

磁粉和渗透探伤技术

上海沪东造船厂中心试验室 编

国防工业出版社

磁粉和渗透探伤技术

上海沪东造船厂中心试验室 编

国防工业出版社

内 容 提 要

本书较详细地介绍了磁粉探伤和渗透探伤的物理基础、探伤方法、探伤设备和材料，并扼要介绍了这两种探伤方法的适用范围和应用实例。

本书可供从事磁粉探伤和渗透探伤工作的工人、技术人员参考。

磁粉和渗透探伤技术

上海沪东造船厂中心试验室 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $9^{5/8}$ 243千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷 印数：0,001—3,500册

统一书号：15034·2353 定价：1.20元

前 言

随着工业的发展和保证产品质量的需要，无损探伤技术已日益被各工业部门广泛重视和应用。本书所介绍的磁粉探伤法和渗透探伤法是无损探伤技术中的二项重要方法，在机械制造、冶金、航空、化工、造船和交通运输等部门的产品质量检验中应用较广。

磁粉探伤应用电和磁的基本原理，可有效地发现铁磁性材料制件(如钢、铁制件)的表面或近表面缺陷，且对裂缝类危险缺陷特别敏感。

渗透探伤应用液体的毛细管渗透原理，可有效地发现零件表面的开口性缺陷，常用于非磁性金属材料制件和非金属材料制件的表面检查。

我们根据实际生产中的体会和经验，编写了《磁粉和渗透探伤技术》一书，供从事磁粉和渗透探伤方面工作的工人、技术人员参考。

本书在编写过程中曾得到有关单位的大力支持和协助，特别是六二一所郑文仪、李家伟两同志对本书进行了全面的审阅，在此，表示衷心的感谢。

本书主要由庄文忠、孙桂儿两同志编写。

编 者

目 录

第一篇 磁粉探伤

第一章 磁粉探伤物理基础	1
第一节 电流和磁场	1
一、磁场	1
二、磁场的几个物理量	3
三、铁磁性材料的磁性能	16
四、磁畴	22
五、钢的磁性	25
第二节 几种通电导体的磁场	27
一、通电长圆柱直导体内外的磁场	27
二、通电中空长圆柱直导体内部的磁场	29
三、通电长螺线管内的磁场	31
四、通电环形螺线管内的磁场	33
五、磁感应强度、剩余磁感应强度的测量和磁化曲线的制作	34
第三节 磁粉探伤法的基本原理	39
一、漏磁通	39
二、零件表面缺陷的漏磁通	41
三、零件近表面缺陷的漏磁通	42
四、零件上缺陷处漏磁通的影响因素	44
第二章 磁粉探伤方法	49
第一节 零件的磁化方法	49
一、周向磁化法	49
二、纵向磁化法	54
三、复合磁化法	61
第二节 零件的磁粉检验和缺陷显示	64
一、磁粉检验的方法和特点	64
二、磁粉探伤中缺陷显示的方法	69
第三节 磁化电流	72
一、磁化电流的种类和特点	72
二、磁化电流值的确定	78

第四节 磁粉痕迹的分析	83
一、常见缺陷磁粉痕迹的特征	83
二、非缺陷性质的磁痕分析	85
三、杂乱显示的消除	89
第五节 退磁	89
一、退磁原理	90
二、退磁方法	94
三、剩余磁性测量	97
第六节 影响磁粉探伤灵敏度的主要因素	97
一、零件表面状态的影响	97
二、磁场强度的影响	99
三、磁化电流种类和磁化电流方向的影响	101
四、检验方法和缺陷显示方法的影响	101
五、磁粉和磁悬液性能的影响	103
六、缺陷形状和分布位置的影响	105
第七节 磁粉探伤所能发现缺陷的限值	107
一、发现表面缺陷的限值	107
二、发现近表面缺陷的限值	107
第三章 磁粉探伤设备和材料	108
第一节 磁粉探伤机的装置及其功能	108
一、磁化装置	108
二、磁粉探伤机的附属装置	121
第二节 磁粉探伤设备的种类、特点和使用方法	126
一、磁粉探伤设备的种类	126
二、磁粉探伤机的特点	131
三、磁粉探伤机的使用方法	133
第三节 磁粉探伤设备的维修	136
一、电压调节器的常见故障	136
二、周向磁化继电器的故障	137
三、纵向磁化回路中整流元件的故障	137
四、直流退磁回路时间继电器的故障	138
五、其它故障	138
第四节 自制移动式简易磁粉探伤机的设计方法	139
一、交流磁粉探伤机电力变压器的计算方法	140
二、单相半波直流磁粉探伤机电力变压器的计算方法	142
第五节 简易手提式磁粉探伤器的制作方法	147
一、简易U型手提式交流磁粉探伤器的制作方法	147
二、手提磁钢型磁粉探伤器的制作方法	150
第六节 磁粉探伤的材料和灵敏度试验片	153

