

材料磁性的 冲击法和电桥法测量

陈笃行 著



中国计量出版社



材料磁性的冲击法 和电桥法测量

陈 笃 行 著

中 国 计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书讲述测量材料磁性的冲击法和电桥法的原理、样品、装置、线路和方法，并着重讨论提高测量速度、减小测量误差的途径。在测磁仪器中，系统地研究了冲击检流计。对测磁工作者关心的材料和样品的磁性规律，也予以适当论述。书中介绍的“低温交流测磁的非平衡互阻抗桥法”，和“圆柱体的退磁因子”是作者最新的研究成果。

本书主要供固体物理、磁学、磁性材料、磁性元件、电磁测量、仪器仪表等专业的大专院校师生、科技和实验人员阅读和参考。

材料磁性的冲击法和电桥法测量

陈笃行 著

责任编辑 王朋植

—♦—

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—♦—

开本 $787 \times 1092/32$ 印张18.125 字数380千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数1—5 000

ISBN 7-5026-0262-3/TB·216

定价8.30元

前 言

磁性测量的冲击法和电桥法，经过百余年的研究和改进已相当完善，被广泛地用于磁学研究和磁性材料的研制、生产和使用中。一般认为，这两类方法具有原理科学稳固、测量结果准确可靠、测试项目灵活多样、仪器装置比较便宜等优点，因此为磁性材料和磁性元件的不少测量标准所推荐。

然而，人们在使用这些方法的过程中，仍不断地发现一些问题，有些问题被认为是它们固有的缺点，例如操作麻烦、测量速度低、难以适应大量测试的需要；有些问题则属于对它们的测量结果的怀疑，例如本来认为无关紧要的仪器和测试条件的变更，竟会导致测量结果的可观变化。在材料研究、开发和应用过程中，常提出一些新的测试课题，也希望用这两类方法解决。进一步提高这两类测磁方法的准确度和速度，尽可能地挖掘它们在材料测试和研究中的潜力，便是撰写本书的主要目的。

为达到这一目的，除了介绍一些标准的测试方法外，将针对发现的实际问题，介绍各种行之有效的解决办法。这些办法的突出特点是效果显著、经济实惠、简单易行。

原理的阐述、分析和研究在书中占有重要地位。这是因为现有方法的正确使用有赖于对原理的正确理解，各种实际问题的解决要靠对实验结果的深入分析和对基本原理的灵活运用。在一定物质条件的基础上，对有关物理原理的理解和应用实在是提高测试水平的关键所在。所论述的原理具有一定的普遍性，它们不只对冲击法和电桥法有用，对别的磁性

测量方法，甚至磁性材料的研制和应用也会有参考价值。

磁性测量是一门技术，同时也是一门科学。作者曾写过一本小册子“磁测量基础”^①，它介绍了与磁测量有关的一些物理原理，而略去了具体的技术问题。本书则是磁测量技术与物理的结合。作为技术，它随社会生产、技术背景的发展而更新，冲击检流计和一些电桥以及相应的测量方法有被淘汰的可能；作为科学，它却是相对稳定并会持续发展的。本书是作者 26 年来从事磁性测量工作的总结，不少内容是本人的研究成果。这些研究，在当时的条件下是迫切需要的，也发挥了良好的作用。具体的方法可用多久，要靠事实来回答。然而，作者相信，有关测量准确度和速度的不少工作将长期发挥作用。这是因为即使有新方法出现，它也要在同老方法已达到的水平相比较、证明其优越性后才能站得住脚；要从老方法的改进过程中寻找经验教训、取得借鉴，以利其自身的发展。何况，原理性的东西常是共同的。目前，磁性测量已在自动化、数字化、高灵敏度诸方面有所发展，作者希望本书在这一进程中也能发挥作用。为证明在新的技术水平下本书的内容仍然有用，在付印之前，加入一节“低温交流测磁的非平衡互阻抗桥法”。它是作者 1986—1988 年，在据称拥有最先进设备的瑞典皇家工学院固体物理系磁性实验室所做的工作，测量数据用计算机读取并处理。正是运用了本书所述的知识并结合新的条件，把一台非平衡电桥的水平提高到了国际的前列。作者于国外在此领域所做的未发表工作，尚包括用于高温超导体研究的冲击法测磁仪和圆柱体退磁因子的计算，后者的结果也已写入本书。

