+})[Ni_{1-x}^{2+}Fe_{1+x}^{3+}]O_4 \quad (11\text{-}19)$$

$$(Zn_x^{2+}Li_{0.5y}^{1+}Fe_{1-x-0.5y}^{3+})[Li_{0.5-0.5x}^{1+}Ti_y^{4+}Fe_{1.5+0.5x-y}^{3+}]O_4 \quad (11\text{-}20)$$

式中（ ）和［ ］分别代表 A 位和 B 位。

Zn^{2+} 取代有使 K_1 降低的作用，但 θ_f 也降低。通常还加入少量 Co 来降低 K_1、少量 Mn 来改善介电损耗。在 Li 系中还需要加入少量 Bi_2O_3 作助熔剂来提高密度。

Ni 系的特点是因为含有两种磁性离子（Fe^{3+} 和 Ni^{2+}），短程的磁不均匀性使得 ΔH、ΔH_k 都高，适于用作高功率材料。Li 系的特点是磁滞回线的矩形度好，适用于移相器，另外，因其只含一种磁性粒子（Fe^{3+}），ΔH、ΔH_{eff} 较低，适用于低损耗器件。通用 Ni 系和 Li 系铁氧体的性能列于表 11-3，其中 XN 和 Xn 表示 Ni 系，XL 表示 Li 系。

表 11-3　Ni 系、Li 系铁氧体的性能

材料牌号	M_s /(kA/m)	$4\pi M_s$ ±5%G	θ_f /℃	ΔH(±25%) /(kA/m)或 Oe		ΔH_k/(kA/m) 或 Oe		ε_r	$\tan\delta_\varepsilon$ /(×10^{-4})	ρ_{app} /(g/cm^3)
XN52A	414	5200	>360	<8	<100	—	—	13.0	<5	5.20
Xn42P	334	4200	>500	<16	<200	2	<25	12.0	<5	5.30
Xn38P	302	3800	>500	<16	<200	2	<25	12.0	<5	5.30
Xn33P	262	3300	>500	<16	<200	2	<25	12.0	<5	5.30
Xn28P	223	2800	>500	<16	<200	2	<25	12.0	<5	5.30
Xn23P	183	300	>500	<16	<200	2	<25	12.0	<5	5.30
Xn18P	143	1800	>500	<19	<240	2	<25	12.0	<5	5.30
XL52A	414	5200	>450	<13	<160	—	—	15.0	<5	4.80
XL45A	358	4500	>500	<26	<280	—	—	15.0	<5	4.75
XL40A	318	4000	>570	<26	<320	—	—	15.0	<5	4.70
XL32A	254	3200	>400	<20	<250	—	—	15.5	<5	4.60
XL26A	207	2600	>350	<20	<250	—	—	15.5	<5	4.50
XL23A	183	2300	>350	<20	<250	—	—	15.5	<5	4.50

③ 六角晶系微波铁氧体材料　磁铅石型铁氧体又称六角晶系

铁氧体，其结构比较复杂，分为 M、W、X、Y、Z 和 V 型。其中 M 型和 W 型的具有较高的单轴各向异性，因而内场（H_a）较高。用高内场的材料来制作毫米波谐振式器件，可以减小外场。M 型和 W 型六晶系角铁氧体的典型分子式分别为 Ba（Sr）$Fe_{12}O_{19}$ 和 $BaM_2Fe_{16}O_{27}$（M＝Co 或 Ni）。通过 Al^{3+}、Ti^{4+} Me^{2+}（Me＝Zn、Co 等）离子代换可调整其 M_s、H_a 及其温度系数。M 型的适用于共振频率较高的器件，W 型的则稍低。实用材料的 M_s 约为 115～342kA/m；H_a 为 478～2787kA/m，$\tan\delta_\varepsilon<2\times10^{-3}$。

④ 微波铁氧体单晶和薄膜材料　单晶材料的特点是 ΔH 很低，YIG 单晶的 ΔH＝8～30A/m(0.1～0.4Oe)，Li 铁氧体单晶的 $\Delta H\approx$ 80～320A/m(1～4Oe)。单晶材料主要是用在电调滤波器和振荡器中，作谐振子用。目前用得最多的是 YIG 及 YGaIG 单晶小球谐振子。

复合 YIG 单晶薄膜生长于 GGG 基片上，具有生长周期短、易于掺杂、便于加工等优点。优质 YIG 薄膜的 ΔH 也很低，膜厚 5μm 时 ΔH＝12A/m(0.15Oe)，主要用于静磁波延迟线。

11.1.3　微波铁氧体材料的制备工艺

（1）微波铁氧体多晶材料的制备工艺　多晶微波铁氧体材料一般采用氧化物法即普通陶瓷工艺来制备。其工艺流程为：配方设计和计算→配料→球磨→预烧→二次球磨→成型→烧结→磨加工→检测。材料的制备工艺决定了材料的显微结构，如气孔率、晶粒尺寸等，因而制备工艺对 ΔH、ΔH_k 等参数有着重大影响。当配方确定了之后工艺水平就决定了材料性能的优劣。工装设备的配置和工艺参数的选择同等重要。目前多采用砂磨机、行星式球磨机、喷雾干燥、造粒机、双向加压压机及气氛烧结炉等先进设备，以其控制产品质量。

（2）微波铁氧体单晶和薄膜的制备工艺　微波铁氧体单晶的生长方法有区域熔融法、提拉法、助熔剂法等。一般多采用助熔剂法。它是将生长晶体的原材料在高温下溶解于低熔点助熔剂的溶液中，成为均匀的混合溶液；然后，通过缓慢降温形成过饱和溶液、析出晶体。常用的助熔剂有 PbO-PbF_2、B_2O_3-BaO、B_2O_3-Bi_2O_3、

Bi_2O_3-V_2O_5 等系统及其组合系统。为提高晶体的生长质量和体积，常采用加籽晶、加速旋转坩埚等技术。

薄膜单晶材料的制备方法有化学气相沉积法、液相外延法和溅射法等。一般多用液相外延（LPE）法，它是将外延膜的相应组分溶于高温熔化的助熔剂中，然后降温，使溶液呈过饱和状态，此时将与薄膜点阵常数和热膨胀系数相近的基片浸入，并迅速旋转，以促使薄膜在衬底上外延生长。生长完毕从熔融体中提出基片，并在接近表面处高速旋转甩去粘在膜上的助熔剂，再慢慢从炉子里提升上来进行表面处理。所用的助熔剂与单晶生长用的相似。

11.1.4 微波铁氧体材料的应用

（1）主要微波铁氧体器件及其工作原理　微波铁氧体器件种类繁多，按微波能量传输方式分，有波导、同轴线、带线和集中参数器件；按工作点分，有低场、高场和谐振场器件等。常用微波铁氧体器件主要有环形器、隔离器、移相器、变极化器、调制器、衰减器、滤波器、振荡器等。

隔离器是两端口非互易器件，由 1→2 端口电磁波能量几乎无衰减，而反相则几乎全被衰减掉。环行器是三端口或多端口的非互易器件，见图 11-6。它只有一个环形方向，如三端口的几乎无反射的传输方向是 1→2→3→1。在环行器的 3 端口加以吸收负载则可构成隔离器。移相器是相控阵雷达中的关键元件。通用的锁式铁氧体非互易移相器的结构为：在矩形波导中轴方向放置一根矩形铁氧体环，环中心穿有激励导线，通以脉冲电流使铁氧体环磁化，脉冲过后铁氧体就处于剩磁工作状态。其相位可通过计算机来精确控制。

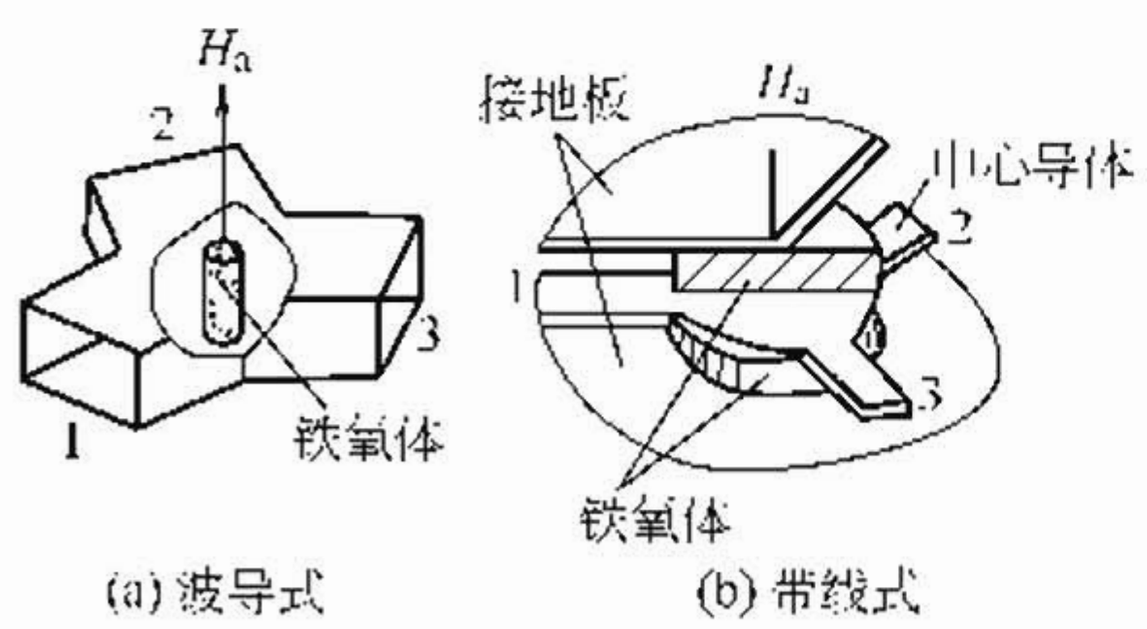


图 11-6　三端环行器

微波铁氧体器件的工作原理主要基于如下旋磁效应。①法拉第旋转效应：在旋磁介质中正负圆偏振波在纵场下（H 平行于电磁波传播方向）的传播相位常数 $\beta_{\pm}=\omega\sqrt{\varepsilon\mu_{\pm}}$，于是线偏振波分解成

的正负圆偏振波 h_+ 和 h_- 分别以不同的相速传播，经过距离 l 后合成的线偏振波的偏振面则发生旋转，旋转角 $\theta=(\beta_- -\beta_+)l$。据此制成了法拉第旋转式环形器、隔离器。②差相移效应：在横向场下，在波导中传播的 h_+ 和 h_- 会因在旋磁介质中的 $\beta_+ \neq \beta_-$ 而使正向和反向传输的电磁波分别产生超前或滞后的差相移，据此制成了差相移式环形器，其特点是可承受非常高的峰值功率，如 10MW。③场移效应：在没有铁氧体样品时，矩形波导中传播的电磁波的场型分布是左右对称的，当将一横向磁化的铁氧体片置于波导一侧时，由于 $\mu_\pm$ 的差异而使正反两方向传播的正负圆偏振波的场型分布不再对称。据此制成了场移式隔离器。结环行器也可看成一个圆柱谐振腔，如图 11-7 所示，在 $H=0$ 时结区中激发的驻波是对称的，无环形作用；加上磁场并使 h_+ 最大处 $\mu'_+ \approx 0$，产生场移，调节铁氧体和 H 使驻波沿轴向旋转 30°，则 2 端口有输出，3 端口无输出，形成环行器。④共振效应：谐振式隔离器利用的是把 H 调至 H_r，将铁氧体置于波导中 h_+ 最大处，则正向传播时发生能量共振吸收，反向时因铁氧体处为 h_- 最大，$\mu''_- =0$，无能量吸收，形成隔离器。YIG 单晶滤波器也是利用了谐振子的铁磁共振效应。

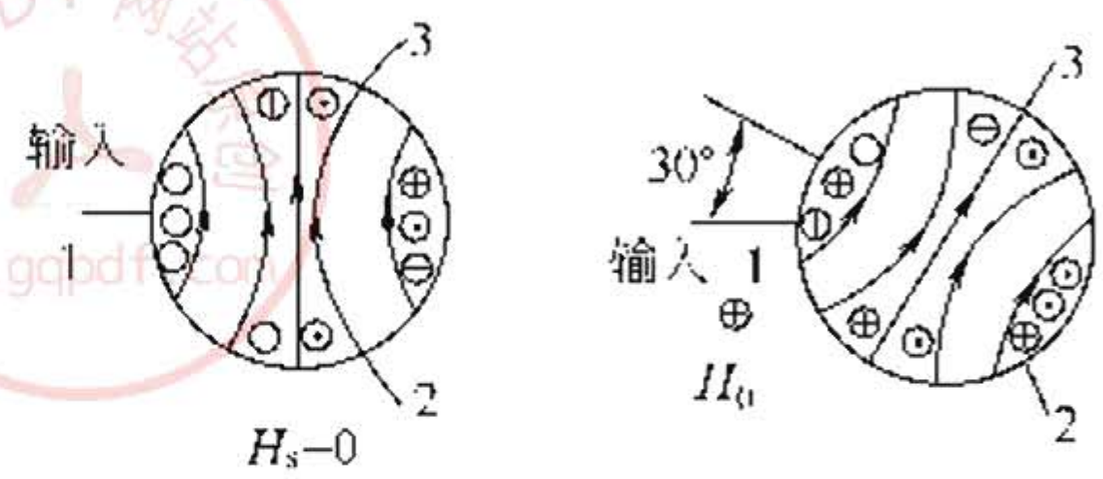


图 11-7　三端环行器的工作模型

（2）微波铁氧体器件的应用　微波铁氧体器件在微波传输通道中担负着调控微波信号的频率、振幅、相位、极化等参数的作用和通道选择作用，主要用于雷达、通信、电子对抗、相控天线、功率分配与合成系统和测试系统中。隔离器、环行器、开关、调制器等作振幅调控和通道选择用；移相器、相位调制器作相位调制用；变极化器用于极化编码、抽样、选择、识别、探测等；振荡器、滤波器、谐振器用作频率调控。

11.1.5　微波铁氧体材料的发展趋势

微波铁氧体器件的发展趋势是组件化、片式化、多功能化、宽带化和高功率。近年来由于移动通信的迅猛发展，推动了一批高性

能表面贴装微波器件及功能模块的问世并获得了广泛应用。其中包括低温共烧铁氧体/陶瓷叠层表面贴装微波器件，如片式叠层天线、片式双工器、片式功率分配器和叠层铁氧体移相器等。用湿化学或其他方法制备的低温共烧微波铁氧体纳米材料、浆料和生坯带等已成为微波铁氧体材料研制的新热点。此外，高功率材料的晶粒细化新工艺、六角晶系铁氧体薄膜、亚毫米波用反铁磁材料等也将有所发展。

11.2 微波吸收材料

11.2.1 微波辐射的物理概念

（1）微波的划分　所谓微波，它也是一种电磁波，只不过在电磁频谱中具有较高的频率即 300MHz～300GHz 的称为微波。而在这宽广的微波波段中，我们便于工作，通常又可分为若干个波段，即：300～1000MHz，称 UHF 超高频；1000～2000MHz，称 L 波段；2000～4000MHz，称 S 波段；4000～8000MHz，称 C 波段；8000～12500MHz，称 X 波段；12.5～18GHz，称 K_u 波段；18～26.5GHz，称 K 波段；26.5～40GHz，称 8mm 波段；频率大于 40GHz 为波长更短的毫米波；频率大于 300GHz 则为亚毫米波，或有的称“超微波”。

（2）微波几个参数的物理概念　从物理学的观点来看，微波的基本特点表现在它和物质的内部运动有着紧密的联系，一般顺磁物质在磁场作用下所产生的许多能级间的能量差额（10^{-5}～10^{-4}eV）恰好落在微波波段电磁波每个量子的能量范围（10^{-6}～10^{-4}eV）之内。既然在这个范围内的量子可以影响分子和原子的能级跃迁，也就可用来研究分子和原子核的结构。同样，在接近绝对温度零度时，每一自由度的热能量也落在这个范围内，所以在低温时，物体吸收一个微波量子，也有可能产生显著的效应。以上两点正是近代微波波谱学和量子电子学所依据的基本物理事实。有了这个基本物理事实，下面就可以来描述微波的几个参数的物理概念。

① 频率 f　每秒的振动次数。在微波波段中，通常以兆赫（MHz）和千兆赫（GHz）为单位来表示。目前国内外研究微波吸收材料的吸收频率均在此波段内，如 1～18GHz 下微波吸收材料吸收特性的研究已经成为当前研究材料的主要方向。随着微波技术的

发展，今后微波吸收材料的研究还会兼顾更高频率 f，如毫米波微波吸收材料的研究。

② 波长 λ　是指电磁波每变化一周所传播的距离。电磁波的波长 λ 和频率 f 之间有下列关系：

$$f\lambda=V \tag{11-21}$$

式中 V 是电磁波的传播速度。在微波吸收材料介质中，电磁波的传播速度取决于材料介质的介电常数 ε 和导磁率 μ。介电常数 ε 通常可写成 $\varepsilon=\varepsilon_0\varepsilon'$。$\varepsilon_0$ 称为绝对介电常数（真空介电常数），是一个物理常数，其值等于充以介质的电容器和该电容器放在真空中电容量之比。同样，导磁率 μ 也可表示成 $\mu=\mu_0\mu'$，μ_0 为真空磁导率；μ' 称为相对磁导率，指介质的磁导性能与真空磁导性能之比。

电磁波在介质中的传播速度是

$$V=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon'\mu'}} \tag{11-22}$$

其中 c 是电磁波在真空中的传播速度，即光速，其值等于 3×10^8 m/s。空气的相对介电常数和磁导率可以认为等于 1，因此空气中频率和波长的关系可简写成

$$\lambda=\frac{300}{f} \tag{11-23}$$

式中，λ 以 m 为单位；f 以 MHz 为单位。

③ 电导率 σ　它是材料介质电阻率的倒数，表征介质的导电能力。若材料介质是理想介质，（绝缘体），则 $\sigma=0$。在电导率 σ 不等于零时，电磁波的波长、速度和穿透深度等，都随不同介质而异。

④ 极化　极化是指电磁波中电场矢量 E 的取向。传播方向和电场矢量 E 所组成的面称为“极化面”。若 E 和传播方向保持在一个平面内，此极化可称为“线极化”。线极化又分成水平极化（电场 E 在水平方向）和垂直极化（电极 E 在垂直方向）。若矢量 E 的大小不变，但其方向随时间作周期性改变，则称为圆极化，即矢量的终端在与传播方向垂直的平面上投影是一个圆。当矢量 E 的方向和大小均改变时，构成椭圆极化。

⑤ 反射系数　当电磁波传到导体时，电磁波会反射回去。反

射波与入射波的比值称为反射系数。介质中存在着入射波和反射波，这两个波的合成就形成了一个驻波。驻波虽然也随时间不停地变化，但它不是行波，沿入射方向没有能量的传播。在出现驻波时，电场和磁场就呈现出一系列相互交替的最大值和最小值。在合成的场合下，电场最大值和最小值之比，也称驻波系数。平面电磁波以与介质的分界面成一角度从一种介质传入另一介质时，有一部分波被反射，一部分波透射到另一介质，但这时透射波的传播方向不同于入射波的方向，通常把这种现象称为折射，把进入另一介质的波称为折射波或透射波。此外，电磁波在传播过程中遇到障碍物时，能够绕过障碍物前进，这种现象称为波的绕射。电磁波对物体的绕射，随着电磁波波长的减小，绕射现象也逐步减弱。当波长远小于物体时，绕射现象基本消失，呈现出直线传播的特性。

（3）微波吸收材料的定义　微波吸收材料，一般指能够吸收和衰减由空间入射来的微波的电磁能量，减少或基本消除其反射的能量，并将电磁能转化为热能的一种特殊功能材料。

11.2.2　微波吸收材料的基本原理

（1）材料吸收电磁波的基本条件　从电磁物理概念出发，材料吸收电磁波的基本条件是：

① 电磁波入射到材料上时，能最大限度地进入到材料内部，即材料具有良好的匹配特性；

② 进入到材料内部的电磁波能迅速地几乎全部衰减掉，即材料具有良好的衰减特性。

（2）材料吸收电磁波的基本原理　当材料满足上述两个基本条件后，材料就能吸收电磁波。那么，材料怎么能够满足上述两个条件呢？实现第一个条件的方法是通过采用特殊的边界条件等来达到，其中最重要的方法是利用材料表面的阻抗匹配技术。由麦克斯韦（Maxwell）方程可知，当电磁波入射到材料表面时，其反射系数 R 可用下式表示：

$$R=\frac{1-\frac{Z_1}{Z_0}}{1+\frac{Z_1}{Z_0}} \tag{11-24}$$

而 $$Z_1/Z_0=\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}$$

式中 Z_0——自由空间阻抗；

Z_1——材料固有阻抗；

μ_r——材料相对导磁率；

ε_r——材料相对介电常数。

欲使表面无反射，需 $R=0$，则 $\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}=1$ 即

$$\mu_r \approx \varepsilon_r \tag{11-25}$$

当达到上述条件时，电磁波则能无反射地从材料表面进入到材料内部。电磁波进入到材料内层后，要使其迅速地几乎全部衰减掉，要求材料内部具有很高的电磁损耗，在无源空间中，麦克斯韦方程可表示为：

$$\begin{aligned}
\mathrm{rot}\ E&=\frac{-\partial B}{\partial t}\\
\mathrm{div}\ D&=\rho\\
\mathrm{rot}\ H&=\frac{\partial D}{\partial t}\\
\mathrm{div}\ B&=0
\end{aligned} \tag{11-26}$$

式中 E——电场强度；

D——电感应强度；

H——磁场强度；

B——磁感应强度；

ρ——自由电荷的体积密度。

在弱变电磁场中，材料的电磁性能可借助复介电常数 $\dot{\varepsilon}$ 与复磁导率 $\dot{\mu}$ 来表征：

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}&=D/E=D_m e^{j(\omega t-\delta_E)}/E_m e^{j\omega l}\\
&=(\boldsymbol{D}_m/E_m)\cos\delta_E-(j\,D_m/E_m)\sin\delta_E\\
&=\varepsilon'-j\varepsilon''
\end{aligned} \tag{11-27}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\mu}&=B/H=B_m e^{j(\omega t-\delta_M)}H_m e^{j\omega l}\\
&=(B_m/H_m)\cos\delta_M-j(B_m/H_m)\sin\delta_M\\
&=\mu'-j\mu''
\end{aligned} \tag{11-28}$$

由上两式可得：

$$\varepsilon' = (D_m / E_m)\cos\delta_E$$
$$\varepsilon'' = (D_m / E_m)\sin\delta_E \qquad (11\text{-}29)$$
$$\mu' = (B_m / H_m)\cos\delta_M$$
$$\mu'' = (B_m / H_m)\sin\delta_M$$

ε'、μ'为材料在电场磁场作用下产生极化磁化程度的量度，而ε''、μ''则是在外磁场作用下材料电偶矩、磁偶矩产生重排而引起的损耗的量度。这说明只有充分利用ε''和μ''才能吸收电磁波，使电磁能转化为热能。

11.2.3 微波吸收材料的基本特征

当考虑平面波入射到表面为平面的吸收材料时，必须对材料的基本特征加以分析。

（1）几个基本概念

① 电压反射系数、功率反射系数　当电磁波以不同角度投射到吸波材料时，可将反射波电场强度与入射波电场强度振幅之比定义为电压反射系数；功率之比定义为功率反射系数。

② 反射率、吸收率　以分贝（dB）表示的反射系数称为反射率；以分贝（dB）表示的光反射率称为吸收率，其数学表达式为：

电压反射系数　$$\Gamma_v = \frac{E_r}{E_i}$$

功率反射系数　$$\Gamma\bar{\omega} = \Gamma_v^2 = \frac{E_r^2}{E_i^2} = \frac{P_r}{P_i} \qquad (11\text{-}30)$$

反射率　$$\Gamma = 20\lg\frac{E_r}{E_i} = 10\lg\frac{P_r}{P_i}\ (\text{dB})$$

吸收率　$$\Gamma' = -\Gamma$$

式中，E_i 和 E_r 分别为入射波与反射波电场强度的振幅；P_i 和 P_r 分别为入射波与反射波的功率。

③ 绕射率　我们称非几何光学的反射为绕射，绕射率电平采用与反射率电平相似的定义，只是用绕射波取代反射波，其数学表达式：

绕射率　$$\Gamma = 20\lg\frac{E_s}{E_i} = 10\lg\frac{P_s}{P_i}\ (\text{dB})$$

式中，E_i 和 E_s 分别为入射波与绕射波电场强度的振幅；P_i 与 P_s 分别为入射波与绕射波的功率。

④ 工作频率带宽（频宽） 电磁波的反射率电平低于某一特定最小值时的频率范围。

⑤ 吸收功率 每单位面积材料所能耗散的最大入射的电磁波功率，单位为 W/cm^2。

⑥ 允许入射角范围 入射角指电磁波入射方向与吸波材料表面法线的夹角。入射角范围定义为反射率电平低于某一特定最小值时，入射角可取的范围。

⑦ 品质因素 系指微波吸收材料所能覆盖的波长与其厚度之比，即 $1/\lambda_{max}$，此值越小，表明材料性能越好。

⑧ 允许反射系数 对实际应用的吸收体所给出的评定指标，它与反射衰减量之间的换算关系如表 11-4。

表 11-4 允许反射系数与反射衰减量的关系

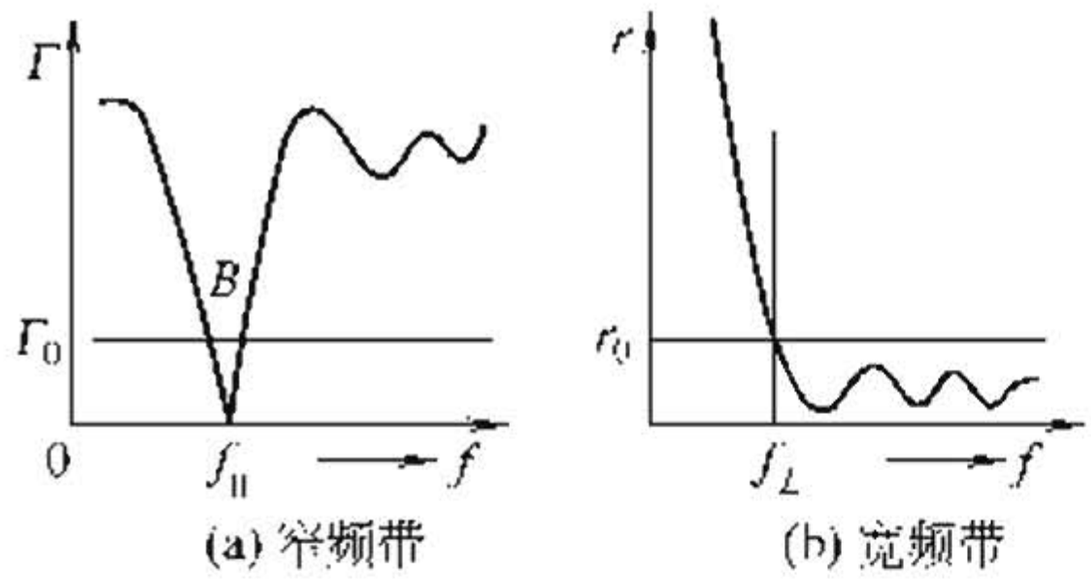
允许反射系数/%	反射率/dB	允许反射系数/%	反射率/dB
100	0	3.2	15
50.1	−3	1.0	20
25.1	−6	0.1	30
10.0	−10	0.01	40

（2）频率特性 在平面波垂直入射到平板状吸波材料的条件下，期望材料对任何频率的电磁波都能无反射地全部吸收是难以实现的。

在自由空间中传播的电磁波之波长 λ 与速度 c 及频率 f 之间的关系为：

$$f\lambda = c \tag{11-31}$$

吸波材料按其频率特性可分为窄频带（NF 型）与宽频带（WF 型）两大类，图 11-8（a）为窄频带吸波材料的反射系数 Γ 与频率 f 的关系，Γ_0 为容许反射系数，B 是带宽，f_0 是中心频率，图 11-8（b）为宽频带吸收材料的频率特性，图中 f_L 为容许使用的最低频率。



(a) 窄频带　　(b) 宽频带

图 11-8　吸波材料频率特性

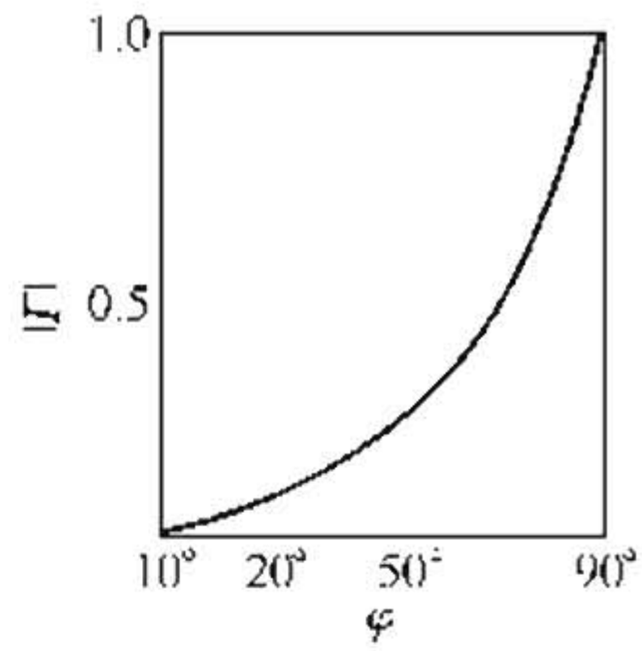


图 11-9　吸波材料反射系数与入射角之间的关系

（3）角度特性　当电磁波以不同入射角投射到吸波材料上时，将得到不同的反射系数（图 11-9），对谐振型薄层涂料而言，在入射角大于 30°情况下，其性能迅速下降。通常可用下式给出近似关系：

$$|\Gamma(\varphi)| = \tan^2 \frac{\varphi}{2} \tag{11-32}$$

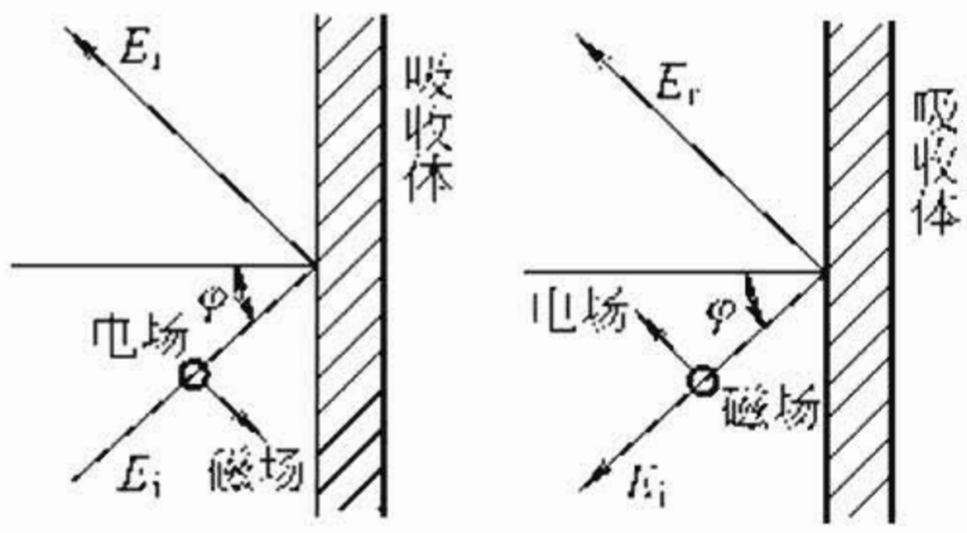
（4）极化特性　对吸波材料而言，入射波的极化定义与测量用电磁波的极化定义是不同的。如大家所知，电磁波的传播方向与电场强度矢量所构成的平面称为极化平面，极化平面垂直于吸收体平面的称为垂直极化波；极化平面平行于吸收体平面的则称为水平极化波。对吸波材料而言，入射波方向与材料平面的法线所构成的平面称为入射面，电场矢量在入射面内称为平行极化，反之为垂直极化（图 11-10）。若入射波为垂直极化波，而矢量$\vec{E}$在入射面内，故为平行极化入射。显然，在电磁波垂直于材料平面入射时，就不存在材料的极化问题了。电磁波极化与入射波极化如图 11-11。

