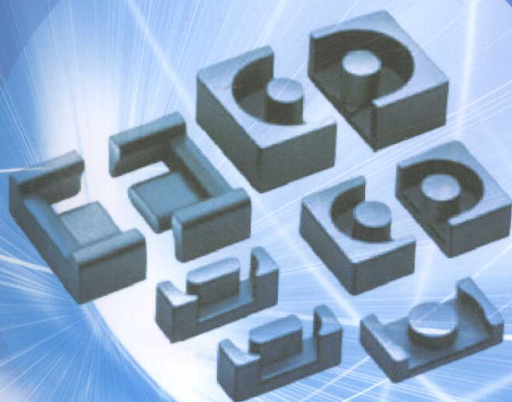
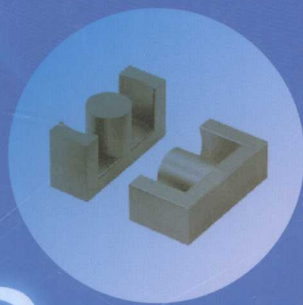
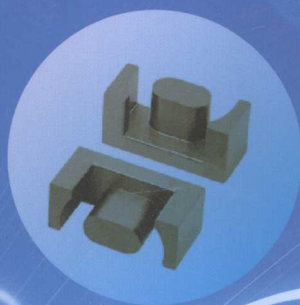


王自敏 编著

# 软磁铁氧体生产工艺 与控制技术



化学工业出版社

013069934

TM277  
09

# 软磁铁氧体生产工艺 与控制技术

王自敏 编著



责任编辑：王自敏

责任编辑：王自敏  
封面设计：吴

地址：北京市海淀区中关村大街22号 邮编：100083

北京航空航天大学出版社

北京市中关村大街22号

ISBN 7-5303-1118-1 定价：29.00元

电话：010-84518888 (传真：010-84518883)

网址：<http://www.cip.com.cn>



化学工业出版社

定价：29.00元

ISBN 7-5303-1118-1



北航

C1677962

13082334

图书在版编目 (CIP) 数据

软磁铁氧体生产工艺与控制技术/王自敏编著. —北京:  
化学工业出版社, 2013. 8  
ISBN 978-7-122-17921-0

I. ①软… II. ①王… III. ①软磁材料-铁氧体-生产工艺  
IV. ①TM277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 151216 号

著者 王自敏



---

责任编辑: 刘丽宏  
责任校对: 吴 静

装帧设计: 刘丽华

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 547 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。



---

定 价: 59.00 元

· 京 北 ·

版权所有 违者必究

近年来,伴随通信、网络、家电、计算机、汽车电子、抗电磁干扰技术、雷达、导航及工业自动化等电子产品市场的强劲需求,软磁铁氧体的发展势头迅猛,我国现已成为全球最大的软磁铁氧体生产基地,但却不是软磁铁氧体研发、生产和应用的强国,其产品的性能参数和性价比,与发达国家相比,差距还很明显,其重要原因之一是本行业的高技能型人才极度缺乏,培养缓慢而流失严重,尤其是在人才培养方面国内目前还没有适合该行业高技能型人才培养所需的教材,本书的编写,填补了国内这方面图书的空白。

本书立足于软磁铁氧体的大生产技术,从软磁铁氧体的基本特性及其化学组成与晶体结构出发,对其常用原辅材料及其控制要点、常用软磁铁氧体的实用配方、预烧与固相反应、备料与造粒技术、成型与气氛烧结、磨加工与产品检测等生产环节的工艺与控制技术,按材料的不同要求与特性,进行了较系统的介绍,并对各生产工序中出现的常见质量问题及其解决措施,进行了较为系统的阐述。本书具有如下特色:

第一,基本原理与软磁铁氧体大生产的实际案例相结合。

第二,先进技术与大生产相结合,介绍了目前软磁铁氧体材料行业国内、国际先进的大生产工艺控制技术。

第三,重视解决软磁铁氧体大生产过程中出现的实际问题。

第四,基于软磁铁氧体系统化的生产过程,组织本教材的编写内容。以生产工序为章节,按材料的不同要求与特性对各工序作了对比介绍,对生产中常见的质量问题及其解决措施,进行了较为系统的阐述,实用性强。

