

电子技术培训教材

铁氧体工艺

电子元器件专业技术培训教材编写组



电子工业出版社

内 容 简 介

本书从工艺过程、操作方法及有关设备的基础知识等方面对铁氧体生产工艺作了较全面的讲解,是铁氧体生产工艺的初级教材。

全书共分七章,第一章为绪论,第二章讨论原材料的性质及其选择,第三、四、五、六章分别介绍多晶铁氧体产品的制造工艺,第七章对单晶及薄膜铁氧体工艺作了一般性介绍。各章后附有小结和思考题,可供复习和自我考查。

本书文字通俗,内容均结合具体的生产工艺,简明易懂,适合于具有初中文化水平和有一定生产实践经验的读者,可作为技术工人进修培训教材和职业中学教材,也可供有关设计和工艺技术人员阅读参考。

铁 氧 体 工 艺

电子元器件专业技术培训教材编写组

责任编辑:宋玉升

*

电子工业出版社出版发行 (北京市万寿路)

山东电子工业印刷厂印刷

*

1984年2月 第1版 开本: 787×1092 1/32

1984年9月第1次印刷 印张: 6.8

印数: 5700册 字数: 151千字

统一书号: 15290·23

定价: 1.05元

出版说明

为了更好地落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，提高电子工业职工技术素质，按照电子工业部的统一分工，参照部颁《电子工业元器件、机电组件、电表专业工人初级技术理论教学计划、教学大纲》，并考虑到企业管理现代化对管理干部的要求，由电子工业部元器件工业管理局组织有关单位编写了《磁学知识》、《铁氧体工艺》、《永磁合金工艺》、《磁性材料及器件测量》、《实用电子陶瓷》（上、下册）、《电阻器与电位器》、《微电机原理及工艺》（上、下册）、《电声器件》、《电子敏感元件》、《继电器技术基础》、《接插件工艺学》、《电容器》、《压电石英晶体及元器件》、《化学电源》（上、下册）和《物理电源》共十八册专业技术培训统编教材。这套教材可作为电子工业工人的技术培训和管理人员的业务进修用书，也可作为技工学校、职工高中的教材和中等专业学校的参考书。

这套教材由董元昌、王乃增、陈兴信、刘联宝、杨臣华、张熙、池玉清、展发祥、张志远、丁光未、焦桐顺、王志昌等同志组成编委会，负责组稿和技术协调。董元昌同志任主任，王乃增、张志远、丁光未同志任副主任。在编写过程中，我们力求在内容上适合电子工业职工技术培训的需要，文字叙述上简明扼要，通俗易懂。但由于电子元件和机电组件门类杂，专业多，涉及科学技术知识十分广泛，加之时间仓促，书中难免有不足之处，恳切希望广大读者提出宝贵意见。

《铁氧体工艺》一书由孙亦栋同志担任主编，岳崇亭、俞秉成、涂学体同志参加编写工作。本书由高长生、石德亮同志审稿。898厂的王根福、杨新春、顾建成对初稿提出了宝贵意见，南京大学翟宏如教授对本书的初稿提出过指导性意见，在此一并表示感谢。

电子工业部元器件工业管理局
技术培训教材编委会
一九八四年三月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 铁氧体概述	1
一、铁氧体的特性	2
二、铁氧体材料的缺点	3
三、铁氧体材料的分类	4
第二节 铁氧体生产工艺	6
一、铁氧体生产工艺概述	6
二、铁氧体生产工艺的特点	9
第二章 铁氧体所用的原材料	11
第一节 铁氧体常用原料	11
一、主要原料	11
二、添加剂	16
三、助熔剂	19
四、添加剂和助熔剂的使用	21
第二节 原料的化学特性	22
一、原料的纯度	22
二、原料的含水量	25
三、原料的化学活性	25
第三节 原料的粉末特性	26
一、粉末颗粒与粉末体	26
二、粉末颗粒的形状	26
三、粒度与粒度分布	27
四、粉末的比表面积	29
第四节 粉末的工艺特性	30