书中一般采用国际单位制。鉴于目前电磁-实用混合制仍广为流行，有些地方也将采用混合制，并加了说明。

① 机械工业出版社，1985 年出版。

作者谨向引导他步入磁测量领域的钟文定教授,胡国璋、周文生副教授,指导他从事磁性材料研究的潘孝硕、戴礼智教授,邀请他前往瑞典皇家工学院 (KTH)、美国国家科学技术研究所 (NIST) 和西班牙巴塞罗那 Autónoma 大学工作的 K.V.Rao 教授、R.B.Goldfarb 博士和 J.S.Muñoz 教授,以及北京大学、北京冶金研究所、中国科学院物理研究所、冶金工业部钢铁研究总院、中国计量出版社在学习、工作、写作和出版上给予很大帮助和合作的同志们表示诚挚的谢意。

作者 1989.9.

目 录

第一章 材料的磁性	(1)
1.1 强磁材料	(1)
1.2 磁场强度、磁化强度和磁感应强度	(2)
1.3 磁滞回线和磁化曲线	(5)
1.4 磁化率和磁导率	(9)
1.5 磁化功、磁滞损耗和磁能积	(12)
1.6 强磁材料的各种磁滞回线	(13)
参考文献	(24)
第二章 测磁电路中元件的分析	(25)
2.1 似稳电路方程	(25)
2.2 电阻元件	(28)
2.3 电感元件	(37)
2.4 电容元件	(41)
2.5 含铁心的线圈	(44)
2.6 交流磁导率和损耗角	(47)
2.7 损耗和功率	(52)
2.8 从低频损耗分析看并联等效的优越性	(53)
2.9 阻抗和绕组关系的进一步讨论	(56)
2.10 退磁场和含开路铁心线圈的等效线路	(65)
参考文献	(89)
第三章 冲击检流计	(91)
3.1 检流计概述	(91)
3.2 冲击检流计的结构和安装	(93)
3.3 检流计可动部分的运动和检流计参数	(99)
3.4 冲击检流计的电荷量灵敏度和磁通链灵敏度	(112)

3.5 用电阻分路和调节电磁阻尼度改变磁通链灵敏度	(117)
3.6 冲击检流计性能的测定	(122)
3.7 被测脉冲的非瞬时性对磁通链灵敏度的影响	(129)
3.8 用多次冲击法提高磁通链灵敏度	(143)
3.9 检流计的结构与性能的关系	(158)
3.10 冲击检流计的等效线路	(171)
参考文献	(194)
第四章 材料磁性的冲击法测量	(196)
4.1 一般原理	(196)
4.2 环状样品的测量	(199)
4.3 方圈样品的测量	(255)
4.4 条状样品在开路下的测量	(263)
4.5 条状样品在磁轭闭路下的测量	(287)
4.6 零位冲击法在材料磁性测量中的应用	(332)
4.7 基于磁强计原理的冲击法	(356)
参考文献	(361)
第五章 交流电桥	(365)
5.1 电桥概述	(365)
5.2 交流电桥简介	(369)
5.3 交流电桥的灵敏度	(377)
5.4 交流电桥的收敛性和平衡程序	(382)
参考文献	(390)
第六章 材料磁性的电桥法测量	(391)
6.1 电桥测磁法概述	(391)
6.2 动态磁化的一般规律	(395)
6.3 交流磁化条件及其控制	(429)
6.4 电桥法测损耗所用的公式	(444)
6.5 样品和线圈	(450)
6.6 交流测磁的电桥法	(472)
6.7 低温交流测磁的非平衡互阻抗桥法	(526)
参考文献	(569)

第一章 材料的磁性

1.1 强磁材料

磁性是物质的基本属性。广义地说，任何一种材料都能表现出某种类型的磁性，但我们所说的磁性材料，是指在较弱磁场中就能表现出明显磁性的“强磁材料”。冲击法和电桥法是强磁材料宏观磁性的重要测试方法。工程上的一些所谓“弱磁材料”实际上常是具有较弱的强磁性的材料，它们的测量方法也在本书讨论之列●。