一、磁粉	153
二、磁悬液	157
三、灵敏度试验片	160
第四章 磁粉探伤实例	165
第一节 小型机械零件的探伤	165
第二节 焊缝的磁粉探伤	167
第三节 大型铸锻件的磁粉探伤	167
第四节 盲孔及螺纹内孔类零件的探伤	168

第二篇 渗透探伤

第五章 渗透探伤的原理和物理基础	171
第一节 渗透探伤的原理和特点	171
一、渗透探伤的原理	171
二、渗透探伤的特点	172
三、渗透探伤法的种类和应用范围	173
第二节 渗透探伤液体的分子物理现象	173
一、渗过程	174
二、除液清洗(洗涤)过程	191
三、显象过程	199
四、溶液的溶解度	200
五、渗透探伤的着色强度和荧光强度	202
第三节 荧光物质的发光现象	203
第六章 渗透探伤方法	207
第一节 渗透探伤法概述	207
第二节 渗透探伤的操作方法	208
一、零件探伤前的表面预处理	209
二、渗透处理	210
三、乳化处理	214
四、洗涤处理	217
五、显象处理	218
六、干燥处理	222
七、观察	222
八、特殊用途的渗透探伤	226
九、各类渗透探伤法操作步骤简述	227
第三节 影响渗透探伤灵敏度的因素	228
一、渗透液渗透性能的影响	228

二、渗透液临界厚度的影响及其测定	234
三、显像液和显像方式的影响	238
四、温度、压力和振动的影响	240
五、缺陷宽深比的影响	241
第四节 渗透探伤的灵敏度试验及试验片	242
一、渗透性能的试验方法	242
二、渗透探伤灵敏度试片	245
三、渗透液特性测试仪	248
第七章 渗透探伤设备及材料	251
第一节 渗透探伤设备	251
一、渗透探伤设备的分类和组成	251
二、紫外线光源	257
第二节 渗透探伤液	259
一、渗透液	259
二、洗涤材料	272
三、显像剂(液)	280
四、发展中的新型渗透探伤液	283
第三节 探伤液配方的选用原则及其毒性分析	285
一、探伤液的选用原则	285
二、一些化学试剂的毒性及其防护	286
第四节 渗透探伤材料的检查与保管	289
一、渗透探伤液的检查	289
二、渗透探伤液的保管	294
第八章 渗透探伤实例	295
第一节 气阀、叶片的后乳化着色探伤	295
第二节 焊缝表面溶剂清洗型着色探伤	297
第三节 铝合金导风轮的自乳化型荧光渗透探伤	298

第一篇 磁粉探伤

第一章 磁粉探伤物理基础

第一节 电流和磁场

“电和磁象热和光一样是一对双生子”，它们之间有着密切的内在联系。近代的科学研究进一步表明：磁铁的磁性起源于物质内部的分子、原子中电子的运动，一切磁现象都是由运动电荷产生的。电和磁是电荷运动过程的两种表现形式；电离不开磁，磁离不开电。

一、磁 场

进行磁粉探伤的必要条件是在被检验的物体内部建立一个磁场。

磁场和电场一样，是一种特殊物质组成的，它可以和空气、纸、木板、玻璃等其它物质共存于同一空间。因此磁体（磁铁）间即使存在其它物质，而它们之间的相互作用（即磁场的作用）依然存在，只是该作用的大小发生变化罢了。

