

中等专业学校规划教材

电工材料

邵忠 石白云 编

煤炭工业出版社

中等专业学校规划教材

电 工 材 料

邵 忠 石白云 编

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

《电工材料》是煤炭中专物资经营与管理专业的专业课之一。

本书从煤炭工业生产和建设的实际出发,根据电工材料在煤炭工业企业生产和建设中的应用状况,在介绍电工材料一般性能的基础上,重点介绍绝缘材料、电线电缆和磁性材料的类别、特点、用途、型号与规格表示方法及有关的验收保管知识。

本书除适于做中专物资经营与管理专业的教学用书外,也可供从事物资经营管理工作的同志参考。

中 等 专 业 学 校 规 划 教 材 电 工 材 料

邵 忠 石白云 编

责任编辑:姚 美 华

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092mm¹/16 印张10³/4

字数254千字 印数1—6,265

1994年9月第1版 1994年9月第1次印刷

ISBN 7-5020-0967-1/TD·892

书号 3733 B0141 定价 6.20元

前 言

电工材料是现代生产及生活中必不可少的重要工程材料。《电工材料》是各煤炭中专学校物资经营与管理专业的必修课之一，但当前尚无适用的教材。因此，煤炭工业部中专经济管理类教材编审委员会在1992年4月的会议上审定了《电工材料》教材编写大纲，确定编写这本教材。

根据物资经营与管理专业的中专教学计划，本课程应在《物理》、《化学》、《普通电工学》、《金属材料》、《非金属材料》之后开设，因此，凡上述教材中讲授的内容，本书不再重复。根据职业技术教育以培养学生动手能力为基本原则的要求，本教材对电工材料的基本理论只做扼要介绍，而对实际工作中大量应用的知识则做了详细的叙述，并在每章之后附有复习思考题。

本书由邵忠主编，参加本书编写工作有秦皇岛煤炭工业管理学校讲师邵忠同志（第三、四、五等三章）、大同煤炭工业学校教师石白云同志（第一、二两章），全书的修改定稿由邵忠负责。

在本书的编写过程中，编者参阅了大量的专著、教材和国家标准，并得到了有关各方领导的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中可能会有缺点和错误，恳请读者和有关教师批评指正。

编 者

1993年11月

目 录

第一章 总论	1
第一节 电工材料的研究对象及其分类	1
第二节 电工材料的基本性能	2
第二章 绝缘材料	13
第一节 绝缘材料的型号编制方法	13
第二节 气体绝缘材料	15
第三节 液体绝缘材料	17
第四节 绝缘树脂、漆和胶	21
第五节 绝缘用纤维制品与浸渍纤维制品	29
第六节 层压制品	34
第七节 云母及其制品	36
第八节 薄膜、粘带与复合制品	42
第九节 绝缘子	45
第十节 绝缘材料的验收和保管	50
第三章 电线电缆	53
第一节 电线电缆的基本结构与材料	53
第二节 裸电线	63
第三节 电磁线	70
第四节 绝缘电线	77
第五节 电力电缆	87
第六节 通讯电缆	102
第七节 电器装备电缆	108
第八节 高低压动力电缆的选用	124
第九节 电线电缆的管理技术	128
第四章 磁性材料	134
第一节 磁性材料概述	134
第二节 软磁材料	135
第三节 硬磁材料	141
第五章 其它电工材料	144
第一节 电杆与横担	144
第二节 架空线路用金具	148
第三节 电碳制品	156
第四节 其它特种电工材料	161
参考书目	167

第一章 总 论

第一节 电工材料的研究对象及其分类

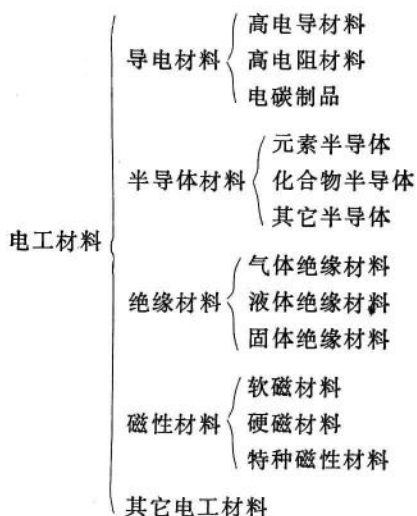
一、电工材料的研究对象

电工材料是应用于电气设备和装置、并对电磁场起有效作用的一类材料的总称。电工材料研究电工材料的组成、结构与性能之间的变化规律，型号、规格与用途之间的相互关系，因而它是一门实用性很强的应用学科。

煤炭生产过程与电有着密切的联系，尤其是现代化矿井，这一点显得更为突出。电的输送、电路的保护、电气设备和装置的正常运行都离不开电工材料。可以这样认为，没有电工材料就没有煤炭工业的机械化，离开电工材料就不可能实现煤炭工业的自动化。机械化和自动化是煤炭工业的发展方向，而机械化和自动化的实现是以电工材料的应用为先导的。随着煤炭工业机械化和自动化程度的提高，对电工材料的品种、规格、数量和质量的要求越来越高，同时，大量新型的电工材料出现，也推动着煤炭工业机械化和自动化的进程。