本书图文并茂,文字通俗易懂,对于从事软磁铁氧体材料及元件的教学、生产、研究的人员具有良好的参考作用。相信对该行业高技能型人才的培养、大生产工艺技术问题的探索、行业技术进步的推动等具有重要而实际的价值。

电子科技大学教授 兰中文

随着数字电视机、笔记本电脑的普及，以及调制解调器、宽带变压器、监视器、程控交换机、网络、通信、雷达、导航、汽车电子等需求的快速增长，软磁铁氧体的生产，近年来持续以超过 8% 的速度增长。我国现已成为全球最大的软磁铁氧体生产基地。为了适应我国软磁铁氧体行业快速发展的形式要求，培养更多行业生产方面的实用性技术人才，我们编写了《软磁铁氧体生产工艺与控制技术》一书。

本书对软磁铁氧体的工艺原理、工艺过程、操作方法以及有关工艺设备的基础知识等，进行了较详细的阐述。全书共分 12 章，内容包括软磁铁氧体的化学组成及其基本特性，常用原料及其控制要点，低、中、高磁导率 MnZn 铁氧体、各类常用 MnZn 功率铁氧体、各类常用 NiZn、MgZn、LiZn 铁氧体的主、辅实用配方，软磁铁氧体的备料、成型、烧结、磨加工、产品检测等生产环节的工艺与控制技术。

本书介绍了软磁铁氧体材料目前国内、国际较先进的大生产工艺控制技术，并将软磁铁氧体的工艺原理与大量的生产实际案例有机结合，注重解决大生产的实际问题，文字通俗，简明易懂，可以作为高职高专电子材料与元器件专业的教材或磁性材料行业专业技术员的参考书。

由于软磁铁氧体材料与元器件涉及面广，且发展十分迅速，加之编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

文中兰、魏楚学、刘群、李宇

# 目录

## 1

### 第1章

#### 认识软磁铁氧体

- 1.1 磁性材料及其分类 ..... 1
- 1.2 金属软磁材料与软磁铁氧体材料 ..... 1
- 1.3 软磁铁氧体的发展史 ..... 2
- 1.4 软磁铁氧体的分类与产品名称的识别 ..... 4
  - 1.4.1 软磁铁氧体的分类 ..... 4
  - 1.4.2 软磁铁氧体产品名称的识别 ..... 5
- 1.5 软磁铁氧体材料的应用 ..... 7
- 1.6 软磁铁氧体的制造方法 ..... 8
  - 1.6.1 氧化物法 ..... 8
  - 1.6.2 化学共沉淀法 ..... 9
  - 1.6.3 软磁铁氧体的其他制备方法 ..... 10
- 1.7 软磁铁氧体材料的发展方向 ..... 12

## 2

### 第2章

#### 软磁铁氧体的化学组成与晶体结构

- 2.1 软磁铁氧体的化学组成 ..... 14
  - 2.1.1 单组分铁氧体 ..... 14
  - 2.1.2 复合铁氧体 ..... 16
- 2.2 铁氧体的晶体化学 ..... 17
  - 2.2.1 铁氧体晶体中的化学键 ..... 17
  - 2.2.2 球体密堆原理和鲍林规则 ..... 18
  - 2.2.3 尖晶石型铁氧体晶体中的晶格常数及氧参数 ..... 20
  - 2.2.4 尖晶石铁氧体晶体中离子置换的摩尔比条件 ..... 22
- 2.3 软磁铁氧体的晶体结构类型 ..... 22
- 2.4 尖晶石型铁氧体的晶体结构 ..... 23