强磁材料包括铁磁材料和亚铁磁材料两大类。从原子磁矩的排列看，它们都由一些或大或小而其间由畴壁隔开的磁畴构成。由于畴内相邻原子磁矩靠很大的交换作用克服热运动而基本平行（对于铁磁材料）和反平行（对于亚铁磁材料）地有序排列，每个畴内都具有强的自发磁化，因而只要施加较弱的磁场，使畴壁发生移动或畴内自发磁化强度发生整体的转动，便能在宏观上表现出强的磁化。

磁畴的运动受到各种各样的阻碍，致使在磁场作用下的磁化过程有时是可逆的，有时是不可逆的，有时以畴壁移动进行、有时以磁畴转动进行，而一般说来这些过程又都混杂在一起，使得强磁材料的磁化强度与磁场强度之间构成远比“无磁材料”（顺磁、抗磁、反铁磁材料）复杂的关系。一

●由于技术的发展，近年来已可用电桥法测量真正的弱磁材料（顺磁或抗磁材料）的磁性，也将在本书中介绍，见§.6.11。

般来说，这种关系既非直线，又与磁化历史有关，磁化强度不仅是磁场强度的复杂函数，而且还是温度和应力的函数，也是我们要予以充分注意的。

磁畴运动的不可逆行为是由各种耗散性阻力（即阻尼）引起的。由于阻尼的作用，对于磁场强度的每一改变需要等待一段时间才能完成磁化强度的相应改变，并同时产生热耗。特别是金属磁性材料，由于涡流的阻尼，磁化的时间效应和能量损耗将更为明显。

我们说的磁性测量，就是为确定材料或样品中磁化强度（或磁感应强度）与磁场强度之间的函数关系及其导出的各种磁性参量的测量。而要得到肯定的结果，被测量的定义和实验条件是极为重要的。

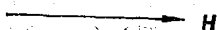
1.2 磁场强度、磁化强度和磁感应强度

上面已经提到这些名词，现在对它们的概念稍作说明。

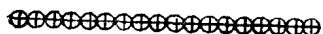
(1) 磁场强度

材料是靠磁场磁化的，磁场的方向和大小用磁场强度 H 表示。从功和能的角度看，磁场强度所处的地位与力相当，因此又常称它为磁化力。磁场由电流和磁极产生， H 的单位是安培每米，符号是安/米 (A/m)。产生均匀磁场的最简单方法是用密绕长螺线管，如图 1.1 所示。如果有电流 I 流

过螺线管，每米的匝数为 n ，则在螺线管的中段 H 沿轴向，其大小为



$$H = nI$$



(1.1)

图 1.1 密绕长螺线管
产生的磁场

其中， I 的单位是安培，符号为安 (A)。

若磁场由通电流导体产生,则 H 的方向遵从右手螺旋法则^①。若磁场由磁极产生,则 H 的方向从正磁极指向负磁极(关于磁极产生磁场的问题将在第二章讨论)。一般情况下,磁场强度 H 是时间和位置的函数,因此可以说“某时、某点的磁场强度 $H(r, t)$ ”。

因为磁场可由电流产生,静态磁场常称为直流磁场,周期性反向的磁场常称为交流磁场。与此相应,也有直流、交流磁化和磁感应的说法。

在电磁-实用混合单位制中,磁场强度的单位是奥斯特,符号是奥 (Oe)。此时,上例中若每厘米绕组匝数为 n 并通过电流 $I(A)$, 则式 (1.1) 写作

$$H = 0.4 \pi n I \quad (1.1a)$$

(2) 磁化强度

磁化强度 M 是标志材料磁化方向和强、弱的物理量,一般说来也是时间和位置的函数。

材料中某点的磁化强度定义作含有该点的一个小体积 δV 内所有元磁矩 m_i 的矢量和被 δV 除:

$$M = \frac{\sum_i m_i}{\delta V} \quad (1.2)$$

M 的单位与磁场强度 H 相同,为 A/m。这里要说明的是 δV 只在宏观上看来十分小,因而可看作一点;从微观上看其中仍包含了数量极多的元磁矩。

点子取在一个畴内,式 (1.2) 给出畴内的自发磁化强

①右手螺旋法则给出一个轴向矢量和一个环向矢量的正向间的关系:右手握轴矢量,伸出拇指指向轴矢量正向,则四指指向环矢量正向。对于电流方向与磁场强度方向之间的关系,一般以电流方向为轴矢量方向,但在螺线管的情况下,以电流方向为环矢量方向也是可以的。

度 M_s 。如果把 δV 换作材料中较大部分的体积 V ，则式

(1.2) 将给出体积 V 内的平均磁化强度 M_{av} 。在指定温度下，均匀材料内所有磁畴的 $|M_s|$ 都相同；在体积 V 内磁化到所有磁畴的 M_s 都一致取向（成为单畴）时，这部分材料就达到所谓饱和磁化状态。在一般情况下，使材料饱和磁化的磁场强度远较造成自发磁化的交换作用场为弱。饱和磁化时的平均磁化强度 M_{av} 与 M_s 相差极微，因而平时我们也用 M_s 来代表饱和磁化强度 M_{av} 。

强磁材料的 M_s 是温度 T 的函数。例如对于铁磁材料， $T=0\text{ K}$ 时畴内元磁矩完全平行排列， M_s 最大，随着 T 上升 M_s 单调下降，到居里温度（也称为居里点） T_c 时 M_s 变为零， $T>T_c$ 时材料将成为无磁的（顺磁性）。在居里点 T_c 以下的温区，除了接近 T_c 的区域由于交换作用场较小因而而在高场下测出的 M_{av} 可能比 M_s 显著地大之外， M_{av} 都有随 H 增大而明显地达到饱和值 M_{av} 的表现，并且 M_{av} 和 M_s 是十分接近的。

在电磁-实用单位制中 M 的单位见 1.2(3)。

(3) 磁感应强度

某一点的磁感应强度 B 等于该点磁场强度和磁化强度的矢量和乘以真空的磁导率 $\mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ ，

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1.3)$$

B 的单位是特斯拉，符号是特 (T)。

若采用电磁-实用混合单位制，磁感应的单位是高斯，符号是高 (G)，它同磁场单位 Oe 相等。磁化强度的单位是 G，只是它对于磁感应的贡献要乘上 4π 。这样，式 (1.3) 成为

$$B = H + 4\pi M \quad (1.3a)$$

与 H 和 M 相同， B 也是时间和位置的函数。如果 H 和 M

均为对于材料体积的平均，则由式 (1.3) 算出的 B 也是材料的平均磁感应强度。在真空中 $M = 0$ (在空气中也可认为 $M = 0$)，有关系式 $B = \mu_0 H$ 。

在材料磁化到饱和之后继续增大磁场强度时，磁化强度不再显著改变(等于 M_s)，但磁感应强度却随磁场强度线性地增大，因而我们平时说的饱和磁感应强度 B_s 只在以下两种理解下才有确定意义：其一是去掉式 (1.3) 中的 H ，定义 $B_s = \mu_0 M_s$ 为饱和磁感应强度 (或按式 (1.3 a), $B_s = 4\pi M_s$)，也叫“内禀饱和磁感应强度”并常记作 B_{si} ；其二是在 M_s 与使材料饱和磁化的磁场强度 H_s 相比为大得多时 (例如对于软磁材料)，把在比 H_s 稍大的指定磁场强度下的磁感应叫做饱和磁感应强度 B_s 。在这两种定义下， B_s 基本相同。

以上叙述中，常把斜黑体符号改为一般斜体表示矢量的模。在实际磁性测量中，所涉及的磁性量总是在样品中某截面或体积内的平均值，并且往往只有正、反两个方向，我们用不带表示平均的符号 av 的代数标量 H 、 M 和 B 来表示。

