# 73．磁介质是什么？

应用最广泛的磁介质是铁磁介质，中学物理教学中不专门讲磁介质的问题，故本文不涉及更多的物理概念和名词，仅用最通俗的语言介绍有关磁介质的一些问题。

学生从小学课堂上就接触到磁体和磁性，磁性是指能吸引铁等物质的特性，学生知道通电螺线管有磁性，并且在中间插入铁芯，可以大大增加磁性。因此，他们已经接触了磁介质，但中学物理中不深入讨论磁介质的问题，主要是因为它涉及太多的物理概念和名词，与中学基础教育的目标不一致。本文也不想引入更多的物理概念和名词，仅用中学生容易理解的通俗语言，讨论一些有关磁介质的问题。

## 一、三种类型的磁介质

磁场是由电流产生的，为了使电流的磁场增强，常常插入铁芯，铁就是一种常用的磁性物质，简称磁介质。铁芯之所以能使得磁性大大增强，是因为铁芯在磁场中被磁化了，磁化后的铁芯也成为一个磁体，它的磁场与电流的磁场叠加在一起，使得磁性大大增强。

并不是所有物质都能使得磁性增强，根据物质在磁场中对磁性的影响，可以把磁介质分为三类：①顺磁介质，它们的存在可以使电流的磁场有所增强，但增强得很有限，例如金属锰和铝就是顺磁介质，它们能使原来的磁场增强的数量级大约是 10−5；②逆磁介质，它们昀存在可以使电流的磁场有所减弱，但减弱得也很有限，例如金属铜和银就是逆磁介质，它们能使原来的磁场减弱的数量级大约是 10−6，总之，这两种磁介质对原来电流的磁场影响很小，一般可以忽略；③铁磁介质，以金属铁为代表，其他如钴、镍以及某些稀土元素也属于铁磁介质，由于铁磁介质的存在，可以使原来电流的磁场增强很多倍（可以达到 102 ~ 106 倍），因此铁磁介质在磁场中的作用非常大。

磁体能吸引铁钉和铁屑，原因就是铁钉和铁屑在磁体近旁会被磁化，磁化后它们也成为磁体，并且与原来的磁体相互吸引，吸引力常常大于它们本身的重力，因此能被吸引起来。如果把磁体靠近顺磁性物质，例如铝箔，也会有一定的相互吸引力，但这个吸引力与铝箔的重力相比太小了，根本不可能用肉眼观察到。如果用磁体靠近逆磁性介质，例如铜丝，它们之间不会产生相互吸引的力，反而会产生相互排斥的力，只是这个排斥力比起它的重力来，也是太小了，完全可以忽略。

## 二、铁磁介质的磁滞回线

没有磁性的铁磁物质，一般是用电流使它磁化的，为了测量充磁电流与铁磁物质磁化后的磁感应强度的关系，可以采用如图 1 所示的装置：把待测的磁性材料制成闭合圆环状，在上面均匀地绕满导线（设共有 *n* 匝），给线圈通以电流 *I*0，此电流称为充磁电流，电流产生的磁场的磁感线都集中在铁芯中形成闭合曲线，铁芯外面没有磁感线（理想情况）。可以想象，如果没有铁芯，而是真空，那么其中心磁场的磁感应强度 *B*0 会比较小，而有了铁芯后，其内部磁场的磁感应强度 *B* 将比 *B*0 大很多。

接冲击电流计

*I*0

图 1 研究铁磁物质磁化规律的装置

在闭合铁芯上还绕了一个匝数较少的次级线圈，它与冲击电流计连接。冲击电流计是在普通磁电式灵敏电流计的基础上加以改进而成的，它的线圈扁而宽，转动惯量大，因此它的自由振荡周期 *T*0 比普通灵敏电流计要长，普通灵敏电流计的 *T*0 为 3 ~ 5 s，而冲击电流计的 *T*0 为 20 s 左右。

如果使冲击电流计通过一个持续时间 Δ*t* 很短的脉冲电流，它的线圈将受到安培力的作用而产生一个冲量矩，使得线圈（连同指针等）获得一个角动量，即有了一定的角速度，但由于该电流持续的时间很短，指针的角位移很小，可以忽略，当线圈中的脉冲电流停止后，指针将继续转动一段，而后才在阻尼的作用下到达最大位移。它第一次到达最大位移时的偏转角度与通过线圈的电荷量成正比。

设某时刻图 1 中铁芯内的磁感应强度大小为 *B*，铁芯截面积为 *S*，则穿过每匝次级线圈的磁通量为 *Φ* = *BS*。当充磁电流 *I*0 突然反向时，穿过次级线圈内的磁通量变化量为 2*Φ* = 2*BS*，次级线圈会产生感应电动势，设所用的时间为 Δ*t*，则平均感应电动势  = ，平均感应电流 = ，式中 *R* 为电阻，则这段时间内通过电路某截面的电荷量 *q* = Δ*t* = 。只要能测量出流过的电荷量 *q*，就可以间接地测量出穿过铁芯的磁感应强度 *B* 的大小。