二、电工材料的分类

电工材料具有品种繁多，性能各异，用途广泛的特点。为此，应对其进行正确的分类。电工材料按电或磁的特性、以及其物质结构或状态常作如下分类：



在物资管理上有时采用综合分类法，将电工材料分为绝缘材料、导电材料、半导体材料、磁性材料和电工结构材料5大类。本教材将重点介绍绝缘材料、导电材料、磁性材料和部分电工结构材料，而半导体材料大部分属于电子元器件类，故在本教材中不予介绍。

第二节 电工材料的基本性能

电工材料的质量和使用寿命取决于它们的基本性能，这些基本性能有导电、绝缘、磁、化学及热性能等。

一、电工材料的导电性能

导电材料一般是由容易传导电流的导体充当的。最常见的导体是金属，如银、铜、铝、铁等，其次是大地、人体、石墨以及酸、碱、盐的溶液等。在实际应用中，对导电材料的主要要求是具有良好的电性能。

1. 电阻

电阻是指电流在导体中流动所受到的阻力。有些导体对电流的阻力小，即导电能力好；有些导体对电流的阻力大，即导电能力差。导体对电流的阻力，称为导体的电阻，用“ R ”表示，单位是欧姆，简称欧，用“ Ω ”表示，常用的单位还有千欧（ $k\Omega$ ）或兆欧（ $M\Omega$ ）。

导体电阻的计算公式为

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

式中 L ——导体长度， m ；

S ——导体截面积， mm^2 ；

ρ ——导体的电阻率，取决于材料的性质， $\Omega \cdot mm^2/m$ 。

从以上公式中不难看出，导体电阻的大小与导体长度成正比，与导体截面成反比。

2. 电阻率

导体的电阻率也称电阻系数，是用以衡量物体电性能的重要指标。不同的材料具有不同的电阻率。常用材料的电阻率见表1-1。

表 1-1 常用材料电阻率

单位： $\Omega \cdot mm^2/m$

材料类别	材料	电 阻 率
纯金属	银	0.0162
	铜	0.0176
	铝	0.026
	钨	0.0548
	铁	0.0978
合金	锰 铜	0.42
	黄 铜	0.07~0.08
	康 铜	0.5
	铁、铬、铝合金	1.4
半导体	硒、锗、硅	$10^2 \sim 10^{13}$
绝缘体	橡 胶	$10^{10} \sim 10^{22}$
	塑 料	$10^{10} \sim 10^{20}$

从表中可以看到，纯金属和合金类材料具有比较小的电阻率，因此常被用作导电材料。橡胶和塑料由于具有较大的电阻率而常被用作绝缘材料。硒、锗、硅等材料的电阻率

介于导体与绝缘体之间，因此被称为半导体材料。

电阻率的倒数为电导率，用 γ 表示。

温度对导体的电阻有较大的影响。一般的金属导体，在温度升高时，其电阻值也增大，这是由于温度升高，金属内部的原子核与电子运动加剧、自由电子流动时阻力增大而造成的。例如，普通的铜导线当环境温度每增加 10°C 时，电阻值约增加40%。电阻随温度而变化的性能，用电阻随温度变化的比例常数表示，称为电阻温度系数，用 α 表示。其表达式为

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0(t - t_0)}$$

式中 R —— 温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻， Ω ；

R_0 —— 温度为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 时的电阻， Ω 。

根据这一公式，可将电阻温度系数 α 描述为当温度升高 1°C 时（ $t - t_0 = 1$ ）电阻的增量（ $R - R_0$ ）与 $t_0^{\circ}\text{C}$ 时的电阻 R_0 的比值。

不同的材料有不同的电阻温度系数，大多数金属的电阻值随温度升高而增大，此时 α 为正值，称为正温度系数。有些材料（如碳）因温度升高而电阻值降低， α 为负值，称为负温度系数。对于导体材料的正温度系数一般要求是越小越好，负温度系数则越大越好。

二、电工材料的绝缘性能

绝缘材料并不是不导电的，而是导电能力非常差。不同的绝缘材料绝缘能力是有差别的，这些差别主要通过下列性能指标来衡量。

1. 绝缘电阻

绝缘电阻用来表示绝缘材料的绝缘能力。事实上一切绝缘材料在加上一定的直流电压 U 后，都将出现一个极微弱的电流 I 。此电流由瞬时充电电流 I_c 、吸收电流 I_a 和漏导电流 I_L 三部分组成。 I_c 是由几何电容和位移极化产生的，并随时间迅速地减小。 I_a 由缓慢极化、导电离子形成体积电荷而产生，也随时间逐渐地减小， I_L 则是由于材料内部带电质点的导电而产生，由于这一部分电流不会随时间而减小，所以形成绝缘材料的漏导电流。绝缘材料的电流组成与时间关系见图1-1。

由于绝缘材料有漏导电流通过，因此出现了绝缘电阻这一衡量绝缘材料绝缘能力强弱的指标，其单位为欧、（ Ω ）千欧（ $\text{k}\Omega$ ）或兆欧（ $\text{M}\Omega$ ）。绝缘电阻越大，通过绝缘材料的漏导电流就越小，表明其绝缘性能就越强，反之，绝缘性能就越弱。