1.3 磁滞回线和磁化曲线

1.3.1 饱和磁滞回线

我们用材料中的平均磁场强度 H 和平均磁化强度 M 来描述它所处的磁状态，并写作 (H, M) 。如果从大于 H_s 的 H_m 出发，磁状态从 (H_m, M_s) 开始，随着 H 缓慢减小至零然后反向增大至 $-H_m$ ，相继经过 (H_s, M_s) 、 $(0, M_r)$ 、 $(-M H_c, 0)$ 、 $(-H_s, -M_s)$ 达到 $(-H_m, -M_s)$ ，此后将 H 正向回扫，又经历 $(-H_s, -M_s)$ 、 $(0, -M_r)$ 、 $(M H_c, 0)$ 、 (H_s, M_s) 最后回到原始状态 (H_m, M_s) ，则在 H - M 坐标平面上所画的磁状态点的轨迹叫做饱和磁滞回线，见图1.2。回线左边一支从 (H_m, M_s) 到 $(-H_m, -M_s)$ 叫下降支，

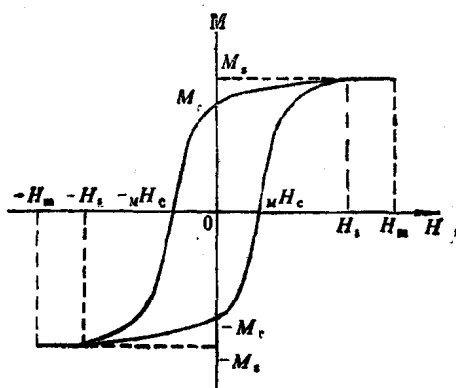


图 1.2 饱和磁滞回线

右边一支从 $(-H_m, -B_s)$ 到 (H_m, B_s) 叫上升支，而下降支中处于第二象限的部分叫退磁曲线。 B_r 和 H_c 分别叫剩余磁化强度和关于 B 的矫顽力， B_r/B_s 叫剩磁比或矩形比 α_m 。矫顽力的大小是区别磁性软、硬的标志，一般 $H_c \leq 10^3$ A/m 的叫软磁材料， $H_c \geq 10^4$ A/m 的叫硬磁（永磁）材料，二者之间的叫半软磁和半硬磁材料。

这里对于饱和回线所用的一些术语，对后面的各种其它回线也常可移用。

1.3.2 不饱和对称磁滞回线和退磁

除了极少数例外，饱和回线对原点总具有 180° 旋转对称性，不饱和回线则不然，可以对称，也可以不对称。从饱和回线开始，逐步减小磁场振幅 H_m 反复磁化，则磁状态沿一连串首尾相继的不封闭“回线”变化。若在中途的某一振幅 $H_m (< H_s)$ 稳定下来反复磁化多次（叫作磁锻炼或稳磁），则“回线”逐渐闭合，最后达到一条稳定的不饱和对称磁滞

回线，如图 1.3 所示。在不饱和对称磁滞回线上定义的 M_r 和 H_c ，一般都比饱和的为小并随 H_m 的减小而单调减小，

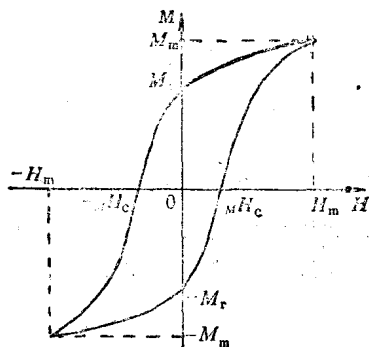


图 1.3 不饱和对称磁滞回线

所定义的 α_M 则随 H_m 减小先升高而后下降。

若减小 H_m 并反复磁化的过程一直进行到 H_m 趋于零，并且每一循环后 H_m 的减量又足够小，使所有不封闭回线都接近对称，则过程终了后磁状态达到原点。这种磁状态 $(0,0)$ 叫退磁态（也叫磁中性状态），而实现退磁态的这种操作叫退磁（也叫磁中性化）。