磁场又是一个肉眼观察不到的物理场。人们认识到磁场的存在并进而认识其特性，是因为人们在长期的实践中，了解到一系列的磁现象，并进一步掌握了这些磁现象的形成规律和描述磁场性质的手段。例如：早在二千多年前，我国劳动人民就发现了磁石吸铁的特性；在东汉初年又有“磁勺柄指南”的文字记载；到了公元十一世纪，（宋代）开始创造并使用了航海指南针——罗盘。随着认识的深化和科学技术的发展，人们发现，不仅磁铁的

周围存在着磁场，电流的周围也存在着磁场。到了近代，电流和磁场的许多特性已被广泛应用于工业、农业、科学研究的很多领域。我们所要介绍的磁粉探伤，仅仅是这些应用中的一个很小的方面。

磁场存在于磁体、通电导体的周围。磁体间的相互排斥或吸引(同性的磁极相斥，异性的磁极相吸)，是由于这种磁场的相互作用。所谓磁体就是能够吸引其它铁磁性材料的物体，如天然磁石(Fe_3O_4)、永久磁铁等。通常将磁体的这种吸引铁磁性材料的性质，称为磁性。地球也是一个大磁体，存在于地球周围的磁场叫做地磁场。习惯上将磁针(磁铁)指北的磁极叫做“北极”，用字母 N 表示；指南的磁极叫做“南极”，用字母 S 表示。地球地磁的南极在地理北极附近，地磁的北极在地理南极附近。磁针的南(北)极所以能指南(北)，就是由于受到地磁北(南)极吸引的缘故(如图1-1)。

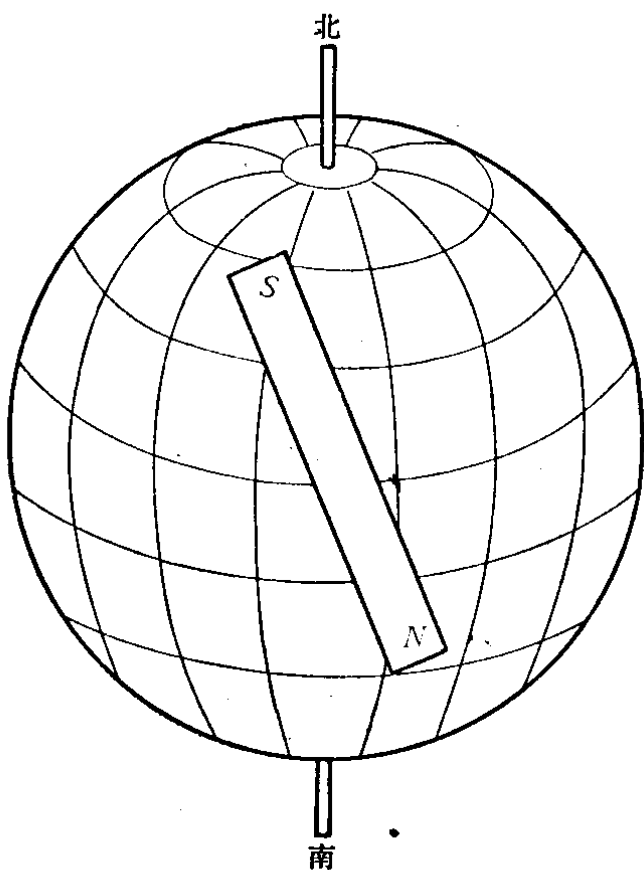


图1-1 地球的磁场

由图1-2可以看出，磁体吸引铁屑最多的地方是在它的两端附近，也就是它的两极，这两个极叫磁极。磁极区域表现的磁性最强。

任何磁体(磁铁)的磁极总是成对出现，即有 N 极，必有 S 极；有 S 极，必有 N 极，单一磁极的磁体是不存在的。一个被粉碎的磁体，它其中的任一碎块必然具有 N 极和 S 极(如图1-3)。