2.5	尖晶石型铁氧体中金属离子分布规律及影响因素	25
2.6	磁铅石型晶体结构与平面六角晶系铁氧体	27
2.7	软磁铁氧体的微观结构与性能的关系	29

### 3

## 第3章

### 软磁铁氧体的基本特性

3.1	铁氧体的磁性来源及亚铁磁性	31
3.2	磁畴和磁畴壁	33
3.3	尖晶石型铁氧体的磁性	34
3.4	决定软磁铁氧体基本磁性的主要因素	35
3.5	软磁铁氧体主要的内禀磁性	35
3.6	软磁铁氧体的磁化特性	38
3.7	影响起始磁导率的主要因素及其改善途径	45
3.8	软磁铁氧体的频率特性	48
3.9	软磁铁氧体的截止频率及其改善途径	51
3.10	软磁铁氧体材料的磁损耗	53
3.11	降低磁损耗的方法	56
3.12	软磁铁氧体材料的稳定性	59
3.13	软磁铁氧体的电学性能	68
3.14	软磁铁氧体的其他物理性能	68

### 4

## 第4章

### 软磁铁氧体的常用原材料及其控制

4.1	软磁铁氧体用主要原料	70
4.2	添加剂与助熔剂	77
4.3	辅助材料	78
4.4	原料的选择	80

### 5

## 第5章

### 常用软磁铁氧体的配方

5.1	MnZn 铁氧体的配方	83
5.1.1	认识 MnZn 铁氧体	83
5.1.2	MnZn 系固溶体范围及 MnZn 铁氧体的最优配方点	85
5.1.3	低 $\mu_i$ MnZn 铁氧体材料及其配方	86
5.1.4	高起始磁导率材料	89
5.1.5	高起始磁导率 MnZn 铁氧体的配方	90
5.1.6	MnZn 功率铁氧体材料	98

5.1.7	MnZn 功率铁氧体材料的配方	99
5.1.8	低损耗高稳定性 MnZn 铁氧体材料的配方	113
5.1.9	双高材料	114
5.1.10	高 $B_s$ 、低损耗、高 $T_C$ 的 MnZn 铁氧体材料	115
<b>5.2</b>	<b>NiZn 铁氧体的配方</b>	<b>116</b>
5.2.1	认识 NiZn 铁氧体	116
5.2.2	NiZn 铁氧体的主配方与常用添加剂	119
5.2.3	高频 NiZn 铁氧体的主配方	123
5.2.4	高 $\mu_i$ NiZn 铁氧体的主配方	123
5.2.5	高饱和和磁感应强度 (大功率) 的 NiZn 铁氧体的主配方	123
5.2.6	低温度系数、低损耗和高饱和磁通密度 NiZn 铁氧体材料	124
5.2.7	高清晰度偏转铁氧体材料用 NiZn 铁氧体	125
<b>5.3</b>	<b>MgZn 铁氧体的配方设计</b>	<b>127</b>
5.3.1	认识 MgZn 铁氧体	127
5.3.2	MgZn 铁氧体的主配方及其常用添加剂	130
5.3.3	常见 MgZn 系铁氧体的配方	131
<b>5.4</b>	<b>LiZn 铁氧体的配方设计</b>	<b>134</b>
5.4.1	认识 LiZn 软磁铁氧体	134
5.4.2	LiZn 铁氧体的主配方及其常用添加剂	135

## 6

### 第6章

#### 原料的配料与混合

6.1	主配方的计算	138
6.2	原料的分析处理与配料	139
6.3	混合	140
6.4	混合料的化学均匀性	144
6.5	NiZn 铁氧体原料的混合及其一次造粒	145
6.6	LiZn 铁氧体的混料工艺	146
6.7	平均粒度测定仪的校准与测试	147
6.8	黏度的测量	149

## 7

### 第7章

#### 软磁铁氧体预烧工艺与控制

7.1	预烧目的与作用	151
7.2	固相反应	152
7.3	固相反应的影响因素	154
7.4	预烧工艺	156
7.4.1	预烧的三个阶段	156
7.4.2	MnZn 铁氧体的预烧	157



7.4.3	NiZn 铁氧体的预烧和氧化锌的异常膨胀	158
7.4.4	MgZn 铁氧体与 LiZn 铁氧体的预烧	158
<b>7.5</b>	磁化度的影响因素及其控制	159
<b>7.6</b>	预烧温度对高磁导率 MnZn 铁氧体的影响	160
<b>7.7</b>	预烧温度对 MnZn 功率铁氧体烧结活性及温度稳定性的影响	162
<b>7.8</b>	预烧料的检测	164