设电磁波在自由空间投射到材料上时的入射角为 φ。则垂直极化的衰减系数为：

$$k''_{\tau} = \frac{2|\mu|}{\pi} \times \frac{\cos\varphi}{377} \tag{11-33}$$

而水平极化的衰减系数为：

$$k''_{H} = \frac{2|\mu|}{\pi\cos\varphi 377} \tag{11-34}$$



(a) 垂直极化

(b) 平行极化

图 11-10　吸波材料极化特性

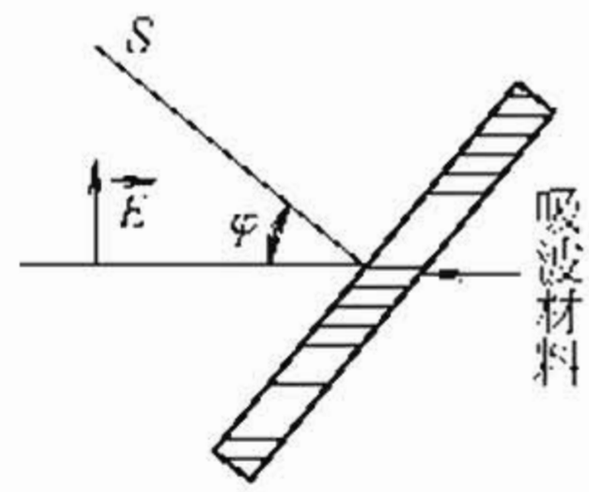


图 11-11　电磁波极化与入射波极化

可见，水平极化时的吸收要比垂直极化时强。

若 $\varepsilon''=\mu''$，则垂直极化时的最佳衰减系数为：

$$k_c''=\frac{2\mu'}{\pi}-\cos\varphi \tag{11-35a}$$

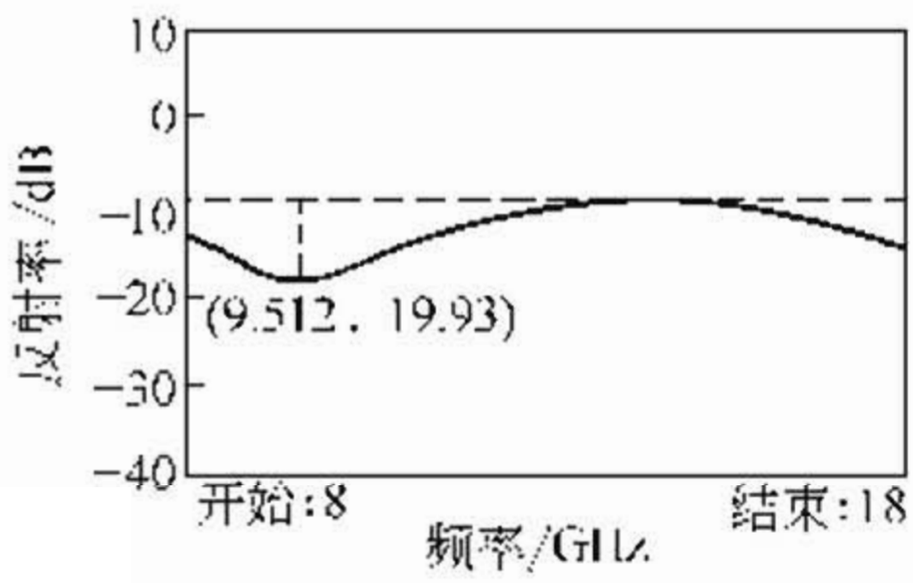
水平极化时的最佳衰减系数为：

$$k_c''=\frac{2\mu'}{\pi\cos\varphi} \tag{11-35b}$$

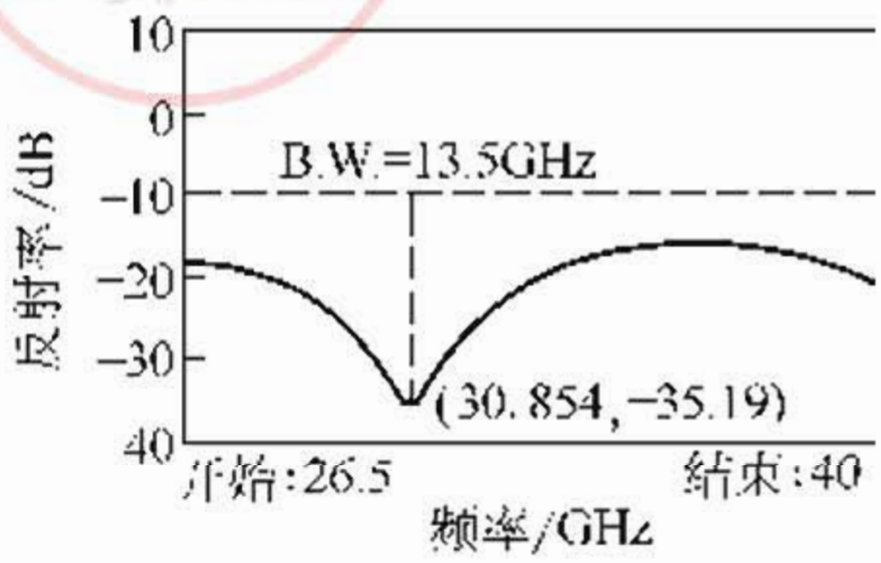
应当指出：当 $\varphi=90°$ 时有 $\Gamma=0$，则在一定的入射角范围内，反射系数大小与极化无关。当 $\varphi=0$ 时，$\Gamma=0$，当入射角很小时，反射系数可用式（11-36）表示：

$$\Gamma=\left|\frac{1-\cos\varphi}{1+\cos\varphi}\right| \tag{11-36}$$

（5）吸收、反射特性　衡量微波吸收材料性能优势的最主要技术指标是材料的吸收反射特性。在特定的材料厚度下，其吸收性能越高，反射就越小；同时，材料的吸收反射特性是随频率的变化而变化的。如图 11-12（a）频率为 8～18GHz 时材料的吸收特性曲



(a) 8～18GHz



(b) 26.5～40GHz

图 11-12　材料的吸收特性曲线

线；图 11-12（b）频率为 26.5～40GHz 时材料的吸收特性曲线。

11.2.4 微波吸收材料（简写为 RAM）的分类

（1）谐振型吸收材料　这类吸波材料的共同特征是在其吸波频谱上有明显的吸收峰（谐振峰）。它们又可依作用原理进一步分为两种类型。

① 干涉型　这种 RAM 主要利用吸波介质前、后表面反射波的相消干涉作用“吸波”，为此，介质厚度必须等于$\frac{\lambda}{4}$或λ的奇数倍（λ 为入射波长）。最简单而典型的产品即“索尔兹伯里屏”，其结构和工作原理简示于图 11-13。理论上，这种 RAM 可在设定频率上达到零反射，实际中也可达到 30dB 以上的反射衰减。但这种 RAM 有效频带过窄，且对较低频段要求材料的厚度偏大，单纯依此原理设计的 RAM 不适应飞行器隐身的要求。

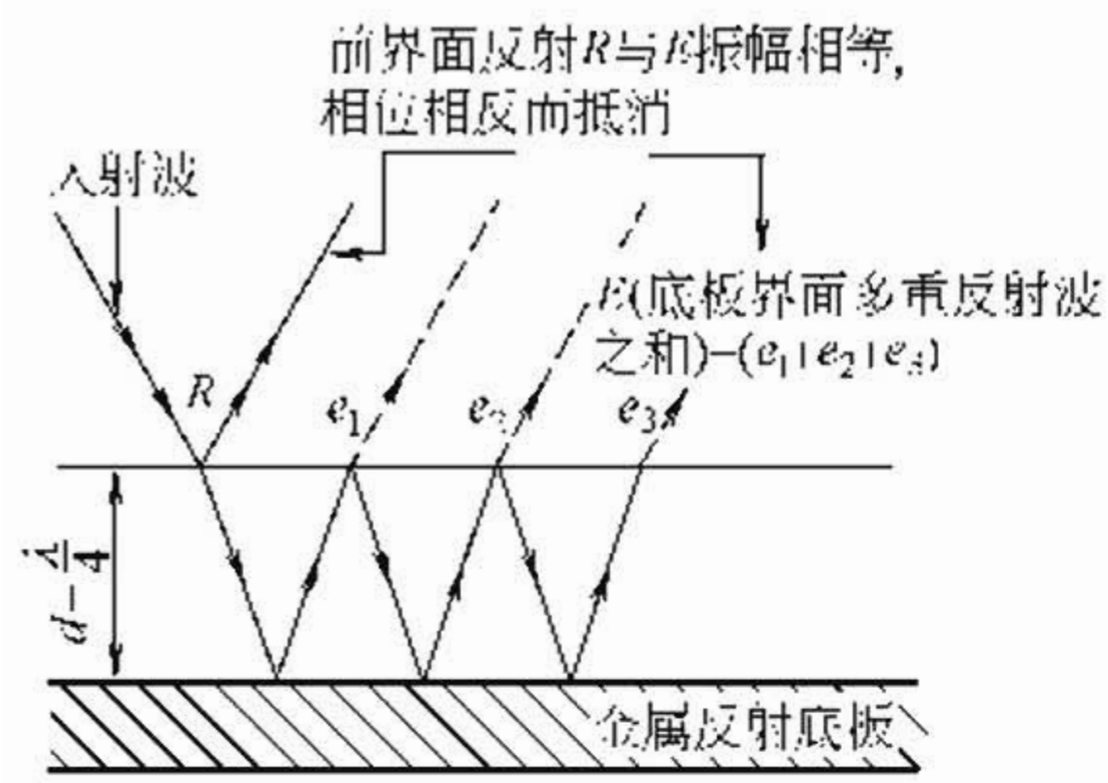


图 11-13　干涉型 RAM 的结构和工件原理示意图

② 吸收型　这类 RAM 主要通过向介电基料中加入导电性或磁性损耗材料（吸收剂）而构成，故又可分为磁损式与电损式两种。前者通常采用电导率较低的碳，有时也用长度一定的金属纤维或金属粉作填料，以使整块材料具有有限的电导率，利用电的极化和传导损耗，消耗入射波能。后者常用铁氧体，Ni、Zn、Mn 等二价金属氧化物和 Fe、Co、Ni 等磁性金属及其合金组成的吸收剂，这些磁性介质在入射波交变场作用下发生亚微观共振摩擦，从而损耗入射波能量。

吸收型 RAM 的损耗作用是电磁能向热能的转化，与电流通过电阻的情形很相似。事实上，只要发射机离 RAM 足够近，确实会使后者变暖。一般来说，电损式 RAM 密度轻，在较高频段内效率高，但其达到宽频时厚度较大；磁损式 RAM 的吸收特性通常优于

电损式产品，在低频段优势尤其明显，故能以较薄的厚度达到较大频宽，缺点是密度大。下面两个 Plessey 产品的性能对比很能反映这两种 RAM 的基本不同特点。图 11-14 为一种磁性填充的双频 RAM 的电性能曲线，该产品厚 4.4mm，面密度 6kg/m^2，在 8～18GHz 内衰减大于 15dB。图 11-15 为一种“泡沫材料＋碳”制成的 RAM 的电性能曲线，该产品厚 19mm，面密度为 0.9kg/m^2，在 8～18GHz 内衰减大于 20dB。

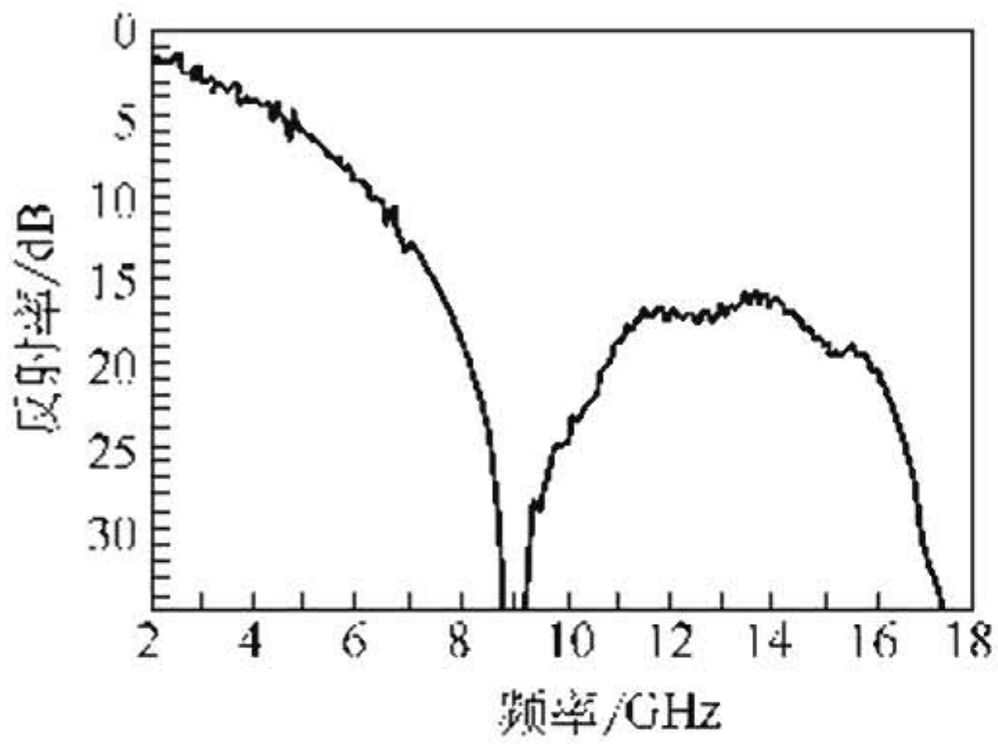


图 11-14　一种磁性填充的双频 RAM 的电性能曲线

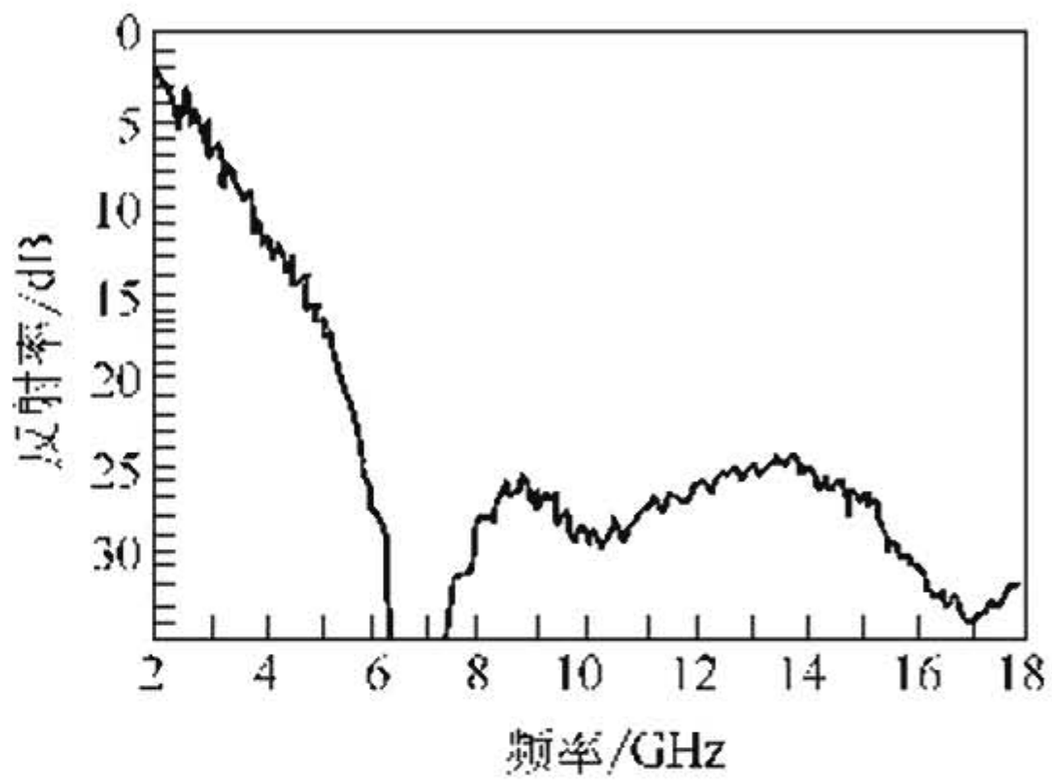


图 11-15　一种“泡沫材料＋碳”制成的 RAM 的电性能曲线

吸收型（特别是磁损式）RAM，厚度无严格限制，作用频率也较易调整（如调整具有不同谐振频率的吸收剂的组合），可以达到频带较宽和厚度较小的基本隐身应用要求。

谐振型 RAM 通常都在一定的频率、极化及入射角（一般为垂直）条件下达到最佳电性能，随着频率和入射角的偏移，性能明显恶化。

一种拓宽频带的有效手段是采用多层结构，但对于飞行器隐身，其应用将受总厚度要求的严重限制。

（2）传播特性均变吸波材料　这类材料亦称“宽频型”或“非谐振型”RAM，其作用原理与上述材料完全不同。已证实：电磁波在不同介质间传播时，若所经介质的传播特性是连续改变的，则介质界面处的反射将极小。这种现象不与特定的频率相联系，故如能制成这样的产品——其阻抗值从前表面的自由空间值平滑过渡到

后表面处的零阻抗，则将获得真正的“宽频”材料。遗憾的是目前的技术还做不到如此自由地调节材料的电学性质。实际中，人们主要是通过制造下述两种 RAM 接近这一理想材料。

① 棱（圆）锥型 RAM　这种产品由底部融合的棱（圆）锥阵构成。这样的几何形状为入射波从自由空间到完全进入介质材料的途径中提供了一种自由空间对介质比例平滑过渡的环境，其效果与材料内部电性能的平滑过渡相似。因此这类 RAM 达到了最优异的电性能（频宽 0.1～100GHz，衰减 60dB），但其厚度大，（一般大于 10cm，厚者达数米），主要用于建造无回波室。

② 平面叠层型 RAM　这类 RAM 吸波性能一般不及锥形产品，但较薄，可用于飞行器隐身。其结构形式有两种，一种是由多层电学性质递变的损耗层直接叠加构成。Eccosorb-AN、RAM 等著名的宽频胶片即是这种产品中较薄的品种。另一种是由平行排列的电阻片加介电隔离层组成，刚性的 Eccosorb-MC 和各种朱曼吸波体可归入这一类。今天，各种叠层宽频 RAM 已达到较高的性能水平（一般可在其有效频段内衰减反射 20dB），显示了应用于隐身飞行器的良好前景。

叠层型宽频 RAM 带宽潜力大——随着薄膜制造技术的提高，可望制得薄、轻且频宽较大的 RAM；可在高入射角条件下保持性能良好（谐振型 RAM 则对入射角变化较敏感）。其缺点是厚度大。

上述 RAM 主要用于抑制镜面反射。还有一类主要用于抑制金属件表面的微波反射 RAM，它们具有高导磁率，厚度很薄（一般<1mm），通常是一个涂层或薄片。目标的反射特性是镜面反射，多次反射和表面波三者综合作用的结果，这类 RAM 对飞行器的隐身技术无疑也有重要意义。

必须指出，上述划分仅是就原理而言。由于原材料品质和工艺等因素的限制，各种吸波作用均很难理想的在产品中实现，这推动人们在实际产品，特别是要求苛刻的飞行器隐身用产品设计中，尽可能综合运用更多的吸波作用。这种“综合型”的 RAM 往往难以准确地归入上述某一类型。如朱曼型 RAM 就同时利用了层间干涉和介电性能递变两种作用，干涉型产品采用磁性填充也已很普遍。

正是各种巧妙设计的“综合型”产品，构成了目前研制新型 RAM 的主要趋势。

也由于如上原因，下文介绍实用 RAM 时，将只按应用形式归类。不难理解，这些类别间并无明确界限。他们往往可在大体一致的配方基础上根据人们的需要互相转化。例如环氧基 RAM，既可制成涂料或贴片，也不难制成结构材料。

11.2.5 微波吸收材料的制备

通常吸波材料是由两种以上的物质组成，他们主要分为基料（或黏结剂）与填料两大部分，其中填料赋予材料以吸波功能，而基料则主要起分散填料的作用。并使材料具有某种物化性能及使用环境性能。填料的加入一般会削弱基料的原有物理性能，同样，基料会影响填料固有的电磁性能。这种混合体系的电磁性能可用混合定律进行描述。其表示式为：

$$\ln|\varepsilon_a| = V\ln|\varepsilon_b| + (1-V)\ln|\varepsilon_c|$$

$$\delta_a = V\delta_b + (1-V)\delta_c \tag{11-37}$$

式中，ε_a，ε_b，ε_c 分别为混合物、填料与基料的复介电常数；δ_a，δ_b，δ_c 分别为它们的相位角；V 为最终混合物中填料所占的体积百分率。对混合物的复磁导率而言，也可用类似的方程表示。值得注意的是混合物的性能取决于其体积组成而不是质量组成。

（1）原材料　对吸波材料而言，不仅要求它们具有优良的宽频吸波性能，而且要求有足够的强度，耐高低温性能以及使用条件下的可靠性与寿命等，因此，慎重地选择原材料是十分重要的。

① 基料　基料（或黏结剂）主要根据使用环境选择，同时希望其电磁常数较小，以尽量减小它对填料性能的影响。

由于吸波材料应用场合较广。使用条件各异，故基料选择范围很大。用作基料的物质主要有有机高聚物与无机黏结剂，究竟选用何种性质的基料视特定条件而异，例如用于地面设施（如微波暗室材料）的基料，采用力学性能较低的软质泡沫体，而用于环境条件苛刻的场合，则应考虑附着力，耐温耐老化性能，抗磨性，耐冲刷力等方面的要求。

橡胶，塑料等为常用的有机聚合物基料，表 11-5 列出了部分

表 11-5　几种有机聚合物的有关性质

项　　目	天然橡胶	丁苯橡胶	丁二烯橡胶	丁基橡胶	乙丙橡胶	硅橡胶	氯丁橡胶	丁腈橡胶	海帕隆
	NR	SBR	BR	HR	EPDM	SI	CR	NBR	CSM
介电常数①	3～4	3～4	3～4	3～4	2.5～3.5	3～5	5～8	5～12	
介质损耗角①正切(tanδ)	0.5～2.0	0.5～2.0	0.5～2.0	0.4～1.5	0.3～1.5	0.5～2.0	2～20	2～20	
体积电阻系数/Ω·mm	10^{14}～10^{15}	10^{14}～10^{15}	10^{14}～10^{15}	10^{15}～10^{16}	10^{15}～10^{16}	10^{15}～10^{16}	10^{12}～10^{13}	10^{10}～10^{11}	10^{12}～10^{15}
使用温度范围/℃	～58～+90，+120	−30～+120	−70～+120	−55，−30～+130	−60，−40～+150	−70～+280	−35～+120，+130	−40，−10～+130	−18～+120，+150
黏结性(对金属)	优	优	—	良	可	良	优	优	优
抗张强度/(kg/cm²)	200～400	15～70	10～40	105～210	70～250	5～106	150～210	30～70	70～250
耐候性	差～可	差～可	良	优	优	良～优	优	差～可	优

项　　目	天然橡胶	丁苯橡胶	丁二烯橡胶	丁基橡胶	乙丙橡胶	硅橡胶	氯丁橡胶	丁腈橡胶	海帕隆
	PE	PVC	ABS	PS	PA	PPO	PI	EP	UP
介电常数	2.2～2.3	3.1～3.5	3.0	2.5～2.8	4.0～5.0	2.6	3.0	3.5～5.0	3.0～4.0
介电损耗角正切(tanδ)	<0.0005	0.08～0.15		0.00005	0.01～0.04	0.0007～0.0014	0.001～0.005	0.001～0.002	0.008～0.04
体积电阻系数/Ω·mm	>10^{17}	10^{13}～10^{15}	10^{6}	>10^{6}	10^{13}～10^{14}	10^{17}	10^{16}～10^{17}	10^{16}	10^{12}～10^{14}
连续耐温性/℃	82～121	66～79	60～121	66～77	80～121	130～190	260	166～269	60～96
密度/(g/cm³)	0.91～0.96	1.30～1.45	1.05～1.07	1.04～1.05	1.12～1.14	1.06			1.1～1.4
拉伸强度/(kg/cm²)	100～380	550～600	360～700	200～560	350	680			
耐候性	差	良～好	差	中	中				

① 60Hz 下的测量值。

高清PDF图书馆 www.gaopdf.com

有机聚合物及其相关性能。各类有机泡沫材料、蜂窝结构与空心微球材料，由于其密度很小，对电磁波的传输性能而言接近于自由空间，因此也是重要的吸波材料基料。表 11-6 列出了部分塑料泡沫的性能。

表 11-6　若干有机泡沫材料

项 目	聚乙烯 (PE)	聚苯乙烯 (PS)	聚氯乙烯 (PVC)	ABS 树脂	环氧树脂 (EP)	聚氨酯 PUR	橡胶泡沫
密度/(g/cm³)	0.01～0.56	0.01～0.13	0.05～0.16	0.5～0.9	0.03～0.32	0.02～1.12	0.07～0.13
最高使用温度/℃	110	122	108	83	260	345	70
介电常数	1.05～1.1	1.05～1.06	—	1.63	1.41～1.55	1.05～2.2	—

以非金属基复合材料为基的结构型吸波材料近年来已成为重要的发展方向，这类基料包括各种玻璃纤维、有机合成纤维（如芳纶纤维）、碳纤维及各种混杂纤维增强的树脂基复合材料。由于非金属基复合材料具有一定的高频介电常数与介质损耗，能吸收和透过一部分入射电磁波，其屏蔽效率显著低于铝合金等金属，因而感应电流较小，再者辐射功率低。利用它们可以获得比金属蒙皮小得多的雷达反射截面。例如，普通玻璃钢的高频介电常数大约为4，而用这种材料制成的平板件的雷达反射截面比金属平板小9.5dB。同样分别用碳纤维与铜材制造的缩比模型，测定其全方位雷达的反射截面时，发现前者比后者小约 3dB/m²。如果在这类材料中再混入电磁波吸收剂，则其吸波性能会进一步提高。在选择以增强复合材料作载体时应考虑表 11-7 与图 11-16 中显示的基本性能。

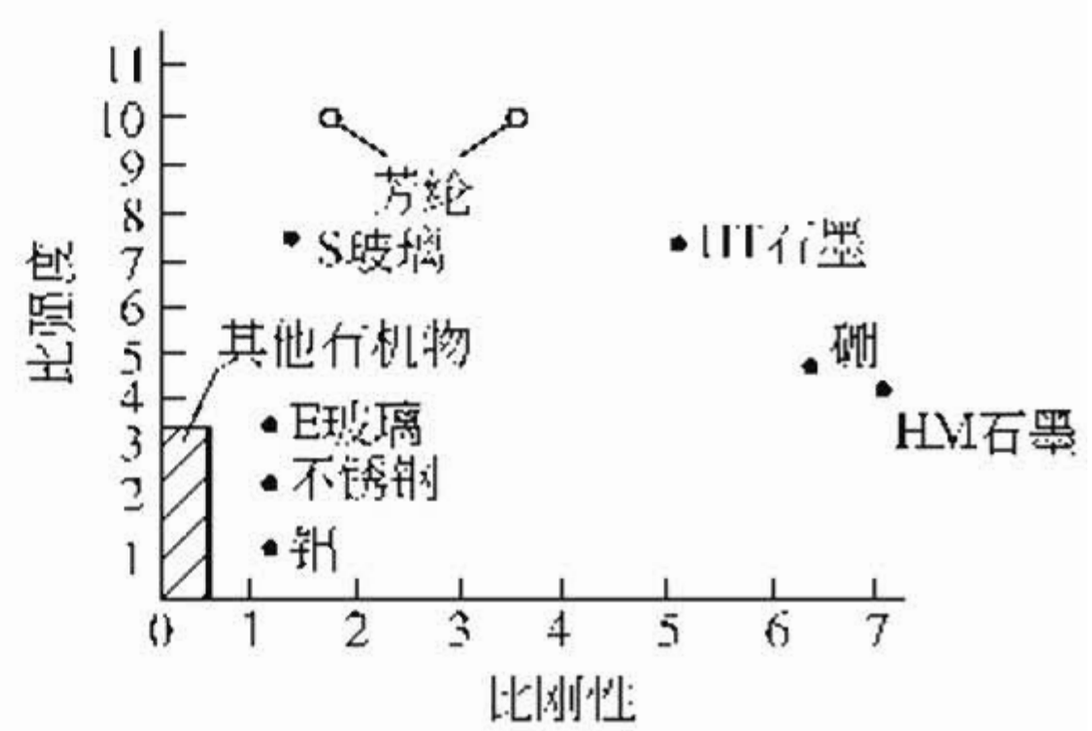


图 11-16　各种纤维的比刚性与比强度

表 11-7　各种纤维的力学性能比较

项　　目	E-玻璃	芳香族聚酰胺	碳纤维	碳化硅纤维	氧化铝纤维
密度/(g/cm^3)	2.55	1.44	1.5～1.9	2.5	2.4～3.9
拉伸强度/(kg/mm^2)	150	280	250～350	250	260
拉伸模量/(kg/mm^2)	7000	8400～13000	35000～46000	19000	10000～46000
伸长率/%	3	2.4～4	0.6～1.3	1.8	

吸波材料制备中还必须选择无机黏结剂作基料，以适应高温条件下的使用要求。这些无机黏结剂包括各种氧化物、碳化物、氮化物、硼化物及硅化物的陶瓷体以及具有一定电导率的各种玻璃。

② 填料　用作吸波材料的填料主要可分为电（阻）损耗填料与磁（电）损耗填料两类。电（阻）损耗填料中一种是依靠 ε_r'' 吸收电磁波，一种是依靠 σ 来吸收电磁波，目前的吸收填料主要是利用后者。而磁（电）损耗填料则是依靠 μ_r'' 与 ε_r'' 来吸收电磁波。

a. 电阻性填料　炭黑是使用最广泛的电损耗填料。填充导电炭黑的吸波材料是通过入射波的感应电流引起的电阻损耗而起衰减电磁波作用。

炭黑是由几个（3～7 个）芳香族缩合碳环平面图 11-17(a) 重叠而成的微晶体，并按图 11-17(b) 所示模型复合而成粒子。通常情况下，这种粒子的平均粒径只有几十到几百纳米，因此粒子能够互相连接而形成一种结构。炭黑的性能在很大程度上取决于芳香族缩合碳环，也取决于结构状态。用于吸波材料中的导电性炭黑（如乙炔炭黑）具有较好的结构性，故在少量填充下亦具有较大损耗性能。

(a) 芳香族缩合碳环

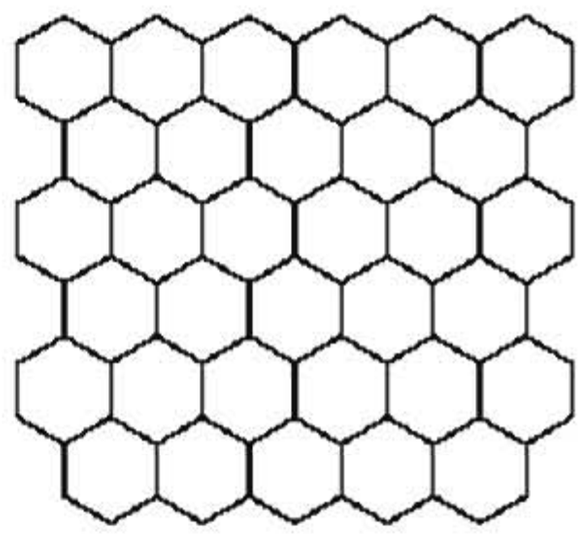

(b) 炭黑粒子微结构

图 11-17　炭黑的微观模型

高清PDF网站源自 www.gqpdf.com

石墨也是经常用到的电损耗填料之一，由图 11-17 所示，碳环平面由规则的叠层配置，形成六方结构。石墨粉末为平均粒径几微米到几十微米的片状。石墨的有关性质如表 11-8。

表 11-8　石墨的性质

性　　质	数　　值	性　　质	数　　值
密度/(g/cm³) 晶系 熔点/℃	2.2 六方晶系 ＞3500	体积电阻系数/Ω·cm	平行于层 10^{-4} 垂直于层 10^{0}

在固态物质中，几乎找不到在高频下感应的损耗（ε_r''）很高的材料，钛酸钡等强感应物质在微波频域内具有复感应系数（$\varepsilon_r=\varepsilon_r'-j\varepsilon_r''$）的频散特性，用它可以制备出厚度为 0.2～0.3mm 的超薄型吸波材料，但其频带太窄，适用性太小，必须进行改进。在液态物质中，水可作为一个典型。

b. 磁损耗填料　从超高频到微波的波段内，这类填料较之前两类材料在吸收频带宽度及几何厚度上都表现出有明显的优越性。这是由于磁性填料兼具电与磁的特性，容易满足阻抗匹配要求，从而可以满足宽频吸收的要求。

磁性填料主要分为两类：铁氧体与金属粉末。

铁氧体是应用最广泛的一类磁性吸波填料。烧结铁氧体块在 TV～VHF 范围内具有良好的吸波性能，可制备成较薄的材料（一般为 7.5～12mm），而且具有陶瓷材料的耐火性及外观，多用于防止高频干扰（如消除电视重影）等场合。烧结铁氧体块在微波范围内不产生自然共振现象，但当把铁氧体粉末分散于非磁性介质中时，其工作频率提高。这可以认为这是一种复合介质，其有效磁导率 μ_e 由下式决定：

$$\mu_e=\mu_1^u v_1 \mu_2^v v_2 \tag{11-38}$$

式中，μ_1，v_1 为橡胶的磁导率和体积；μ_2，v_2 为铁氧体的磁导率和体积，显然，$\mu_1=1$，假定 $v_1=v_2$ 则有

$$\mu_e=\mu_2 v_1^2$$

故可认为铁氧体—介质混合物的磁导率下降，因而工作频率自然增

高，使它可应用于微波波段，图 11-18 即表示铁氧体烧结块与铁氧体复合物的工作频率变化。

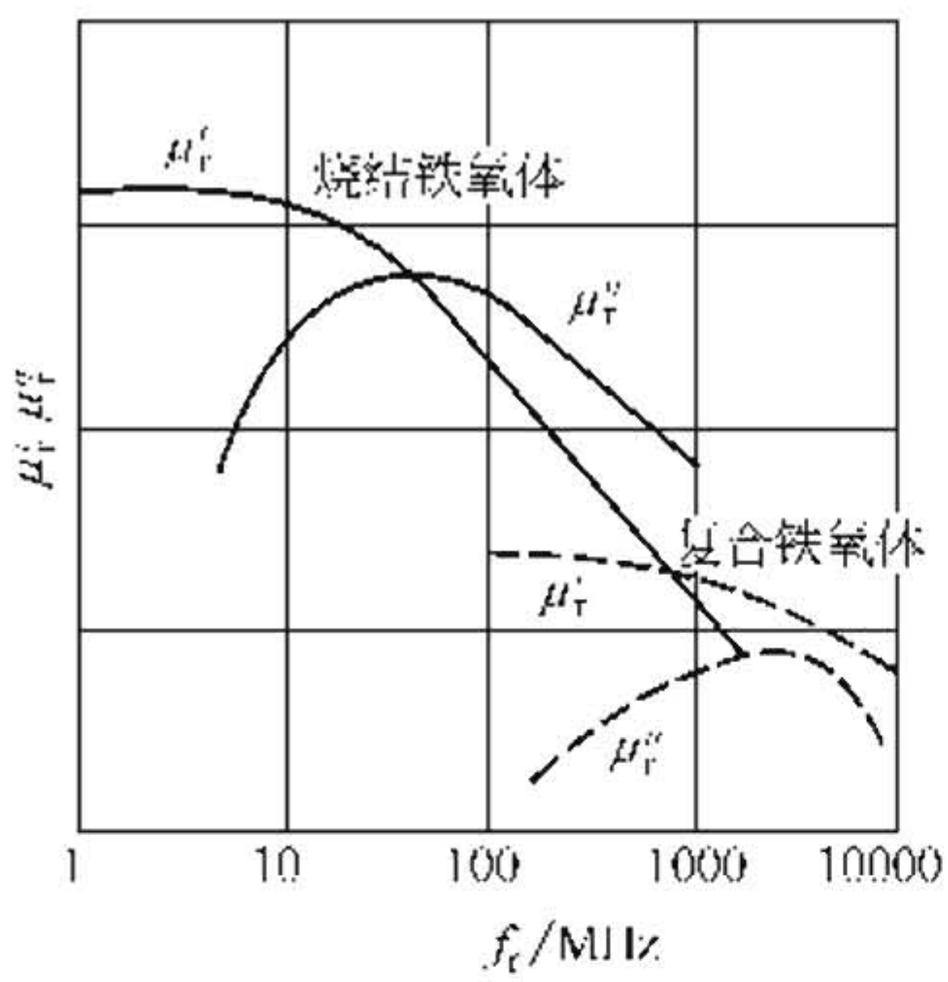


图 11-18　铁氧体烧结体与复合体频散特性

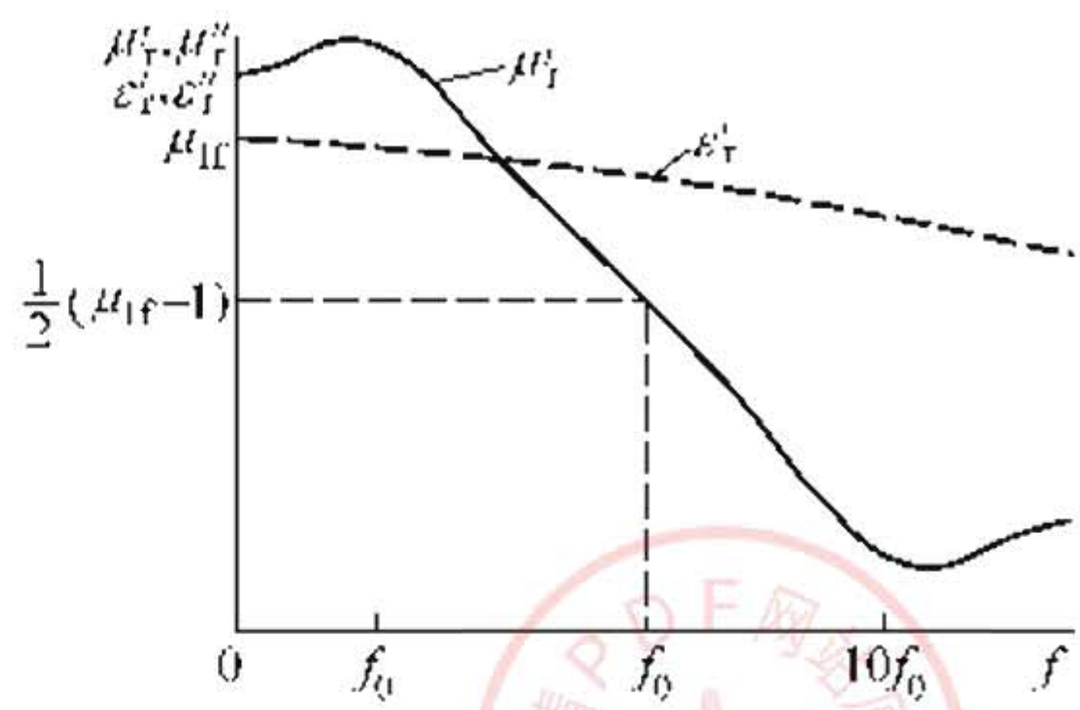


图 11-19　典型铁氧体电谱-磁谱曲线形式

铁氧体的磁谱与电谱曲线如图 11-19 所示。导磁率的实部（μ_r'）在低频下为一恒定值 μ_{1f}，当频率在 $0.1f_0 \sim 10f_0$ 内变化时，μ_r'值在 $\mu_{1f} \sim 1$ 之间变化，中心频率（f_0）时 $\mu_r' = (\mu_{1f} - 1)/2$。损耗值（$\mu_r''$）最大点就在 f_0 处，频率高于或低于 f_0 时，损耗都比较小。实际上，复磁导率的实部与虚部是彼此相关的，可用 Kramers-Kroning 式来表示这种关系。