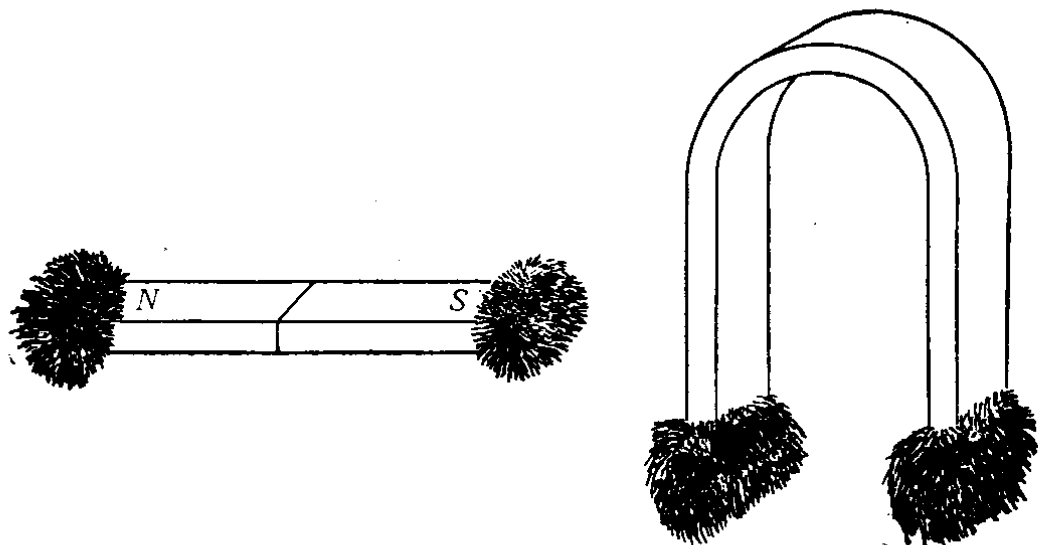


图1-2 磁体对铁屑的吸引

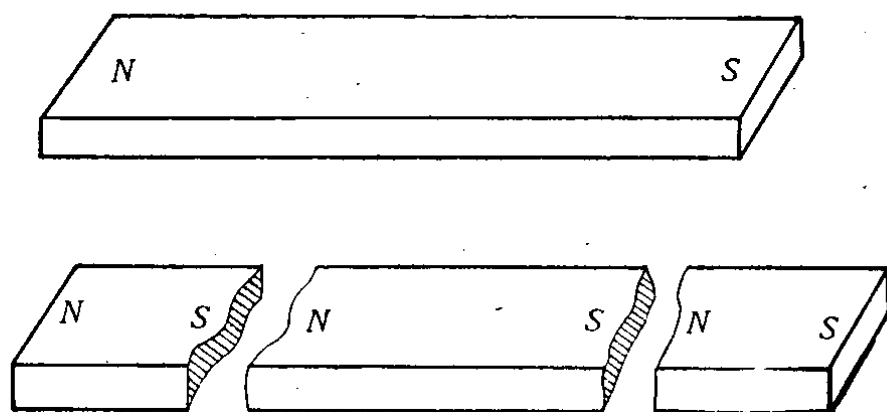


图1-3 磁体及其粉碎后的磁极

二、磁场的几个物理量

磁场不仅具有方向性，而且磁场中各点的强弱也是不同的。在磁铁的两极磁性最强，离磁极越远磁性越弱。下面介绍几个描述磁场强弱和方向及有关的物理量的定律。

1. 磁力线

在电学中，人们曾引进电力线来描述电场中各点电场强度的方向和大小。同样，我们也可以用假想的磁力线来反映磁场中各点的磁感应强度，即用磁力线上某点的切线方向表示该点磁感应强度的方向；用磁力线的疏密程度表示所在点磁感应强度的大小。

为此，我们可先做这样一个实验，形象地观察一下磁场中磁力线的大致情况：取一块玻璃板，平放在一条形磁铁上，在玻璃板上均匀地撒一些细铁屑，轻敲玻璃板，就可看到铁屑有规则的排列。这是因为铁屑在磁铁的磁场中都被磁化，每一粒磁化了的铁屑都可看成是一只“小磁针”，它们在磁力的作用下都有一定的取向。这些“小磁针”的 N 极的指向就是磁场的方向。我们顺着铁屑排列的方向，即可画出一系列的闭合曲线（如图1-4）。