## 8

### 第8章

#### 软磁铁氧体备料工艺与控制

<b>8.1</b>	铁氧体粉料的性质	167
<b>8.2</b>	软磁铁氧体的粉碎工艺	170
8.2.1	滚动球磨	171
8.2.2	砂磨机磨料	173
8.2.3	软磁铁氧体研磨料浆的检测	174
<b>8.3</b>	黏合剂	175
8.3.1	PVA 的制备	175
8.3.2	聚乙烯醇水溶液的性质及其改性	178
<b>8.4</b>	造粒 (制造颗粒料)	180
8.4.1	干压成型对颗粒料的质量要求	180
8.4.2	常见的造粒方法	182
8.4.3	镁锌铜铁氧体材料的机械造粒	183
8.4.4	喷雾造粒系统的构造与原理	185
8.4.5	喷雾造粒的过程控制	186
8.4.6	提高喷雾造粒质量与效率的途径	189
<b>8.5</b>	不同类型产品粉碎、造粒工艺的比较	192

## 9

### 第9章

#### 软磁铁氧体成型工艺与控制

<b>9.1</b>	干压成型	196
9.1.1	干压成型方式的分类	196
9.1.2	干压成型压机	198
9.1.3	模具设计	202
9.1.4	成型工艺	203
9.1.5	压机的运行与调试	205
9.1.6	模具的安装与调试	206
9.1.7	生坯密度的控制	209
9.1.8	复杂型产品成型工艺要点	212
9.1.9	不同软磁铁氧体成型参数的比较	213
9.1.10	常见干压成型的质量问题及其解决措施	213

9.2	热压铸成型 .....	217
9.3	铁氧体坯件的其他成型法 .....	220
9.4	成型方法的选择 .....	222

# 10

## 第10章

### 软磁铁氧体烧结工艺与控制

10.1	铁氧体的烧结 .....	223
10.2	固态物质的烧结 .....	224
10.3	液相存在下的烧结 .....	225
10.4	铁氧体烧结过程的控制 .....	226
10.4.1	氮窑上、下坯件的操作规程 .....	226
10.4.2	铁氧体烧结过程的控制 .....	229
10.4.3	影响铁氧体烧结效果的因素 .....	234
10.5	铁氧体的微观结构及其控制 .....	236
10.5.1	铁氧体的微观结构 .....	236
10.5.2	铁氧体显微结构的控制 .....	237
10.6	铁氧体的气氛平衡 .....	243
10.6.1	铁氧体的平衡气氛 .....	243
10.6.2	铁氧体的还原与氧化 .....	245
10.6.3	锌的游离和挥发 .....	249
10.6.4	锌的挥发对含锌铁氧体性能的影响 .....	250
10.6.5	预防锌挥发的措施 .....	252
10.6.6	锰铁氧体的形成与氧化 .....	253
10.6.7	烧结气氛对锰锌铁氧体性能的影响 .....	258
10.6.8	锰锌铁氧体的平衡气氛 .....	259
10.6.9	锰锌铁氧体常用的烧结方法 .....	262
10.6.10	锰锌铁氧体的冷却 .....	267
10.6.11	防止锰锌铁氧体氧化的其他方法 .....	271
10.7	铁氧体的低温热处理 .....	273
10.8	热压烧结 .....	274
10.9	常用烧结设备与维护 .....	276
10.9.1	钟罩窑 .....	276
10.9.2	推板窑 .....	279
10.10	窑炉的调节 .....	283
10.11	烧结常见质量问题 .....	285
10.12	不同类型软磁铁氧体产品烧结工艺的比较 .....	289
10.12.1	MnZn 铁氧体 .....	289
10.12.2	NiZn 铁氧体 .....	301
10.12.3	MgZn 铁氧体材料 .....	304
10.12.4	LiZn 铁氧体 .....	308

# 11

## 第11章

### 软磁铁氧体磨加工工艺与控制

11.1 铁氧体的机械特性 .....	310
11.2 铁氧体的机械加工及其影响因素 .....	312
11.3 加工变质层及其表面的处理 .....	314