铁氧体的介电常数与磁导率无关，其随频率的变化较缓和。介电常数的实部（ε_r'）与虚部（ε_r''）也可用 Kramers-Kroning 关系表示。由于铁氧体的电谱与磁谱之间无相关性，故也必须利用阻抗匹配等技术才能制备出较好的吸收体。

最普遍使用的为尖晶石铁氧体，立方晶系，以 $MFeO_4$ 表示。这类铁氧体的 μ_{1f}在 10～1000 范围内，f_0 在 5～500MHz 之间。μ_{1f} 与 f_0 之间关系可用 Snoek 经验式（$\mu_{1f} \times f_0$ 约为常数）表示，其中常数为 5600MHz。尖晶石铁氧体在 1GHz 以下发生弛豫现象。

在此频域内可直接用其烧结体。六角晶系铁氧体的 μ_{1f}比尖晶石铁氧体略低（<30），而 f_0 略高（>1GHz），可用于更高的

频段。

铁氧体用作吸波填料除了其密度较大、价格较高外，主要问题在于其特性参数与外加电磁场频率是非线性的，同时，其居里温度不高，因而在高温下的吸波性与热稳定性均不理想。此外是铁氧体对深冲雷达的效应问题，由于铁氧体的损耗机制主要是针对正弦波雷达的。对于无载波雷达，它对宽频带信号的其他部分频谱几乎不起作用，故吸波能力很弱，单靠铁氧体是无法处理宽频带信号的。

金属的电阻率在 $10^{-6}\sim10^{-3}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$ 范围内，选用金属或合金粉末作吸波填料时，除了考虑电阻率外，还应考虑其熔点、耐热性、线膨胀系数等因素。从金属本身的稳定性以及与电磁波频率的关系来看，它们比其他吸收剂要好，但是采用纯金属作吸收剂显然是行不通的，只能以其粉末状态分散于其他绝缘黏结剂中。研究表明：在容积为 V_1 的金属微粒中，平均吸收的电磁能量 Q 由下式决定：

$$Q=\frac{\omega}{2}V_1(\alpha_\varepsilon''+\alpha_\mu'')\,|E|^2 \tag{11-39}$$

式中，α_ε''与α_μ''分别为微粒的电极化率与磁极化率的虚部；E 为散射波电场。研究指出：当金属微粒粒径与其趋肤深度相差一个数量级或不大于一个数量级时，吸收电磁波能量为最大。总的吸收功率由晶格静电场热振动引起的电子散射（R_1）、杂质与晶格缺陷引起的电子散射（R_2）以及电子-电子间的互相作用（R_3）三种效应决定。

下面简叙几种金属粉末吸波填料。

金属粉末作为吸波填料中应用较普遍的是羰基铁粉。羰基铁粉是通过在惰性气体中热解五羰基铁而制备的，反应方程式如下：

$$\mathrm{Fe(CO)_5}\xrightarrow[\text{高温}]{\mathrm{N_2}\text{ 等}}\mathrm{Fe}+5\mathrm{CO}\uparrow \tag{11-40}$$

羰基铁粉纯度高，它的颗粒为“洋葱皮”似的层状球形，颗粒中夹有氮化铁和碳化铁绝缘层，因而它具有还原铁粉、电解铁粉所不具有的性能。目前常用的是磷化羰基铁粉（用磷酸处理使其球形颗粒表面生成磷酸盐膜作绝缘层），这种磷化铁粉的有关电磁性能

如表 11-9 所示。

表 11-9　磷化羰基铁粉有关电磁性能

规格	平均直径 /μm	测试频率 /MHz	相对品质因素 (Q_x)	有效导磁率 (μ_i)	起始导磁率 (μ_0)
LDT-10	≤3.0	5	≥1.8	≥2.05	≥13
LDT-20	≤3.0	5	≥1.85	≥2.85	≥12
LDT-50	≤2.5	40	≥1.50	≥1.55	≥11

羰基铁粉具有较高的磁导率，虽然其密度较大，但在高于厘米波段的频带内使用时仍不失为一种较好的吸收剂。

金属超微粉与块状体比较，在磁、电、光以及活化面积、熔点、热传导性等方面具有许多奇特的性能。这是因为随着粒子细化，表面原子所占百分比急剧上升，例如当粒径为 100nm 时，表面原子仅占 2%，但当粒径为 10nm 时，上升到 20%，而粒径为 5nm 时，则增加到 40%。由于波函数的尾端效应，造成表面原子与内部原子具有不同的能带结构，故导致表面能急剧增加，同时也引起能带结构的改变。此外，当粒子尺寸小于导电电子平均自由程、超导电子对的平均寿命距离时，当粒子尺寸与畴壁的厚度具有同样数量级时，因粒子中原子数目减小，也会改变其能带结构。这些必然引起电、磁、热等物理性质的改变。超微粉具有一定的吸收电磁波能力，特别是在极高频以致光波范围内都可以具有衰减电磁波的性能。制备超微粉的许多工艺问题都已基本解决。但是如何将这种极细的粉末分散到绝缘基料中是制备这类吸波材料的关键。目前采用的方法之一是先将这种粒子与一种分散性好的介质（如粒径为 0.007μm 的二氧化硅）混合均匀，然后将这种混合物再与基料混合，并利用适当的工艺成型为吸波材料部件。这种分散方法的最大优点是，所制得的混合物的介电常数低于将超微粉直接与基料混合所得产物的介电常数。超微粉用作吸波填料的明显优点是质量较轻，但其成本较高，而且单独应用超微粉也做不成宽频吸波材料，只当它与其他吸波填料混用时，才能发挥其优点。

用作吸波填料的其他纯金属粉包括镍、钴等单元细粉及其超微

粉，以及铜粉、片状铝粉等，表 11-10 为 Ni 粉与 Co 粉的部分性能。

表 11-10　Ni 粉与 Co 粉的部分物理性能

项目	粒度/μm	晶型	比表面积/(m^2/g)	松装比/(g/cm^3)
Ni 粉	1.0～2.0	立方晶型	1.6～6.0	1.6～2.0
Co 粉	0.1～0.6	六方晶型		

在制备用于高温条件下使用的吸波材料时，还会用钛、铬、铌、钼、奥氏体钢等粉末以及许多包覆粉末。其中包覆粉末是将金属、合金等粉末作核心，在其外表，通过某些化学反应等在其上包涂上一种或多种其他金属、合金、氧化物等，用这种方法可得到理想的均匀复合粉末材料。这类粉末，如 Ni/石墨、Ni/铝等。

c. 其他填料　金属短纤维：在吸波材料中混入金属短纤维（或镀有金属膜的合成纤维等）可以获得合适的低阻抗层，而且比仅靠增加颗粒状填料混合比要容易。金属短纤维在电磁波作用下感生电流而成为电偶极子，从而辐射能量。这种诱导电流可以由纤维的阻抗进行估算（其阻抗以 E/I 表示，E 为纤维上的外加电场；I 为纤维上的诱导电流），它与纤维的电导率、纤维的形状以及外加电场频率有关。当纤维长度为介质半波长时它所辐射的能量最大，故其吸收亦具有共振的特性，由此当采用不同长度的金属短纤维时，就可获得一定的共振频率。

用作吸波填料的导电短纤维有纯金属纤维，如铜纤维、不锈钢纤维等，各种半导体性质的纤维，如碳纤维、碳化硅纤维以及纯金属的纤维，如镀铝涤纶纤维、镀银尼龙纤维等。

碳化硅粉末或纤维：碳化硅是电阻值介于金属导体与绝缘体之间的杂质型半导体。碳化硅陶瓷超微粉是烧制高特殊密度陶瓷的原材料、高纯度碳化硅烧结体对电磁波有很高的吸收率，使用频率从几十兆赫到一万兆赫，而且在 2000℃高温下仍保持其吸收特性。

碳化硅纤维可以编织成布、毡等，通过叠层，然后与合成树脂或陶瓷等复合而制成吸收层。这种材料不仅具有高强、耐热、耐化学性能，而且其吸波性能很好。如何制备出这种类型纤维的关键是控制其电阻率。

一种碳化硅纤维与环氧树脂混合而成的复合材料电阻率为 $3\times10^2\Omega\cdot cm$，其平板试样在 8～16GHz 范围内均有约 20dB 的吸收。

应用碳化硅等半导体性材料制作吸波材料时，由于其电性能的温度依赖性较大，故应十分谨慎。通过选择适当的半导体类型、杂质成分与百分含量等，有可能减小温度的影响。

功能高分子材料　绝大多数高分子材料在不同程度上是介电性质的，现已研制出很多高分子半导体和高分子磁性材料。利用高聚物的导电性来衰减电磁波，这是一种本征型吸收材料。这种聚合物是由 C、H、N、S、O 等元素组成，具有共轭性主链（例如聚乙炔、聚吡咯等），它与电子受体型化合物进行电荷转移复合后，形成高分子电荷转移复合物。它的特点是其电导率可以通过控制掺杂浓度在半导体与导体之间的宽阔范围内变化，因此可以根据吸波性能的要求，在深入研究导电聚合物吸波机理基础上进行分子设计，合成出具有优异综合性能的新型吸收剂。这类吸收剂具有密度小、热稳定性与化学稳定性高等优点，但从其吸波机理上讲，是属于电损耗类型，为了进一步扩展吸收频带，应研制同时具有电与磁损耗的高分子物。最近，国外报道研制了一种称为视黄素席夫碱盐的高分子物质，据称有可能吸收宽频电磁波。

放射性同位素　等离子体是电磁波的良好吸收介质。很早就提出过利用等离子体进行反雷达伪装的想法。其基本原理是：当电磁波与等离子体相互作用时，等离子体内的电子发生与电磁波同样频率的强迫振动，但由于在电子振荡运动的轨道上存在中性粒子和离子，因而可能发生偶然碰撞，使规则的二次辐射过程受到干扰。不规则的二次辐射与入射雷达波之间的共同点很少，且能被等离子体有效地吸收。此外，电磁波对等离子体的绕射、折射和反射等都会使反射信号发生频移和相移。加之等离子体屏外层边界电子密度很小，从而保证它与自由空间有良好的匹配，使电磁波在两媒质边界上的反射很小，在整个电磁波频谱范围内都可能发生电磁波的吸收和衰减。等离子体的产生是通过使用放射性同位素而获得的，这是由于放射性同位素所辐射的高能粒子流（α、β、γ 粒子）不断电离毗邻的空气层所致。

利用放射性同位素作吸收剂的主要优点　吸收频带宽（几乎对整个电磁波频谱都可产生吸收与衰减）；厚度小；使用周期长；应用工艺简单；能承受高速飞行时的空气动力特性，此外，它还吸收红外、声波以及抗静电等。应用放射性同位素的主要问题除了它的吸波性能随离地面高度增加而降低外，还有放射性对人体的伤害问题，为此必须严格选择同位素类型及控制其剂量，但这样作又大大减少了它的效果，试验证明：对厚度为 0.025μm 的钋-210 涂层，在 1GHz 雷达波发生多次反射的部位（例如，进气道内壁），则可成倍增加吸收效果。目前考虑选用的同位素主要是能释放 α-粒子的元素，如钋-210。其他如锶-90 也可考虑。

（2）吸波材料制备

① 吸收剂（颗粒、短纤维等）在介电黏结剂（基料）中的分散工艺　吸收材料主要是通过填料的作用（本征型功能吸收剂除外）而具备衰减电磁波功能的，因此其性能在很大程度上不仅受填料种类的影响，而且受填料的分散状况、填料与黏结剂的界面状态的影响。为了使其混合均匀，合理地选择制备工艺及施工条件是很重要的。

在制备黏稠状混合物时，一般采用搅拌、研磨等方法就可以获得比较均匀的分散体。但当吸收剂颗粒达到超微级时，分散就成为制备吸波材料的关键，目前采用的方法包括溶液分散法与低介电黏结剂先期分散法。有些吸收剂颗粒可能与液体黏结剂（如树脂、乳胶等）混溶性不好，此时必须选用适当的特种助剂（如表面活性剂等）以制备出均匀分散的体系。

当采用导电纤维作吸收剂时，短纤维的分散是一个困难问题，因为此时不能进行研磨，而只能在无剪切力作用状态下进行缓慢搅拌，否则纤维将被切断，这就等于混合的是金属粉末，其作用也就消失。用这种混合物制片时，也只能采用等速辊筒压出，以防止导电纤维被撕断。

在制备固态混合物时，经常采用机械式混合、混炼等工艺方法，除了按一般橡胶、塑料等通用的加工方法外，还必须掌握其混合工艺特点，例如，对有些吸收剂而言，由于混炼条件的微小变

化，可以很显著地改变其制品的吸波性能。

② 涂层型吸波材料的制备　吸波涂层的涂覆工艺通常采用油漆涂覆工艺。由于被涂物体为金属反射体，为了增加厚膜涂层与金属之间的附着力，必须对金属表面进行除锈，去氧化皮等表面处理，并用溶液清洗。

施工中经常采用刷涂法与喷涂法。前一方法简单，适用于任何形状物件，损失量也较少，但施工效率低，劳动条件差，表面状况不太好。后一方法所得的涂层均匀，生产效率高，但涂料损失量大，同时由于使用大量溶剂，操作环境较差。当喷涂的吸波涂料中混有导电短纤维时，所采用的喷枪之喷嘴口径应为 1.0～6.0mm。口径小于 1mm 时，金属短纤维将堵塞喷嘴而使喷涂困难，而口径大于 6mm 时，则很难使喷料细化而得不到平整而均匀的涂层。

采用熔射法制备吸波涂层时，把金属粉末或树脂从喷嘴随同等离子体或火焰喷射到反射基体上并使其熔固，以形成一复合吸收膜。用这种方法制得的吸收体性能与其他方法所得的相同，但粘接强度提高，故可用于恶劣环境中。

制备吸波涂层时，涂层厚度的控制是十分重要的，如对厚度为 2mm 的涂层，为了保证其吸收频率在规定范围内，其允许厚度变化为±0.1mm。目前控制厚度的方法除了凭经验外（如掌握涂覆遍数与用料量，称量被涂物增重等），已采用测厚仪器控制。

③ 结构型吸波材料的制备　结构型吸波材料根据其构成可分为层板型与夹层型两种。其电气设计依据的是多层阻抗变换原理，因而其制备工艺也可按类似过程进行，即按混合物制备→增强纤维浸渍→铺层→固化成型等步骤进行。当采用夹芯结构时，则可直接粘接或胶膜粘接。

手糊成型法目前仍较常用，在常温常压下，用刷子或辊子使纤维浸渍于树脂中，脱模后，使之固化而获得制品。采用喷射成型法来制备混有导电短纤维的结构型吸波制件也很有发展前途，其他的复合材料多种成型方法可根据使用要求而被采用。

随着材料制备工艺技术的发展以及未来隐身装备的使用要求，结构型吸波材料的制备新技术也不断出现，如混杂增强，自动编织

及夹层缠绕等技术。

11.2.6 微波吸收材料的应用

（1）在世界发达国家军事上的应用

① 美国　推出六项隐身计划

a. B-1B 轰炸机，总投入 260 亿美元，除了采用隐身外形设计来改变缩小雷达散射截面外，还采用了吸波材料。两项技术措施到位后，可以大大缩小 RCS，它的 RCS 是 B-52 轰炸机的 1%。

b. ATB 先进技术轰炸机，近 9000 万美元拨款，采取的主要技术措施：一是采用独特的尾翼外形；二是机身表皮大部分是由吸波的蜂窝结构建造的，蜂窝中填充了吸收雷达波微粒。经两项技术措施后 ATB 的 RCS 小于 $1m^2$。

c. ATF 先进战术战斗机，计划 2006 年列装部队。美国空军、海军计划采购 1000 架，单价不低于 3500 万美元。主要技术措施一是将外挂武器置于机身内或半埋，采用数控飞行；二是 60%的机身质量由热塑性吸波复合材料组成；三是采用红外搜索跟踪设备获取目标。

d. ATA 先进战术飞机 1995 年开始交付部队，美国海军、空军计划采购 1000 架。采取弯曲的机身外形和相应的吸波材料。

e. F-19 侦察攻击机采用硼、碳纤维复合吸波材料、机身涂覆以铁酸盐为主的微波吸收材料，在外形设计上采用双三角、双内倾重尾，发动机进气口位于翼根部上方。

f. ACM 先进巡航导弹，1986 年开始生产，计划生产 1300 枚，总费用 70 亿美元，目前已开始装在 B-52 上进行试验。

② 前苏联　从 20 世纪 80 年代以来，在隐身技术的研制工作上投入很大力量，取得明显进展。目前研制的重点是降低武器的 RCS。

a. 一些飞机已采用了隐身技术，如 An-124 运输机，采用 60t 吸波复合材料，不但减轻了自重，也降低了 RCS。Tu-95H 机身均采用了 RAM。米格 29、米格 31、苏 27 也采用了 RAM，以降低 RCS。

b. 加强陶瓷吸波材料和锂-铝合金吸波材料的研究应用，正在

考虑使用它们来制造发动机进气道中使用吸波挡板和涂料。

③ 西欧　目前处于认识到其重要性并开始执行减少雷达信号技术计划的初始阶段。

a. 英国如普莱塞公司自第二次世界大战以来，一直在研究、生产吸收材料，它在美国的子公司将生产的 99%的吸波材料卖给美国用于隐身计划。

b. 法国政府和空军很重视发展和应用隐身技术，法国的玛帕莱克斯（Marplex）公司研制出一种防雷达涂料，得到法国国防部的大量订货。

c. 德国早在二次世界大战期间，就研制出橡胶型吸波材料，用在潜艇通气管上，使被发现的概率大为减少，开始了舰艇隐身的新纪元。但真正引起世界对舰艇隐身技术的重视则是 20 世纪 70～80 年代的事。由于战争，几次海战中双方大量使用制导武器，空舰导弹、反舰导弹击毁水面舰艇的概率越来越大，迫使各国寻求解决的办法，其中舰艇隐身技术就应运而生。最典型的是美国对现役的 10 万吨级的“尼米兹”号核动力航母上涂有大量的雷达波吸收涂料，使 10 万吨级的尼米兹号变成了巡洋舰的“大小”。又如前苏联下水的“基洛夫”级核动巡洋舰采用了 RAM 以减少了巡洋舰的 RCS；德国的 SAR2000 新型高速导弹艇、意大利“西提亚”新型快速攻击艇均采用了雷达波吸收材料。

④ 日本　是研究 RAM 很强的国家，20 世纪 80 年代中期推出世界领先的铁氧体系列的吸波材料，防卫厅除了积极武装自己外，还专门出资于美国等国家来发展隐身计划。另外，日本也是发展研究纳米材料最先进的国家之一，在雷达隐身材料方面同样也是世界先进的国家之一。

综上所述，国外吸波材料的应用技术已发展到一个相当高的水平，由于在一段历史时期内，雷达仍将是一种最基本的远程探测手段，雷达波吸收材料的研究和应用无疑仍将是隐身技术研究中最重要的内容。

（2）国内微波吸收材料应用研究情况　国内吸波材料研究始于 20 世纪 60 年代中期，80 年代中期被国家正式列为研究攻关项目，

www.gqpdf.com

通过近二十年的研究发展，材料研究水平并不逊于国外，但应用水平远落后于国外先进水平，尤其是飞行器上的应用差距更大，尽管如此，我国在某些武器上的应用也达到世界先进水平，特别是冶金系统、航天系统、航空系统等研究院所在材料研究和应用方面做出了极为重要的贡献。

参 考 文 献

1 廖绍彬．铁磁学（下）．北京：科学出版社，1992

2 Wohlfarth E. P. 主编．铁磁材料．刘增民等译．北京：电子工业出版社，1993. 175

3 Kittel G.. *Phys. Rev.*. 1948，73（2）：155

4 Damon R. W.. *Rev. Mod. Phys.*. 1953，25：239

5 Suhl H. *Proc. Inst. Radio Engrs.*. 1956，44：1270

6 Helszajn J.，Eng C.，McStay J.. *Proc. Inst. Electrical Engrs.*.（Electronics）1967，114（11）：1585

7 Sparks M.. Ferromagnetic Relaxation Theory. New York：McGraw Hill，1964

8 Schlomann E.. *J. Phys. Chem. Solids*. 1958，6：242

9 Schlomann E.. *AIEE Proc. Conf. Magn. Magn. Mat.*. 1956，600

10 Han Zhiquan. Proc. of ICF-4. *Advances in Ceramics*. 1985，16：61

11 Han Zhiquan. A Study of Microstructure of Narrow Linewidth Polycrystalline YIG. *INTERMAG-MMM Conf*. New York，1979，韩志全，电子科学，1983，(3)：26

12 Zhang Xi，Lin Houzhi. *IEEE Trans Mag*. 1983，13（3）：1457

13 Winkler G.，Hansen P.，holst P.. *Philips Res. Repts.*. 1972，(2)：151

14 Takamizawa H.，Yotsuganagi K.，Inui T.. Annual National Convention，IEEE，Japan，1972，No. 423；Ogasawara N.，IEEE Trans Mag. 1973，MAG-9，（3）：538

15 Vrehen Q. H.. *J. Appl. Phys*. 1969，40（4）：1849

16 Patton C. E.. *J. Appl. Phys*. 1970，41：1637；Patton C. E. *IEEE Tran. Mag*. 1972，8（3）：433

17 Kaelberer R. E.，Patton C. E.. *IEEE Trans. Mag*. 1977，13（5）：1230

18 Han Zhiquan，3rd Inter. Conf. on Microwave and Millimeter wave Technology Proceedings，2002，1097

19 韩志全．磁性材料及器件．2003，34（2）：1

第 12 章　磁流体与磁流变体

12.1　磁流体

12.1.1　磁流体的基本概念

磁流体（Magnetic fluid）又称磁性液体（Magnetic liquid）或铁磁流体（Ferromagnetic fluid）。顾名思义，它是一种液态的磁性材料。既具有固体的磁性又具有液体的流动性。它是由粒径为纳米尺寸（几个到几十个纳米）的磁性微粒，依靠界面活性剂的帮助，均匀分散、悬浮在载液（基液加界面活性剂）中构成的一种固液两相的胶体混合物，这种材料即使在重力、离心力、电磁力作用下也不会发生固液分离，是一种典型的纳米复合材料[1]，如图 12-1 和图 12-2。

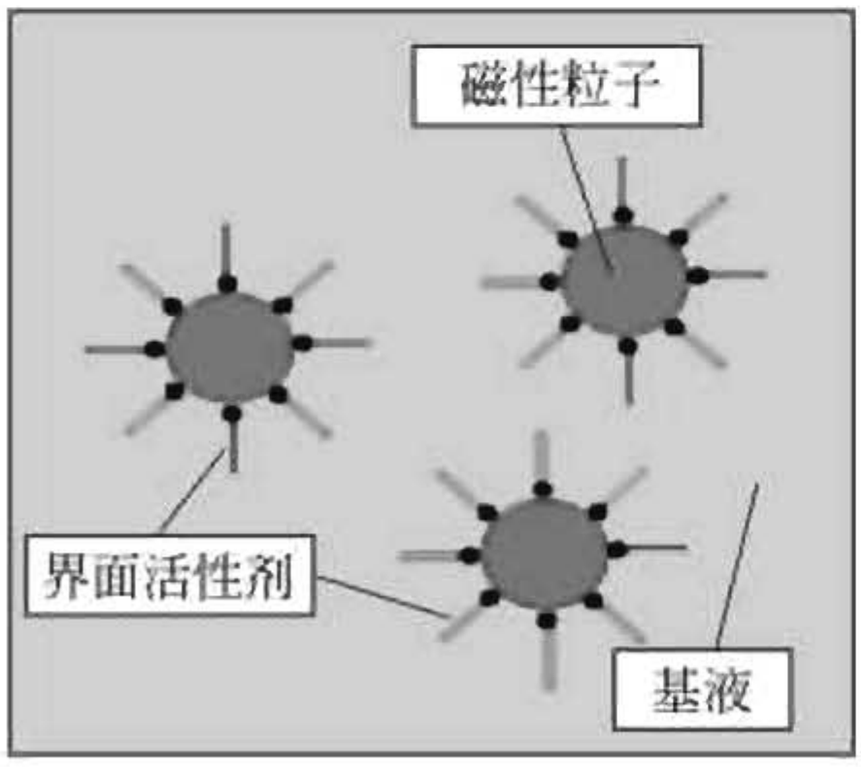


图 12-1　磁流体组成原理图

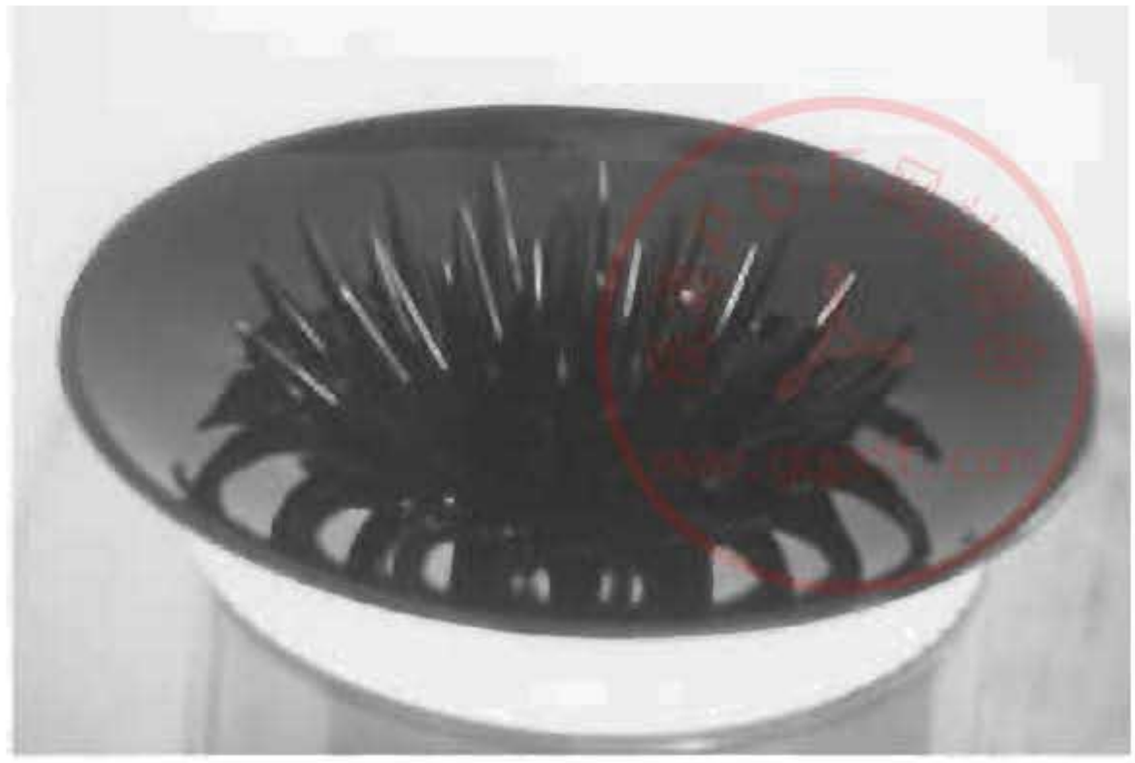


图 12-2　磁性液体在磁场下的形貌像

早在 200 年前，人们已意识到磁性液体的潜力，并且试图生产出一种稳定的铁磁悬浮液，但直到 20 世纪 60 年代初才由美国宇航局（NASA）解决，NASA 将一种液体与稳定的表面活性剂用球磨的方法制取了一种胶体，用这种磁性胶体与燃料混合，通过永磁体加以控制，克服了失重状态下燃料不能正常工作的问题。1960 年

美国又用磁性液体作宇航服的封接材料获得成功。就磁性液体而言，它是一种完全为了满足实际需要，特别是航天工业的需要而开发的产品，并逐渐扩展到军事及民用的各个领域。不仅是美国，前苏联、英国、日本、法国、德国等发达国家都十分重视，许多著名的大公司也投入大量人力物力进行研究。开发和生产磁性液体，并将其应用到航天、电子、遥测、遥控、机械、能源、化工、冶金、仪表、环保、印刷、医疗、卫生等诸多方面，成为解决复杂过程问题的可靠材料。目前国外已将磁性液体和磁液装置广泛应用于真空设备、等离子化学处理设备、激光系统、阻尼系统、选矿设备等。据估计，日本 2000 年磁性液体的产值已近 200 亿日元。

在研究和开发的同时，各国间的科技交流与协作也日益增多，1977 年在意大利召开了第一届磁性液体国际会议，自此以后，国际上每三年召开一次国际会议，至今已召开九届。

12.1.2 磁流体的分类

目前国际上开发的磁性液体种类繁多，由于它是一种由磁性粒子与载液形成的复合体，因此可分别按磁性粒子的类型和载液的类型来分类。

（1）按照磁性液体中超微磁性粒子的类型来分　磁性液体可分为以下几种。

① 铁氧体类　如 Fe_3O_4、γ-Fe_2O_3、$MeFe_2O_4$（Me = Co、Ni）等。

② 金属系　这类磁流体超微粒子选用 Ni、Co、Fe 等金属微粒及合金（如 Fe-Co、Ni-Fe）。

③ 氮化铁系　磁性液体超微粒子选用氮化铁，因其磁性较强，故可获得较高饱和磁化强度。

（2）按照载液种类来分　磁性液体载液可分为以下几种。

① 水。

② 有机溶剂（庚烷、二甲苯、甲苯、丁酮）。

③ 碳氢化合物（合成剂、石油）。

④ 合成脂。

⑤ 聚二醇。

⑥ 聚苯醚。

⑦ 氟聚醚。

⑧ 硅碳氢化物。

⑨ 卤代烃。

⑩ 苯乙烯等。

由前文可知，磁流体主要由磁性粒子、表面活性剂及基载液三个基本成分组成。由于表面活性剂与基载液均可从现有的物质中选用，因此，磁流体制备研究的关键主要是磁性粒子的制备。早期的磁流体制备技术的研究主要是以铁氧体为主，后来，为了满足不同应用的需求和向高性能发展，人们又研究开发了其他材料的磁性粒子。

12.1.3 磁性粒子的种类及制备[2~9]

（1）铁氧体类　按照具体原理的不同，其制备方法可以概括地分为物理方法与化学方法两大类，物理方法主要是指机械研磨法，化学方法则包括水溶液吸附——有机相分散法、胶溶法等，下面分别加以论述。

① 机械研磨法　该方法最早由 S. S. Papell 提出，是最初制备磁流体的方法之一，其基本原理为将直径为 0.1～0.2μm 的铁氧体粉料与所选的基载液及表面活性剂混合，装入球磨机中，经长时间球磨（>1000h），然后采用高速离心机离心分离 20min，以除去直径>25nm 的粒子，从而得到性能稳定的磁流体。该方法最先由 Papell 提出，此后又经过许多学者的深入研究，在磁流体的早期研究中曾发挥重要作用。该方法虽然原理十分简单，但是效率低下，而且成本昂贵，加之材料的利用率很低，设备磨损十分严重，所获得磁流体的杂质较多，因此实用性很低。

由于颗粒之间的相互吸引所造成的磁性凝聚是导致球磨效率低下的直接原因，Khalafalla 与 Reimirs 提出可采用非磁性的吴氏体氧化铁作为原料，通过球磨获得稳定的胶体悬浮液，然后再通过加热使其转变为磁铁矿，即发生 $4FeO \longleftrightarrow Fe + Fe_3O_4$ 的反应，该方法可以使研磨时间大大缩短，节省时间约 95%左右。