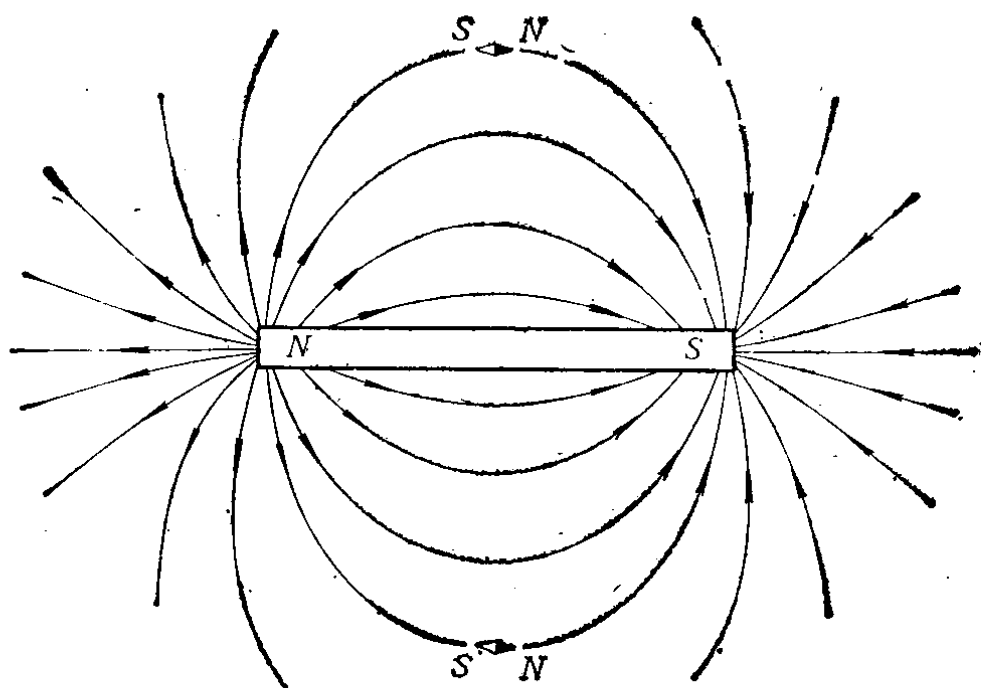
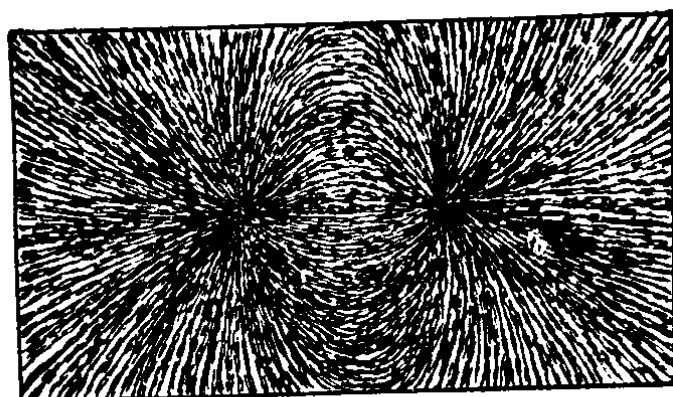


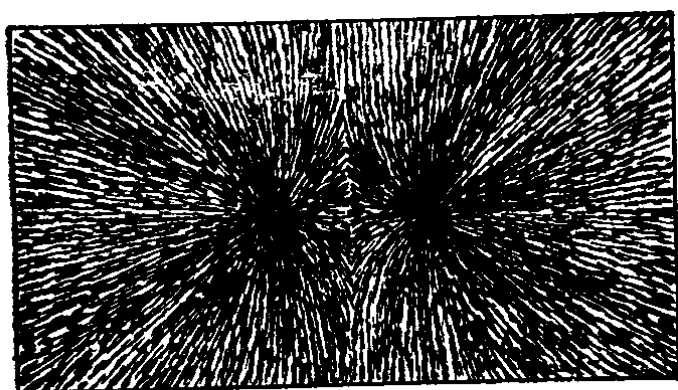
图1-4 磁体的磁力线及其方向

如果这些曲线上每一点的切线方向和该点的磁场（磁感应强度）方向一致，那么这些曲线就叫做磁力线。图1-5表示用这种方法得到的两异性磁极和两同性磁极间磁场的磁力线分布情况。当然，我们还可以用更简便的方法了解磁场中某点的磁感应强度的方向。如用一小磁针直接置于该点，当小磁针在磁场力作用下停止偏转后，它的 N 极的指向，就是该点磁感应强度的方向，简称这一点的磁场方向。