绝缘电阻一般是用电阻系数（电阻率）来表示的。在固体绝缘材料中，漏导电流分为表面电流（ I_s ）和体积电流 I_v 两部分，与之相对应的有表面电阻率（ ρ_s ）和体积电阻率（ ρ_v ）。表面电阻率（ ρ_s ）的单位为欧（ Ω ），它表征材料表面的电导特征。体积电阻率（ ρ_v ）的单位为欧·厘米（ $\Omega\cdot\text{cm}$ ），它表征材料内部的电导特征。绝缘材料的体积电阻率通常在 $10^9 \sim 10^{21} \Omega\cdot\text{cm}$ 之间。

影响绝缘电阻的主要因素是温度、湿度、纯度和清洁度。当环境温度升高时，各种绝缘材料的绝缘电阻会降低，这也是电机和电炉中的绝缘体为什么在工作温度下，绝缘电阻比常温下绝缘电阻低的直接原因。

绝缘材料在吸收水份后，其绝缘电阻也会大大降低，特别是纤维质的绝缘材料，如棉、麻、纸、木材、丝绸、石棉及其制品等，吸湿后尤为显著。但是吸湿后的绝缘材料经

干燥后，其绝缘电阻仍可恢复到原来的水平。

纯度是指制取绝缘材料的原材料的纯度，其纯度愈高，绝缘材料的电阻愈大。

此外，绝缘电阻的强弱还受工作地清洁程度的影响。一般来说，工作地的清洁程度越高，电阻值下降越不明显。

电气设备的绝缘电阻是关系到人身及设备安全的一项重要参数，如在实际应用中常用兆欧表测量电气设备绝缘性能的好坏。一般低压电气设备的绝缘电阻不得低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。移动电器如手电钻等的外壳绝缘电阻不得低于 $1\text{M}\Omega$ 。在潮湿环境下使用的电器，如煤矿井下使用的电器其绝缘电阻应适当增大，以保证安全。

2. 介电系数

介电系数也称相对介电系数或相对电容率，是表示绝缘材料在交变电场作用下极化程度的一个重要参数。

图1-2是一个平板型真空电容器，极板面积为 A ，极板间距为 d 。接通电源充电，直至

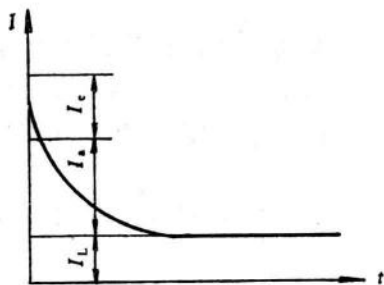


图 1-1 绝缘材料的电流组成与时间关系示意图

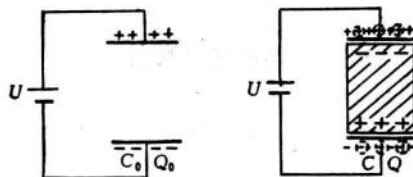


图 1-2 静电场中介质的极化

极板间的电压为 U 、极板上的电荷为 Q_0 时，如在真空电容器中插入绝缘材料后，由于绝缘材料发生极化，电容器极板上储存的电荷量增至 Q ，这时相对介电系数为

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} = \epsilon_r$$

相对介电系数是电容器（两极板间）在有绝缘时的电容量比真空时电容量增长的倍数。在静电场作用下， ϵ_r 是一个无量纲的正数，且恒大于1。各种绝缘材料均有自己的相对介电系数，见表1-2。

表 1-2 绝缘材料相对介电系数表

绝缘材料类别		介质名称（按 ϵ_r 从小到大排列）	ϵ_r 范围（50Hz, 20℃）
气体绝缘材料 (760mm汞柱)		氢、氦、氧、氩、空气、氮、 二氧化碳	1.000072~1.00096
液体 绝缘材料	非极性	四氯化碳、矿物油、苯、甲苯	2.163~2.294
	极性	蓖麻油、酒精	4.5~26-82
固体 绝缘材料	非极性	石蜡、硫磺	1.9~4.2
	极性	电木、卤蜡、纤维、碱玻璃、刚玉、金 刚石、偏铁酸钡	4.5~10 110~1 500

绝缘材料的介电系数对电机电器电容量的大小, 绝缘能力的强弱有很大的影响。例如, 制造一定电容的小型电容器, 必须采用介电系数很高的介质; 在高压电机及开关中所使用的各种绝缘材料, 则要尽量选用介电系数相近的介质, 这样才能使整个绝缘系统中的电压分布均匀, 提高绝缘效果; 在高压下使用的固体绝缘材料, 如密度较小且存有气隙时, 往往使高电压集中于气隙处, 并很容易在此发生击穿现象, 使整个绝缘系统遭到破坏。

3. 介质损耗

在交流电压作用下, 绝缘材料将使一部分电能将转变成热能而损耗掉, 这一能量损耗称为介质损耗。单位时间内消耗的能量称为介质损耗功率。介质损耗主要是由电导缓慢松弛极化所引起的, 它是绝缘材料发热和击穿的根源。