② 胶溶法　又称解胶法，是目前最普遍使用的方法之一，其基本原理为，将可溶性的亚铁盐及铁盐按摩尔比 1∶2～2∶3 的比

例以溶液的方式混合，加入过量的氨水（$NH_3 \cdot H_2O$），在一定的温度下，高速搅拌，进行沉淀反应，得到胶体尺寸的 Fe_3O_4 微粒。然后，将其加入到含有适当表面活性剂的基载液中，如含有油酸的煤油中煮沸，Fe_3O_4 粒子表面就会吸附油酸，从水相转移到基载液煤油中，分离后即可获得煤油基磁流体。该方法是 Khalafalla 于 1972 年提出的，具有制备时间短、回收率高的特点，但是，它对操作过程的控制要求非常严格，而且，在将 Fe_3O_4 粒子从水相转移到基载液中的过程中，Fe_3O_4 粒子容易发生氧化。

③ 溶液吸附——有机相分散法　该法由日本的下饭坂于 1966 年首先提出，其基本原理为将可溶性的铁盐和亚铁盐［如 $Fe_2(SO_4)_3$，$FeSO_4$］以溶液的方式按照一定的配比混合，加入 NaOH，用沉淀法合成 Fe_3O_4 粒子；接着，加入过量的表面活性剂油酸钠，并加热；部分油酸钠发生水解，生成油酸，并在 Fe_3O_4 粒子表面形成双分子吸附层；然后，进行酸化处理，使双分子吸附层变成单分子吸附层，使 Fe_3O_4 粒子从水溶液中沉降分离；最后，清洗沉淀，除去钠盐，将其分散于相应的基载液中形成磁流体。该方法具有原理简单、工艺连续的特点，但产品纯化比较麻烦。

（2）金属类　按照基本原理的不同，金属类磁流体的制备方法大致可以分为以下几类，即铁磁元素金属有机化合物在适当条件下热分解，铁磁元素金属氧化物在适当条件下还原，铁磁元素金属或合金在惰性气氛下蒸发，以及铁磁元素金属盐类在特定条件下电解等，下面分别予以简要论述。

① 羰基分解法　常用的铁磁元素金属有机化合物主要有 $Fe(CO)_5$、$Fe_2(CO)_9$、$Co_2(CO)_8$、$Ni(CO)_4$ 等。在一定的条件下，在加入表面活性剂的溶液中，使上述金属羰基化合物发生分解，即可得到纳米级的金属磁性粒子；金属磁性粒子在表面活性剂的作用下分散在基载液中，形成稳定的磁流体。如果采用含有两种或两种以上的金属元素的有机化合物，则可以制得二元或多元合金磁流体。

按照外加条件的不同，羰基分解法又可分为紫外线照射分解法与油浴加热分解法。其中，后者使用较多。目前，采用上述方法已

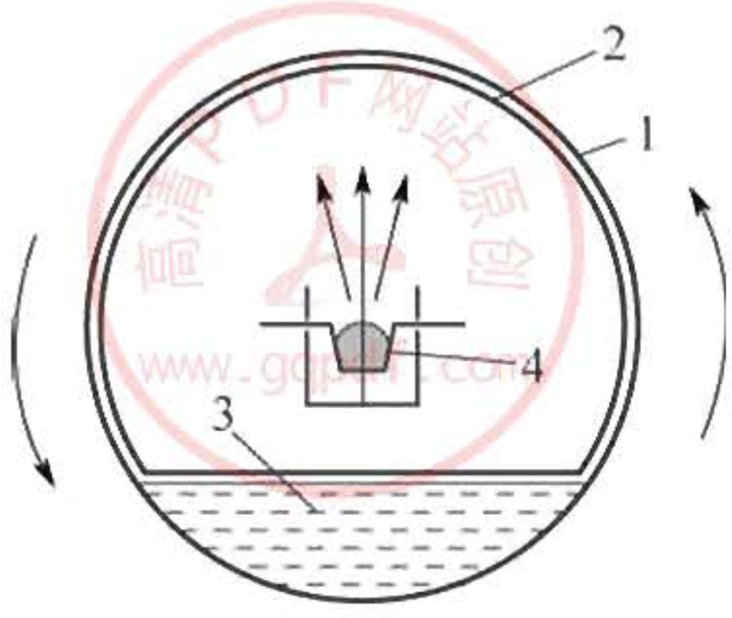


图 12-3　真空蒸发法制备金属磁流体示意图

1—真空室；2—液体薄膜；3—磁流体；4—蒸发源

可以制备金属铁磁流体、金属钴磁流体、金属镍磁流体以及 Fe-Co 合金磁流体、Fe-Ni 合金磁流体等。

② 真空蒸发法　如图 12-3 所示，在旋转滚筒内部装入含有表面活性剂的基载液，则当滚筒转动时，将在其内部形成一层液体薄膜；将单质金属 Fe 或 Co 或 Ni 放在蒸发源中蒸发，则金属蒸气在液体薄层中发生冷凝形成细小的固态金属颗粒；金属颗粒在表面活性剂的作用下分散于基载液中，如此周而复始，即可制得稳定的金属磁流体。用该方法制备金属磁流体具有磁性粒子粒度分布均匀、分散性好的特点，但是所需要设备复杂，而且需要抽真空。

③ 电火花熔蚀法　其基本原理为，通过浸没于介电流体中的两个电极之间反复电火花放电，在电极上产生局部的高温过热区，使电极材料（金属或合金）发生熔化、蒸发，并从加热区域喷射进介电流体中，迅速冷凝成为细小的金属颗粒。由于粒子的粒度分布范围较宽，生成的金属粒子必须经过进一步筛选，并选用合适的表面活性剂，方可制得稳定的磁流体。

④ 电解沉积法　在电解池中以液态金属载体（如水银）为阴极，对铁磁元素金属盐的水溶液或酒精溶液进行电解还原，被还原的金属在液态金属载体中沉积。为了防止金属颗粒长大，在沉积过程中，必须用机械方法或磁力搅拌方法搅动液态金属载体。

可用作载体的液态金属主要有汞、镓、Cerro 低熔点合金（即镓合金）、锡、Ingas 合金（即 In-Ga-Sn 合金）和铅铋合金等。其中，研究应用最多的是汞。但是，以汞为基液的金属磁流体容易发生金属颗粒的扩散长大，磁流体的化学稳定性较差。为此，可在汞中加入 Sn、Na 或 Sb，以在金属颗粒表面形成一层覆盖层。以汞为载体的金属磁流体存在的主要问题是提高饱和磁化强度比较困难，因为当汞中金属粒子浓度较大时，其黏滞性会显著增加。

目前，利用电解沉积法可以制得 Fe、Co、Ni、Fe-Co 合金、Ni-Co 合金、Ni-Fe 合金等在水银或水银合金中的磁流体。

（3）氮化铁类　金属类磁流体的饱和磁化强度虽然很高，但是其化学稳定性较差，容易发生氧化变质，导致磁流体磁性能的下降。为此，人们又研究开发了氮化铁类磁流体。氮化铁类磁流体的制备方法主要有以下两种。

① 等离子体法　用 Ar 气将 $Fe(CO)_5$ 及 N_2 通过等离子体反应器，通过等离子体激发使 $Fe(CO)_5$ 分解，产生的 Fe 与离子态的氮发生化合反应，即可制得氮化铁磁流体。该方法生产效率很高，但是粒子的粒度分布范围较宽，而且磁流体的饱和磁化强度不高，另外，产品的纯化也比较困难。

② 气相液相反应法　在添加了羰基铁及胺基系表面活性剂的煤油中导入氨气，通过化学反应生成胺基羰基铁的中间体，然后在高温下分解该中间体，即可生成氮化铁。氮化铁粒子在表面活性剂的作用下分散在基载液中，即可制得氮化铁磁流体。该方法由日本的中谷于 1990 年提出。用该方法制备的氮化铁磁流体饱和磁化强度很高，可高达 0.17T。

氮化铁磁流体的化学稳定性虽然优于单质金属，但仍然存在着氧化问题，在大气中，随着时间的延长，氮化铁磁流体的饱和磁化强度不断下降，1008h 后接近于零。

12.1.4　基载液的选择[2,3,10,11]

磁流体的用途很广，在实际应用中，根据使用对象的不同，对磁流体有关性能指标要求也不一样，往往是偏重于某一个方面或某几个方面。如用于真空密封的磁流体要求具有低蒸气压，用于液体密封的磁流体要求与被密封液体具有不相溶性，用于阻尼的磁流体要具有一定的黏度和导热性，而用于密封化工反应设备的磁流体则要求具有耐高温和抗蚀性等。因此，在使用磁流体时必须根据使用对象的不同，有针对性地选择特定性能的磁流体。

基载液作为磁流体的主体部分，它赋予磁流体以流体的性质，其基本性质对磁流体的有关性能指标如密度、黏度、沸点、凝固点、蒸气压、导电性、导热性、耐高温性、抗辐射性以及化学稳定

性等有着直接影响，因此，在制备磁流体时，可以根据具体应用条件的要求来选择相应的基载液。

基载液的种类很多，大致可以分为水基、有机基和金属基三大类，而每一类又具有不同的特性，人们可根据实际应用的要求选择不同的基载液。

12.1.5 表面活性剂的种类及选择[2,3,7,10～13]

表面活性剂是一种具有特殊分子结构的有机化合物，从结构上来看，所有的表面活性剂都是由功能完全不同的两个部分组成，即极性基和非极性基。由于极性基团在种类结构上的改变远比非极性基团的改变对表面活性剂性质的影响大，因此，表面活性剂一般是以极性基团的结构分类，按照其是否带电，可将表面活性剂分为离子型表面活性剂与非离子型表面活性剂两大类，其中，离子型表面活性剂按电离后电荷类型的不同又可以分为阳离子型表面活性剂、阴离子型表面活性剂和两性表面活性剂三类；非离子型表面活性剂在水中不能电离，因而呈电中性。

表面活性剂的种类很多，然而，如何选择合适的表面活性剂却并非易事。就表面活性剂的作用而言，客观上要求其分子的一端能通过离子对、氢键或范德华力等作用与磁性粒子表面形成牢固的结合，另一端则能够被基载液溶剂化。表面活性剂分子吸附在磁性粒子的表面，其亲液端在液相中扩展开来，在粒子周围形成一层溶剂化膜。为了有效防止磁性粒子因碰撞接触而发生聚集，溶剂化膜通常要求具有一定厚度。

由上面分析可知，分散体系的稳定性是由磁性粒子、表面活性剂和基载液三者之间的相互作用共同决定的。因此，选择表面活性剂时，必须保证其一端会对基载液形成争夺粒子表面的竞争吸附，另一端则会被基载液溶剂化，这就要求基载液对表面活性剂的一端具有良好的相容性，而对另一端则不具备溶解性。

当基载液为液态金属时，上述有机表面活性剂不再适用。为了阻止金属磁性粒子通过金属基载液扩散成长，在制备时，可加入非磁性金属元素，如 Sn、Sb、Na 等，在磁性颗粒表面覆盖一层非磁性金属膜或形成中间金属化合物，以阻止磁性粒子的扩散成长。

磁性液体制备研究的发展方向：磁性液体的稳定性与耐热性是人们十分关切并致力研究的方向之一。对被密封液体介质高度稳定的磁性液体，是解决磁性液体密封液体介质问题的主要途径。金属粒子磁性液体饱和磁化强度较高，而氮化铁类磁性液体的饱和磁化强度和化学稳定性均优于金属类磁性液体，这是目前研究和开发的主要方向之一。研究人员们尝试多种表面活性剂配合使用，以突破现有表面活性剂品种有限的制约，寻求利用现有表面活性剂制备新型磁性液体的可能性。另外，国内外正采用电子显微技术、X 射线衍射技术、穆斯堡尔谱技术等现代测试技术来分析磁性粒子的尺寸及晶体结构，以便有效控制磁性液体质量。

我国自 20 世纪 70 年代开始先后有钢铁研究总院、南京大学、中国矿业大学、北京理工大学、北京航空航天大学、北京化工大学、北方交通大学、山东大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、黑龙江省化工研究院、株洲维格磁流体有限公司等几十家单位开展了磁性液体的开发和应用研究工作。在科技人员 30 多年的不懈努力下，我国磁性液体的研究也取得了较大的进步，从磁性能上来讲，目前铁氧体型磁性液体的磁性能达到 $3\times10^{-2}\sim5\times10^{-2}$T 左右；金属型磁性液体的磁性能达到 0.07～0.1T；氮化铁磁性液体的磁性能达到 0.08～0.17T 范围，在磁性液体密封、传感器等应用研究方面也取得了一些重要进展。

12.1.6 磁性液体的主要特殊性能[3,6]

（1）磁特性　磁性液体的磁特性主要取决于磁性粒子的磁特性。由于磁性粒子尺寸很小，一般为几个纳米到几十个纳米，通常小于单畴临界尺寸，因此，其磁化矢量能自发磁化到饱和状态。当无外加磁场时，磁性粒子的集合体类似于顺磁体，各磁化矢量相互抵消，对外不显示宏观磁性，磁性液体的这种特性就称为超顺磁性。

（2）力学特性　磁性液体在磁场中的表观黏度发生显著变化（具有磁流变特性），这种特性不但取决于磁性液体本身的性质，同时取决于外加磁场的强度、温度和流动形式；因为磁性液体为固液两相流体，因此在外加磁场中显示出两相流体的特点。

（3）光学特性　磁性液体大多为暗褐色、不透明，对它进行稀释或制成厚度只有几个微米的薄膜，则光线可以通过。当无外加磁场时，其光学特性表现为各向同性；当有外加磁场时，由于磁性粒子沿外加磁场方向作有序排列，从而表现出光学各向异性。与某些晶体一样，当光线通过时，将产生光的双折射现象，这就是磁致双折射效应。磁性液体的磁致双折射效应可通过改变薄膜的厚度及外加磁场强度来进行调控。

（4）声学特性　声波在液体中传播时，会因能量的耗散而衰减。对于磁性液体而言，当声波在其中传播时，其传播的速度及衰减的程度与外加磁场直接相关，并且呈现出各向异性。此外，还与基载液的黏度、温度、固体粒子的粒度及体积分数等有直接关系。

由于磁性液体具有上述这些特殊的性质，从而使其可以在许多领域获得应用。目前其应用范围已扩展到航空航天、电子、化工、机械、能源、冶金、环保、医疗等各个领域，成为解决复杂工程问题的可靠材料。

12.1.7　磁性液体的主要应用[1~3,6,9,11,14]

磁性液体的应用如图 12-4～图 12-8 所示。

（1）密封　能被强磁场吸引而牢牢地附着在磁场内，并保持流动性，是磁性液体的特点之一。利用这一特性可制造各种类型的密封装置，与现有密封相比，磁性液体密封有如下特点。

① 无泄漏，这对不允许泄漏的侵蚀性介质，毒性介质及有害生态的介质之密封无疑非常重要。

② 转轴从静止到高速或低速旋转都具有相同的密封效果，而且时开时停工作均可密封，目前国外这种转轴的转速的最高线速度已达 30m/s。

③ 无密封摩擦，磁性液体可避免活动部件与固定部件间的直接接触，消除零件间的磨损，密封寿命仅取决于轴承寿命，它对轴的跳动、偏心和表面光洁度等要求都不高。

④ 结构紧凑，辅助及控制系统简单，振动小，密封的同时又有润滑作用，故无需外加润滑系统。

⑤ 由于磁性液体泄漏损失极小，因此能长时间运转而无需重

新充填磁性液体，经久耐用，可连续工作十多年，工作可靠，维修也很方便。

⑥ 磁性液体还能像排斥一切非磁体一样消除落入间隙的灰尘和砂粒，因此磁性液体密封能可靠的保护密封空间不受污染。

⑦ 通过密封设计，其密封不仅可以耐高压，还能保持在真空下工作。

⑧ 近年来人们研究开发的可封油用的憎油基磁性液体，使得磁性液体在封水、封润滑油等液体介质方面取得突破，如图 12-4。

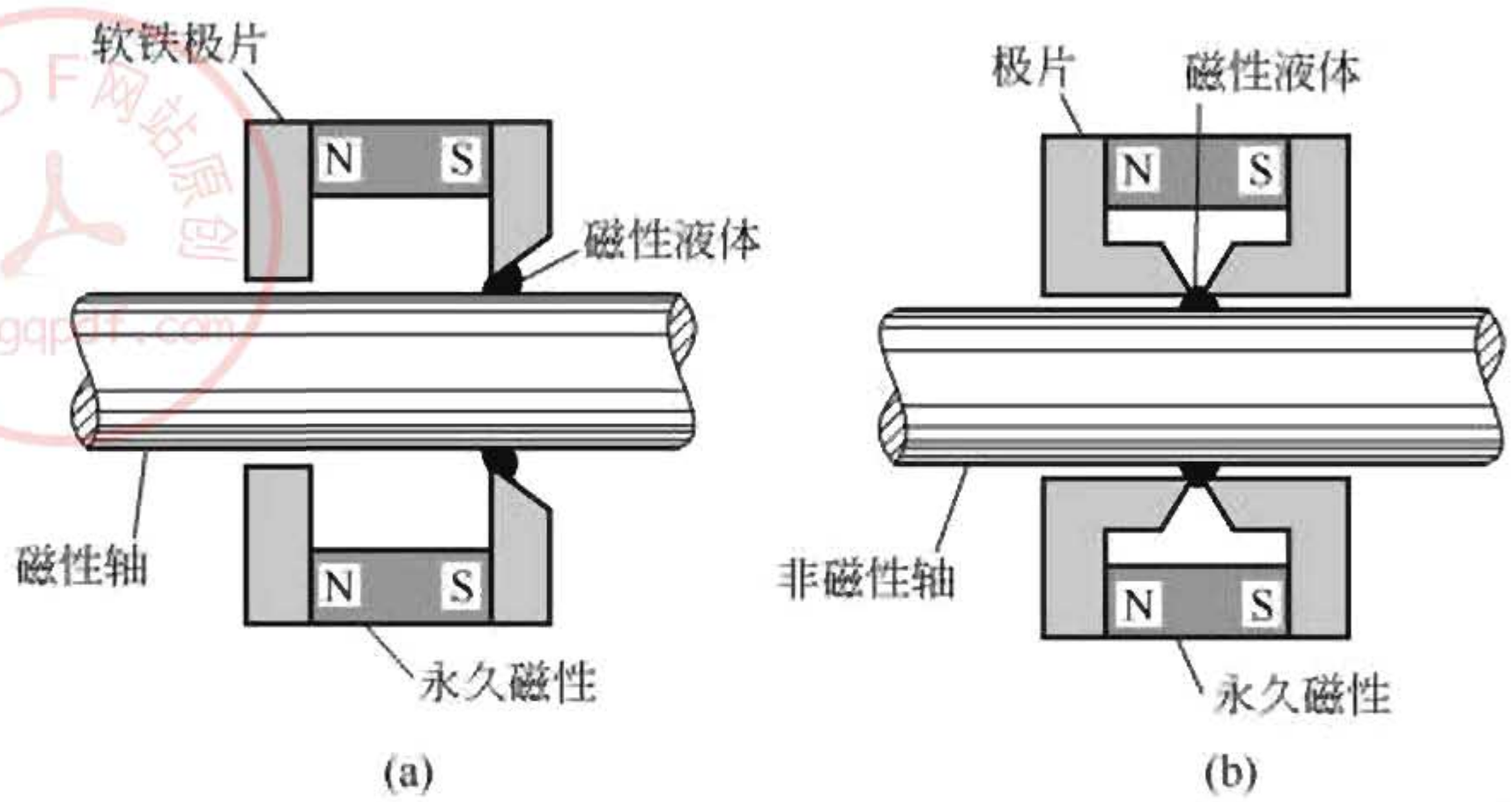


图 12-4　磁性液体密封原理

由于磁性液体密封有上述优越性，因此可应用于真空水和油等液体的密封和超洁净密封，如精密仪器的转动部分，X 射线衍射仪中的转靶部分的真空密封，大功率激光器的转动部件，单晶炉提拉部位，真空加热炉等相关部件的密封，均可采用磁性液体。特别是磁流体在计算机硬盘上防尘密封的应用，既可以防止尘埃进入硬盘损坏磁头和磁盘，又可以使计算机硬盘达到更快的转速。由此可见，磁性液体密封有着许多其他密封不可取代的优越性，因此不论在国防工业，还是在民用工业都将有着非常广泛而重要的应用前景，在国民经济中将会形成一个非常重要的产业。据估计国外 2000 年磁流体在计算机硬盘上的应用已达 1.7 亿美元产值。

（2）磁性液体扬声器　随着电子技术的发展，收音机、录音机、电视机从电子管转变到晶体管，今天又发展到集成化，出现了

小型携带式装置，在电路设计方面也很完善，能得到高保真度。这样，扬声器的音质效果就成为主要矛盾，尤其是小口径扬声器，希望提高输出功率，扩展低音区域。采用注入磁性液体的方法可以很好地解决上述问题，特别是对于口径为 3～10cm 的扬声器更为有益。

磁性液体扬声器与普通扬声器相比，具有输出功率高、频率响应特性好，从而扩展了低音区域和减小了频率失真现象。其特点如下。

① 承受高功率特性　提高扬声器的承受功率特性是设计高保真扬声器时必须考虑的重要参数之一。在大型落地式音响系统中，需要进一步扩大动态范围，为此要提高音频信号电流，也就是提高扬声器承受输入功率能力；在小口径扬声器方面，需要改善低音不足的问题，从而要求增加振动系统的质量。扬声器承受输入功率的能力取决于音圈的耐热性能，因为扬声器是一个电声换能器，在电能的转换过程中，很大一部分电能将转换为热能消耗在音圈上，随着输入音频信号电流的增加，音圈上的温度会升高，导致烧断音圈绕线和软化黏胶。如果采用磁性液体的方法，能有效的解决散热问题。实验证明：灌入磁性液体后能使扬声器的输出功率提高 2 倍以上，这是因为磁性液体的热导率比空气大 6 倍，另外磁性液体直接与金属接触，散热面积大。

② 改善频率特性　在现有普通的扬声器中，磁隙中心段和两端之间的磁通密度分布是不均匀的，因此它们对音圈的推动也不一致，造成频率失真现象。在磁性液体扬声器中，由于磁性液体具有比空气大的磁导率，能使磁通密集到磁性液体中，使磁隙中形成较平均的磁通分布。另外磁性液体还能使音圈与极靴和极板间保持一定距离，避免音圈与磁铁之间发生摩擦，避免出现失真现象；由于磁性液体具有一定的黏度，它还可以消除扬声器在最低谐振频率时产生谐波失真。

③ 提高磁通密度　在扬声器磁隙间注入磁性液体能使磁通密度提高近两倍。特别是对于小口径扬声器，提高磁通密度有助于增加灵敏度。同时由于磁通密度的提高，可以减少磁铁尺寸。

由此可见，与普通扬声器相比，磁性液体扬声器有着非常优异

的性能。特别是随着家庭影院及小型袖珍式电子产品的普及，对高保真（Hi-Fi）扬声器和专业扬声器的需求快速增长，因此磁流体在这一领域将会形成一个巨大的市场，据 1998 年的资料，世界上至少有 3 亿只高档扬声器采用了磁流体。

（3）润滑　磁性液体润滑材料是一种新颖的润滑剂，它可使用外加磁场使磁液保持在润滑部位，准确地充满润滑表面，用量不多，又可节约泵及其他辅助设备。这样，在润滑过程中可抵消重力和向心力等，也不泄漏，并可防止外界污染，是一种结构简单、维护方便、使用可靠的新型润滑剂，可用于曲轴、齿轮、轴承以及其他任何具有接触面的复杂运动系统，并可使零件的耐磨性提高 7～9 倍。摩擦磨损是普遍存在的现象，摩擦损失了世界一次性能源的 1/5～1/3 以上，磨损是材料与设备破坏和失效的三种主要形式之一，而润滑则是降低摩擦、减小或避免磨损的最有效技术。因此发展具有良好抗磨性能、高承载能力的润滑添加剂是材料、表面工程和摩擦学领域的重要前沿课题。而目前的研究已表明，部分纳米颗粒可以作为润滑油脂添加剂而起到减摩、抗磨和降压作用，显示出纳米材料在润滑领域的广阔应用前景。磁性液体中的磁性颗粒仅有 10nm 左右，因此它不会损坏运动零件，只要采用合适的磁场就可将磁性润滑油约束在所需的部位。同时由于磁性液体的特点，使得磁性液体润滑具有许多独到好处：

① 由于磁性颗粒为球形，它们在接触表面润滑时可以起到类“分子轴承”的作用，从而提高了润滑性能；

② 纳米磁性颗粒在磁场作用下实现竞争吸附、沉积到摩擦表面上，并在摩擦接触区的高温高应力下熔融铺展，形成低剪切强度的表面膜；

③ 纳米磁性颗粒可以控制填充到工作表面的损伤、表面凹处和微裂纹部位，起到自补偿修复功能，在一定程度上实现零磨损。

正是以上的几种联合作用机制，可以显著降低机械部件的磨损，改善润滑的动力性能，延长使用寿命。预计纳米磁性液体将成为新一代性能优异的润滑剂，这无疑对航空、国防、机械、汽车等行业都具有极大的现实意义。如果将磁性液体润滑应用于食品、药

品和纺织工业以代替普通的润滑油，则除了润滑外，还会消除由于油液飞溅造成的产品污损而导致的经济损失，避免食品、药品和纺织品的污染对环境和人类所造成的危害，具有良好的经济和社会效益。

（4）磁性液体打印机墨水　利用磁场来控制磁性液体墨水，以达到稳定供墨的目的。已证明多笔型磁液记录仪是一种实用的印刷机，它利用磁液沿着磁化导管流动来达到电位平衡的效果，挤压非顶点端的磁液墨水，在记录纸之间，由电场产生的库仑力的作用，飞向对面的电极。在这种机器中，具有高达 248000/s 和 8 点/mm的记录功能，因此具有打印速度快和打印分辨率高的特性。

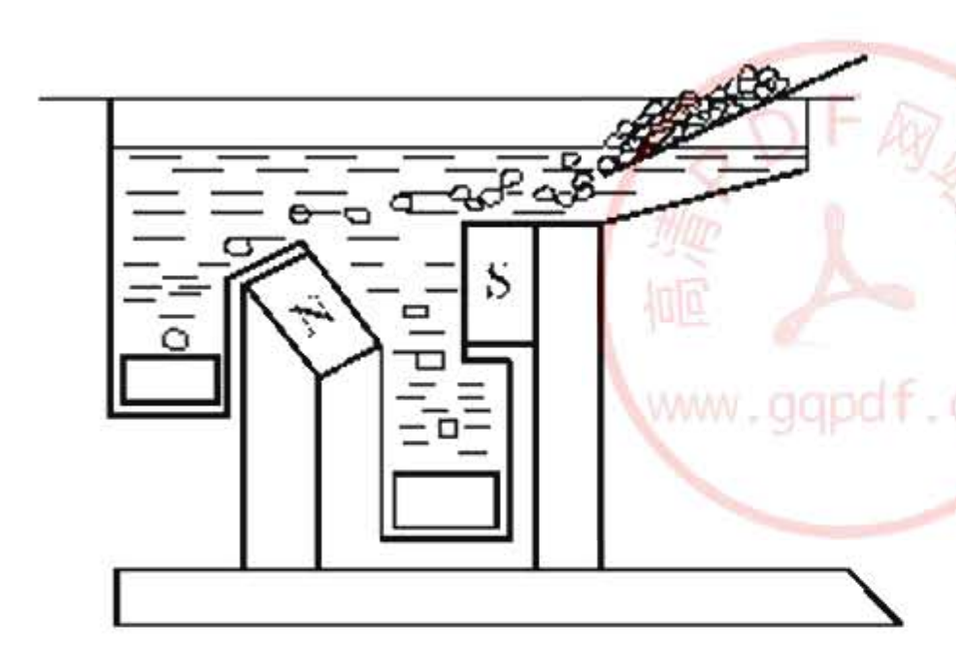


图 12-5　磁性液体选矿分离示意图

（5）磁性燃料　将宇航用的喷气燃料制成磁性液体，通过永磁加以控制，克服了失重状态下燃料不能正常工作的问题。

（6）研磨和抛光　在磁场控制下，用磁性液体和磨料粒子相结合进行表面抛光，既可提高磨削率，又能得到高质量的表面。

（7）磁性液体比重分离器　可用来进行选矿和分选及回收各种金属。

（8）传感器　可用于振动计、温度计、重力计、水位计、比重计、压力计、加速度表等。

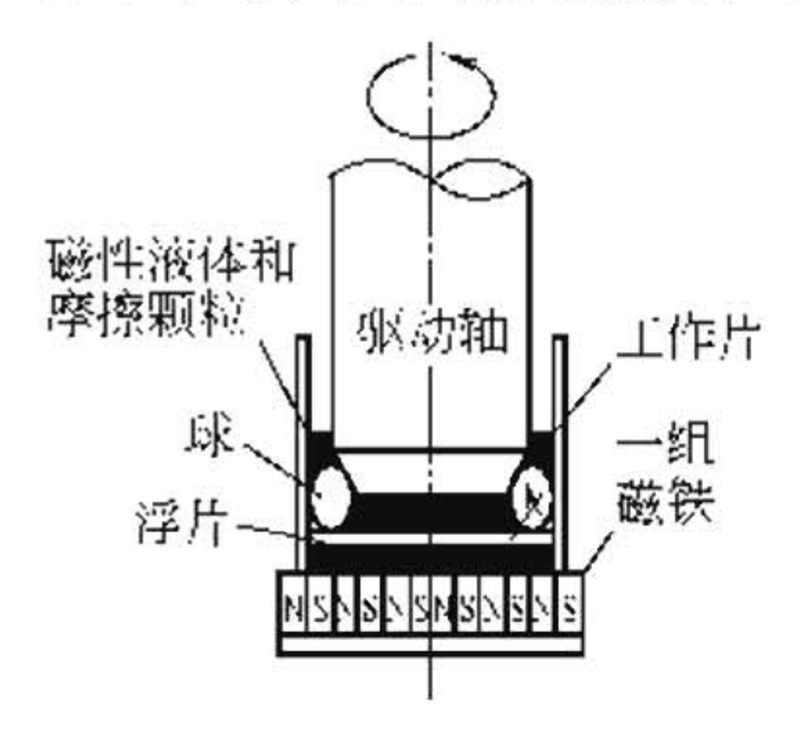


图 12-6　磁性液体研磨

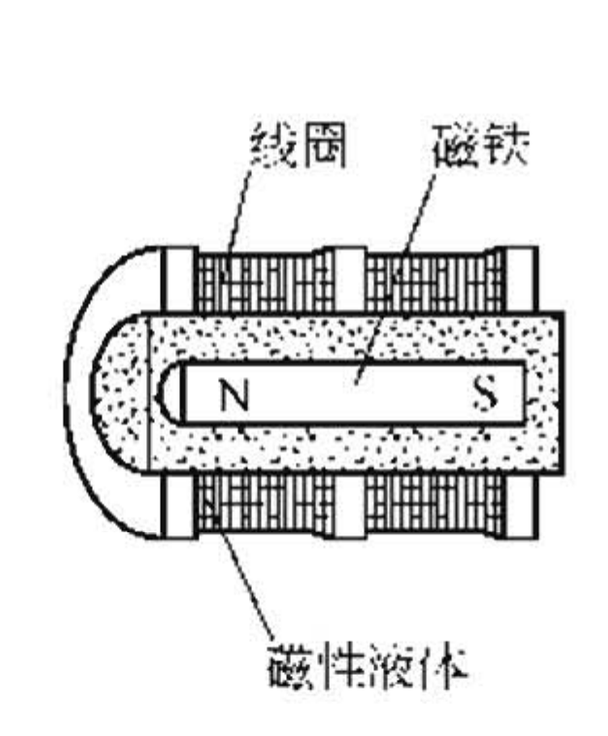


图 12-7　磁性液体倾角计

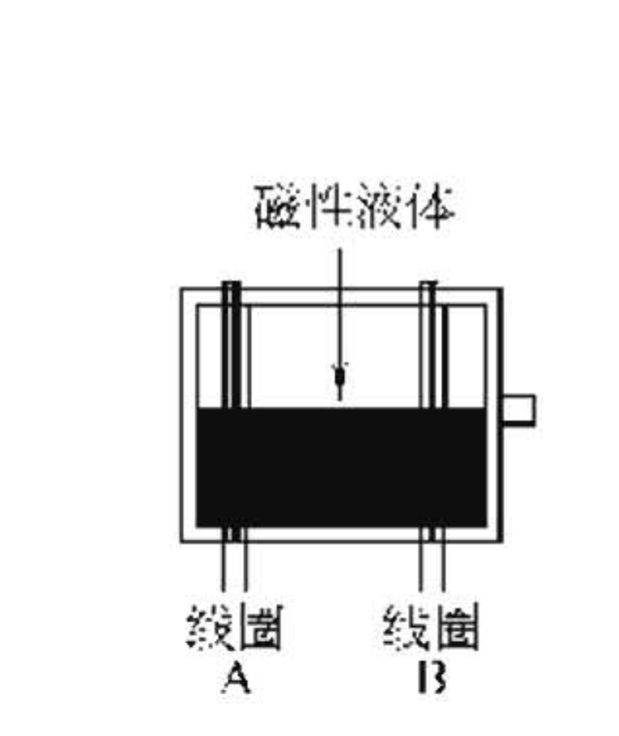


图 12-8　倾斜传感器

（9）医学应用　利用磁性液体作药物载体，通过磁场控制，可实现定向给药，利用磁性液体在交变磁场下温度升高的原理，把它注入到肿瘤部位，可用来杀死癌细胞。

除上述应用外，磁性液体还有许多其他的应用，如地磁、热发动机、声呐系统、磁陀螺、磁性液体薄膜轴承、磁印刷、磁显影剂、磁染料、机器人肌肉、无摩擦开关、继电器、惯性阻尼器、减振器、缓冲器、光快门、光调变器、光信号放大器、光计算机、激光稳定器，磁性液体涡轮发电、磁性液体刹车等，这里就不再一一赘述。另外在军工方面，目前直升机和坦克等都对磁性液体有需求，由此可见，在未来的磁性产品市场上，磁性液体将是一个应用量大而广，具有巨大潜在应用市场的产品，如果在这些市场的开发应用获得成功，将会在我们国家形成新的产业，新的经济增长点，产生巨大的经济和社会效益。

12.2　磁流变液

12.2.1　磁流变液的基本概念

磁流变液（Magneto Rheoilogical Fluid，MRF）是一种新型的功能材料。是一种具有良好发展前景和工程应用价值的新型智能材料，磁流变液的主要成分是由在磁场下可极化的微米级（0.01～10μm）具有高饱和磁化强度的铁磁性细微颗粒和能使磁性颗粒均匀分散的溶剂（水，矿物油，硅油等）及表面活性剂组成的稳定悬浮液体。