应该指出，磁场中的磁力线与电场中的电力线，是有区别的。例如，电力线是起于正电荷而终于负电荷，是有头有尾的曲



(a)



(b)

图1-5 两异性和两同性磁极间的磁场
a—异性磁极；b—同性磁极。

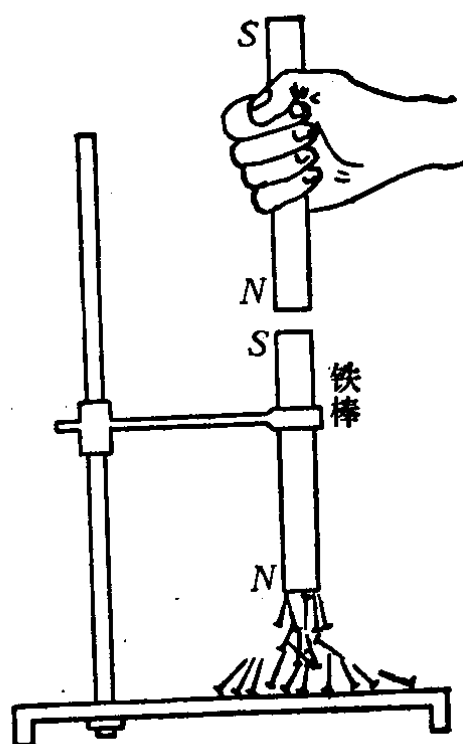


图1-6 磁铁使铁棒磁化并吸引大头针

线；而磁力线则是无头无尾、永远连续的闭合曲线，诸磁力线互相不切割，互相不合并。在磁铁外，磁力线由 N 极出发，进入 S 极；在磁铁中由 S 极指向 N 极，成为闭合状态。又如，在电力线的末端确实存在着电荷，是电量集中的地方；而在磁力线上并不存在什么“磁荷”，也不能把磁极看作是“磁量”集中的地方。

2. 磁感应强度和磁化强度

磁粉探伤时必须将被检验零件(铁磁性材料)置于磁场中进行磁化。所谓磁化就是在外磁场的磁感应作用下，使原来没有磁性的铁磁性物质内部感生出磁场的物理过程，这种铁磁物质内部感生出来的磁场的强度就叫做磁感应强度，用字母 B 表示。图1-6所示的铁棒，原先没有磁性，对大头针没有吸引力，如果在靠近铁棒上端放一条形磁铁，那么大头针就会被铁棒所吸引。这说明铁棒在磁铁磁场的磁感应作用下被磁化，并且具有一定的磁感应强度。

显然，铁磁物质在外磁场作用下被磁化后，其内部感生出来的磁感应强度 B ，是一个与外磁场的强度和铁磁物质性能有关的物理量；它们之间的关系式如下：

$$B = \mu H \quad (1-1)$$

式中 μ ——铁磁物质的磁导率；

H ——外磁场强度。

在电磁系单位中：如果 B 的单位是“高斯”， H 的单位是“奥斯特”，则磁导率 μ 的单位是“高斯/奥斯特”。

在实用制单位中：如果 B 的单位是“韦伯/米²”， H 的单位是“安培/米”，则磁导率 μ 的单位是“韦伯/安培米”。

它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 韦伯/米}^2 = 10^4 \text{ 高斯}$$

$$1 \text{ 安培/米} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ 奥斯特}$$

在实际应用中， H 由激磁电流强度决定， B 可用实验方式测定，这样就可画出 B 随 H 变化的曲线，这一曲线叫做磁化曲线。

一般磁铁和通电导体产生的磁场对铁磁物质都有磁化作用，都会使铁磁物质内部感生出磁场，这个磁场也叫做附加磁场。

例如，通电螺线管中插入铁芯，由于铁芯被螺线管磁场所磁化，铁芯内部就产生了附加磁场，这时螺线管内的磁感应强度 B 应等于原来电流所激发的磁感应强度 B_0 和铁芯磁化后产生的附加磁感应强度 B_i 之和，即