1.3.3 正常、始发和理想磁化曲线

不饱和的对称回线也可从退磁态开始获得，此时只要施加一个给定的 H_m 并进行磁锻炼便能得到一条稳定的对称回线。如果我们从退磁态开始逐步提高 H_m 进行磁锻炼，则每次都能得到对称回线，把这些回线的顶点 (H_m, M_m) 连起来，就得到一条正常磁化曲线，虽然正常磁化曲线上的每一点都代表相应回线的顶点 (H_m, M_m) ，在画磁化曲线时仍然用符号 H 和 M 。

如果从退磁态 $(0,0)$ 开始, 单向地缓慢增大磁场强度, 把历经的磁状态点 (H,M) 连起来, 就得到始发磁化曲线。

如果在从零递增的诸稳定磁场强度 H 下, 叠加一个如同退磁那样振幅由大到小直至零的交变磁场进行“消滞”, 则对每个 H 都得到一个消滞后的 M , 连接从零到 H_s 的所有 H 所对应的 (H,M) 点就构成一条所谓理想磁化曲线或无滞磁化曲线。

图 1.4 画出这三种磁化曲线和饱和回线的上半部分。可以看到理想磁化曲线的位置最高, 它大致上是饱和回线的中线, 始发磁化曲线的位置最低, 正常磁化曲线则比始发磁化曲线稍高一些。

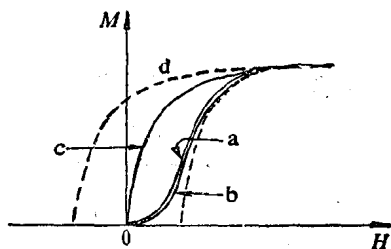


图 1.4 正常 a、始发 b 和理想 c 磁化曲线以及饱和磁滞回线 d

1.3.4 不对称的磁滞回线和小回线

1.3.1 和 1.3.2 中得到对称回线的磁化方式称为对称循环磁化方式, 实现这种方式的条件比较严格, 对于材料磁性的测试而言, 它是一种标准的磁化方式。如果磁场强度的正、负振幅不相等, 或虽相等但 H_m 曾经过从大到小的较大跳变, 在正、负振幅间进行磁锻炼后也能得到闭合回线, 这种回线将是不对称的。显然, 不对称回线有多种多样, 不宜

用它们来标志材料的性能（除非对于特殊应用的场合）。为保证对称循环磁化方式的实现，必须有合理精心的操作才行。

有些材料的磁滞回线在严格按照标准手续进行操作时也是不对称的，例如矩形比很高的软磁合金就会如此。

对于硬磁材料，一个顶点在退磁曲线上的不对称回线具有重要意义。我们把这种象树叶一样“长”在磁滞回线或磁化曲线上的回线叫小回线。图 1.5 给出不对称磁滞回线和小回线的示意图。

上面关于 $M-H$ 回线和曲线的讨论也可以推广到 $B-H$ 的场合，而且在实用上，一般说的磁滞回线和磁化曲线多是指的后者。在最后一场合用 (H, B) 表示磁状态，相应于 M_r 、 μH_0 和 α_M 有剩余磁感应强度 B_r 、关于 B 的矫顽力 ${}_B H_0$ 和关于 B 的剩磁比 α_B 。因为它们更为常用，下标 B 按惯例是被省去的， ${}_B H_0$ 和 α_B 写作 H_0 和 α 。

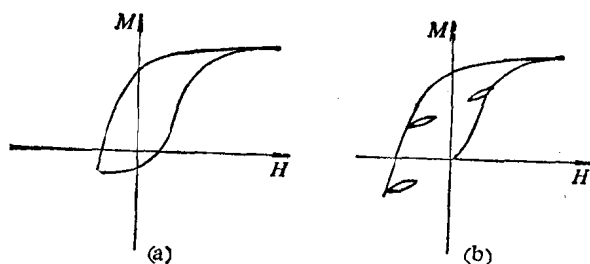


图 1.5 不对称磁滞回线 (a) 和小回线 (b)

1.4 磁化率和磁导率

磁化率 χ 定义为材料中 M 与 H 的比值；磁导率 μ 定义为材料中 B 与 H 的比值。强磁材料的磁化行为复杂，对于 χ 和 μ 的定义还必须作更严格的规定，否则将没有任何确定