早在1949年美国国家标准局（US National Bureau of Standards）的Jacob Rabinow首先发现并研制了磁流变液及器件，几乎在同时人们也发现了电流变液。在20世纪40年代末期和50年代初，与磁流变液有关的论文和专利比电流变液的要多，但随后文章明显减少，近年来，随着计算机直接控制技术在智能减振、传动及智能结构等领域的应用技术发展，使人们重新重视磁流变体材料的研究和开发。作为一种智能可控流体材料，目前磁流变液已在能量耗散控制领域获得成功的应用，在半主动振动控制、液压传动和智能材料与结构等领域亦有广阔的应用前景。

www.gqpdf.com

12.2.2 磁流变液的组成[15~18]

磁流变液是由细小的磁性颗粒分散于绝缘的载液中形成的、随外加磁场变化、具有可控流变特性的特定的非胶体性质的悬浮液体。其磁性颗粒一般为球状或近球状的金属或铁氧体磁性材料（粒径范围为 0.01～10μm）。作为连续绝缘介质的载液一般用硅油，煤油和合成油，通常应选择温度稳定性好，非易燃且不会造成环境污染的载液。表面活性剂是用来确保磁性颗粒稳定地悬浮于液体中，与磁流变液相关的稳定性有：团聚稳定性和沉降稳定性，前者阻止颗粒黏结在一起，后者确保颗粒随时间的推移不往下沉。表面活性剂必须具有特殊的分子结构：其一端有一个对磁性离子界面产生高度亲和力的钉扎功能团，另一端还需有一个极易分散于某种基液中的适当长度的弹性基团。考虑到铁磁颗粒的类型和体积浓度，利用下列方法之一可以确保磁流变液的稳定性。①粗分散小体积分数（10%）的磁流变液，可通过引入凝胶形成的附加剂，即在铁磁性颗粒外表面形成一保护性的胶体结构实现稳定化。该结构的强度应能阻止磁性颗粒的沉降和凝聚。此外，该结构的强度也应能承受在外磁场中的可逆触变转变而不致破坏。作为这种稳定剂的一个例子可使用包含有超细颗粒的无定型硅粉即硅凝胶。该粉末有大的表面积（100～300m^2/g）。每个颗粒是高度多孔的且其孔面积可吸收大量液体或蒸汽。铁磁分散颗粒在力学上可通过硅凝胶的表面结构来支撑且可均匀分散在载液中。②细分散高体积分数（25%左右）的磁流变液可通过引入表面活性剂，促使铁磁颗粒形成凝胶的空间结构，从而实现稳定化。离子键的表面活性剂（如油酸）可以用来实现团聚稳定性，这些表面活性剂分子通过离子键，吸附在铁磁性颗粒的表面，从而阻止颗粒的团聚。另一方面，非离子键表面活性剂也可对单个磁性粒子产生一个柔软的结构[19]。当然，在选用表面活性剂时，应考虑其跟相应的载液是否匹配。

常用的磁性粒子、载液、表面活性剂如下。

① 磁性颗粒　平均粒径为 0.01～10μm 的 Fe、Co、Ni、Fe-Co、Fe-Ni、Fe-Co-V、CrO_2 等超细粉末。

② 载液　矿物油、硅油、硅氧烷共聚物、石蜡油、液压油、

变压器油、氟化烃、氟化硅氧烷等。

③ 表面活性剂　阴离子型表面活性剂、非离子型表面活性剂或它们的混合物等。

④ 其他添加剂　如有机酸、偶联剂等。

12.2.3　磁流变液的特性[20]

磁流变液是与外加磁场相关的材料，在无磁场作用下，它表现为一般流体的性质；当施加外加磁场时，磁流变液的流变学行为将随着外加磁场而变化，表现为屈服应力随外加磁场线性的增加，其变化特点是：变化速度快（10ms 以内），变化过程可逆，变化范围宽（力学性质可以变化上万倍，如只需 20W 的电力即可以提供 20t 阻尼力的阻尼器件）。因此磁流变液器件可以在电控制和机械系统间提供一个简单、安静、快速反应的中间体。磁流变液器件可从根本上改变电动机械器件的设计和工作方式。

磁流变液对磁场的反应是由于在外场下磁流变液中的悬浮颗粒的极化造成的。这些极化的偶极子的相互作用，使得颗粒形成了平行于外加磁场的柱型结构，这种链状结构阻止了流体的运动，因此使悬浮液的黏性增加（图 12-9，图 12-10）。随着磁场的增加使这种链状结构发生屈服的机械能也增加，因此发生了屈服应力对场的依赖。

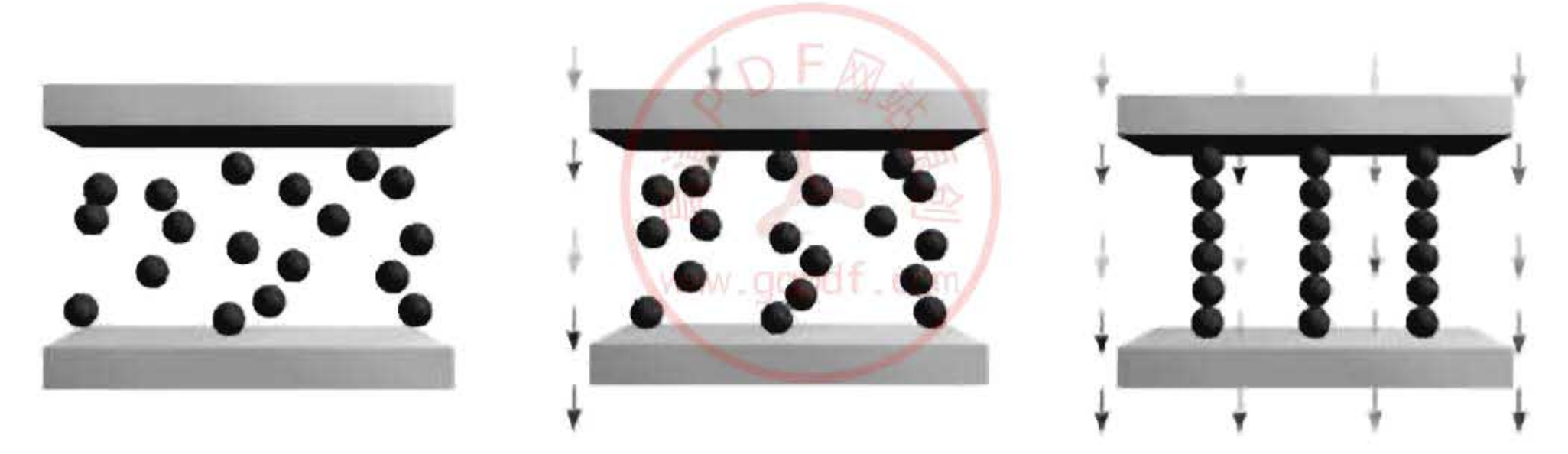
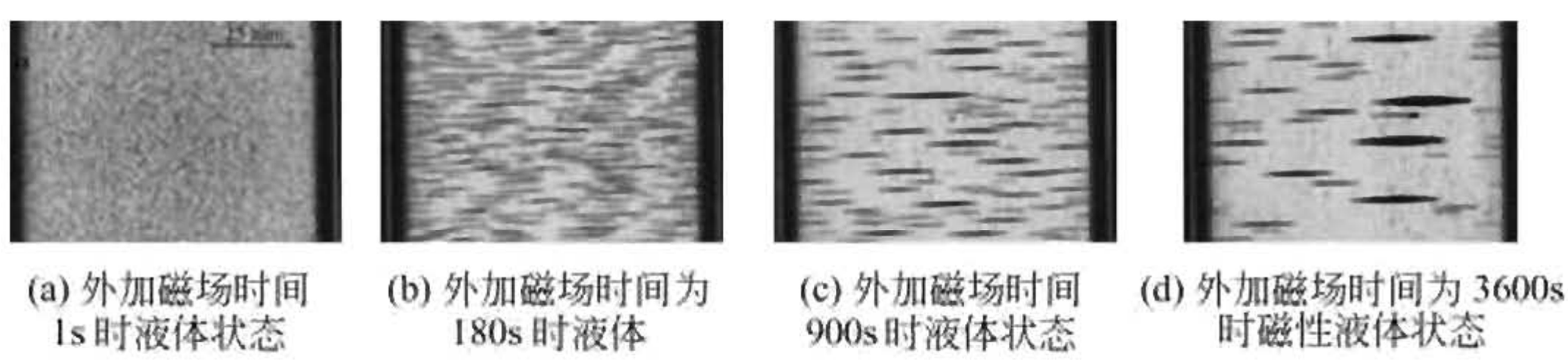


图 12-9　外加磁场对磁流变液中磁性颗粒的影响



(a) 外加磁场时间 1s 时液体状态　(b) 外加磁场时间为 180s 时液体　(c) 外加磁场时间 900s 时液体状态　(d) 外加磁场时间为 3600s 时磁性液体状态

图 12-10　磁流变液中的磁性颗粒随外加磁场变化关系

Thomas Lord Research Center 的 Mark R. Jolly 等通过对 Lord 公司四种商业磁流变液（表 12-1）的研究，对磁流变液的特性进行了如下分析。

表 12-1　四种商业磁流变液的基本成分和密度（Lord，1998）

磁流变液型号	铁体积百分数/%	基　液	密度/(g/mL)
MRX-126PD	26	矿物油	2.66
MRX-140ND	40	矿物油	3.64
MRX-242AS	42	水	3.88
MRX-336AG	36	硅油	3.47

（1）流变特性　在没有外加磁场时，磁流变液表现为牛顿流体行为，因此可控制流体的行为经常用具有可变屈服强度的 Bingham 塑性模型表示[21]，按照该模型，当应力 τ 高于与外场有关的屈服应力 τ_y 时，描述磁流变液行为的 Bingham 方程为：

$$\tau=\tau_y(H)+\eta\dot{\gamma},\tau\geqslant\tau_y \tag{12-1}$$

当应力 τ 低于与外场有关的屈服应力 τ_y 时（在 10^{-3} 应变数量级），材料表现为黏弹性：

$$\tau=G\gamma,\tau<\tau_y \tag{12-2}$$

式中 G 为复合材料切变弹性模量。研究发现复合材料模量也与外场有关[19]。Bingham 塑性模型已经被证明对磁流变液器件设计及特性研究是有帮助的，当然磁流变液的实际行为与这一简单模型存在有一些差别，最明显的差别是当没有磁场存在时，磁流变液表现为非牛顿流体行为[22]。

可控流体的流变特性与颗粒密度、颗粒尺寸和形状、载液的性能、添加剂、外场、温度等许多因素有关。同时这些因素间的相互作用也非常复杂，它们对获得最佳的满足实际应用需要的磁流变液也非常重要。测量了四种磁流变液的磁流变效应，实验所使用流变仪的平行板直径为 46mm，平行板间隙为 1mm，在平行板间，剪切率沿着流体横截面而线性的改变，在外径处达到最大值，流变仪可施加给磁流变液的外场超过 1T。图 12-11 表明磁流变液在 $26s^{-1}$

最大剪切速率时磁流变液的剪切应力随磁通密度的变化。在这样低的剪切速率下，如式（12-1）所描述的，剪切应力近似等于流体的屈服应力。在低磁通密度下，流体应力表现出幂指数行为，当外场较低或属于中等程度时，利用磁流变模型可得到幂指数为 1.75，在非常低的磁通密度，线性模型和粒子饱和的非线性磁效应模型均给出了二次方关系[23]。由 Ginder，Davis 和 Elie 提出的非线性模型可得到在中等磁场下的幂指数为 1.5。随着磁通继续增加到 0.2～0.3T，磁饱和的影响曲线开始偏离指数规律；当磁流变液接近磁饱和时，应力开始出现平台。可以发现，饱和时的磁通密度随着磁液中铁体积分数的增加而增加。对于磁流变液而言，在没有外加磁场时的黏度是一个很重要的指标，并且它与载液、表面活性剂，磁性粒子数有很大的关系。人们总是希望得到低黏度的磁流变液，同时希望有宽的使用温度范围和不发生沉淀。由于表面活性剂的添加，及在剪切过程中磁性颗粒微结构的改变，大多数磁流变液表现出明显的界层内剪力的减小（剪切稀释）。

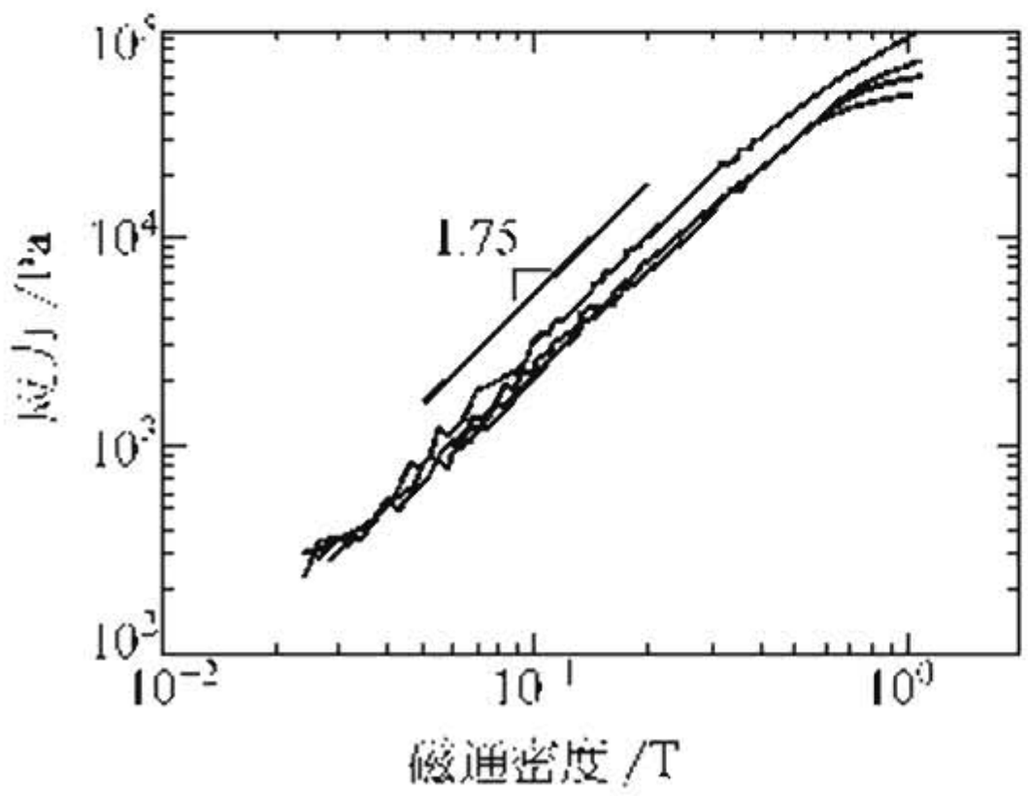


图 12-11　在 $26s^{-1}$ 剪切速率下磁流变液剪切应力与磁通密度的关系

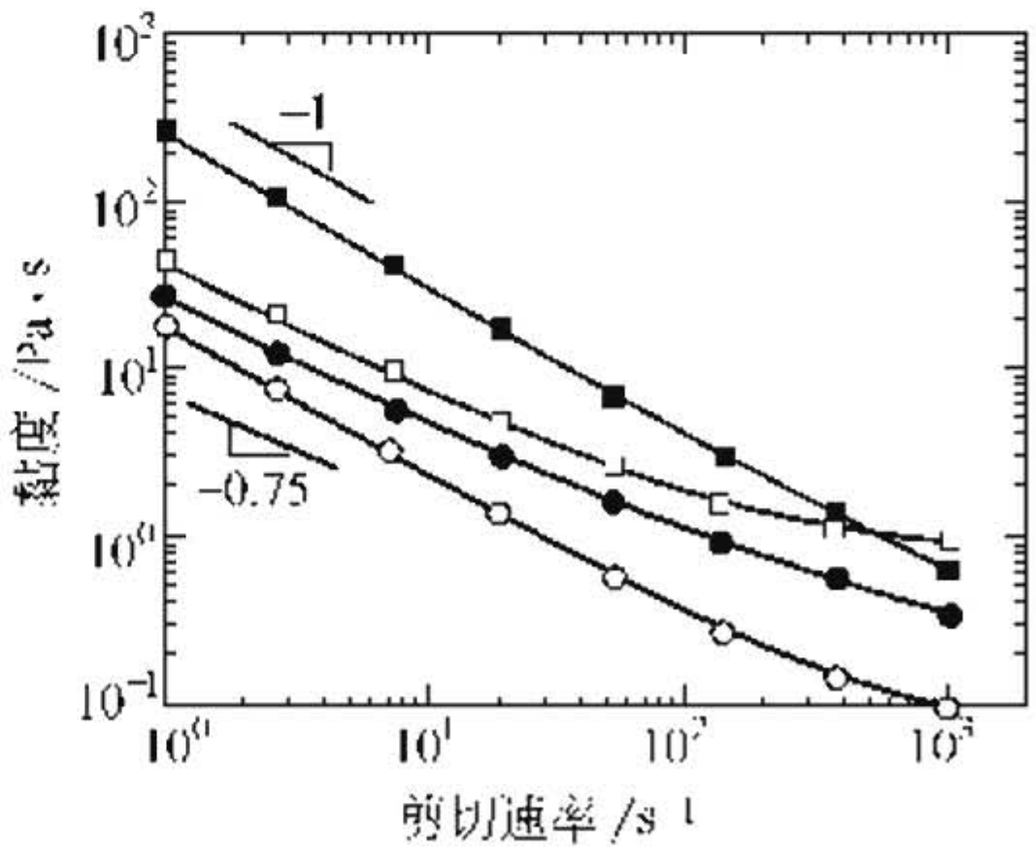


图 12-12　25℃时磁流变液的黏度与剪切速率的关系

○ MRX-126PD；● MRX-242AS；
□ MRX-140ND；■ MRX-336AG

利用 TA Instruments CS^2 500 应力流变仪测量了四种磁流变液的黏度，测试所用锥片形可控应力流变仪的尺寸为直径 40mm，锥

角为 1°。图 12-12 给出了四种磁流变液的黏度与剪切速率的关系。可以看出，铁含量对磁流变液黏度的影响并不很明显，而载液的成分和化学性能对磁流变液的黏度影响很大。在低剪切速率下，磁流变液的黏度与剪切速率的关系表现为幂指数在－1～－0.75 间的指数关系，在高剪切速率时，界层内剪力变小（剪切稀释），速率降低并最终达到某一定值。该定值决定于磁流变液中的等颗粒含量，载液黏度和表面活性剂的特性。在低剪切速率下，与别的磁流变液相比，MRX-336AG 的黏度与剪切速率的关系接近于一次方，说明该流体具有重要的零场弹性行为，在低场时为－1 指数关系。超过弹性区时，流体的塑性黏度（$\partial\sigma/\partial\dot{\gamma}$）实际上相当低（约 10^{-1}Pa·s）。

（2）磁性能　磁流变液的磁性能对磁流变液基器件的设计非常重要。在许多器件中，磁路中的磁流变液具有明显的磁阻。这些磁性能可能非常有助于研究流体内颗粒结构的特性和形成。

图 12-13 为四种商业磁流变液的磁化曲线（*B-H* 曲线），可以看出，在外场低于 $0.02\mu_0$ A/m 时，磁流变液的磁性能与外场成近乎线性的关系，式中 μ_0 为真空磁导率，在该区域，各种磁流变液的磁导率之差（*B-H* 曲线的斜率）为常数，它们的磁导率在真空磁导率的 5～9 倍间变化。磁流变液在磁场中的磁性能变化与块状

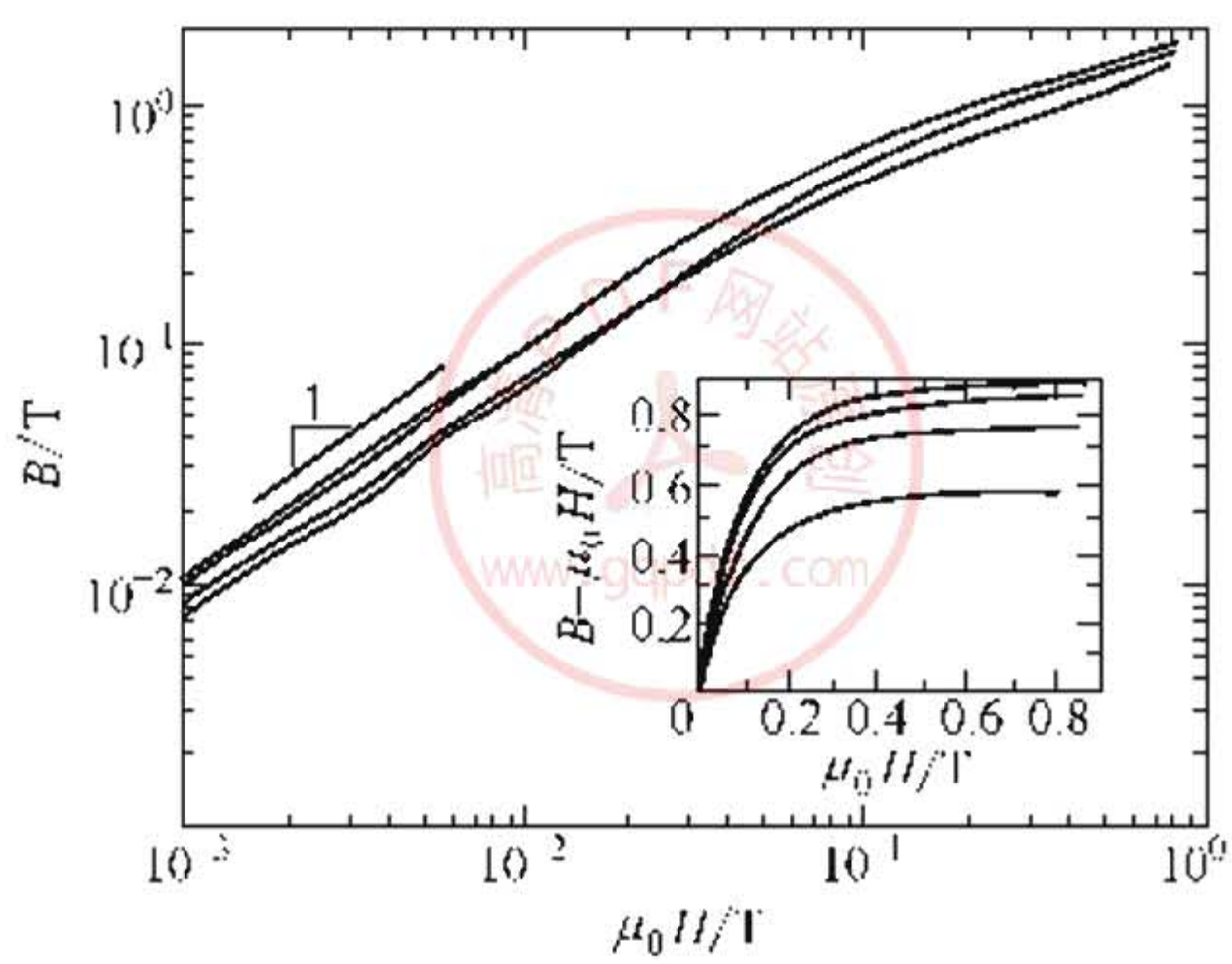


图 12-13　磁流变液内磁通密度与外场的关系

由图可知，内禀磁感应强度与外场的关系，随铁粒子百分含量的增加，曲线抬高

磁体的磁性能改变有非常明显的不同，它们在很宽的外加场范围内都表现为线性关系，相应的磁导率也为块状磁体的几个数量级，当外场超过线性区时，磁流变液开始逐渐出现磁饱和。当外场超过 $0.4\mu_0$ A/m 时，出现完全饱和，磁流变液在完全饱和时的内禀磁感应密度或磁极化密度（$B-\mu_0 H$）是 ϕJ_sT，ϕ 是流体中粒子的百分数，J_s 是颗粒材料的饱和磁极化强度[24]。例如含有 30%铁颗粒（$J_s=2.1$T）磁流变液的饱和值约为 0.63(0.3×2.1) T。磁流变液的磁化曲线的磁滞现象很小，甚至完全不存在，这种超顺磁行为决定于磁流变液中铁颗粒的软磁特性和颗粒相的迁移特性。

（3）润滑、沉淀特性及材料相容性　磁流变液是天然的研磨剂，其对部件或组件的寿命影响程度取决于磁流变液的成分和器件的结构设计。滑动接触的磁流变液磨损带或其他轴承材料经常被用于那些直线运动的、磨损较严重的部位。特别是在线性应用器件中，磁流变液对滑动表面的润滑能力决定了该表面的磨损状态。表 12-2 给出了用磁流变液润滑时铁对铁、尼龙对铁的摩擦系数。该结果是用 Instron Model 4204 实验机测试的，样品采用接触面积为 7.6cm×7.6cm 的标准尺寸，相对运动速度为 2.6mm/s，压力变化范围为 10～20N（实验时没有外加磁场）。可以看出，与干磨相比，加入磁流变液后滑动摩擦系数减少了 2 到 3 个数量级。然而，实验发现，采用这种方法测量磁流变液滑动摩擦重复性稍差，其原因是由于磁流变液具有复杂的流变学特性，其滑动摩擦性能不仅与滑动速度有关，还与界面流体膜的厚度有关。

表 12-2　磁流变液润滑面的平均滑动摩擦系数

磁流变液	铁对铁	尼龙对铁	磁流变液	铁对铁	尼龙对铁
Dry	0.18	0.19	MRX-242AS	0.05～0.07	0.06～0.07
MRX-126PD	0.04～0.07	0.04～0.07	MRX-336AG	0.08～0.11	0.08～0.11
MRX-140ND	0.07～0.09	0.05～0.07			

由于是微型颗粒悬浮液，在颗粒和载液间必然存在着密度的差别，因此在设计磁流变液时必须考虑颗粒的沉淀分离，在一些特殊

www.gqpdf.com

的应用当中，也必须考虑将沉淀分离控制在什么范围及怎样测量它们。例如，一个振动阻尼器可能对沉淀的要求非常严格，而刹车应用对沉淀的要求就不重要。表 12-3 给出了一个简单的、非应用的沉淀实验结果的比较，表中把起始沉降速率作为流体柱总质量的百分数。在该实验中流体被放在一个圆柱形玻璃量杯中，在室温沉降 5 周（注意：沉降的结果在富颗粒的悬浮液的顶部产生了一个无颗粒的流体区，并且在沉降发生后，沉降速率减慢，因此沉降刚开始时的沉降速率是最快的），通常，沉降取决于悬浮载体的流变特性、磁性颗粒的表面特性和添加的表面活性剂，在器件中，沉降还进一步受到残留磁场、器件取向及器件几何形状等方面的影响。对于这里研究的磁流变液，按照黏度排列，具有最高黏度的磁流变液其起始沉降速率最低（见表 12-3）。

表 12-3　起始沉降速率

磁流变液	起始沉降格/%	磁流变液	起始沉降格/%
MRX-126PD	1.0	MRX-242AS	0.2
MRX-140ND	0.3	MRX-336AG	无法测定

其他与磁流变液成分有关的特性包括器件的工作温度范围、与器件内材料的相容性、及工作环境是否与大气相隔绝。表 12-4 给出了一些典型密封材料与磁流变液密封特性的对比（注意：这些数据只是定性的），在给出的磁流变液中，只有水基磁流变液不能用于非密闭的系统。

表 12-4　温度及相容性

磁流变液	温度范围/℃	对比结果					
		天然橡胶	腈橡胶	氟橡胶	硅树脂	三元乙丙橡胶	氯丁(二烯)橡胶
MRX-126PD	−40～150	差	好	好	类似	差	好
MRX-140ND	−40～150	差	好	好	类似	差	好
MRX-242AS	5～90	好	好	好	好	好	好
MRX-336AG	−50～200	好	好	好	好	好	好

（4）磁流变液品质因数　图 12-14 给出了四种磁流变液的品质因数（Figures of Merit）$F_1=\tau^2/\eta$（式中，τ 为屈服应力；η 为无外加磁场时的黏度；F_1 的单位为 Pa/s）与剪切速率的关系。它是与磁流变液工作流体体积有关的一个因数，该品质因数除反映出对磁流变液体积和能量消耗的需要外，也反映了磁流变液器件的动力学范围（或控制比）。可以发现，随着剪切应力的增加，由于这些磁流变液显著的界层内剪应力变小（剪切稀释），品质因数 F_1 明显的提高。因为品质因数 F_1 与黏度有很大的关系，因此磁流变液的品质因数 F_1 变化范围很大。

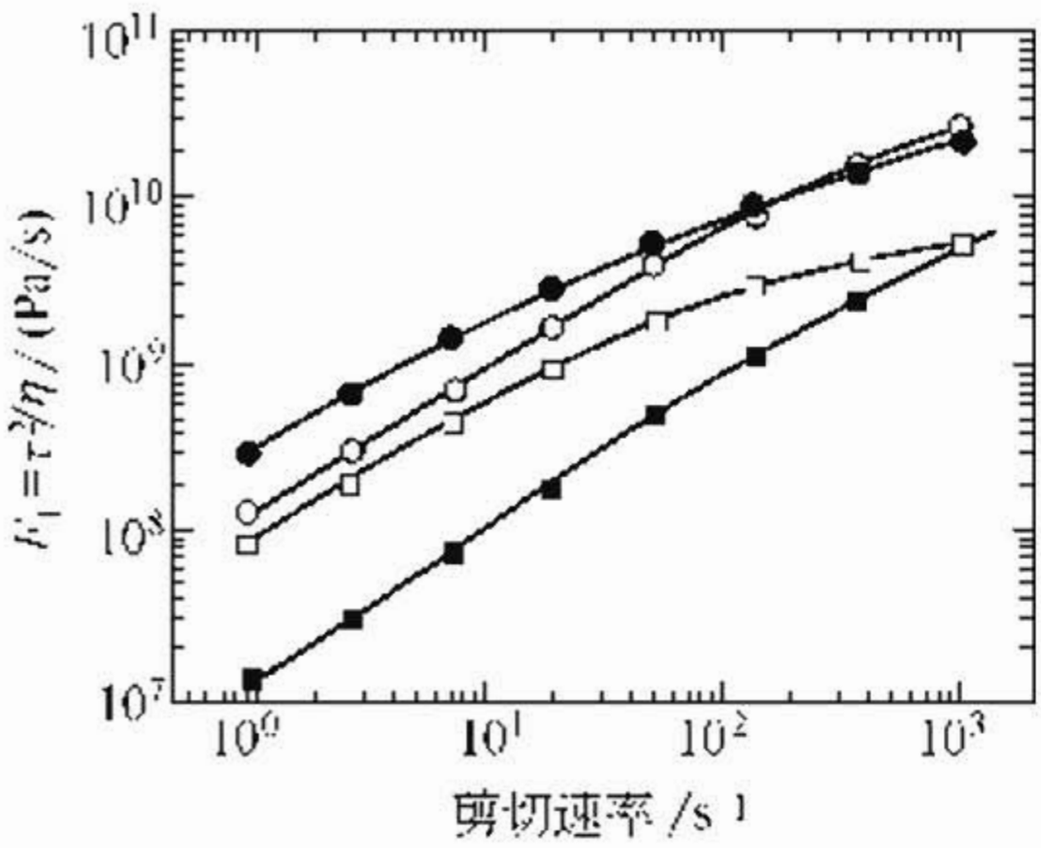


图 12-14　在 25℃和 1.0T 下 F_1 与剪切速率的关系

○ MRX-126PD；● MRX-242AS；□ MRX-140ND；■ MRX-336AG

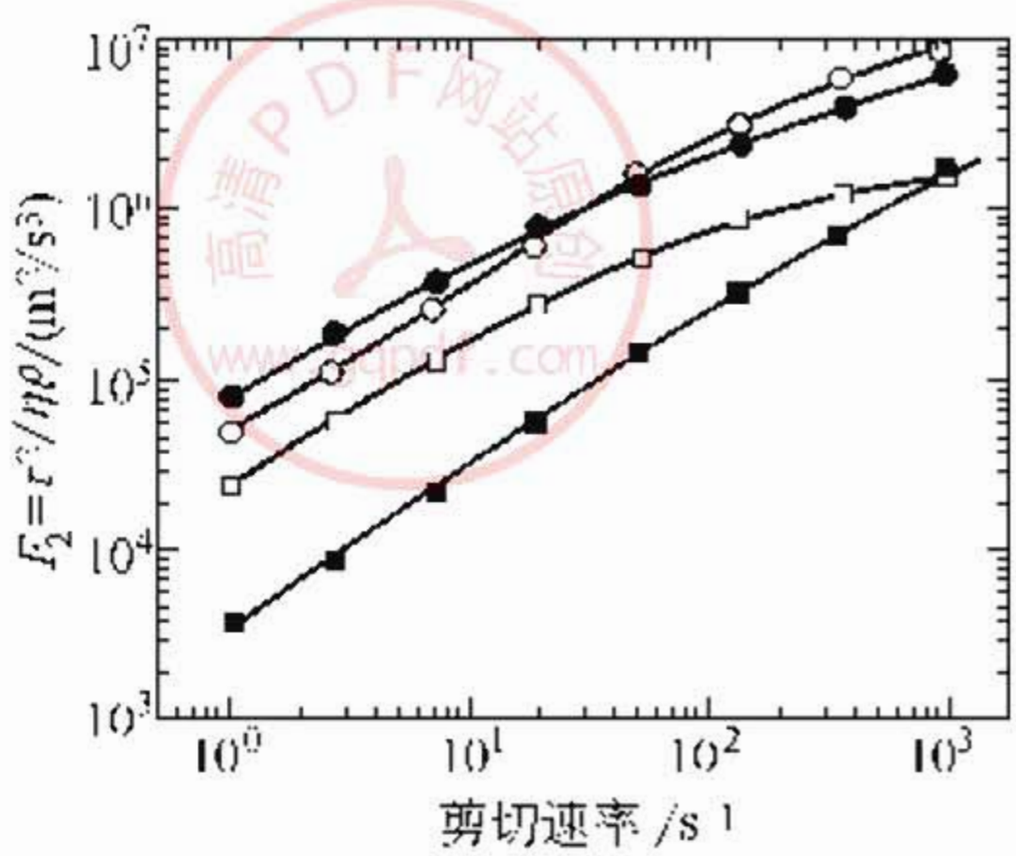


图 12-15　在 25℃和 1.0T 下 F_2 与剪切速率的关系

○ MRX-126PD；● MRX-242AS；□ MRX-140ND；■ MRX-336AG

图 12-15 给出了四种磁流变液的品质因数 $F_2=\tau^2/\eta\rho$（式中，ρ 为磁流变液密度；F_2 的单位为 m^2/s^3）与剪切速率的关系。与 F_1 不同的是该品质因数 F_2 还与流体的密度有关，它与最小活性流体质量成反比，除了数值在垂直方向发生变动外，F_2 与 F_1 有非常类似的特征。根据 F_2 的结果可以有趣地注意到，MRX-126PD 特别适合于在低剪切速率下应用，而 MRX-242AS 更适合于高剪切速率应用。由 F_1 和 F_2 共同结果表明，由于这些磁流变液显著的界层内剪应力变小（剪切稀释），磁流变液在高剪切应力下表现出更好