$$B = B_0 + B_i \quad (1-2)$$

从这里明显地可以看到：一方面电流通过它周围的磁场对其他物质具有磁化作用，另一方面磁场中的其他物质也在不同程度上影响着电流所激发的磁场。铁磁物质就是能够显著影响磁场的物质。通常把能够影响磁场的物质统称为磁介质。显然，铁磁物质也是一种磁介质。

由于 B_0 是螺线管中无磁介质时电流所激发的外磁场强度，即 H 。而附加磁感应强度可用 $B_i = 4\pi J$ 来表示，则上述 (1-2) 式

也可写成

$$B = H + 4\pi J \quad (1-3)$$

或

$$\frac{B}{H} = 1 + 4\pi \frac{J}{H}$$

定义

$$\chi_m = \frac{J}{H}$$

χ_m 就叫做磁介质的磁化率,是一个与介质性质有关的纯数。式中 J 就叫做磁化强度,是一个表征物质在磁场中被磁化程度的矢量性物理量。它的物理意义是物质单位体积元 (dV) 内分子电流所具有的分子磁矩 (P_m) 的总和 (ΣP_m),

即

$$J = \frac{\Sigma P_m}{dV} \quad (1-4)$$

3. 磁通量和磁通密度

磁通量简称磁通,用字母 Φ 表示。它是磁场中垂直通过某一截面上的磁力线条数 (如图 1-7)。

我们知道磁场中某处磁力线的疏密程度反映了该处磁场的强弱和磁感应强度的大小,磁学中通常用磁通密度 (即单位面积上的磁通量) 来表示磁力线的疏密程度,并用此来衡量磁感应强度的大小。

在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,若与磁力线垂直的截面用 S 表示,则可得

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-5)$$

或写成

$$\Phi = BS$$

在电磁系单位中,如果 B 的单位是“高斯”、 S 的单位是“厘米²”,那么 Φ 的单位就是“麦克斯韦”。

在实用制单位中,如果 B 的单位是“韦伯/米²”, S 的单位

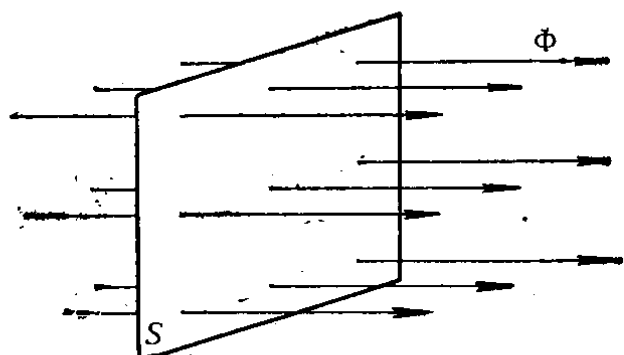


图1-7 垂直通过截面上的磁力线

是“米²”，那么 Φ 的单位就是“韦伯”。它们之间的换算关系是：

$$1 \text{ 韦伯} = 10^8 \text{ 麦克斯韦}$$

$$1 \text{ 米}^2 = 10^4 \text{ 厘米}^2$$

$$1 \text{ 高斯} = 1 \text{ 麦克斯韦/厘米}^2$$

$B = 1$ 高斯的物理意义就是：被外磁场磁化的磁介质中 1 平方厘米的截面上有 1 根磁力线垂直通过。可见磁介质中 1 平方厘米截面上垂直通过的磁力线越多，则 B 就越大。

在实际使用中，磁感应强度 B 的大小可以用高斯计直接测定，一般永久磁铁附近的磁场 B 约为 2000~7000 高斯；变压器铁芯中磁场可高达 9000~17000 高斯；而地球磁场的 B 值，仅为 0.5 高斯左右。