一、粉末的松装比重和摇实比重	31
二、粉末的流动性	32
三、粉末的压制特性	32
第五节 原料性能的测量	33
一、原料的化学分析	33
二、原料活性的测量比较	33
三、粉末粒度的测量	35
四、粉末比表面积的测量	38
五、粉末流动性的测量	39
第六节 辅助材料	40
一、弥散剂	40
二、铁氧体生产用水	41
三、粘合剂	43
第七节 原料的选择	45
一、适当的纯度和化学活性	45
二、合适的粉末特性和工艺特性	47
三、选择原料的其他依据	47
小 结	48
思 考 题	50
第三章 成型用料的制备	52
第一节 概 述	52
一、制粉、造粒工艺流程(干法)	52
二、湿法生产工艺流程	55
第二节 配 料	55
一、配方的换算	56
二、原料投放量的计算	58
三、原料的分析处理和准确称量	59
第三节 混 合	60
一、混合工艺的目的和要求	61

二、影响化学均匀性的因素	62
第四节 滚动式球磨机	64
一、滚动式球磨机的构造	64
二、球磨机的转速	64
三、球磨筒内钢球的组成	65
四、球磨筒的装填系数	66
五、球磨机的清洁处理	66
第五节 预 烧	67
一、预烧的目的和作用	67
二、预烧温度与保温时间	68
三、预烧设备与预烧方式	70
第六节 预烧坯料的粉碎和研磨	72
一、二次球磨的作用和工艺要求	72
二、二次球磨的工艺特点	72
三、二次球磨设备	73
第七节 化学共沉淀法	75
一、概 述	75
二、分 类	75
三、特 点	76
第八节 造粒工艺	76
一、机械造粒	76
二、喷雾干燥造粒	77
三、热压铸成型料浆的制备	78
小 结	79
思 考 题	80
第四章 成 型	81
第一节 干压成型	81
一、干压成型对粒料的工艺要求	81
二、干压成型的成型密度	83

三、压床和模具	85
四、干压成型坯件的质量问题	90
第二节 湿压磁场成型	93
一、湿压磁场成型原理	93
二、湿压磁场成型用压机和模具	95
三、湿压磁场成型的质量问题	95
四、各向异性永磁铁氧体的其他成型方法	97
第三节 热压铸成型	99
一、热压铸机和模具	100
二、热压铸坯件的质量问题	101
第四节 挤压成型	102
一、坯泥的炼制	102
二、挤压成型	102
第五节 其他成型方法	104
一、注浆成型	104
二、等静压成型	106
三、塑料永磁成型工艺	108
四、轧带冲压成型	103
第六节 成型方法的选择	109
一、成型方法选择原则	110
二、成型方法与产品形状	111
三、常用成型方法比较	113
小 结	113
思 考 题	114
第五章 烧 结	115
第一节 烧结前对坯件的处理	115
一、坯件干燥处理	115
二、坯件“毛刺”处理和“倒角”	116
三、装 盒	117

四、排 蜡	118
第二节 烧结过程和固相反应	120
一、烧结过程概述	120
二、固相反应	123
第三节 烧结过程的化学变化	126
一、平衡气氛	126
二、几种铁氧体烧结时的化学反应	128
第四节 降温过程的热处理工艺	131
一、含锰铁氧体的降温	131
二、某些铁氧体的低温热处理	134
第五节 烧结过程的质量问题	136
一、烧结条件对磁性能的影响	136
二、其他质量问题	138
第六节 烧结设备	140
一、高温窑炉	140
二、耐火材料	147
第七节 高温的获得与测量	148
一、发热体	148
二、温度的测量	153
第八节 热压烧结	156
一、热压烧结的优越性	156
二、热压机理	157
三、起压温度和热压方式的选择	158
小 结	159
思 考 题	160
第六章 铁氧体的加工、涂复、检测与包装	162
第一节 铁氧体的加工	162
一、铁氧体产品的几种加工方法	162
二、铁氧体磨削加工的目的	163