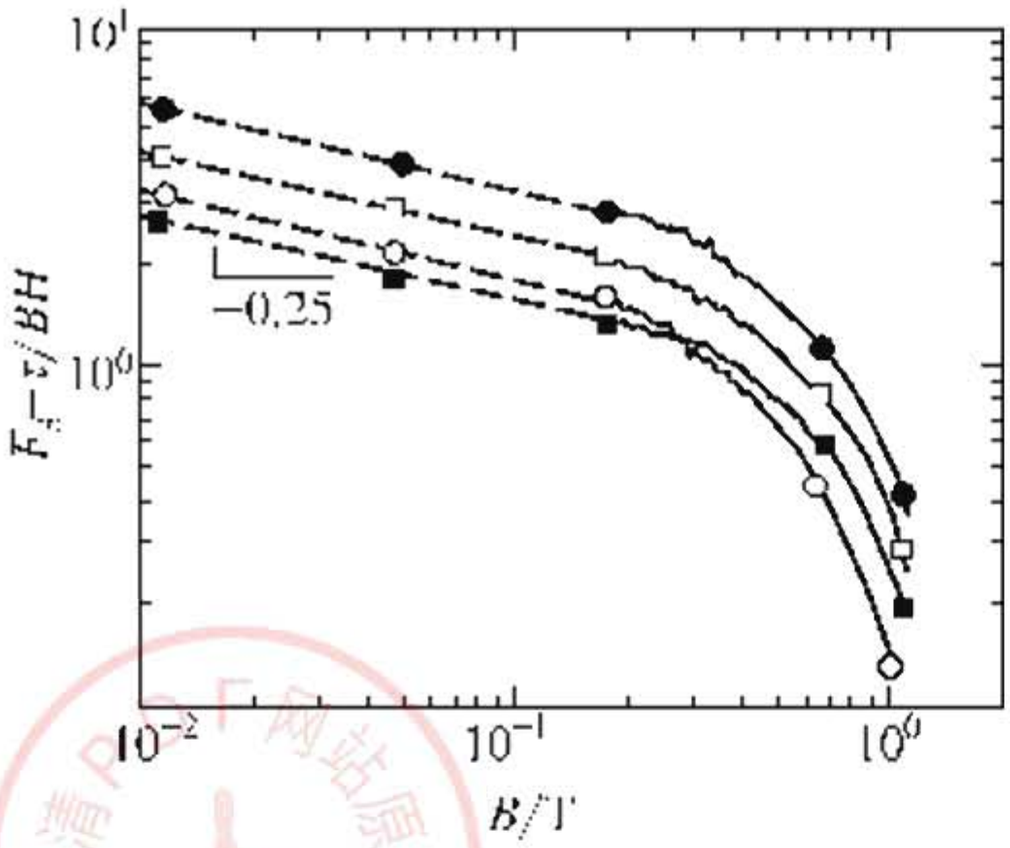


图 12-16　在 25℃时 F_3 与磁通密度的关系

○ MRX-126PD；● MRX-242AS；
□ MRX-140ND；■ MRX-336AG

的流变学行为。

图 12-16 给出了四种磁流变液品质因数 $F_3=\tau/BH$ 与磁通密度的关系，该品质因数代表着磁流变液的能量效率，并且对磁流变液在高带宽时的应用非常重要。图中的虚线对应于用最小二乘法拟合的渐进外推结果。由于在较低磁通密度时会增加测量和计算误差，所以选用此法。可以看到，随磁通密度的增加，F_3 逐步降低，当磁流变液开始饱和时，F_3 下降很快。最终当磁流变液达到一定条件，即磁场导致屈服应力增加时，F_3 将为零。由于高铁含量的磁流变液磁导率和屈服应力较高，因此其 F_3 的测量结果较好。有趣的是，对于该四种磁流变液，只有在高磁通密度下才能够证实。在希望的带宽上，对于一个给定的传递机械能，该品质因数增加，电能消耗减少。

一般认为，良好的磁流变液应具备以下性能[25]：

① 磁流变液所具有的磁流变效应是一种可逆变化，它必须易于磁化和退磁，因此这种流体的磁滞线必须狭窄，内聚力要小，而磁导率要大，尤其是磁导率的初始值和极大值必须很大；

② 这种悬浮液应具有较大的磁饱和强度，以便使得尽可能大的“磁流”通过悬浮液横截面，从而给磁性颗粒相互间提供尽可能大的能量；

③ 这种液体在接上交流电的工作期间，总损耗（如磁滞、涡流等）应该很低；

④ 这种悬浮液中的磁性颗粒的分布必须均匀，而且分布率保持不变，这样才能保证其能高度地磁化和并且具有稳定的性能；

⑤ 为了防止磁流变液被磨损而改变性能，这种液体必须具有

极高的“击穿磁场”；

⑥ 磁流变液的稳定性应不随温度变化，即在较宽的温度范围内具有较高的稳定性；

⑦ 构成磁流变液的原材料应该是廉价的。

12.2.4 磁流变液的制备[15,18,26～33]

在磁流变液的制备中，磁性颗粒的团聚、悬浮体系的沉降速率、磁流变液的力学性能和固液相变的可逆性是必须考虑的四个主要问题。

制备磁流变液时，其磁性粒子大多采用具有高饱和磁化强度、高磁导率的软铁磁材料，如羟基铁粉。一般来说，铁磁材料的密度与铁接近，在 7～8g/cm^3，与载液的密度相比要大许多，因此就提出了另一个重要问题：怎样使磁性粒子在液体中不沉淀？防止磁性粒子沉淀的方法有两个：一是从微细颗粒本身的制备上入手，想办法减小颗粒的密度，这与制备方法有密切关系。另一方面则是从表面活性剂与载液入手，以制得性能稳定的液体。由此可知，磁性粒子的制备主要考虑两个方面的问题：磁性颗粒要有优良的磁学性能和相对较小的密度。其制备方法有以下几种。

① 磁性颗粒采用气相法合成的球形羟基铁粉（1μm），选用硅油作为载液，表面活性剂选用油酸。然后将三种组分按羟基铁粉（松装 80mL），油酸（5mL）和硅油（160mL）的比例混合球磨 60h，转速为 200r/min。球磨后制得的磁流变液长时间静止后，无沉淀分层现象发生。

② 将还原铁粉加入 $Co(Ac)_2$ 溶液中搅拌，经过初步的修饰和保护处理后加入缓冲溶液，保持不产生沉淀，将上述溶液用剂量为 80kGy 的 γ-射线辐照两天，钴微粒析出，用强磁铁分离沉淀与溶液，将沉淀用水和丙酮洗后烘干，得到的就是铁磁性复相颗粒。电镜分析表明，纳米尺寸的钴微粒在铁粉表面析出，并形成某种合金状态。将此颗粒加入硅油中，再加入硬脂酸作为表面活性剂，在 80℃下加热 30min，取出后再不断搅拌使之自然冷却，即成所需磁流变液。

③ 高速小珠球磨掺混机已用于制备大量的磁流变液。利用该

机械实现的混合过程可满足制备磁流变液复杂触变介质的需求。HSBMBM 不同于其他类型球磨机之处在于它的高强度混合整个负荷体积，同时它可慢慢地在固体表面之间研磨混合料。在制备磁流变液过程中，使用 HSBMBM 的一大优点是转速可达 2000r/min，每次可生产 200mL 磁流变液，且在生产过程中可控制组成成分的比例。

④ 铁-钴合金磁流变液的制备。取体积比为 48%的 Fe、50%的 Co 和 2%的 V 的铁-钴合金 112g，与 2.24g 硬脂酸分散剂以及 30g 的 0.2Pa·s 的硅油混合在一起，在这种磁流材料中铁-钴合金粒子的体积比为 0.3，然后高速分散，使这种磁流变液材料均匀化，储存在聚乙烯材料制成的容器中，以供使用。

⑤ 用铁-镍合金制成的磁流变液。取质量为 94.25g 的铁镍合金粉，其中 Fe 的质量占 92%，Ni 的质量占 8%，使粒子成分的质量占 25%，然后将载液与铁镍粒子的混合粉，通过高速分散，使其磁流变液均匀化，储存在聚乙烯材料制成的容器中以备使用。

⑥ 用铁钴合金制成的第 2 种磁流变液。取 107.63g 铁钴合金，其中 Fe 的质量占 48%，钴的质量占 50%，根据硬脂酸，硅油或矿物油的质量变化，使其颗粒的质量占 25%，通过高速分散过程，使磁流变材料均匀化，然后将放在聚乙烯材料制成的容器中以备使用。

12.2.5 磁流变液的主要应用领域[17,26,28～33]

磁流变液的各种高技术特征引起了国内外学者和工业界的广泛兴趣，成为当前智能材料（Smart materials）研究的一个重要分支。被认为是将来最具有前途的智能材料之一。由于磁场可以通过控制激磁电流来控制，所以利用磁流变液的特性，可以制作各种新型的阻尼器、制动器、减震器、离合器、缓冲器、柔性夹具等器件。在航空航天、机械工程、汽车工业、精密加工、建筑工程、医疗卫生等领域广泛应用，可完成智能传动、制动、减振、降噪等功能，可制成阀式，剪切式和挤压式各类磁流变液器件，如液压控制伺服阀、离合器与制动器、振动悬架、减振器等。它们可以用于在车辆悬挂系统、土木工程结构抗震、减振及大能量动力设备的基础

隔振等方面。此外，磁流变阻尼器还可用于制成无级可调式健身器材。将来或许在机器人血管中流动的磁流变液可以使机器人的肢体和手指像人一样活动起来，曾有人预言，在汽车工业上，21 世纪将是磁流变液的世纪。

目前世界各大主要工业国都投入了大量的人力物力进行磁流变液机理、制备、性能测试以及应用开发等方面的研究，并已有部分商品化的应用器件问世。其中以美国 Lord 公司为代表，目前该公司已经有多种商品化的磁流变液及应用产品面世，广泛应用于汽车座椅减震和健身器材中。此外通用汽车公司和 Lord 汽车公司也都大力的开发磁流变液阻尼器和离合器在汽车工业中的应用。图 12-17 为能抵抗强风的安装有磁流变阻尼器的洞庭湖大桥。

图 12-17　抵抗强风安装有磁流变阻尼器的洞庭湖大桥

（1）用于振动控制系统的阻尼器　磁流变液阻尼器可广泛用于各种控制系统，具有阻尼力大、电功率消耗低等优点。阻尼器的结构形式较多，按其工作模式可分为如下几种类型。

① 流动模式　这种阻尼器常采用活塞缸结构，磁流变液的通路由位于活塞上的阻尼孔或单独的旁路构成，磁流变液工作于流动模式，在磁流变液的通路上施加磁场。按结构可分为单出杆活塞缸结构和双出杆活塞缸结构。由图 12-18 所示为美国 Lord 公司制造的直动式磁流变液阻尼器，采用的是单出杆活塞缸式结构。

② 流动与剪切组合模式　这种阻尼器也采用类似活塞缸式的结构，但活塞与缸体内壁间存在环形间隙，按结构也可分为单出杆和双出杆活塞缸结构，分别如图 12-19（a）、（b）所示。活塞的移

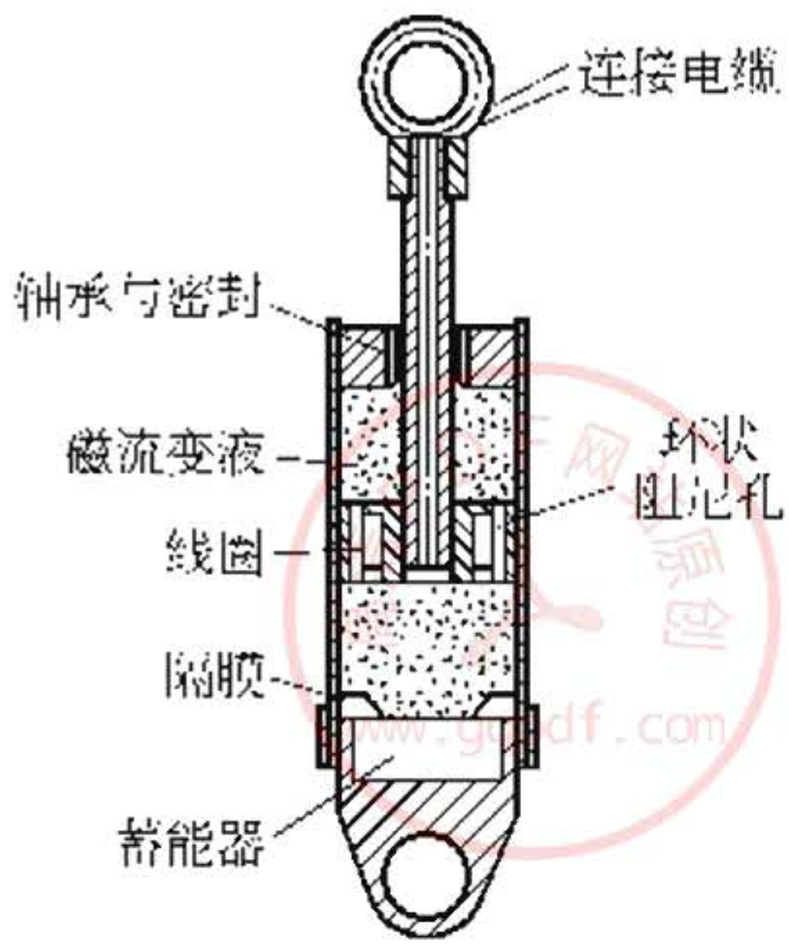


图 12-18　磁流变液直动式阻尼器

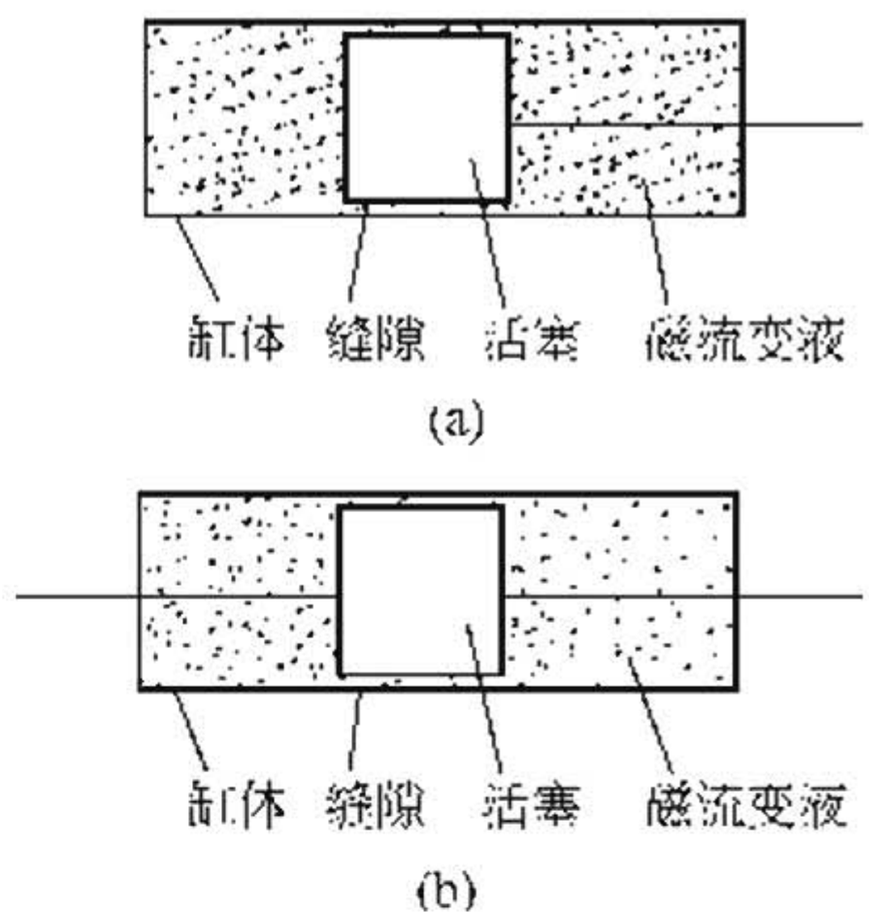


图 12-19　流动与剪切组合模式的阻尼器

动引起流体通过环形间隙而流动，磁流变液体在剪切和流动的组合模式下工作。电磁线圈可绕在活塞上或缸体外侧。单出杆活塞缸结构一方面要考虑体积补偿；另一方面需考虑活塞杆的稳定性。而双出杆就可以省去活塞杆体积补偿；另一方面活塞通过活塞杆支撑在缸体两端，活塞的稳定性较好，可用于制造阻尼力大的阻尼器。

③ 挤压模式　Lord 公司的小型磁流变液振动阻尼器是一种挤压式阻尼器，如图 12-20 所示，可用于工业场合的实时主动阻尼控制，也可用于锁紧装置。该阻尼器通过内腔阻尼板的移动来产生阻尼力，其自由端具有多个运动自由度。最大行程为±3mm 阻尼力为 0～200N，响应时间＜10ms。由于其行程较小该阻尼器不使用滑动式密封，而仅使用弹性橡胶元件。

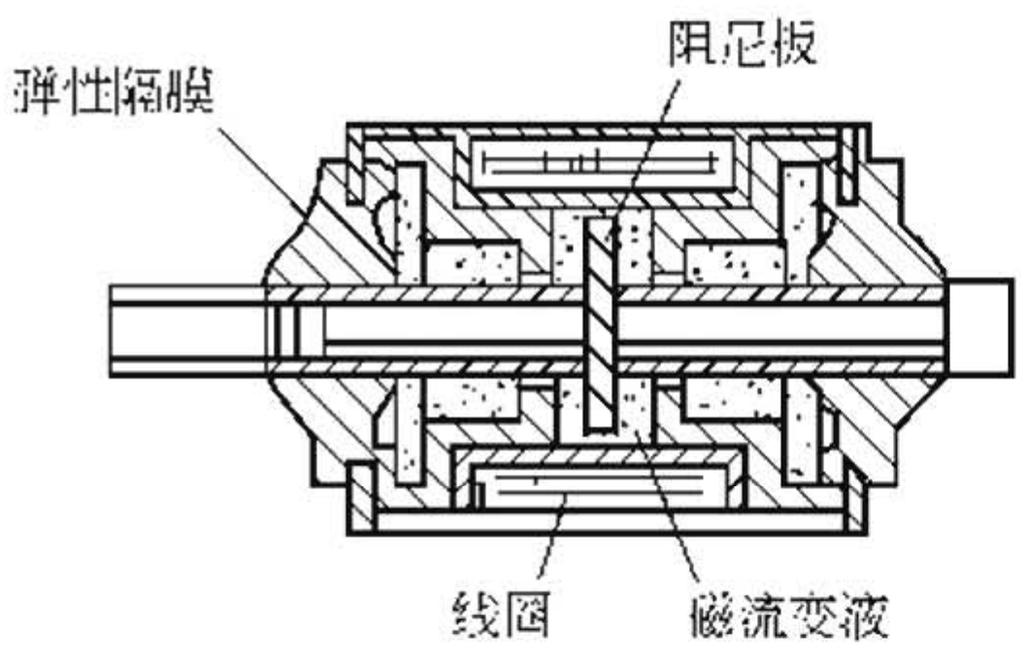


图 12-20　磁流变液振动阻尼器

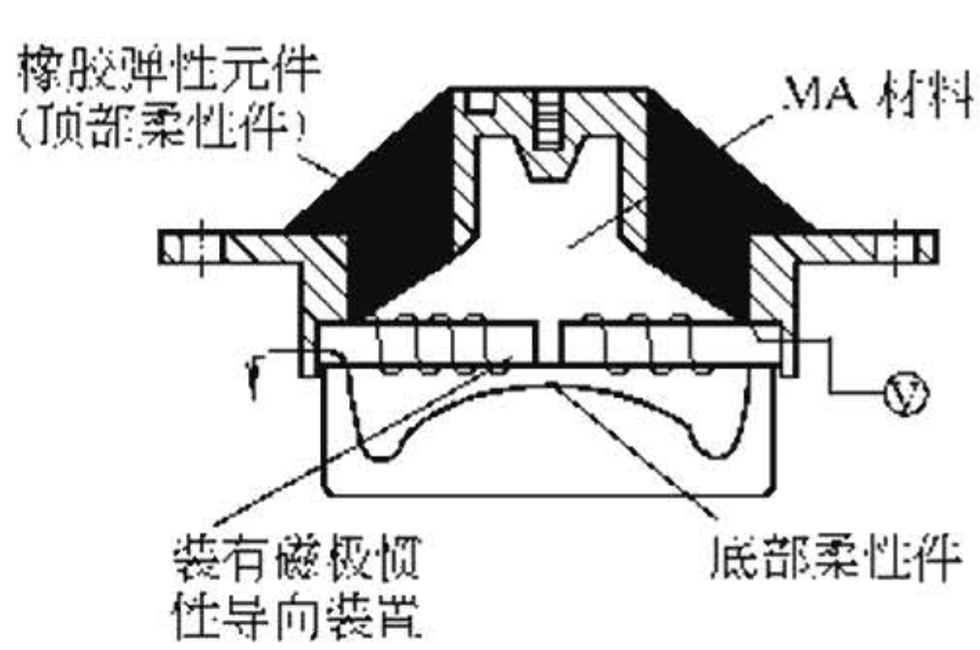


图 12-21　磁流变可控支架示意图

（2）磁流变液在汽车工程中的应用

① 磁流变可控支架　应用在汽车发动机上的支架如图 12-21 所示，它的顶部和底部为承受作用力的橡胶柔性体。磁流变液体由两磁极的间隙分开，该间隙起到慢性导向作用，控制磁极上的磁场值即可改变磁流变体的剪切性能，这种支座具有高的静态刚度，以及在 20～40Hz 的频率范围内产生低的动态刚度。目前制造的可控支座可以在－30～110℃的范围内使用，承受 20 亿次的载荷变动，仍能正常工作。

② 磁流变减振器　减振器是汽车悬架系统中重要的部件。通过自身的阻尼作用，从而耗散掉由于地面激励所引起的汽车振动能量，从而为汽车运行提供良好的平顺性及操纵稳定性。传统的被动式悬架由于自身的悬架参数无法实现主动调节而阻碍了汽车平顺及操作稳定性的进一步提高，应用磁流变效应设计的减振器为汽车的半主动悬架走向工程实用提供了坚实的基础。磁流变减振器的结构示意图如图 12-22，其工作原理是在活塞两端填充磁流变液体，绕线圈在活塞中间圆柱面上，通过调节线圈的磁场来改变工作黏性，进而实现调节磁流变减振器阻尼力的目的。

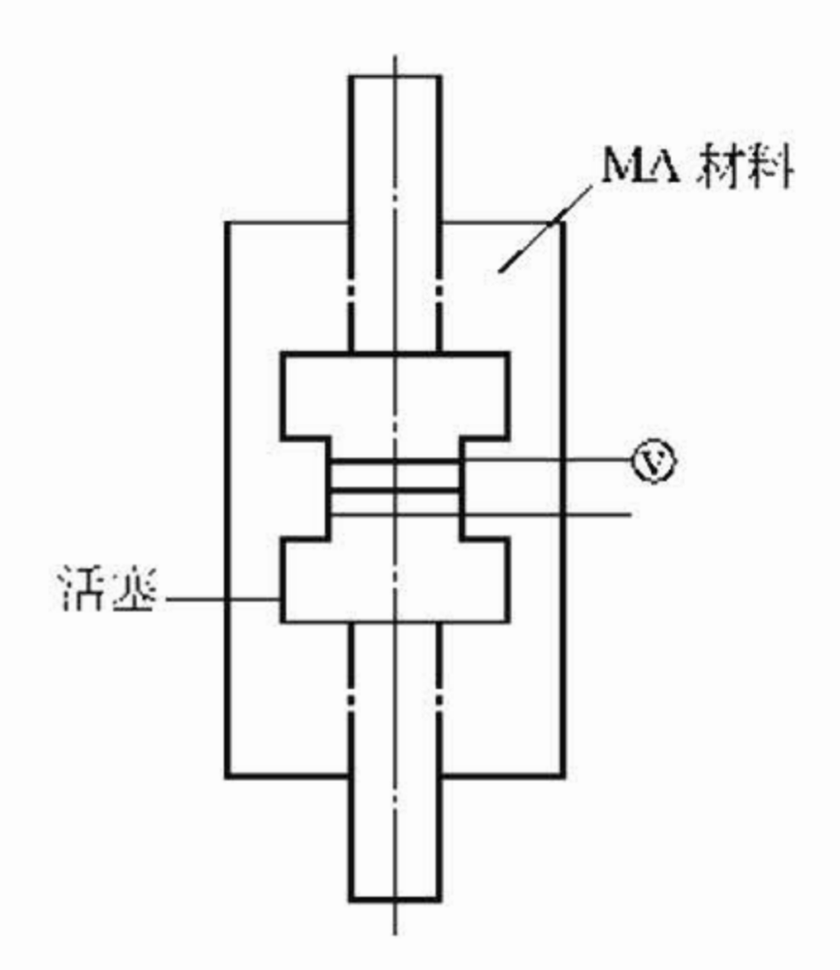


图 12-22　磁流变减振器结构示意图

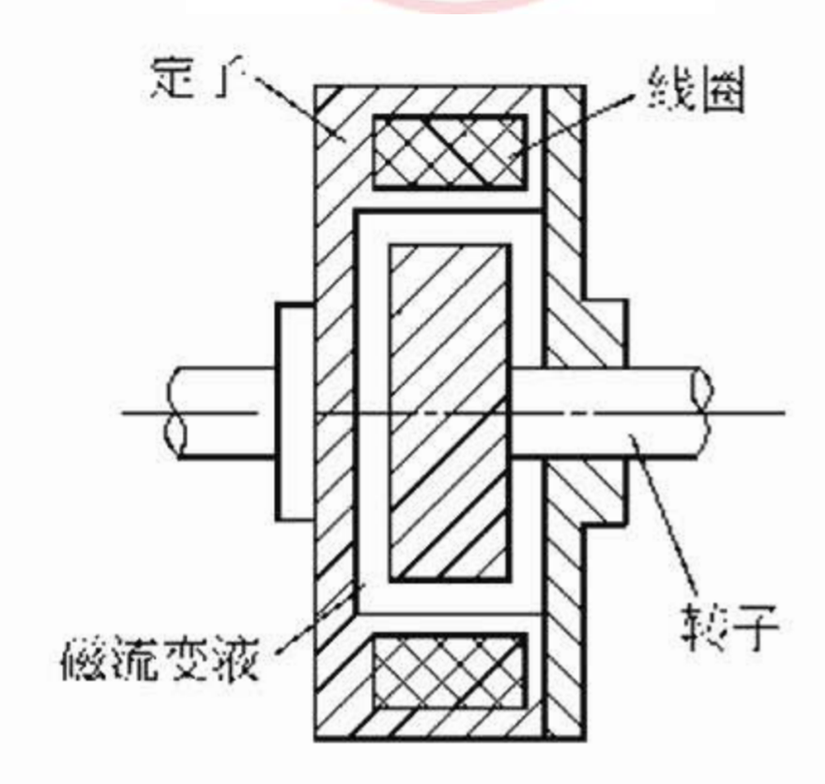


图 12-23　磁流变制动器结构简图

③ 磁流变制动器　目前研究磁流变制动器的工作原理仍限于剪切型。而磁流变制动器的结构很多，有圆柱形、圆筒形、环形、圆盘形，其中最常见的、最基本的是圆柱形，其结构如图 12-23

所示。

制动器由定子和转子两大部分组成，定子和转子之间充满磁流变液体。当线圈不通电，磁流变液呈液态，转子和定子相互分离；而当线圈通电后，定子内部的线圈将在定子与转子间的间隙内产生沿转子半径的磁场，磁流变液受到磁场的作用下成为固态形式，使磁流变液的黏性阻力增加，屈服应力增大。定子通过类固态的磁流变液对转子产生剪切制动力矩。由于黏塑性流体的屈服应力是磁场强度的函数，因此通过控制线圈中的电流强度来调节磁场强度，就可以调节流体的剪切应力，从而调节制动器定子对转子的制动力矩。

④ 子磁流变离合器　磁流变离合器的工作原理是在两个圆盘之间填充磁流变液体，然后在其间加一磁场，通过改变磁场强度就可以调节两个圆盘之间的转速比，这种新型的磁流变离合器与传统的汽车离合器相比具有结构简单、机械磨损小、噪声低、响应速度快等特点。

(3) 磁流变体在溢流阀上的应用　传统的溢流阀由弹簧调压，容易失效、调压困难、响应速度慢，而利用磁流变体作为工作介质，制造的磁流变体溢流阀，无动作部件，可在计算机上实现连续调压，具有结构简单、工作可靠、使用寿命长等特点。

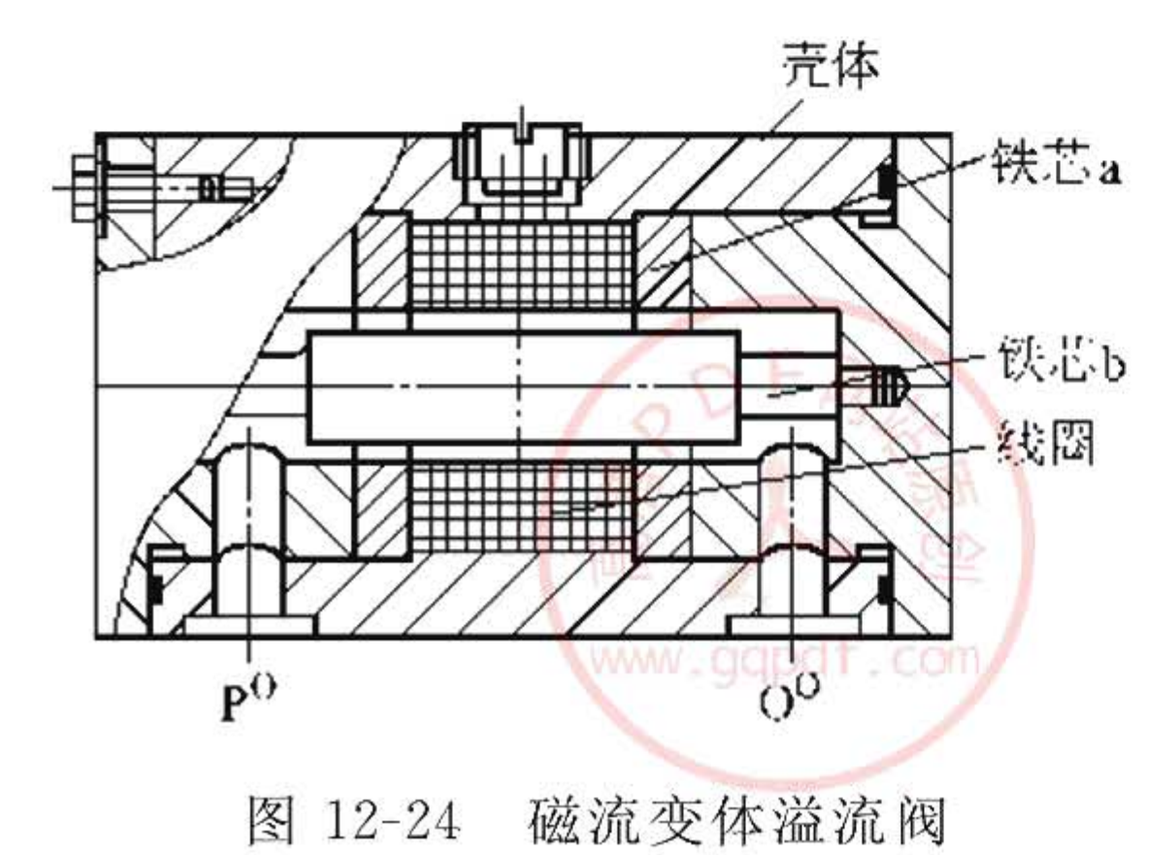


图 12-24　磁流变体溢流阀

磁流变体溢流阀的结构如图 12-24 所示，磁流变体溢流阀由衔铁和线圈组成，磁流变体从铁芯 a 和铁芯 b 之间的间隙内流过，当溢流阀的线圈通电时，铁芯间隙内形成一定的磁场。流经间隙的磁流变流体在磁场的作用下瞬间转变为接近固体状态，只有当压力达到一定值时，磁流变流体才恢复原流动状态，继续流动。因而当线圈通电时，溢流阀可实现调压。当溢流阀线圈不通电时，磁流变流体为流动状态，可通过溢流阀实现卸荷。

（4）磁流变抛光技术　磁流变抛光技术是利用磁流变抛光液在磁场中的流变性进行抛光的。在高强度的梯度磁场中，磁流变抛光液变硬，成为具有黏塑性的 Bingham 介质。当这种介质通过工件与运动盘形成的很小空隙时，对工件表面与之接触的区域产生很大的剪切力，从而使工件表面材料被去除。

抛光球形表面工件如图 12-25 所示，将含有微米磁性颗粒与磨料的水基磁流变液体置于旋转的托盘内，工件安装在旋转的主轴上。旋转托盘将磁流变液送到工件的表面。在工件附近施加直流磁场，则磁流变液在此变硬，并被拖入由工件和托盘构成的间隙中。在与工件接触的小区域上产生较高的切应力，使工件表面得以抛磨。主轴由程序控制进行偏转，使工件表面扫过高切应力区，从而整个工件得以抛光。

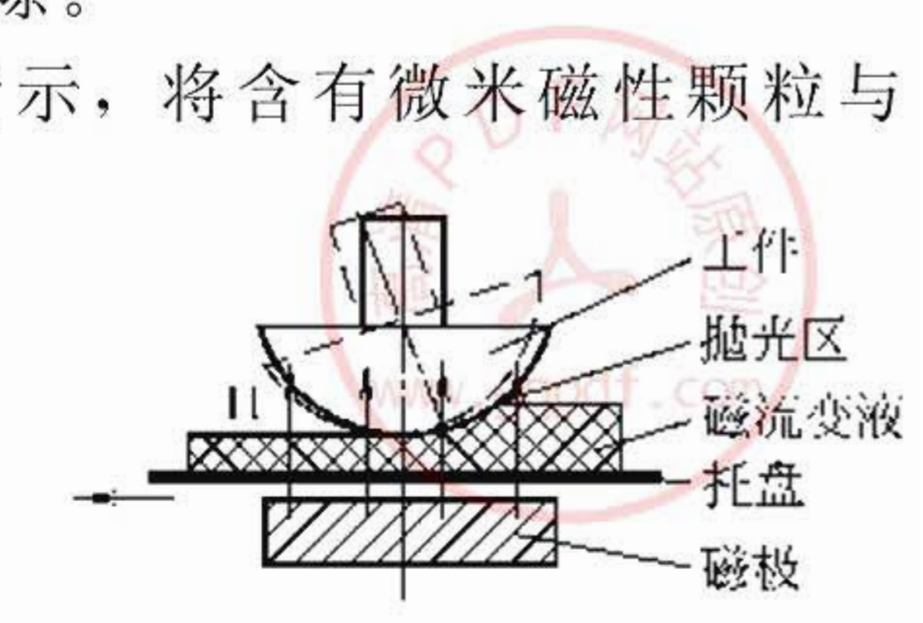


图 12-25　磁流变抛光装置

（5）磁流变液密封　Kordonski 通过实验研究了以磁流变液为密封介质的旋转轴单级密封技术。它是通过磁场控制间隙中磁流变液的黏度而达到密封目的，其结构与铁磁流体密封基本一样，具有结构简单、密封性能好、配合件无磨损、维修简便等特点。