如果不考虑绝缘材料内的功率损耗, 在对绝缘材料施加交流电压时, 电流向量将准确地超前电压 90° 。而事实上各种绝缘材料都或大或小地存在着介质损耗, 且这一损耗是绝缘材料在施加交流电后所产生的微弱电流引起的。其中瞬时充电电流(I_c)只引起电容电流, 并超前电压 90° ; 漏导电流(I_L)与电压同相, 引起绝缘材料发热损耗。吸收电流分为两部分, 一部分是有功电流分量(I_a), 另一部分是无功电流分量(I_r), 与电压同相, 也将引起绝缘材料发热损耗。它们的相量关系见图1-3。

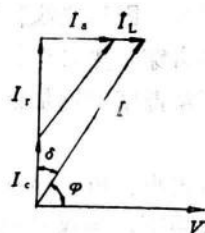


图 1-3 绝缘材料电流与电压相量关系示意图

图1-3中 I 为总电流。由于介质损耗存在, 使总电流(I)滞后瞬时充电电流(I_c)一个角度 δ , 此角称为介质损耗角。介质损耗角的正切, 即 $\tan \delta$ 称为介质损耗因数, 可用下式表示为

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r}$$

电器工程上常用 $\tan \delta$ 作为衡量电介质损耗的参数。该值愈小说明绝缘材料的介质损耗也愈小, 绝缘材料的质量也就愈好。一般电工绝缘材料的介质损耗角正切($\tan \delta$)约为 10^{-4} 左右。

介质损耗因数的大小受温度和湿度的影响。温度升高时, $\tan \delta$ 也随之增大。介质吸湿后, $\tan \delta$ 值也将增大。

4. 击穿强度

绝缘材料所承受的电压是有限的, 当施加于绝缘材料上的电场强度大于临界值时, 绝缘材料就会被击穿, 电流剧增, 绝缘材料会发生破裂或分解, 此时绝缘材料完全失去绝缘性能。绝缘材料发生击穿时的电压临界值称为击穿电压(U_b)。击穿时的电场强度称为击穿电场强度(E_b), 也即击穿强度, 它表征的是各种绝缘材料抵抗击穿的能力。在均匀电场中, 击穿电场的强度 E_b 为

$$E_b = \frac{U_b}{d}, \text{ kV/mm}$$

式中 d —— 击穿处绝缘材料的厚度。

绝缘材料的类别不同, 其击穿形式也不同。

(1) 气体绝缘材料的击穿。气体绝缘材料在电场作用下, 电子在运动中发生碰撞电

离,并获得巨大能量。当高能量的电子与气体分子相碰撞时,可将气体分子碰裂,电离为正离子和电子。新形成的电子在运动中又不断碰撞,使其它分子不断电离产生电子。这种不断碰撞电离的结果就形成了电子崩,即形成一条具有高电导的通道,导致气体击穿。

(2) 液体绝缘材料的击穿。液体绝缘材料的击穿形式和气体相同,只是由于液体密度大,电子自由行程短,积聚的能量小,而击穿强度比气体的高。液体绝缘材料的击穿强度受其纯度影响很大,当液体绝缘材料中含有气泡、乳胶状水滴和纤维类杂质时,击穿强度大为降低。

被击穿的气体或液体绝缘材料,当撤去电压后,由于流动性能的作用,被击穿的部位立刻会被填满,从而恢复绝缘能力。

(3) 固体绝缘材料的击穿。固体绝缘材料的击穿形式有如下3种:

热击穿:热击穿是由于介质损耗而导致绝缘材料发热引起的。绝缘材料的击穿电压随周围环境温度的增加而下降,另外,材料厚度增加会使散热条件恶化,也会使击穿强度降低。

电击穿:电击穿是由于绝缘材料结构直接受到电场力的破坏所致。其基本过程是在强电场作用下,绝缘材料内部带电质点(电子)在剧烈运动中发生碰撞电离,使绝缘材料的分子结构遭到破坏,电导增加而导致击穿。固体绝缘材料的击穿电压随绝缘材料的厚度线性地增加,并且在一般情况下(在均匀电场中)与电压作用时间的长短、周围散热条件和环境温度无关。

放电击穿:固体绝缘材料的放电击穿是指含有杂质的绝缘材料,特别是含有气泡的固体绝缘材料,在强电场作用下发生碰撞电离而放电,使材料的结构遭受破坏而击穿。固体绝缘材料放电击穿的击穿电压与其杂质的成分、含量以及密度有关。

一般来说固体绝缘材料的击穿电压最高,液体次之,气体最低。常用绝缘材料的击穿电压见表1-3。

表 1-3 常用绝缘材料击穿电压

材料分类	名 称		击穿电压 kV/cm	试验条件
气 体 绝缘材料	空气、氮		32	气压760mm汞柱、极 距为1cm、温度为20℃、 均匀电场直流电压
	二氧化碳		32×0.9	
	六氟化硫、二氯甲烷、三氯甲烷、四氯化碳		$32 \times 2.5 \sim 32 \times 6.4$	
液 体 绝缘材料	不清洁的变压器油		40~50	均匀电场、频率为 50Hz,电压为交流有效 值
	干燥清洁的变压器油		200~300	
	含硅有机油		150~200	
固 体 绝缘材料	多孔及吸 水性介质	耐热陶瓷	15~25	
		大理石	40~50	
		木材	40~60	
		未浸渍电缆用纸	70~100	
	玻璃、浸渍纸		1 000~3 000	
	天然云母		2 000~3 000	