三、磨削加工设备	163
四、砂轮的选择	164
五、金刚石砂轮	164
第二节 铁氧体的磨削加工工艺	166
一、平面磨削加工	166
二、双端面磨削加工	168
三、外圆磨削加工	170
四、磁芯螺纹的磨削加工	171
五、成型面的磨削加工	171
六、金刚石砂轮加工铁氧体	172
第三节 铁氧体的研磨加工	173
第四节 铁氧体的抛光	174
一、机械抛光	174
二、化学抛光	175
第五节 铁氧体产品的余复、检测与包装	176
一、产品的余复	176
二、产品的检测	178
三、产品的包装	180
小 结	181
思 考 题	182
第七章 单晶与薄膜铁氧体制造工艺	184
第一节 单晶的成长过程	184
一、尽量减少结晶中心个数	185
二、控制单晶生长速度	186
第二节 单晶铁氧体制备方法	187
一、熔融法	187
二、助熔剂熔融法	188
三、其他制备方法	191
第三节 薄膜铁氧体的制造	194

一、真空蒸镀·····	159
二、化学气相沉积·····	195
三、液相外延法·····	196
四、电弧-等离子喷涂·····	196
小 结 ·····	197
思 考 题 ·····	197
附 录	

- 附录 1 元素周期表(长式)
- 附录 2 常用金属氧化物原料
- 附录 3 常用盐类原料
- 附录 4 常用助熔剂和添加剂
- 附录 5 分样筛孔径目数对照表
- 附录 6 测温三角锥编号和热电偶的
电动势的温度对照表

第一章 绪 论

铁氧体是一种以氧化铁为主要成分的非金属磁性材料。自本世纪四十年代以来，铁氧体以其独特的良好性能和广泛用途，受到了相当的重视，发展极其迅速。

第一节 铁氧体概述

铁氧体又称铁淦氧磁体，其制造工艺、机械特性与陶瓷材料类似，是一种磁性陶瓷材料，习惯上也叫做黑色陶瓷或磁性瓷。

按照晶体结构，铁氧体主要分三种类型：尖晶石型、石榴石型和磁铅石型。

尖晶石型铁氧体

凡是晶体结构与天然镁铝尖晶石 ($MgAl_2O_4$) 相似的铁氧体，均称为尖晶石型铁氧体。尖晶石型铁氧体的晶体结构属于立方晶系，其化学分子式可用 MFe_2O_4 表示，其中 M 代表离子半径与二价铁离子 Fe^{2+} 相近的二价金属离子（如 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Co^{2+} 等）或平均化合价为二价的金属离子组（如 $Li_0^{+1.5}Fe_{1.5}^{+3.5}$ ）。主要成分为四氧化三铁 (Fe_3O_4) 的磁铁矿是天然的尖晶石铁氧体，化学分子式可写成 $FeFe_2O_4$ 的形式。

1909年以来，用人工的方法合成了多种尖晶石型铁氧体，习惯上用 M 所代表的金属名称命名。如 $MnFe_2O_4$ 称为锰铁

氧体。M代表一种金属的,称为单组分尖晶石型铁氧体或简单铁氧体;M代表两种以上金属组合的,称为多组分尖晶石型铁氧体或复合铁氧体,如常见的锰锌铁氧体($Mn-ZnFe_2O_4$),镍锌铁氧体($Ni-ZnFe_2O_4$)和锰镁锌铁氧体($Mn-Mg-ZnFe_2O_4$)等。

软磁铁氧体、矩磁铁氧体、压磁铁氧体和旋磁铁氧体的一部分属尖晶石型铁氧体。

石榴石型铁氧体

1956年问世的石榴石型铁氧体又称磁性石榴石,是与天然石榴石($Fe,Mn)_3Al_2(SiO_4)_3$ 有类似晶体结构的铁氧体。钇铁石榴石($Y_3Fe_5O_{12}$)是这类铁氧体的代表,通常用 YIG 表示。