（6）柔性夹具　在生产制造过程中，对于加工不规则形状的工件和小型部件，特别需要使用些柔性夹具，以保证加工精度并减少非加工工时。利用磁流变液相变速度快、屈服强度大等特点，人们通过加压的方法迫使磁流变液体微观结构由单链变为粗大的柱状，在中等磁场作用下使其屈服应力达到 800kPa 以上，从而满足了精密加工所需的夹具承载能力。

当然磁流变液体的应用远不止这些，一些新的研究正在加紧进行，如用于机械手的抓持机构，机器人的传感器等。此外磁流变液装置的数学模型及控制技术也是许多学者正在深入研究的方向之一。随着研究的深入，相信磁流变液必将广泛地应用于航空、航天及民用工业的各个领域。

参 考 文 献

1 翁兴园．磁性材料及器件，1993，24（4）：59

2 翁兴园．磁性材料及器件，1999，29（6）：35

3 周继斌，陆永平著．磁性流体密封原理与设计．北京：国防工业出版社，2000

4 许孙曲，卢继美．国外科技，1986，（5）：22

5 都有为．磁性材料及器件，1992，23（3）：30

6 许孙曲，许菱．磁性材料及器件，1995，26（2）：23

7 高道江，赖欣，王建华．磁性材料及器件，1998，29（2）：20

8 张茂润，李广田．功能材料，1994，25（1）：44

9 庄人杰．粉末冶金技术，1989，7（4）：248

10 康鸿业，赵海燕，赵纯，赵慕愚．功能材料，1993，24（5）：402

11 齐风春．材料导报，1998，12（2）：17

12 周伦，王凯印．润滑与密封，1996，（1）：58

13 蒋秉植，杨健美．润滑与密封，1995，（3）：61

14 黄刚．电子工艺技术，1994，（1）：18

15 杨仕清，张万里，龚捷，谭锐，王豪才．功能材料，1998，29（5）：550

16 金昀，周刚毅，张培强，李卫华．实验力学，1999，14（3）：288

17 潘华锦，黄红军，崔海萍，蔡玉平，阎军，王建江．磁流变液制备方法研究进展．见：第十一届全国磁学和磁性材料会议论文集．长沙：1992.466

18 杨仕清，王豪才，张万里，龚捷．大自然探索，1998，17（3）：38

19 Weiss，K. D.，Carlson J. D.，Nixon D. A. J. Intell. Mater. Syst. and Struct. 1994，（5）：772

20 Mark R. Jolly，Jonathan W. Bender，J. David Carlson. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. Thomas Lord Research Center，Lord Corporation

21 Phillips，R. W. Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress：Ph. D. Thesis. Berkeley University of California，1969

22 Kormann，C.，Laun M.，Klett G. In：Borgmann H，Lenz K. Axon eds Actuator 94，4th Int. Conf. on New Actuators. Technologies Consult GmbH，1994. 271

23 Ginder，J. M.，Davis L. C.. Elie L. D. Rheology of Magnetorheological Fluids：Models and Measurements. 5th Int. Conf. on ERF，MRS and Thier Applications. July，1995，Univ. Sheffield，UK. 1995

24 Jolly，M. R，Carlson J. D. Controllable Squeeze Film Damping Using Magnetorheological Fluid. In：Borgmann H and Lenz K. Axon . Actuator 96，5th Int. Conf. on New Actuators. Technologies Consult GmbH. 1996

25 周鲁卫，潘胜，乔皓洁．力学进展，1996，26（2）：230

26 刘丁雷，李德才，袁祖贻．新技术新工艺，1999，（6）：14

27 金昀，唐新鲁，王晓杰，张培强，陈祖耀．实验力学，1998，13（2）：168

28 汪建晓，孟光．机械强度，2001，23（1）：50
29 华文林，柳舟通，吴景华．适用技术市场，2001，（4）：11
30 徐静，董雁．机械设计与制造，2001，（3）：34
31 李松晶，王广环．功能材料，2001，32（3）：260
32 张峰，余景池，张学军，王权陡．光学精密工程，1999，7（5）：1
33 廖昌荣，余森，杨建春，陈伟民，黄尚廉．汽车技术，2001，（5）：11

PDF 图原色 www.gqpdf.com

高清PDF网站原创 www.gqpdf.com

第 13 章　复合磁性材料

复合材料是由两种或两种以上异质、异性、异形的材料复合形成的新型材料，一般由基体组元与增强体或功能组元所组成。

功能复合材料是指除力学性能以外还提供其他物理性能并包括部分化学性能和生物性能的复合材料，如有导电、超导、半导、磁性、压电、阻尼、吸声、摩擦、吸波、屏蔽、阻燃、防热等功能的复合材料。功能复合材料主要由功能体和基体组成，功能体可以由一种或多种组成，在单一功能体的复合材料中，其功能性质由功能体提供，基体既起到黏结和赋形的作用，也会对复合材料整体的物理性能有影响。多元功能体的复合材料具有多种功能，同时还可能因复合效应而出现新的功能。多功能复合材料将成为功能复合材料新的发展方向。

功能复合材料功能的复合效应包括线性效应和非线性效应两类[1]。

线性效应包括加和效应、平均效应、相补效应和相抵效应。例如常用于估算功能体与基体在不同体积分数情况下复合而成的复合材料的某一功能性质

$$P_c = V_r P_r + V_m P_m \tag{13-1}$$

式中，P_r、P_m 分别为功能体和基体的这种性质；V_r、V_m 分别是两者的体积分数。复合材料的电导、热导、密度和弹性模量等服从这一规律。

非线性效应包括乘积效应、系统效应、诱导效应和共振效应。其中乘积效应已被认识和利用，而其他效应未被充分认识和利用。所谓乘积效应可描述如下：如把一种具有两种性能互相转换的功能材料 X/Y 和另一种 Y/Z 的转换材料复合起来，可以得到(X/Y)·(Y/Z)＝X/Z 的新材料。表 13-1 给出了一些具有乘积效应的复合材料实例。

表 13-1　复合材料的乘积效应及其应用[2,3]

甲相性质 X/Y	乙相性质 Y/Z	复合后的乘积效应 $(X/Y)(Y/Z)=X/Z$	用　途
压磁效应	磁电效应	压电效应	压电传感器
压电效应	场致发光效应	压力发光效应	压力过载指示
磁滞伸缩效应	压阻效应	磁阻效应	磁场测量元件
光导效应	电致伸缩效应	光致伸缩效应	光控机械运作元件
热致变形效应	压敏电阻效应	热敏电阻效应	热敏电阻,PTC

磁性复合材料是以高分子（高聚物）或低熔点金属等为基体与磁性材料复合而成的一类复合材料，它是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型功能复合材料，是现代科技领域的重要基础材料之一。

磁性功能复合材料的主要优点是：密度小，耐冲击强度大，制品可进行切割、切削、钻孔、焊接、层压和压花纹等加工，且使用时不易发生破裂。易于加工成尺寸精度高、薄壁、形状复杂的制品，对电磁设备实现小型化、轻量化、精密化和高性能化的目标起关键的作用。

由于磁性材料有软磁和永磁之分，因此也有软磁磁性复合材料和永磁磁性复合材料。磁性粉末颗粒涂覆在高聚物材料带上或金属盘上形成磁带或磁盘用于磁记录或者磁性粉末颗粒与液体混合形成磁性液体（磁流体）等都是重要的磁性复合材料。此外，目前在军事领域发展迅速的隐身材料中的磁性吸波材料也是一种重要的磁性复合材料，由于磁记录材料、磁流体和吸波材料已在前面章节中作了介绍，因此本章重点介绍软磁和永磁复合材料。

13.1　磁性复合材料的组成

磁性复合材料是由基体与磁性材料复合而成的一类复合材料，此外，还可添加少量的辅助成分，如抗氧化剂、润滑剂、分散剂、增塑剂、稳定剂等。

13.1.1　基体

磁性复合材料的基体主要包括聚合物基体和低熔点金属。在磁

性复合材料中，主要起到黏结和赋形的作用。

（1）聚合物基体　聚合物机体分为橡胶类、热固性树脂类和热塑性树脂类三种。橡胶类机体包括天然橡胶和合成橡胶，以后者为主。这类机体主要用于柔性磁体复合材料，特别是在耐热耐寒的条件下，使用硅橡胶作基体是最合适的。热固性树脂一般用环氧树脂，目前添加多硫化物对环氧树脂进行改性，提高了加工稳定性和磁性能。热塑性树脂中绝大多数均可作磁性复合材料的基体，而且对磁性能影响不大，但对力学性能、耐热性、耐化学性等有影响。常用的热塑性基体为尼龙（6，66，610，12 等）。其他高性能热塑性聚合物如 PES、PEEK、PPS 等，虽然能提高磁性复合材料的综合性能，但由于价格高、成型困难而很少使用。一些通用的塑料如 PE、PVC、PMMA 等也可使用，该类基体价格便宜，易加工，但耐热性差。

（2）低熔点金属基体　低熔点金属主要指 Zn、Al、Sn、Bi、Pb 等质地较软，容易发生塑性变形的金属材料。该类基体主要应用在制备较高温度下（>200℃）使用的复合磁性材料中，通常情况下，较少使用。

13.1.2　磁性材料

磁性材料是决定磁性复合材料最终性能的功能体，一般包括结构型有机高分子磁性材料和无机磁性材料，目前广泛使用的为无机磁性材料，结构型有机高分子磁性材料使用的很少。

（1）结构型有机高分子磁性材料[4,5]　结构型有机高分子磁性材料是指聚合物本身就具有磁性的一类磁性材料。其最早是在被称作 PPH（聚双-2,6-吡啶基辛二腈）的聚合物中发现的。目前，主要的结构型有机高分子磁性材料的种类包括：分子晶体、有机金属化合物和有机聚合物三大类。

结构型有机高分子磁性材料制备的基本原理为：①根据单畴磁体结构，构筑具有大磁矩的高自旋聚合物；②参考 α-Fe 和具有金红石结构的铁氧体，使低自旋高分子的自旋取齐。

结构型有机高分子磁性材料的特点为密度小，易成形，绝缘性好，不存在涡流，磁性能表现在分子水平上，因此开发了功率分配

器、射频振荡器等磁性元器件，可以在航空航天、微波通讯、电子对抗和高密度存储器等方面发挥重要的作用，但这类聚合物尚处于探索之中，各国的研究工作都很活跃。

（2）无机磁性材料[2,6,7]　无机磁性材料的种类很多，根据性能可分为软磁材料、永磁材料、旋磁材料、矩磁材料、压磁材料等；根据成分和结构可分为铁氧体类磁性材料和金属类磁性材料等，其中的软磁和永磁材料是应用最为广泛的两类。软磁材料的特点为矫顽力和磁滞损耗低；电阻率较高，磁通变化时产生的涡流损耗小；饱和磁感应强度高，因此，广泛应用于计算机、微波通讯、电视、自动控制、航空航天、仪器仪表、医疗、汽车工业等领域。永磁材料的特点为剩磁、矫顽力和最大磁能积高。永磁材料的应用主要利用永磁体在气隙产生足够强的磁场，利用磁极与磁极的相互作用，磁场对带电物体或粒子或载流导体的相互作用来做功，或实现能量、信息的转换。永磁材料已在通讯、自动化、音像、计算机、电机、仪器仪表、石油化工、磁分离、磁生物、磁医疗与健身器械、玩具等领域得到了广泛的应用。

① 铁氧体类磁性材料　铁氧体是一种以氧化铁为主要成分的非金属磁性材料。与金属磁性材料相比，铁氧体磁性材料的饱和磁化强度只相当于纯铁的 1/5～1/3，性能偏低，但自 20 世纪 40 年代以来，因其独特的良好性能和便宜的价格，而得到了迅速发展和广泛的应用。

其独特的性能特点表现在：

a. 电阻率高，一般为 10^{-2}～$10^{11}\,\Omega\cdot\mathrm{cm}$，在导电性方面，铁氧体属于半导体范畴；

b. 介电性能高，某些铁氧体的低频电容率高达 10^3～10^5；

c. 在高频环境中具有较高的磁导率和低的涡流损耗。

按照晶体结构，铁氧体主要有尖晶石型、石榴石型和磁铅石型三种类型。

按照特性和应用，铁氧体材料可分为：软磁铁氧体、永磁铁氧体、旋磁铁氧体、矩磁铁氧体和压磁铁氧体五大类。各类铁氧体的特性与应用列于表 13-2 中。

表 13-2　各类铁氧体的特性及用途

类型	代表性铁氧体	晶系	结构	主要特性	频率范围	应　用
软磁	锰锌铁氧体	立方	尖晶石型	高 μ_i、Q、B_s 低 α_μ、D_A	1kHz～5MHz	多路通讯及电视用磁芯和录音、录像磁头
	镍锌铁氧体			高 Q、f_r、ρ 低 $\tan\delta$	1kHz～300MHz	多路通讯用电感器、滤波器、磁性天线和记录磁头
	甚高频铁氧体	六角	磁铅石型	高 Q、f_r、低 $\tan\delta$	300～1000MHz	多路通讯及电视用磁芯
永磁	钡铁氧体 锶铁氧体	六角	磁铅石型	高 ${}_bH_c$、$(BH)_{max}$	1～20kHz	微音器、拾音器、电话机，各种电声器件及仪表和控制器件的磁芯
旋磁	镁锰铝系铁氧体 镍系铁氧体 锂系铁氧体	立方	尖晶石型	ΔH 较大	500～100000MHz	雷达、通讯、导航、遥测、遥控等设备中的微波器件
	钇铁石榴石 铁氧体		石榴石型	ΔH 较小	100～10000MHz	
	钡铁氧体	六角	磁铅石型		毫米波、亚毫米波	
矩磁	镁锰铁氧体 锂锰铁氧体	立方	尖晶石型	高 α、R_s 低 τ、S_w	300kHz～1MHz	计算机存储器磁芯
压磁	镍锌铁氧体 镍铜铁氧体			高 α、K_r、Q 耐蚀性好	约 100kHz	超声、水声器件，电讯自控磁声和计量器件

表中符号的意义：μ_i—初始磁导率；Q—品质因数；B_s—饱和磁感应强度；α_μ—磁导率的温度系数；D_A—减落；$\tan\delta$—损耗角的正切；f_r—截止频率；ρ—电阻率；${}_bH_c$—磁感矫顽力；$(BH)_{max}$—最大磁能积；ΔH—共振线宽；α—剩磁比；R_s—矩形比；τ—开关时间；S_w—开关系数；K_r—机电偶合系数。

软磁铁氧体是指在较弱的磁场下，容易磁化也容易退磁的一类铁氧体，一般用在弱场条件下，主要用作各种电感器件，是目前铁氧体材料中用途较广、产量较大的一种铁氧体材料。

永磁铁氧体是指磁化后不易退磁，能够长时间保留磁性的一类铁氧体，主要应用于电讯器件、小型电机及磁分离机中的永久磁体，在污染的处理、磁生物学、印刷显示和家用电器等方面也被广泛应用。

旋磁铁氧体的旋磁特性是铁磁材料的共性，旋磁性在甚高频至微波频率下才明显表现出来，而在这样高的频率下，金属材料已无法

使用，因此，旋磁性的应用，成为铁氧体独有的领域。

所谓旋磁性是指在两个互相垂直的直流磁场和电磁波磁场的作用下，平面偏振的电磁波在材料内部按一定方向传播过程中，其偏振面会不断绕传播方向旋转的现象。

旋磁铁氧体主要用于制造微波器件，在雷达、通讯、导航、遥测、遥控等领域都有应用。

矩磁铁氧体是指具有矩形磁滞回线的铁氧体，主要用于制作计算机存储器的磁芯，在自动控制、雷达导航、宇宙航行、信息显示等方面都有广泛的应用。

压磁铁氧体是指磁化时，在磁场方向具有磁致伸缩效应的一类铁氧体，主要应用于电磁能与机械能相互转换的器件中，如超声、磁声器件。

② 金属类磁性材料

a. 金属软磁材料　金属软磁材料是磁性材料中用途最广、用量最大的一类材料，包括分别可应用于强磁场和弱磁场条件下的磁性材料。在强磁场下工作的材料，要求具有高的饱和磁化强度；在弱磁场下工作的材料，要求具有高的磁导率。按材料的成分，金属软磁材料可分为电工纯铁、Fe-Si 合金、Ni-Fe 合金、Fe-Al 合金（包括 Fe-Si-Al 合金）、和 Fe-Co 合金等；也可分为晶态、非晶态及纳米晶软磁材料等。表 13-3 列出了某些金属软磁材料及其磁性能。

表 13-3　某些金属软磁材料及其磁性能

材　料　种　类	初始磁化率	每周期的磁滞损耗/(J/m^3)	饱和磁化强度/T
电工纯铁	250	500	2.16
无取向 Fe-4%Si	500	50～140	1.95
取向 Fe-3%Si	14000	35～140	2.00
45 坡莫合金(45%Ni-55%Fe)	2700	120	1.60
Mu 金属(75%Ni-5%Cu-2%Cr-18%Fe)	30000	20	0.80
超坡莫合金(79% Ni-14% Fe-5% Mo-0.5Mn)	100000	2	0.79

高清PDF网站原创 www.gqpdf.com

非晶软磁材料由于其内部的原子是无序排列的，因此，不具有磁晶各向异性，磁致伸缩特性好，耐腐蚀，机械抗拉强度高，韧性好，电阻率高于一般的软磁合金，性能与 Fe-Ni 合金基本相同。

纳米晶软磁材料的代表为日本 1987 年发明的“Finemet”合

表 13-4　金属永磁材料的成分与性能

类　型		型　号	代表性成分（质量分数）	磁　性　能			
				B_r /T	H_c /(kA/m)	$(BH)_m$ /(kJ/m³)	T_c /℃
铸造永磁		AlNiCo5 系	8%～12% Al，15%～22% Ni，5%～24% Co，3%～6% Cu，余 Fe	0.7～1.32	40～60	9～56	890
铸造永磁		AlNiCo8 系	7%～8% Al，14%～15% Ni，34%～36% Co，3%～4% Cu，5%～8% Ti，余 Fe	0.8～1.05	110～160	40～60	860
稀土永磁	钴系	1：5 型 SmCo	62%～63% Co，37%～38% Sm	0.9～1.0	1100～1540	117～179	720
稀土永磁	钴系	2：17 型 SmCo	Sm($Co_{0.69}Fe_{0.2}Cu_{0.1}Zr_{0.01})_{7.2}$ Sm($Co_{0.67}Fe_{0.22}Cu_{0.1}Zr_{0.07}Ti_{0.01})_{7.1}$	1.0～1.3 1.0～1.07	500～600 800～1400	230～240 160～204	800 810
稀土永磁	铁系	烧结 NdFeB	$Nd_{13.5}(Fe,M)_{余}B_{6.1\sim7.0}$	1.1～1.4	800～2400	240～400	310～510
稀土永磁	铁系	快淬 NdFeB 磁粉	$Nd_{12\sim15}(Fe,M)_{余}B_{5.5\sim7.0}$	1.0～1.4	640～1800	200～280	310～510
稀土永磁	铁系	HDDRNd-FeB 磁粉	$Nd_{12.5\sim15}(Fe,M)_{余}B_{6.0\sim7.0}$	1.1～1.5	640～1600	240～340	310～510
稀土永磁	铁系	2：17 与 1：12 型间隙化合物	$Sm_2Fe_{17}N_x$，$Nd(Fe,Mo)_{12}N_x$	0.6～1.1	600～2000	56～160	310～600
稀土永磁	铁系	纳米复合永磁	$Nd_2Fe_{14}B/\alpha$-Fe，$Sm_2Fe_{17}N_x/\alpha$-Fe	1.0～1.3	240～640	80～160	
其他永磁		Fe-Cr-Co 系	33Cr-16Co-2Si-余 Fe	1.29	70.4	64.2	500～600
其他永磁		Fe-Ni-Cu 系	16Ni-15Cu-余 Fe	1.30	4.8	50～60	
其他永磁		Pt-Co 系	76～78Co-余 Pt	0.79	320～400	40～50	520～530
其他永磁		Fe-Pt 系	78Pt-余 Fe	1.08	340	154	

金，其晶粒大小约为 20nm，具有极高的初始磁导率和最大磁导率。

b. 金属永磁材料　金属永磁材料的种类很多，概括起来主要有铸造永磁材料、稀土永磁材料和其他永磁材料三大类，其代表性成分和磁性能列于表 13-4 中。铸造铝镍钴永磁材料居里温度高，温度稳定性好，磁感温度系数低。但含有较多的战略金属钴和镍。Sm-Co 系永磁材料居里温度高，温度稳定性好，磁性能高。但含有较多的金属 Co 和 Sm，价格高。以 NdFeB 为代表的稀土铁系永磁材料磁性能高，相对价格较低，因而得到了广泛的应用，平均年增长率高达 20%～30%。

在金属永磁复合材料制备中常用的功能体粉末主要包括：永磁铁氧体、纳米复合永磁，SmCo 类、$Sm_2Fe_{17}N_x$ 类、$Nd(Fe,Mo)_{12}N_x$ 和 NdFeB 类粉末，目前应用最广泛的是铁氧体和 NdFeB 两类粉末。

NdFeB 类粉末的制备方法目前主要采用熔体快淬法和氢爆法（HDDR 法）。采用熔体快淬法直接制备的磁粉是各向同性的，经热变形后，可以产生组织织构，具有各向异性。采用 HDDR 法，可以直接制备出具有各向异性的磁粉，该类磁粉是目前所有磁粉中磁性能最高的，其最大磁能积高达 $342kJ/m^3$[8]。

13.1.3　辅助成分

辅助成分就是巩固或增强复合材料复合效果的少量添加成分，包括抗氧化剂、润滑剂、分散剂、增塑剂、稳定剂等。

在磁性粉末与热固性树脂混合制成的复合材料——黏结磁体中，常使用的辅助材料为耦联剂和润滑剂。一般讲，金属磁性粉末具有亲水性，而树脂具有亲油性，两者直接复合的结合力差。耦联剂是既具有亲水基团又具有亲油基团的高分子物质，其亲水基团与磁性粉末相互作用，其亲油基团与树脂相互作用，从而提高了磁性粉末与树脂的亲和力，进而提高了复合材料的结合力。润滑剂的作用主要是减少材料制备过程中粉末与粉末之间，粉末与模壁之间的摩擦，从而提高磁性复合材料的密度以及尺寸和性能均匀性，常用的润滑剂为硬脂酸盐类。

13.2 磁性复合材料的种类

磁性复合材料有多种组合：①无机磁性材料与聚合物基体构成的复合材料；②无机磁性材料与低熔点金属构成的复合材料；③有机磁性材料与聚合物基体构成的固态复合材料；④无机磁性材料与载液构成的复合材料——磁性液体。其中无机磁性材料与聚合物基体构成的复合材料应用得最多。

13.3 磁性复合材料的主要制备方法

磁性复合材料主要的制备方法包括：模压成型、注射成型、挤

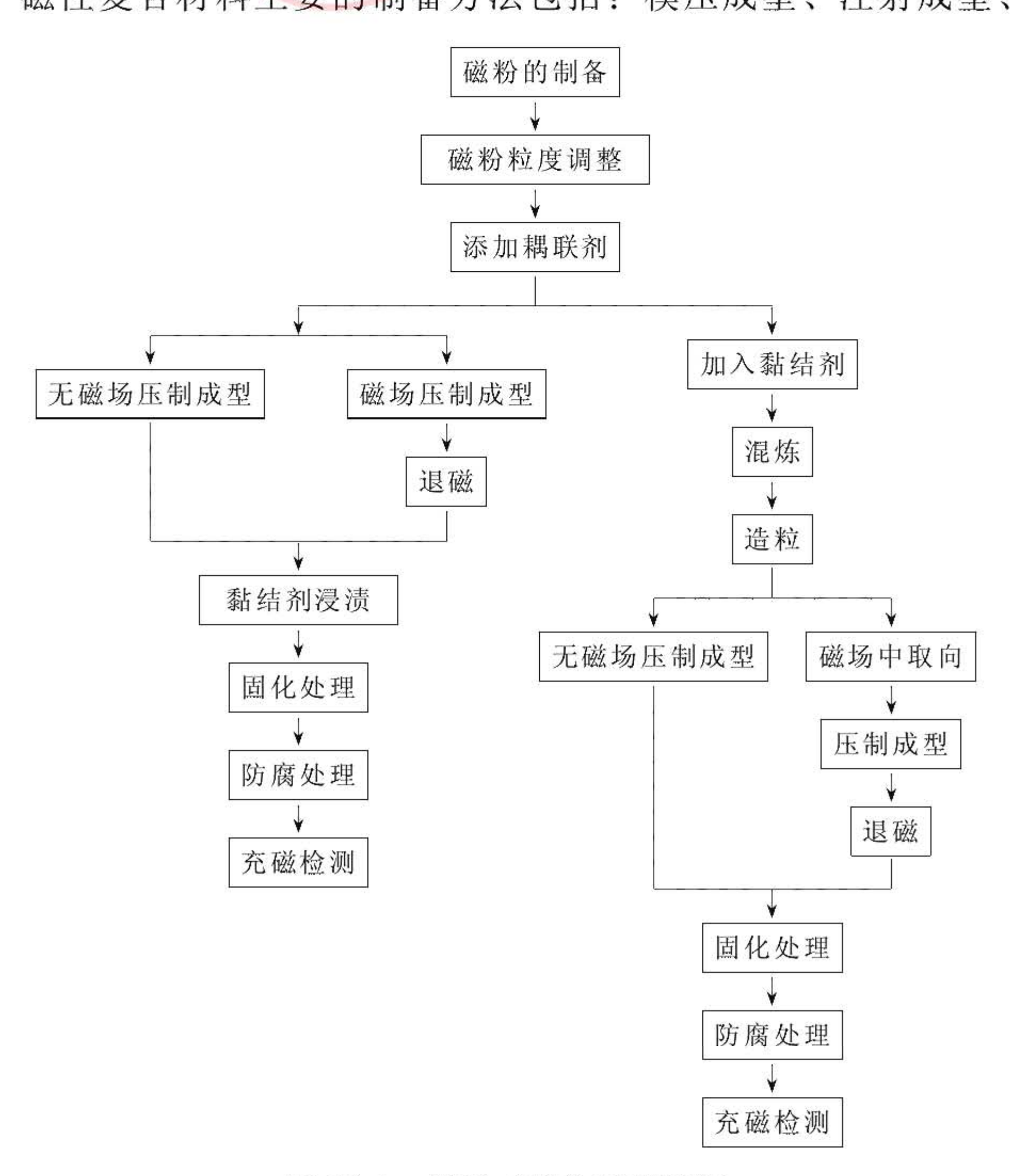


图 13-1 模压成型的工艺流程

压成型和压延成型。在材料的制备过程中，通过外加磁场或机械力，使磁粉的最大易磁化方向顺序排列，制得各向异性磁性复合材料；而在加工的过程中，不施加外加磁场或机械力，使得磁性粒子的最大易磁化方向杂乱无章地排列，制得各向同性磁性复合材料。对于同种类型的材料，各向异性磁性复合材料的磁性能要高于各向同性磁性复合材料的磁性能。制备各向异性磁性复合材料所使用的磁粉主要包括：单畴颗粒磁粉、MQⅢ热变形磁粉和 HDDR 各向异性 NdFeB 磁粉。

13.3.1 模压成型

模压成型的方法主要适用于制备薄壁环状等简单形状的磁性复合材料，由于所含高聚物的比例低（2%～5%），因此，与其他制备方法相比，该类材料的磁性能相对较高。

图 13-1 和图 13-2 分别给出了模压成型的工艺流程图和模压成型的示意图。

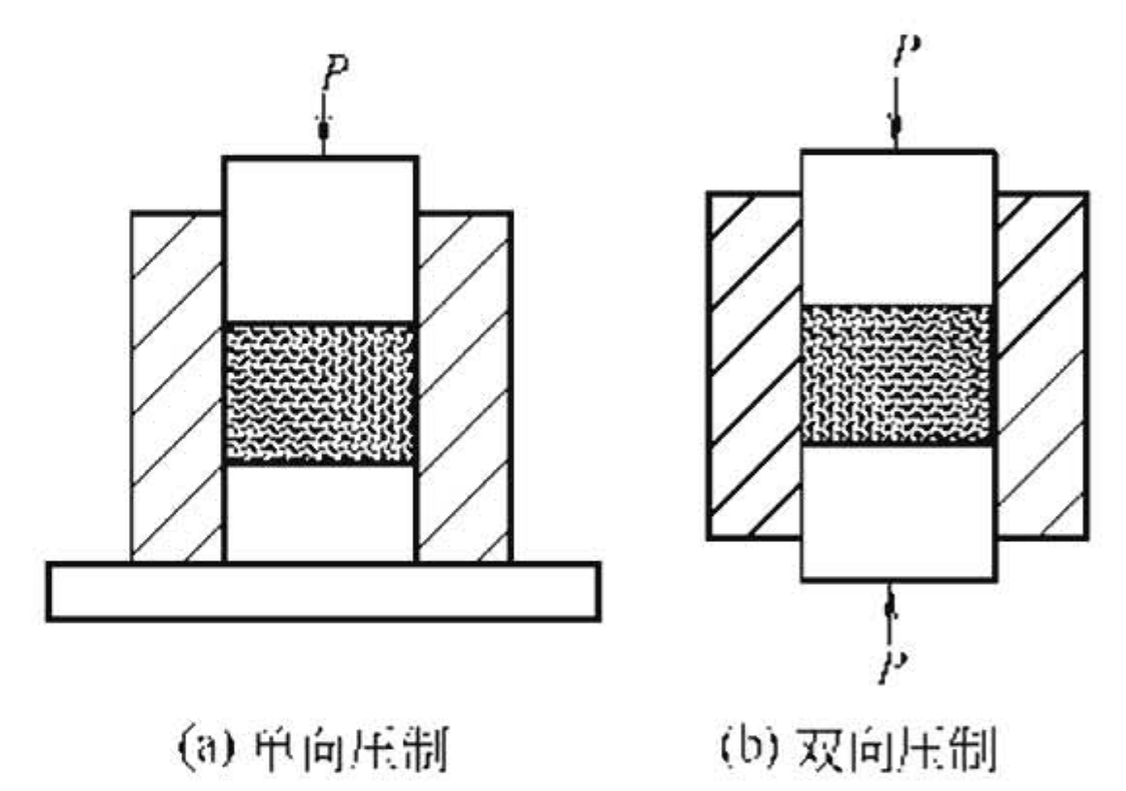


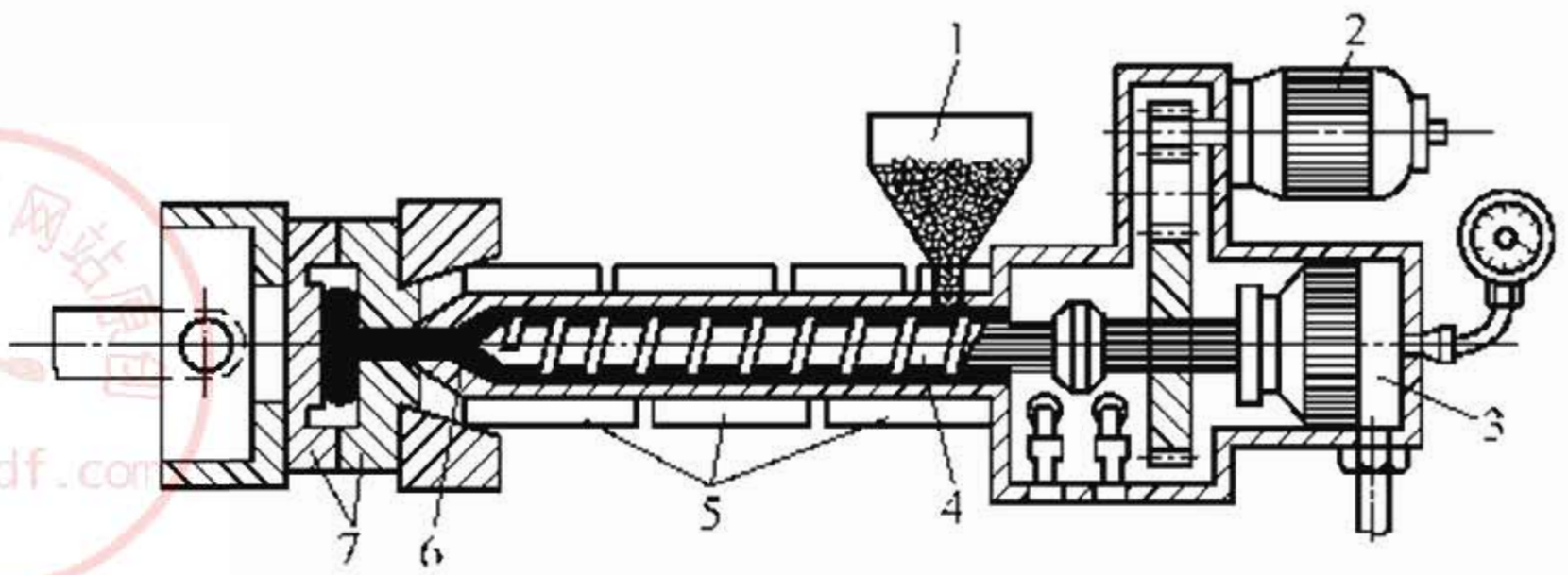
图 13-2 模压成型的示意图

在模压成型前，首先进行粒度调整，包括调整粒度的大小和分布，提高磁性粉末的松装密度，然后在磁粉中添加黏结剂、耦联剂和其他辅助成分后进行混炼（使黏结剂等均匀包裹在磁粉颗粒的周围）和造粒（提高材料的流动性），然后进行压制。根据磁性复合材料形状和尺寸的要求，可采用不同的压制方式。对于形状简单和高/径比小的材料，可采用单向压制；对于形状复杂和高/径比大的材料，可采用双向压制。压制过程可简单的描述成：将造粒后的粒料装入模具的料腔内，然后合模加压，使其成型。为了提高材料的磁性能，在模压过程中可以施加取向磁场，制成各向异性模压磁体；也可以采用温压成型的方法，即将模具和粒料加热到树脂的软化温度范围内，进行磁场取向压制，有助于减小粉末颗粒之间以及粉末颗粒与模壁之间的摩擦，使得磁粉的最大易磁化方向排列更整齐一致，磁体的