使充磁电流 *I*0 由 0 逐渐增加，测量多次 *I*0 及相应 *B* 的值，直到 *I*0 增加而 *B* 不再变化时，铁芯的磁化已达到饱和，这时的 *I*0 = *I*m，称为饱和充磁电流。这个过程中的 *B*–*nI*0 图线如图 2 所示，开始阶段 *B* 随 *I*0 的增大变化比较快，而后逐渐变慢，最后成为一条水平线。显然，这条反映铁芯内磁感应强度从 0 开始随充磁电流变化的关系图线是一条复杂的非线性曲线。

*B*

*nI*0

*O*

*nI*m

图 2 起始磁化阶段 *B*–*nI*0 关系曲线

如果充磁电流从 *I*m 逐渐减小，*B* 并不沿原路返回，而是沿另一条曲线变化，如图 3 所示，当 *I*0 从 *I*m 逐渐减小到 0 时，磁感应强度 *B* 沿曲线 SR 变化，充磁电流虽然减小到 0，但磁感应强度 *B* 并没有减为 0，仍然保留有一定的磁性，称为铁芯的剩余磁感应强度。要想让已经被磁化的铁芯磁性完全消失，必须通一个反向电流，如图 3 中 C 点所示，这可以称作“矫枉过正”吧。反向电流从图中的 C 点再继续增大，磁感应强度 *B* 将沿着图中的 CSʹ 段变化。从 Sʹ 点开始，反向电流逐渐减小，减为 0 后变为正向电流，磁感应强度 *B* 则沿着 SRʹCʹS 的路径变化，最终形成一条闭合曲线，称为磁滞回线。

*B*

*nI*0

*O*

*nI*m

S

R

C

Sʹ

Rʹ

Cʹ

图 3 铁磁介质的磁滞回线

磁滞回线所围面积的大小反映了磁滞损耗的大小。根据安培的磁性起源假说，构成磁性物质的基本单元（姑且称为磁分子）都是一个环形电流，它就是一个小磁体，未被磁化前，这些磁分子的取向是杂乱无章的，因此整体上看，没有磁性。在电流磁场的影响下，这些磁分子的取问趋于一定规律，这就是磁化的过程。如果电流是交变的，那么铁芯内部的磁分子就要反复颠倒方向，从而产生内摩擦而消耗电能转化为内能，磁滞回线所围的面积越大，磁滞损耗越大；反之，磁滞回线所围面积越小，磁滞损耗就越小。

## 三、硬磁材料和软磁材料

图 4 也是铁磁材料的磁滞回线，它与图 3 相比较，图 3 的磁滞回线宽而粗，所围面积较大，图 4 则细而长，所围面积较小。图 3 中的铁磁材料要完全消除磁性，需要的反向电流较大，即消除磁性较为困难，图 4 中的铁磁材料要完全消除磁性，需要的反向电流较小，即消除磁性较为容易。图 3 中的铁磁材料称为硬磁材料，图 4 中的铁磁材料称为软磁材料。

硬磁材料适合制作永磁体，用电流充磁后，离开电流的磁场仍能保留较大的磁性，并且不容易消磁，以前的永磁体多用碳钢制作，现在有了性能更好的硬磁材料，例如钕铁硼合金，用它制作的强磁体，比用碳钢制作的磁性要强上百倍，甚至更多。

软磁材料适合应用在交变电流的场合，用来作为线圈的铁芯，以增加磁性，又可分为两类：一类是用于各种电子电信设备中，通过的电流很小（弱电流），铁芯的工作状态符合起始的一段磁化曲线，铁芯材料应选用如图 4（a）那样磁滞回线比较“陡”的类型；另一类是电力设备，如变压器、发电机、电动机等设备中的铁芯，它们工作时电流较大（强电流），铁芯工作状态接近磁饱和状态，要求制作铁芯的材料饱和充磁电流要大，适合选用如图 4（b）那样磁滞回线较为倾斜的类型。

*B*

*nI*0

*O*

（a）

图 4 软磁材质的磁滞回线

*B*

*nI*0

*O*

（b）

铁芯造成的能量损耗是普遍现象，损耗分为涡流损耗和磁滞损耗两种，它们都是有害的，不但造成能量的利用率降低，而且工作过程中产生过多的热量，会使器件的温度升高，而温度的升高还会使得导线外层绝缘性能下降，甚至烧毁器件，极端地还能引起火灾。为了减小铁芯造成的能量损耗，制作铁芯的材料应该电阻率大，非金属磁性材料的电阻率比金属材料的电阻率大得多，例如铁氧体，它是由铁和一种或多种其他金属组成的复合氧化物，是图 4（a）类软磁材料的代表，在高频和微波段弱电流器件中，铁氧体是不可或缺的材料。而在发电机、变压器等强电流设备中，主要使用饱和充磁电流较大的金属材料（硅钢）制作铁芯，它的磁滞损耗较小，但涡流损耗较大，因此要把硅钢制成薄片，各片间涂上绝缘漆再叠起来。