石榴石型铁氧体属于立方晶系,是性能良好的微波材料。化学分子式写成 $M_3Fe_5O_{12}$ 的形式,其中 Mi 表示钇(Y)或其他三价稀土金属离子(如 Sm^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Ho^{3+})等。

磁铅石型铁氧体

磁铅石型铁氧体出现于 1933 年,这类铁氧体与天然磁铅石 $Pb(Fe_{7.5}Mn_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5})O_{19}$ 有类似的晶体结构,属于六角晶系。1952 年制成的分子式为 $MFe_{12}O_{19}$ (M为二价金属离子,如 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Pb^{2+} 等)的磁铅石铁氧体,称为 M 型磁铅石材料,是产量很大的永磁铁氧体材料。此外,还有五种结构类似的六角晶系铁氧体,分别称为 W、X、Y、Z 和 U 型材料。

一、铁氧体的特性

与金属磁性材料相比,铁氧体有其截然不同的性质。

1. 在导电性能方面铁氧体属于半导体范畴,其电阻率为 $10^{-2}—10^{11}$ 欧姆厘米,较金属磁性材料的电阻率($10^{-6}—10^{-4}$ 欧姆厘米)高得多。

2. 铁氧体又是一种具有高介电性能的磁性材料,某些铁氧体材料的低频电容率高达 $10^3—10^5$ 。

3. 铁氧体在高频时具有较高的磁导率,这是包括坡莫合金在内的一些金属磁性材料无法比拟的。

由于上述这些特性,在高频应用场合下,铁氧体比金属磁性材料有着十分显著的优越性。在交变磁场作用下工作,铁氧体具有低涡流损耗的优异性能,不需要象金属磁性材料那样叠片使用。在微波频率下,由于严重的涡流效应和趋肤效应,金属磁性材料已经无法工作,而铁氧体材料却可以制成性能良好的微波器件。事实上,铁氧体的出现,在一定程度上改变了微波技术的面貌。

二、铁氧体材料的缺点

与金属磁性材料相比,铁氧体磁性材料也有其不容忽视的缺点。

1. 铁氧体材料的饱和磁化强度偏低,一般只有纯铁的五分之一到三分之一。就是说,铁氧体单位体积中贮存的磁能较低,因而限制了铁氧体材料在需要高磁能密度场合下的应用。在发电机、电动机和输电变压器等大功率电力设备中,仍需采用金属磁性材料,难于用铁氧体材料取代之。

2. 铁氧体磁性材料的居里温度较低,其磁性的温度稳定性一般不及金属磁性材料好。

三、铁氧体材料的分类

根据特性和应用，铁氧体材料主要分为五大类：

（一）软磁铁氧体

软磁材料是易磁化也易退磁的磁性材料，一般用于弱磁场下。软磁铁氧体的典型代表是锰锌铁氧体和镍锌铁氧体。

软磁铁氧体主要用作各种电感元件，是目前各种铁氧体材料中用途较广、产量较大的一种铁氧体材料。

一般软磁铁氧体都是尖晶石型的，应用于音频至甚高频频段（1千赫—300兆赫）。磁铅石型的Y型和Z型软磁材料的应用频率上限却高得多。

（二）永磁铁氧体

永磁材料磁化后不易退磁，能够长时间保留其磁性，其典型代表为钡铁氧体和锶钙铁氧体，是性能较好的永磁材料。

永磁铁氧体可以用作电讯器件、小型电机及磁分离机的永久磁铁，在污染处理、医学、生物学、印刷和家用电器等方面也被广泛应用。

永磁铁氧体的出现，不仅节约了镍、钴等大量稀贵金属而且为永磁材料在高频段的应用开辟了新的途径。

（三）旋磁铁氧体

旋磁性是铁磁材料的共性，这种旋磁性在甚高频及至微波频率下才明显表现出来，而在这样高的频率下，金属磁性材料已无法应用，只有铁氧体才能得到有效的应用。

旋磁性的应用频率范围为100—100000兆赫（米波到毫米波范围），因而铁氧体旋磁材料也称为微波铁氧体。常用的微波铁氧体有镁锰铁氧体、镍锌铁氧体、锂系铁氧体、钇铁石榴石铁氧体和钙钒系石榴石铁氧体。