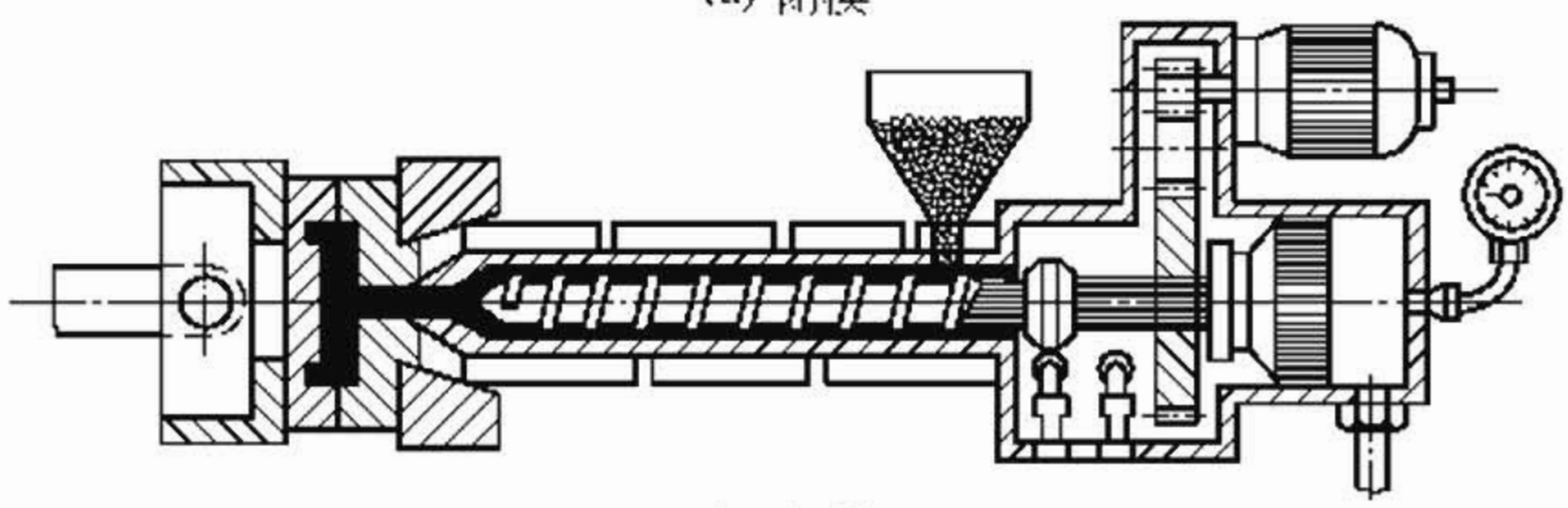
密度更高、更均匀。磁体成型后，进行固化处理（对于环氧树脂类黏结剂，固化温度为 130～180℃），以增强磁体的强度等力学性能。对于容易腐蚀的一类磁性粉末，如 NdFeB，要对毛坯进行防腐处理（主要为电泳、喷涂），然后充磁检测，完成材料的制备过程。

13.3.2 注射成型[9,10]

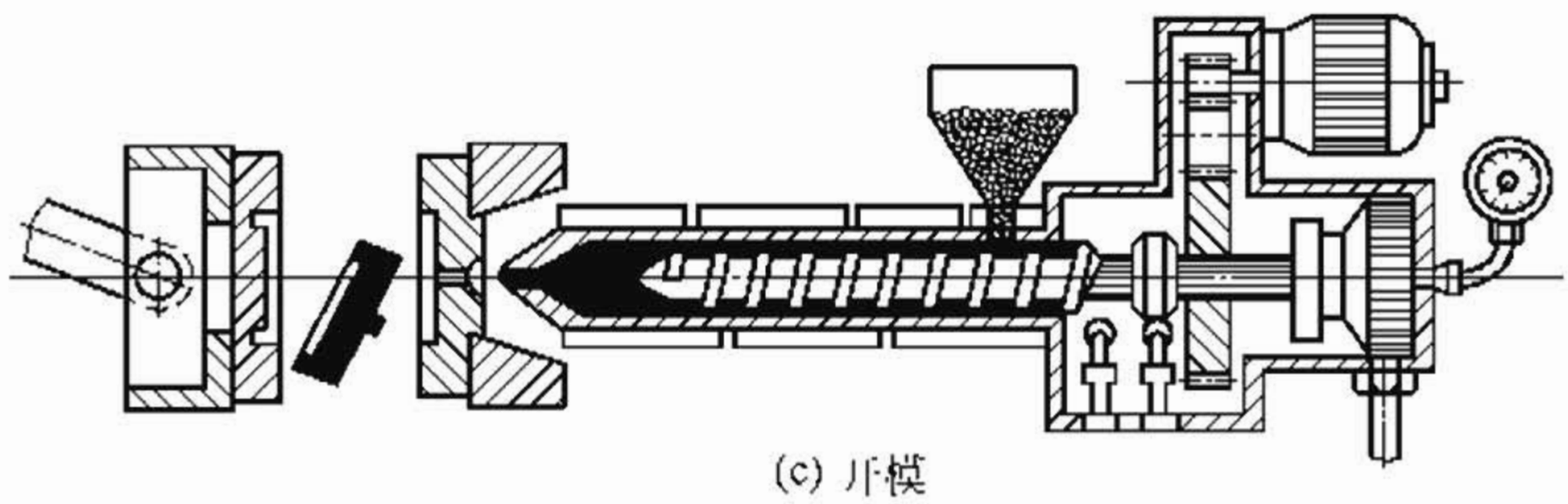
注射成型所选用的黏结剂为热塑性树脂，热塑性树脂包括尼龙（6，66，610，12）、聚乙烯、聚氯乙烯、橡胶、PPS（聚亚苯基硫醚）、PBT（聚苯二甲酸酯）等，在注射成型中常用的为尼龙 6。



(a) 闭模



(b) 成型



(c) 开模

图 13-3 注射成型原理示意图

1—料斗；2—螺杆转动传动装置；3—注射液压缸；4—螺杆；5—加热器；6—喷嘴；7—模具

采用注射成型的方法适于制备形状复杂和带镶嵌件的制品。

注射成型主要包括三个步骤：①混合料的制备——将磁性粉末与树脂、稳定剂、润滑剂等按一定比例混合、加热搅拌制成粒料；②注射成型——利用注射机将粒料注入成型模具，此外，在注射成型的同时外加取向场，可以制备各向异性的注射磁体；③去掉外磁场，冷却后退磁，取出成型产品。

注射成型所选用的设备通常为螺杆式注射机。注射成型的原理（图 13-3）为：将粒料由料斗倒入注射机中，并将动模与定模闭合，此时螺杆转动，将粒料推进并积存于料筒端部，在这一过程中，粒料中的热塑性树脂被加热熔融成黏流状态，同时原料进行充分混合，然后，螺杆对料筒顶端的熔融原料施加压力，将其注入到模腔中，当模腔充满并保压一定时间后，模具打开，在推力机构的作用下，注射工件被推出模具，完成注射成型过程。

注射产品的性能与注射温度、磁性粉末的种类和含量以及取向磁场的强度等因素有关。注射温度一般为 200～300℃。

13.3.3 挤压成型

挤压成型主要适于制备细长的棒状、管状样品，但不适宜制备薄壁管状材料。

挤压成型所用的树脂绝大多数为热塑性树脂。柱状材料和管状材料挤压成型的示意图如图 13-4 和图 13-5 所示。

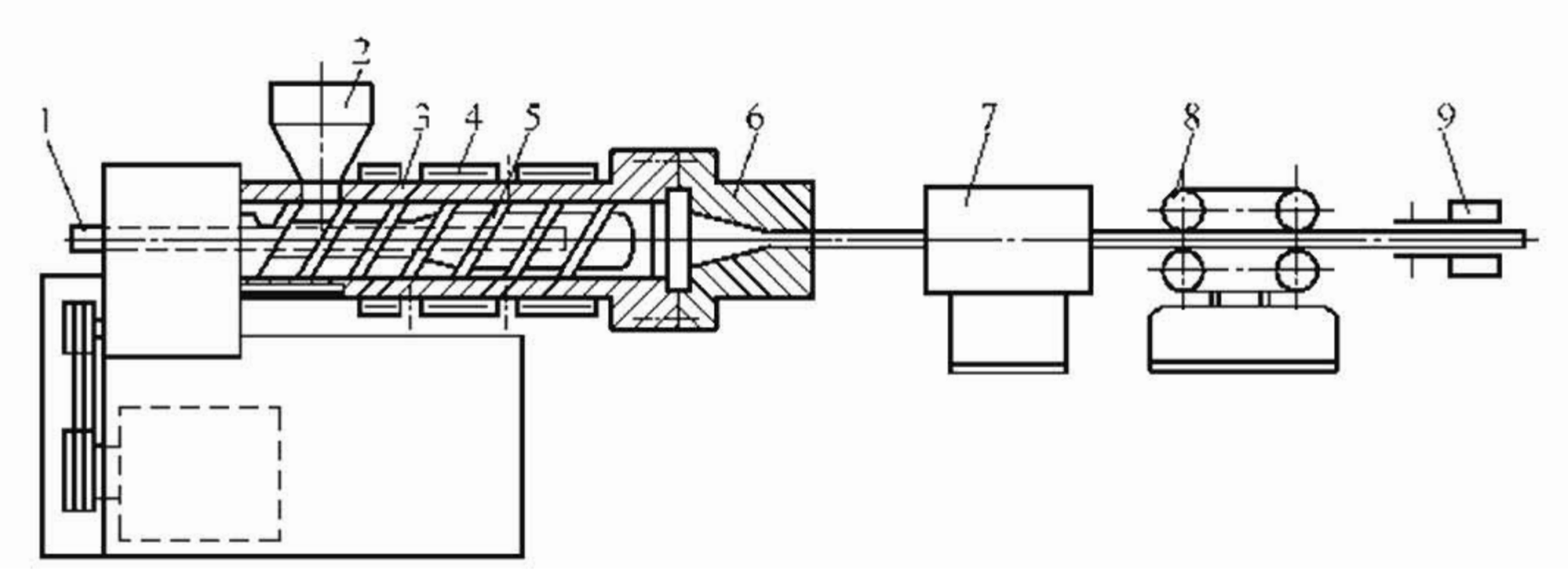


图 13-4　柱状材料挤压成型示意图

1—冷却水入口；2—料斗；3—料筒；4—加热器；5—螺杆；6—机头；7—冷却装置；8—牵引装置；9—切割装置

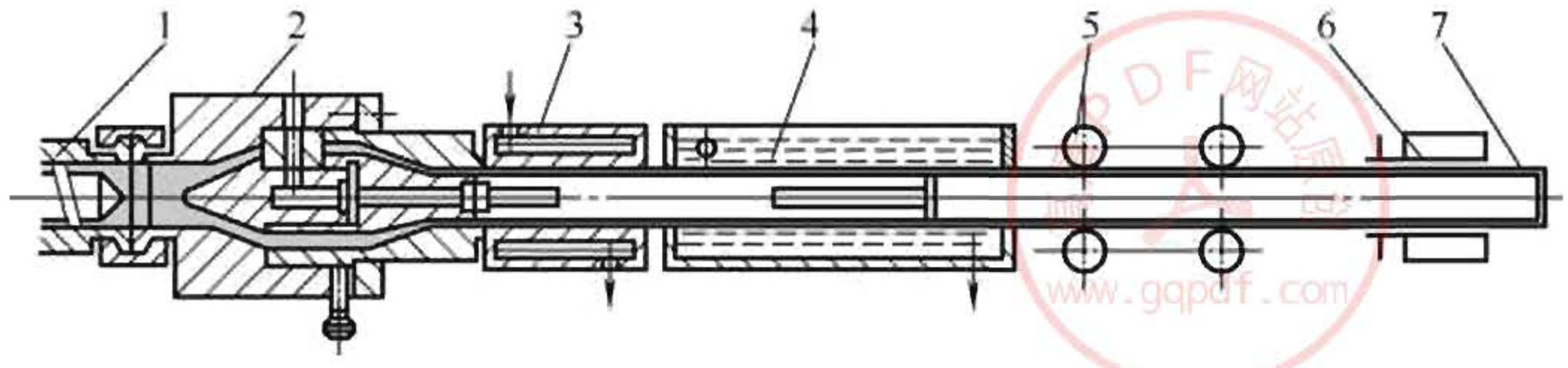


图 13-5　管状材料挤压成型示意图

1—挤出机料筒；2—机头；3—定型套；4—冷却装置；5—牵引装置；6—切割装置；7—管材

挤压成型的原理与注射成型相似，其主要区别在于挤压成型的形状由机头控制，而不是由模具控制，并且成型后要进行定型和快速冷却。

13.3.4　压延成型[11]

压延成型的方法最早主要应用于铁氧体类材料的制备，并且使用的铁氧体粉末为片状。片状铁氧体粉末在碾压过程中会自动定向排列起来，有助于提高材料的剩磁和磁能积。采用压延成型方法制备的材料为纸板样的膜片，使用时将膜片放在剪切机上剪切，剪切后的磁条经卷曲或冲压以适应不同应用场合的要求。

图 13-6 给出了压延成型的示意图。

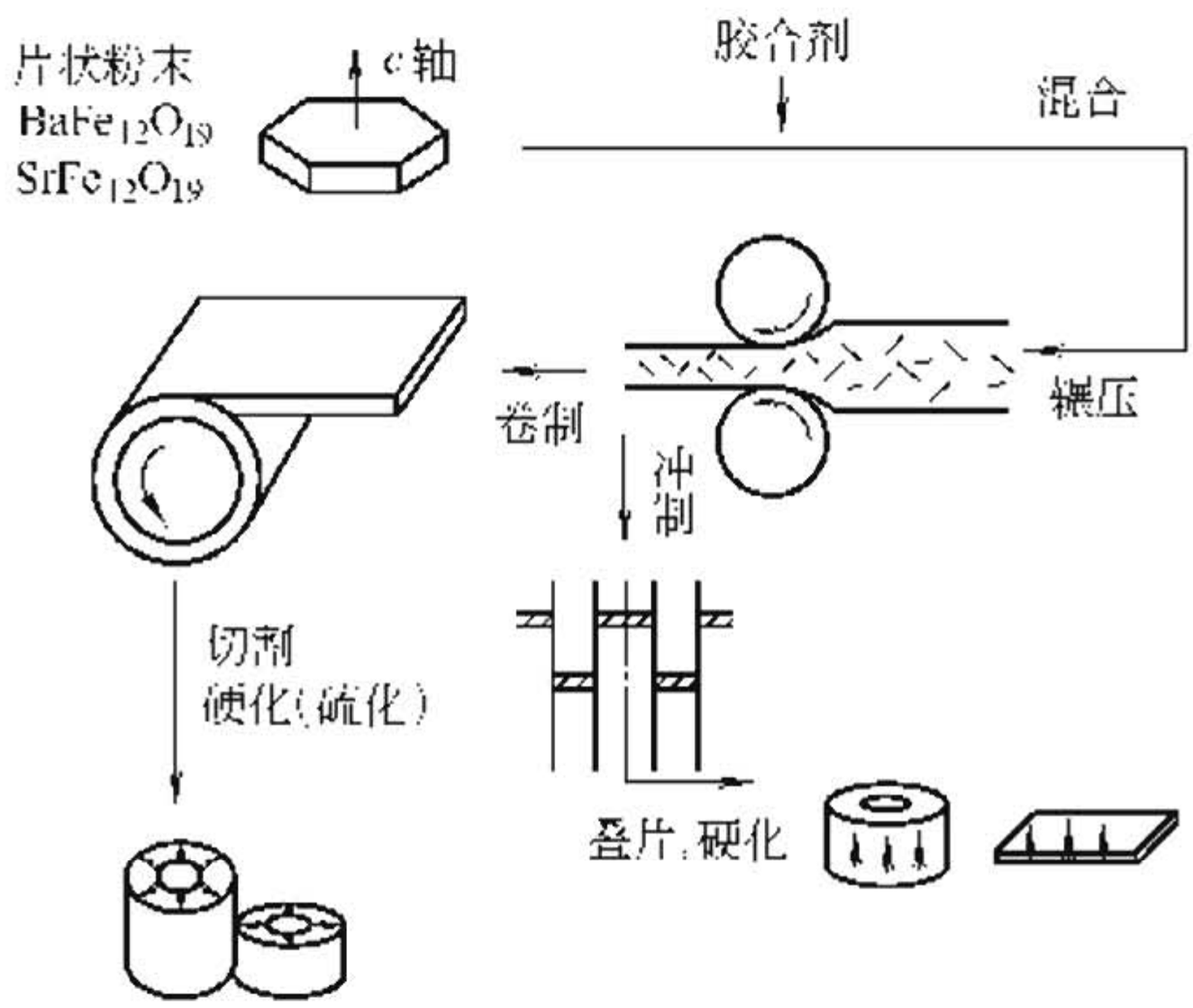


图 13-6　压延成型方法制备铁氧体类磁性复合材料的工艺示意图

13.4 几类主要的磁性复合材料及其应用

13.4.1 软磁复合材料

（1）软磁复合材料的性能及特点　广泛应用于交变场作用下的软磁材料，除要求具有高的饱和磁化强度、高的磁导率和低的矫顽力外，还要求具有低的交流损耗，因此要求软磁性片状材料的厚度薄而电阻率高，并尽量减小磁导率随频率提高而迅速下降的效应。这正是聚合物基软磁复合材料的特长。因为聚合物基复合材料容易压延成强度好的薄片；同时聚合物基体是电绝缘材料，与导电的无机磁性材料复合后能大大提高电阻率，电涡流损耗得以降低。

通常情况下，金属软磁材料的相对磁导率 μ_r 随驱动频率的增大而急剧下降[12]（见图 13-7），但将软磁材料制成复合材料，如 Fe-Si-Al 合金制成粉末，表面被极薄的 Al_2O_3 或高聚物分隔绝缘，然后热压或模压固化成块状软磁体，由图中 A、B、C、D 曲线看出，它的 μ_r 值在相当宽的驱动频率范围内不随交变场频率的升高而下降，保持在某一恒定值。这种复合磁性材料的 μ_r 值可由式（13-2）表示：

$$\mu_r=(\mu_c d)/(d+2\mu_c\delta) \tag{13-2}$$

式中 d、μ_c 和 δ 分别表示金属磁性粒子尺寸、块状金属相对磁导率和包覆层的厚度。选择合适的金属粒子尺寸和包覆层的厚度就

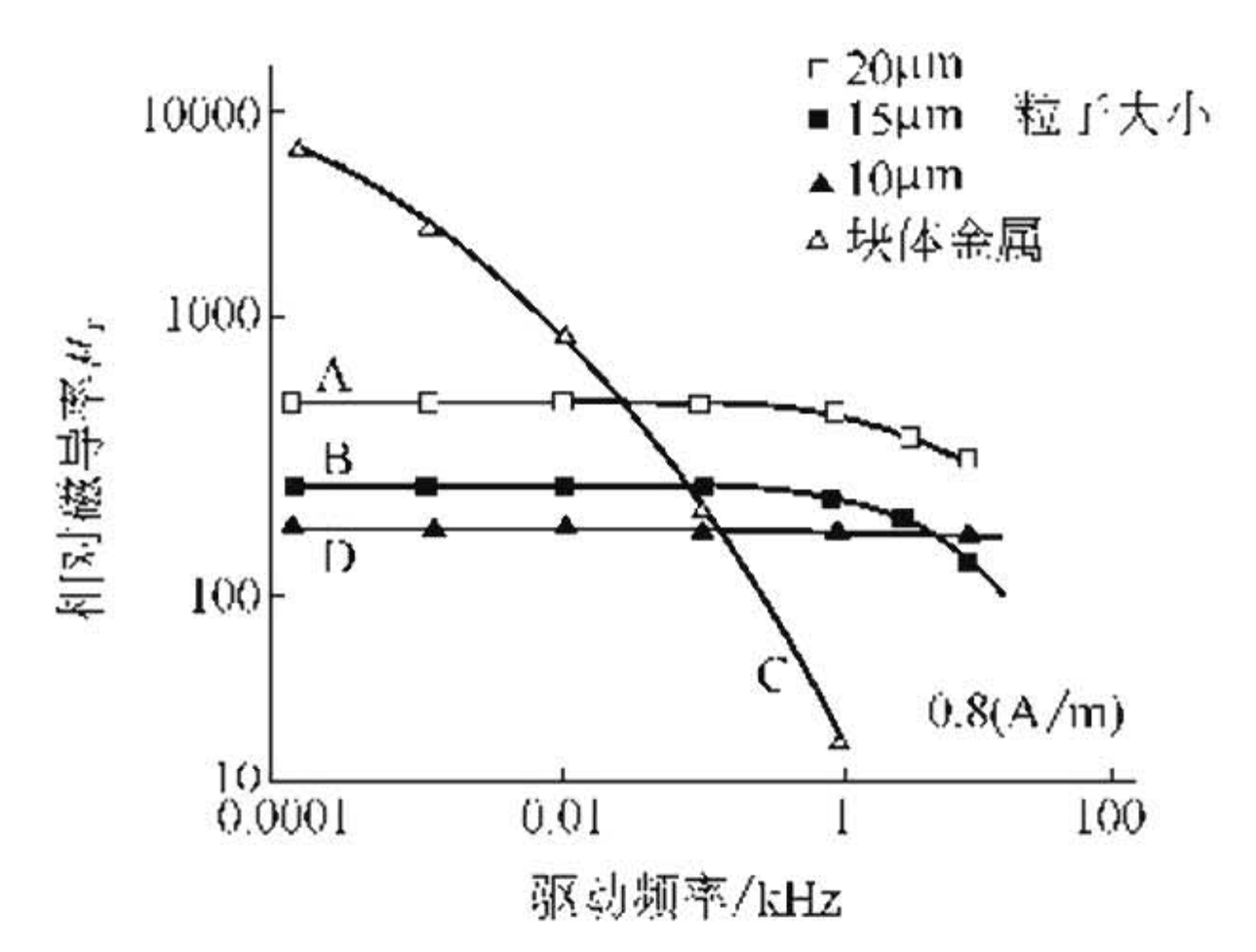


图 13-7　Fe-Si-Al 粉末颗粒复合体相对磁导率随驱动频率的变化

可获得所需的 μ_r 值，这对电感器和轭流圈的设计是十分重要的。

（2）应用　软磁复合材料的高电阻率和低涡流损耗的特点，使其广泛应用在通讯技术和电力技术中，如可用作无线电设备中的中频、回路、振荡及高放线圈等的调感磁芯，可用于滤波、谐振、耦合、补偿、延时电路等电感线圈磁芯，和制造低频（或共频）中小型变压器铁芯等。

13.4.2　永磁复合材料

（1）永磁复合材料的性能及特点　永磁复合材料主要指黏结永磁材料。在磁性能方面，复合永磁的磁性能一般均低于同类材料烧结体的磁性能，对于不同种类的磁性材料制成的复合磁性材料，稀土类磁性复合材料的磁性能优于烧结铁氧体。各类单功能组元黏结体的退磁曲线如图 13-8 所示[13]。

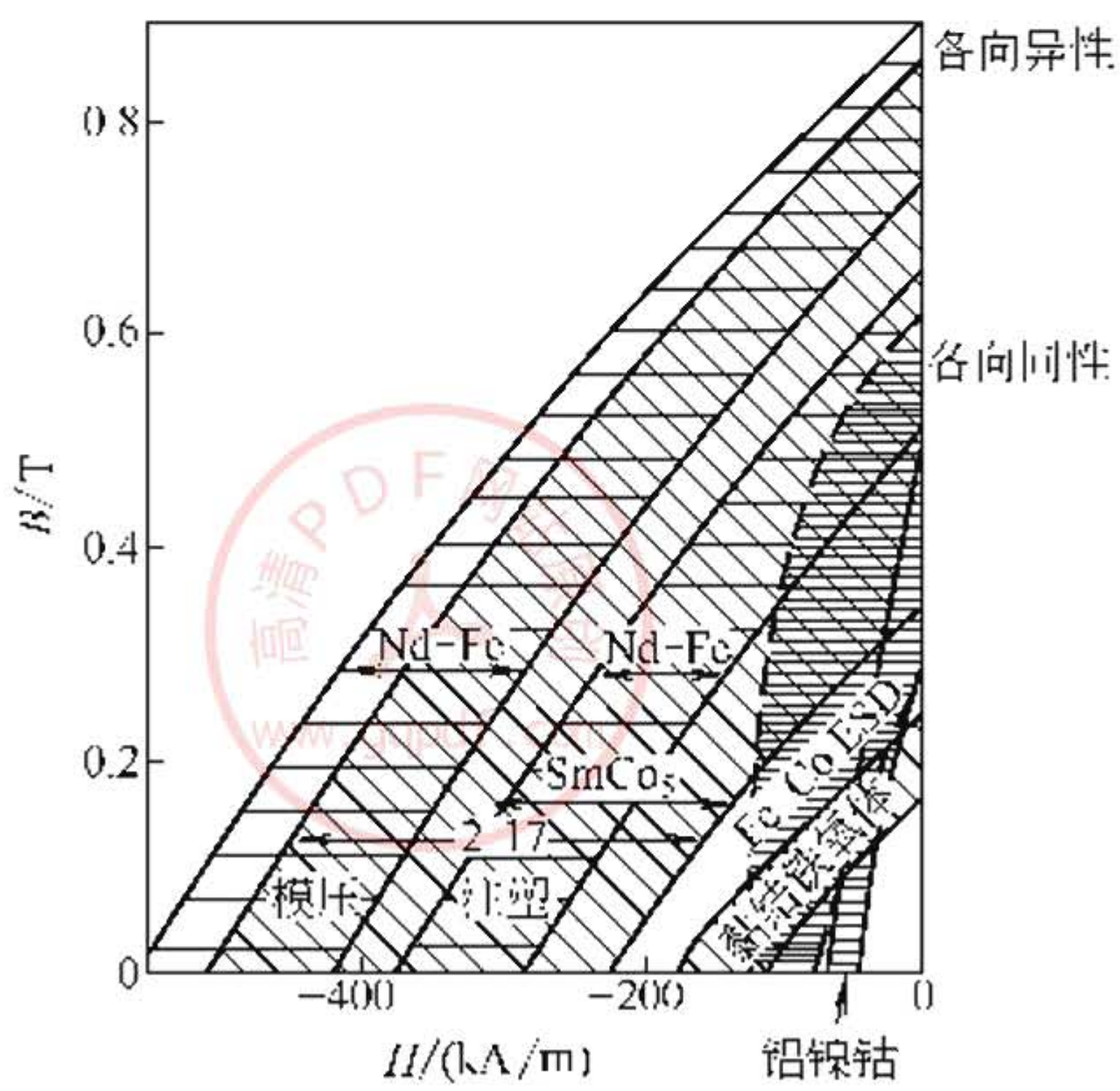


图 13-8　由单功能组元制成的黏结磁体的退磁曲线

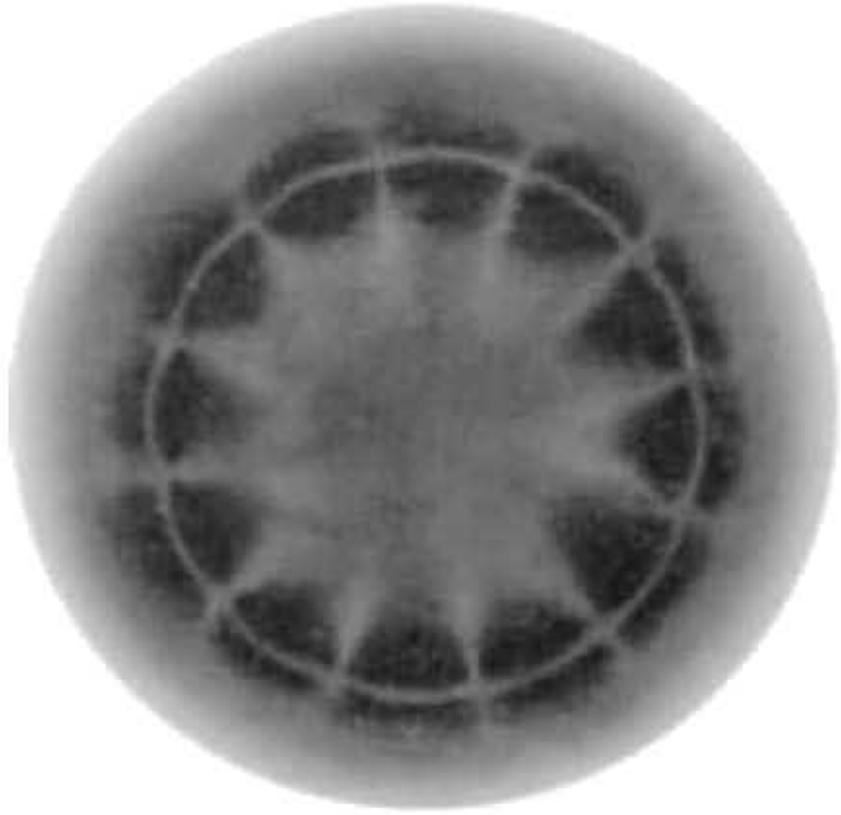
复合材料的剩余磁化强度 M_r 可表示为：

$$M_r \propto (M_s\beta)\left[\frac{\rho}{\rho_0}(1-\alpha)\right]^{2/3} \times f \tag{13-3}$$

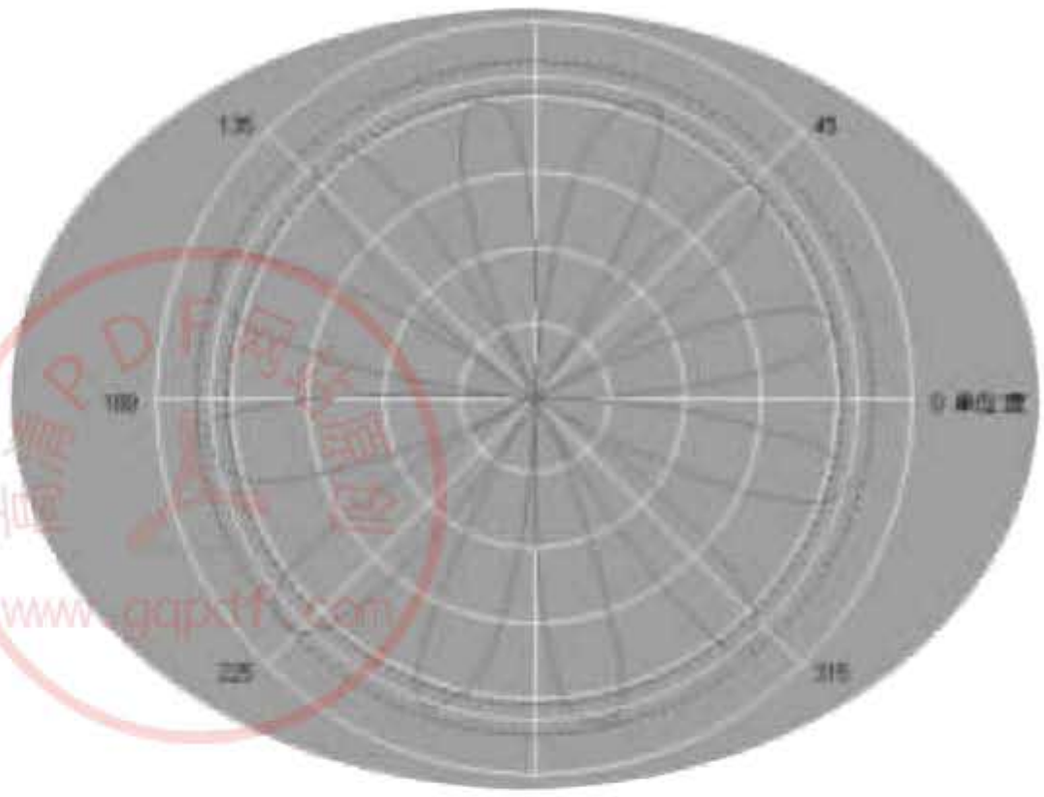
式中，M_s 为磁性组元的饱和磁化强度；ρ 为复合磁体的密度；ρ_0 为磁性组元的理论密度；α 为复合物中非磁性相的体积分数；f

为铁磁性相在外磁场方向的取向度。

复合永磁材料已被广泛地用来制作微特电机使用的薄壁磁环，此类磁环的磁极分布为均匀的辐射多极分布，如 8、12、16、24、36、54 极等。图 13-9 为 12 极充磁后磁环的磁极分布及磁极分布的极坐标图。



(a) 磁极分布



(b) 磁极分布的极坐标图

图 13-9　12 极充磁后磁环的磁极分布及磁极分布的极坐标图

（2）应用　永磁复合材料被广泛地用于制造各种微特电机、微波铁氧体器件、磁性开关、磁副轴承和电真空器件等，因此，应用遍及电子、电气、仪器仪表、通讯、汽车工业、办公自动化及日常生活的诸多领域。如计算机主轴电机，钟表的步进电机，各种门的密封条，显像管中的会聚组件，汽车中的分电器、里程表磁环和减振磁体，数字设备如 CD、DVD、数字摄像机和数字照相机等，在未来最具潜力的应用领域为电动汽车和自动导航系统。

参　考　文　献

1　G. 皮亚蒂编．复合材料进展．赵渠森，伍临尔译．北京：科学出版社，1984

2　马如璋等主编．功能材料学概论．北京：冶金工业出版社，1999

3　吴人洁主编．复合材料．天津：天津大学出版社，2000

4　周馨我主编．功能材料学．北京：北京理工大学出版社，2000

5　郭卫红等编著．现代功能材料及其应用．北京：化学工业出版社，2002

6　王会宗编著．磁性材料及其应用．北京：国防工业出版社，1989

7　周志刚等编著．铁氧体磁性材料．北京：科学出版社，1981

8 Mishima C, Hamada N, Mitarai H, Honkura Y. Magntic properties of NdFeB anisotropic magnet powder produced by the *d*-HDDR method. Proc. 16th Int. Workshop RE Magnets and their Applications, 2000, 873
9 电子元器件专业技术培训教材编写组．铁氧体工艺．北京：电子工业出版社，1984
10 翁其金主编．塑料模塑成型技术．北京：机械工业出版社，2000
11 宋后定等．永磁材料及其应用．北京：机械工业出版社，1984
12 Sugaya Y, Inoue O. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1995, 33 (3): 147
13 Strnat K J. *Proc. of the IEEE Tran. Magn*. 1990, 78 (6): 923

www.gqpdf.com