液体绝缘材料除自身有较高的击穿电压外,还可为固体绝缘材料补强。如固体绝缘材料经液体绝缘材料浸渍后,可起到填充气孔、减少固体中的气泡的作用,从而提高固体绝

缘材料的击穿电压。对热击穿,不能单纯依靠增加绝缘材料的厚度来提高其击穿强度,应在材料的选择、结构设计上采取措施。为了确保电气设备安全运行,任何电机和电器设备绝缘结构的工作电压均应低于其击穿电压。

5. 耐电弧性

电弧是在一定的电场作用下,两极之间的气体被击穿后产生的。

绝缘材料在电弧作用下抵抗表面破坏的能力称为耐电弧性。通常用电弧作用于绝缘材料,使其表面产生碳痕时(俗称烧焦)所经历的时间(单位:秒)作为耐电弧性能指标。该值越大,表示绝缘材料对电弧、电火花作用的抵抗能力越强,反之就越差。

绝缘材料的耐电弧性与其本身的性质有关。如木材、棉麻纤维及熔点较低的塑料等,它们的耐电弧性较差,而石棉、云母、电瓷等材料,则耐电弧性较高,因此,电气设备上常用的灭弧绝缘装置一般用石棉、云母等制成。

三、电工材料的磁性能

电与磁之间有着密切的联系,电工材料的磁性能就是指它与磁场有关的各个物理量。

1. 磁场、磁通与磁场强度

(1) 磁场。在磁极或电流回路的周围以及被磁化后的物体内外,都对磁针或运动电荷具有磁力作用,这种存在磁力作用的空间称为磁场。磁场具有力和能的特性,且又有强弱和方向。通常用磁力线的疏密程度来描述磁场的强弱。

(2) 磁通与磁场强度。为了能用数量来表示磁场的强弱,把通过某一垂直截面(S)的磁力线根数称为磁通,用字母 Φ 表示,单位是韦伯,简称韦和麦克斯韦,简称麦,分别用 W_b 表示,或用字母 M_x 表示,两者的关系为

$$1 M_x = 10^{-8} W_b$$

表示磁场内各点磁场强弱和方向的物理量,称为磁感应强度,用字母 B 表示。它的方向就是该点磁场的方向,大小用单位面积通过的磁力线根数来表示。若磁场中各点磁感应强度相等、方向一致,则称为均匀磁场。在均匀磁场中磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

由此可知,磁感应强度实质上是单位面积的磁力线数,故可将磁感应强度称之为磁通密度。

磁感应强度(B)的计量单位是特拉斯或高斯,分别用 T 和 G_s 表示,两者的关系为

$$1 T = 10^4 G_s$$

当材料截面积一定时,如果磁通越大,则表明通过该截面的磁力线越多,此时磁感应强度就越大。

在研究磁场时,还要引用一个表示外磁场强弱和方向的量,称为磁场强度,用 H 表示,单位为安匝/米(A/m)或奥斯特(O_s),两者的关系为

$$1 A/m = 4\pi \times 10^{-3} O_s$$

磁场强度 H 的大小仅与产生该磁场的电流大小和载流导体的形式有关,而与磁介质无关。

2. 导磁系数

在电工产品中,凡是带线圈的产品,例如电动机、变压器、电磁铁、接触器等,它们

的线圈均采用导磁系数较高的硅钢片或低碳钢等材料制成铁芯,这是因为在同样的线圈尺寸、匝数和通入相同值的电流时,用硅钢片和低碳钢做成的线圈铁芯,将使磁通大大增强,反之,如果磁通 Φ 一定,则通入的电流可大大减小。这样可使产品的体积缩小、效率提高,价格降低。

导磁系数是用来表示物质导磁能力大小的物理量,也称磁导率,它是反映物质在磁场中对磁感应强度的影响程度。可用公式描述为

$$B = \mu H$$

或

$$\mu = \frac{B}{H}$$

式中 μ ——导磁系数,单位为亨/米 (H/m)。真空中导磁系数为一常数。即

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}, \text{H/m}$$

通常把任意一种物质的导磁系数与真空导磁系数的比值 $\mu_r \left(= \frac{\mu}{\mu_0} \right)$ 叫做相对导磁系数。它是一个无量纲,用来表征该物质的导磁能力的大小。例如,硅钢片的相对导磁系数 $\mu_r = 6000 \sim 8000$,铁镍合金在弱磁场中的导磁系数 $\mu_r \approx 10^5$ 左右。

物质按 μ_r 的大小可划分为3大类:

(1) 抗磁性物质, μ_r 为 $0.999995 \sim 0.99998$,如氢、铜、银等。

(2) 顺磁性物质, μ_r 为 $1.000003 \sim 1.000004$,如空气、铝、锡等。

(3) 铁磁性物质, μ_r 为几百至上万,如铁、镍、钴及其合金等。

工业上广泛应用的磁性材料主要是用铁磁性物质制取,这是因为铁磁性物质在外加磁场作用下,能被强烈地磁化。顺磁性和抗磁性物质被称为弱磁或无磁性材料,顺磁性物质在外加磁场的作用下只是微弱地被磁化,抗磁性物质能抗拒或削弱外加磁场对材料本身的磁化作用。

3. 铁磁材料的磁化与磁化曲线

铁磁性物质的导磁性能之所以特别好,原因在于铁磁材料的内部存着许多天然磁性区域,称为磁畴。它相当于一块块的小磁钢(永久磁铁),而非铁磁性物质则没有这样的小区域。平时这些磁畴杂乱地排列着,它们产生的磁场都互相抵消了,宏观上不显磁性。当把铁磁材料放入磁钢周围或通电线圈中,由于外磁场产生同性相斥、异性相吸的作用力,使内部磁畴沿着外磁场方向作有规则的翻转。铁磁材料中磁畴产生的磁场不再相互抵消,形成与外磁场方向一致的附加磁场,但这个附加磁场比引导它的外磁场要强得多。这种铁磁性材料在外磁场作用下,使磁畴排列整齐产生磁场的过程,称为铁磁性材料的磁化。

用来描述铁磁性材料在磁化过程中的磁感应强度(B)随磁场强度(H)变化的关系曲线称为磁化曲线,也称 $B-H$ 曲线。见图1-4。

从图中 $B-H$ 曲线看出,经过消磁(去磁)的铁磁材料,当磁感应强度和磁场强度在零的状态开始磁化时,在外磁场较小的情况下(即图中 $H < H_1$ 的区域),材料的磁感应强度(B)随磁场强度增加而增加,但并不显著。随着外磁场继续增大,材料的磁感应强度将急剧增加,如图中 $a_1 a_2$ 段,在这一区域内,材料表现出较高的导磁能力或较低的磁阻,所以通常要求铁磁性材料工作点在 a_2 附近, a_2 点亦称之为工作点。当外磁场继续增大($H > H_2$),铁磁材料中 B 的增长幅度反而减小,如图中 $a_2 a$ 段。当 $H > H_m$ 以后,磁感应强度的

增长幅度就更小,此时磁化达到饱和状态,称为磁饱和。在饱和区域,导磁系数下降,磁阻增大。这就是铁磁材料从原始态开始进行磁化的整个过程,这种曲线称为原始(起始)磁化曲线。

铁磁材料的导磁系数 $\mu = f(H)$ 曲线,在起始阶段和进入饱和后,导磁系数均不大,但在 $H = H_2$ 附近, μ 值达到最大值。由此可见,在磁化过程中,铁磁材料的导磁系数是随磁场强度(H)变化的变量。

4. 磁滞回线及其相关的性能

(1) 磁滞现象与磁滞回线。铁磁材料在外磁场作正负变化的反复磁化过程中,磁感应强度总是滞后于磁场强度的变化。这种现象称为磁滞现象。如果对铁磁材料反复磁化若干循环后,可得到一条近似对称于原点的闭合曲线,称其为磁滞回线,见图1-5。它表征铁磁材料在磁化过程中磁感应强度(B)和磁场强度(H)的变化关系。

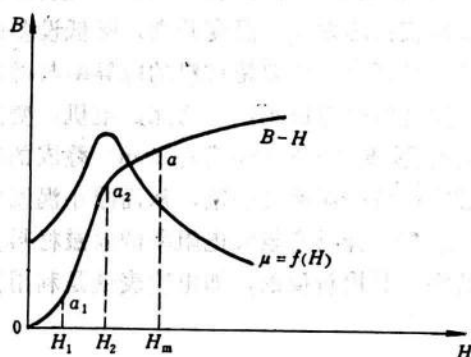


图 1-4 铁磁材料的磁化曲线

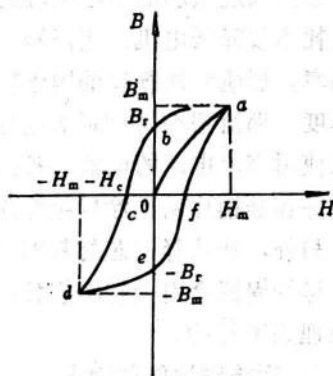


图 1-5 磁滞回线

磁滞回线的形成过程是当对未磁化的铁磁材料施加磁场(H)时,随磁场强度(H)增加,磁感应强度(B)沿着起始磁化曲线 $0a$ 到 a 点,此时磁感应强度达到饱和值 B_m ,再减小 H 时,由于磁感应强度并不是可逆的,故它不沿原始曲线下降,而是沿曲线 ab 变化。在 b 点 $H = 0$,但磁感应强度并没有完全消失($B = 0b$),称之为剩余磁感应强度,简称剩磁,用 B_r 表示。为了消除剩磁,就要加一个反向磁场,当磁场强度反向增加到 $0c$ 时, B 才为零。消磁时所施加的反向磁场强度 $0c$,称为矫顽力,用 H_c 表示。继续增加反向磁场强度至 $-H_m$ 时,可使磁感应强度达到反向饱和点 $-B_m$ 。若把磁场强度再由 $-H_m$ 增至 H_m 时,磁感应强度将沿着 $defa$ 这样的曲线变化,从而形成 $abcdefa$ 的闭合磁滞回线。