旋磁铁氧体大都用来制造微波器件，在雷达、通讯、导航、遥测、遥控等方面都有应用。

(四) 矩磁铁氧体

具有矩形磁滞回线的软磁铁氧体又称为矩磁铁氧体，最常用的矩磁材料有锂锰铁氧体和镁锰铁氧体。

这类材料主要用作各种类型电子计算机的存储器磁芯，在自动控制、雷达导航、宇宙航行、信息显示等方面也得到广泛应用。

(五) 压磁铁氧体

应用磁滞伸缩特性的铁氧体称为压磁铁氧体。目前应用最多的是镍锌铁氧体、镍铜铁氧体和镍镁铁氧体。

压磁材料主要用于电磁能与机械能相互转换的器件，如水声器件、超声器件、磁声器件等。

压磁材料和压电材料具有几乎相同的应用领域，压磁材料适用于较低频率范围，但可承受较大功率；而压电材料的承受功率较小，但适用频率较高。

铁氧体的分类及其用途列表如下：

表1-1 各类铁氧体的特性及用途

类	代表性铁氧体	晶系	结构	主要特性	频率范围	应 用
软	锰锌铁氧体	立	尖	高 μ_i , Q , B_s	1kHz—	多路通讯及电视用的各种磁芯和录音、录象磁头
			晶	低 α , D	5MHz	
磁	镍锌铁氧体	方	石	高 Q , f_r , ρ	1kHz—	多路通讯用电感器、滤波器、磁性天线和记录磁头
			型	低 $\tan\delta$	300MHz	
	甚高频铁氧体	六角	磁铅石型	高 Q , J , 低 $\tan\delta$	300MHz— 1000MHz	多路通讯及电视用各种磁芯

续表1-1 各类铁氧体的特性及用途

水 磁	钼铁氧体 钨铁氧体	六角	尖晶石型	高 μH_c 、 (BH) _{max}	1kHz— 20kHz	微音器、拾音器、 电话机、各种电子 器件及各种仪表中 控制器件的磁芯
矩 磁	铁锰铝系铁氧体 镍系铁氧体 钾系铁氧体	立方	尖晶石型	ΔH 较大	500MHz— 100000MHz	雷达、通讯、导航、
磁	钒铁石榴石 氧体	立方	石榴石型	ΔH 较小	100MHz— 10000MHz	通讯、遥控等设
	银铁氧体	六角	磁铅石型		毫米波、 厘米波	各中的微波器件中
矩 磁	铁锰铁氧体 锂锰铁氧体	立方	尖晶石型	高 α 、 R_s 低 r 、 S_w	300kHz— 1MHz	电子计算机存储器 磁芯
压 磁	镍锌铁氧体 镍铜铁氧体	立方	石榴石型	高 α 、 K_r Q 耐蚀性好	~ 100 kHz	超声、水声器件以 及电讯、自控磁声 和计量器件

注：表中特性参数定义参见《磁学知识》（电子工业出版社1984年版）

第二节 铁氧体生产工艺

一、铁氧体生产工艺概述

多晶铁氧体（以下简称为铁氧体）的生产工艺一般包括四道主要工序：成型用料的制备、坯件成型、坯件烧结和产品加工。但是，尽管主要工序只有四道，辅助工序却相当复杂。

目前普遍采用的铁氧体生产方法有三种，它们的工艺流