上述讨论中，我们所取的截面 S 是与磁力线垂直的。如果截面 S 与磁力线不垂直，即平面 S 的法线 n 与磁力线的夹角为 φ （如图 1-8），则 S 在与磁力线垂直方向上的投影面积为：

$$S_0 = S \cos \phi$$

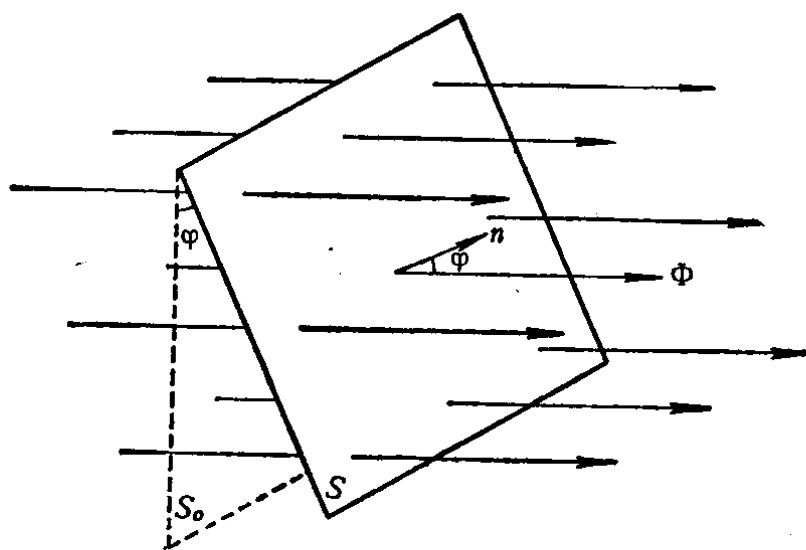


图1-8 磁力线通过与其不垂直的截面

由图可知，穿过 S 面的磁力线条数与在它的投影面 S_0 上穿过的磁力线条数是一致的，因此通过 S 面的磁通量为：

$$\Phi = BS_0 = BS \cos \phi \quad (1-6)$$

对于非匀强磁场，在给定的 S 截面上各点的 B 是个变量，这

时可用微积分学知识来计算通过 S 面的磁通量。

4. 磁导率

由公式 (1-1) 可知, 磁介质的磁导率 μ 等于介质的磁感应强度 B 与外磁场强度 H 的比值, 即 $\mu = \frac{B}{H}$ 。

磁导率直接反映了磁介质的磁化性质以及对磁场影响的大小。 μ 的单位如前所述, 在电磁系单位中, μ 的单位是“高斯/奥斯特”, 它在真空中的磁导率规定为 1, 即 1 奥斯特就是真空中磁感应强度为 1 高斯处的磁场强度。它的实用制单位是“韦伯/安培米”, 在这种单位制中, 规定真空中的磁导率是个常量, 用字母 μ_0 表示。

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 韦伯/安培米}$$

并且将磁导率与真空磁导率的比值 $\frac{\mu}{\mu_0}$ 叫做相对磁导率, 用字母 μ_r 表示。由于 μ 与 μ_0 是相同的单位, 所以相对磁导率 μ_r 是一个无单位 and 无量纲的纯数, 其量值与电磁系单位中的磁导率 μ 的量值相同。它的物理意义就是电流在均匀的磁介质中所激发的磁场的磁感应强度 ($B = \mu H$) 和在真空中所激发的磁场的磁感应强度 ($B_0 = \mu_0 H$) 之比。

$$\text{即} \quad \mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{\mu H}{\mu_0 H} = \frac{\mu}{\mu_0}$$

磁导率 μ (或 μ_r) 是与物质的原子和分子磁化有关的量, 它和 μ_0 在物理意义上没有相同之处, μ_0 仅仅表示了磁场的性质而与介质无关。不同的磁介质有不同的 μ (μ_r), 即使同一种磁介质 (尤其是铁磁物质), 它的 μ (μ_r) 也不是常数, 而是随外磁场强度 H (或激磁电流) 的大小而变化的, 其变化曲线如图 1-9 所示。

图中, 当 H 变化到某一值 H_m 时, μ (μ_r) 具有最大值。为了在实际使用中方便, 将常用的铁磁物质的 μ (μ_r) 之最大值列于表 1-1。