不同材料具有不同的磁滞回线,我们可以用磁滞回线形状和面积的差异来直观地表征铁磁性材料的主要磁性能、分类及用途。一般磁滞回线形状特征窄而陡、面积较小的材料属于软磁材料,这类材料的特点是剩磁低矫顽力小,磁导率高,适用于制作性能稳定、效率高的磁性元器件,如硅钢片、电工用纯铁、坡莫合金(铁镍合金)等均属此类。磁滞回线形状较宽,面积较大的一类材料,属于硬磁材料,也称永磁材料。硬磁材料的特点是剩磁和矫顽力较大,磁能积($B \cdot H$)也大、剩磁不易消失,因此,这类材料适宜制作永磁体,如碳钢、钨钢、钴钢及镍钴合金等。形状接近矩形的一类材料为矩磁材料。由于矩磁材料具有很高的剩磁,因而适宜用作电子计算机存储器的磁芯,即记忆元件。

(2) 铁损。铁磁材料在反复磁化的过程中需要消耗一定的能量, 我们把单位重量的磁性材料在交变磁场中磁化时所损耗的功率称为铁芯损耗, 简称铁损, 单位为瓦/千克(W/kg)。它包括磁滞损耗和涡流损耗。

磁滞损耗是指铁磁材料在交变磁化过程中磁畴翻转的不可逆性而形成的, 并以热的形式表现出来的能量消耗。磁滞损耗的大小受交变磁化的频率、铁芯的体积和磁滞回线所包围的面积的影响。由于磁滞回线的面积、与铁磁材料的性质有关, 而对于一定的铁磁材料, 磁滞回线的面积显然又与磁感应强度最大值(B_m)有关。可见, 磁滞损耗与铁磁材料的体积成正比, 并与磁感应强度的最大值以及交变频率有关。实践证明, 正常运行中的交流电机、变压器及其它电器, 磁滞损耗比涡流损耗大2~3倍。因此, 为了减少磁滞损耗, 应尽量选择磁滞回线形状狭窄的软磁材料, 例如硅钢片、坡莫合金等。

涡流损耗是由于存在交变电流, 使铁芯内产生感应电动势, 形成感应电流, 感应电流在铁芯内围绕铁芯的中心呈旋涡状流动而引起的。涡流在铁芯中流动也要引起功率损耗。涡流损耗不仅降低电机、变压器以及电器的效率, 而且使铁芯发热、温度升高, 降低设备的利用率。影响涡流损耗的因素较多, 但从材料学的角度而言, 主要是材料的电导率与材料的厚度。涡流损耗与材料的电导率成正比, 与材料厚度的平方成正比。为此, 电机, 变压器及使用交流电源的电器, 都采用薄硅钢片(一般的厚度为0.35mm或0.5mm)叠成的铁芯, 并在硅钢片两面涂以绝缘漆, 这样可以使铁芯中产生的涡流被分割, 从而减小涡流损耗。另外, 在选择铁芯材料时, 为使涡流进一步削弱, 应选择具有较大电阻率的软磁材料。

尽管涡流会引起功率损耗, 但在某些场合也是很有利用价值的, 如电度表就是利用涡流原理来工作的。

5. 影响磁性能的因素

材料成份、加工方法、热处理方式及切割方向等都是影响铁磁性材料磁性能的因素。但在实际应用中考虑的重点因素是温度。铁磁性材料的磁性能同温度的关系十分密切, 它们之间的函数关系为

$$B_r = f(T)$$

$$H_c = f(T)$$

温度对磁性能的影响见图1-6。

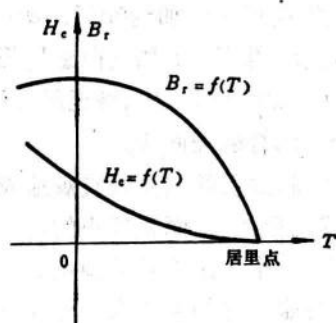


图 1-6 温度对磁性能的影响

从图中可以看出, 剩磁(B_r)与矫顽力(H_c)随温度的增高而降低, 在温度升至居里温度点时, 其铁磁性能全部消失, 这时材料呈顺磁性。例如铁氧体永磁材料处在450℃(居里点)以上温度时, 将失去磁性能而表现为顺磁性。

四、电工材料的化学性能

电工材料的化学性能主要包括耐腐蚀性、抗老化性和耐油性等。

1. 耐腐蚀性

电工材料的腐蚀是指电工材料因受周围环境介质的侵蚀作用时而破坏的现象。使用中的电工材料被腐蚀之后会使其电性能下降, 绝缘能力减弱, 机械性能降低, 对设备和人员的不安全因素增加和使用寿命缩短。电工材料抵抗各

种介质（大气、水蒸汽、有害气体、酸、碱、盐等）侵蚀的能力称为电工材料的耐腐蚀性。

从电工材料遭受腐蚀的情况来看，主要是用作导体的金属或合金与周围环境介质发生化学及电化学反应所致。因此，在选择导体材料或材料来制造电气设备的元器件时，应从材料本身的耐腐蚀能力、结构设计和外加保护性覆盖层等方面采取措施，以防止腐蚀现象的发生。如在常用导体材料金属铜、铝等表面，镀上一层锡、铅或锡铅合金，就可以形成有效的防腐蚀覆盖层。

2. 抗老化性

抗老化性是绝缘材料的一项耐久性指标，是指绝缘材料在使用过程中，抵抗由于受热、电、光、大气、机械和化学等因素的作用而遭受破坏的能力。

绝缘材料在运输、保管、使用过程中，都不可避免地要产生一系列缓慢的、不可逆的物理化学变化，从而导致绝缘材料的性能下降。例如电缆外护套的发粘、变脆、开裂，各种绝缘漆膜的发脆、龟裂、脱落，在各种电器用油中形成的氧化物等都是老化的结果。

根据绝缘材料老化发生的条件不同，可分为热老化和电老化两种。

热老化是指在短时间内温度升高或在长期高温作用下，绝缘材料或绝缘体发生缓慢或急剧的化学变化。促使这种老化的因素是温度和氧气。

电老化是指在高电场作用下，因局部放电产生电离，造成的绝缘材料急速老化变质现象。

老化会造成绝缘材料的报废，因此要求绝缘材料应具有一定的抗老化性。提高绝缘材料的抗老化能力，应立足于材料性能的改善，加强储运和使用中的管理（主要是改善环境和使用条件）以及采取保护覆盖层等。

3. 耐油性

耐油性是指电工材料承受各种油脂侵蚀的能力。电工材料在使用中经常要和各种油脂类物质相接触。在油脂的作用下很容易发生侵蚀性化学变化，致使这些材料的电性能和机械性能降低，提前失去作用而报废。因此，在选用油脂类液体绝缘材料时，应考虑它对固体介质的侵蚀性，在性能上应做到互不抵触。

五、电工材料的热性能

电工材料在温度升高的情况下会发生一定程度的物理、化学变化。为保证在一定温度范围内，电工材料的使用性能不发生过大的劣化，要求电工材料具有一定的热性能。它包括耐热性、热稳定性、熔点、软化点、粘度和导热性等。

1. 耐热性与耐热等级

使用中的电工材料，导电材料是属放热性的，这是因为所有的导体都有一定的电阻，在通电时都要发热，温度都要升高。绝缘材料属载热、散热性材料，这是因为绝缘材料是包覆于导电材料的外层，用来吸收、散发导电材料在工作中产生的热量，因此，电工材料的耐热性主要是指绝缘材料承受高温作用的能力。通常为了提高电气设备的容量，除选用耐高温的绝缘材料和加强通风散热外，还可通过增大导体截面积减小导体电阻的方法来限制导体过分发热。

耐热等级是为了保证电工材料安全、长久、可靠地工作而规定的最高允许工作温度的级别。耐热等级的划分及各级的极限工作温度见表1-4。

在一般电机、电器技术规定中，有时直接在铭牌中规定耐热等级，有时则规定最高允

表 1-4 耐 热 等 级 表

耐热等级	极限工作温度 (℃)	耐热等级	极限工作温度 (℃)
Y	90	F	155
A	105	H	180
E	120	C	>180
B	130		

许温升。允许温升就是根据耐热等级规定的最高允许工作温度与标准环境温度 (40℃) 的差值。

2. 热稳定性和导热性

热稳定性是指电工材料在温度反复变化的情况下, 不改变其理化、机械性能和电性能的能力。这个性能与材料本身的热膨胀系数有很大关系。热膨胀系数大的材料, 因膨胀或收缩会使材料开裂破碎而失去正常工作能力。热稳定性对于户外工作或温度变化频繁的电气设备材料具有重要意义。

导热性表示绝缘材料的热传导能力, 它是指在相距 1cm、温差为 1k 的横断面 (1cm²) 轴向上, 于 1s 内所传导的热量, 其单位为 W/cm²·k。它对材料的热击穿及热稳定性等影响很大, 在电机、电器的设计中有很重要的意义。

六、电工材料的力学性质

电工材料在使用中都要承受一种或几种形式的机械负荷, 如拉伸、压缩、扭曲、弯折、震动等, 因此, 要求电工材料本身要具有一定的力学性质。电工材料的力学性质主要包括硬度和强度。强度又包括抗切强度、抗张强度、抗拉强度和抗劈强度等。

思 考 题

1. 什么是电阻、电阻率? 温度对电阻有何影响?
2. 电介质的电流组成与时间有何关系?
3. 何为绝缘电阻? 用什么来表示? 影响绝缘电阻的因素有哪些?
4. 何为介电系数、介质损耗角正切、击穿强度、耐电弧性? 它们分别用什么指标表示?
5. 何为磁场、磁通与磁场强度?
6. 简述铁磁材料的磁化过程?
7. 简述磁滞回线的形成过程, 并解释有关概念?
8. 何为铁损? 有何利弊?
9. 电工材料为什么要有耐热性的要求? 是怎样划分耐热等级的?