# 12

## 第12章

### 软磁铁氧体检测工艺与控制

12.1 样品的抽取与处理 .....	316
12.1.1 磁正常（状态）化 .....	317
12.1.2 测量与实验条件 .....	318
12.2 电磁特性测试常用仪器 .....	318
12.3 低磁通密度下性能参数的测量 .....	318
12.4 高磁通密度下性能参数的测量 .....	322
12.5 磁滞回线及 $B_s$ 、 $B_r$ 、 $H_c$ 的测量 .....	323

### 参考文献

# 认识软磁铁氧体

## 1.1 磁性材料及其分类

磁性是物质的一种基本属性，任何物质都具有或强或弱的磁性，任何空间都存在着或高或低的磁场。通常把磁性强的物质称为磁性材料，它主要由过渡族元素铁、钴、镍等元素及其合金组成，且能够直接或间接产生磁性。

在现代科技领域中，特别是在电工及电子技术领域中，磁性材料得到了广泛的应用，已成为国民经济的基础材料。目前，磁性材料主要应用于通信、信息、家用电器、仪器仪表、电子电力、自动控制、海洋、空间、生物、新能源、军事、科学研究等领域。

从材质和结构角度，磁性材料分为金属及合金磁性材料和铁氧体磁性材料两大类，铁氧体磁性材料又分为多晶结构材料和单晶结构材料。

从应用功能角度，磁性材料分为软磁材料、永磁材料、磁记录-矩磁材料、旋磁材料等。软磁材料、永磁材料、磁记录-矩磁材料中既有金属材料，又有铁氧体材料；而旋磁材料和高频软磁材料就只能是铁氧体材料了，因为金属在高频和微波频率下将产生巨大的涡流效应，导致金属磁性材料无法使用，而铁氧体的电阻率非常高，能有效地克服这一问题，并得到了广泛的应用。

## 1.2 金属软磁材料与软磁铁氧体材料

软磁材料是磁性材料中的一大类，分金属软磁材料和非金属软磁材料，它们的重要区别在于导电性的不同。金属软磁材料的电阻率 $\rho$ 低，适用于低频电子产品；软磁铁氧体材料是非金属软磁材料，它的电阻率高，适用于高频和特高频。

### (1) 金属软磁材料

金属软磁材料的生产已经有很长的历史，在电力、电信和自动控制等方面，都得到了广

泛的应用。纯铁（99.99%）、硅铁（又称硅钢）和铁镍合金（又叫坡莫合金或欧姆合金）就是这类材料的典型代表。

纯铁（又称工程纯铁），在19世纪前，就已经作为一种金属磁性材料在电工技术上得到了应用，但由于其电阻率太小，涡流损耗太大，至20世纪初，就陆续被各种类型的硅铁合金所取代。硅铁合金的电阻率比纯铁高好几倍，是发电机、电动机和一些大功率变压器最常用的一种磁性材料。铁镍合金具有比硅铁合金更好的高频特性，开辟了金属磁性材料在较高频率下应用的新领域，已广泛用于海底电缆、电视、精密仪表等电器里的特种变压器以及录音、录像磁头等领域。

但是，由于金属磁性材料的电阻率 $\rho$ 太低，一般只有 $10^{-4} \sim 10^{-2} \Omega \cdot m$ ，使用频率增大后，在材料内部产生的涡流将使能量显著损失。这样就使它在高频方面的应用受到了限制。为了使硅钢等金属磁性材料用作高频变压器，一般先轧成 $0.05 \sim 1.0mm$ 厚的薄片，然后叠合起来使用，这样做，其工艺较复杂，成本较高，消耗金属的量较大。在20世纪20年代以后，基于高频无线电技术的迫切需要，软磁铁氧体得到了迅速的发展。

## (2) 软磁铁氧体材料

软磁铁氧体是铁氧体材料中种类最多、应用最广的一类非金属磁性材料。它是一种半导体材料，主要的特点是电阻率高，一般为 $10^2 \sim 10^8 \Omega \cdot m$ ，比金属软磁材料高数百倍到数十万倍。并且有较低的剩余磁通密度和矫顽力（小于 $10A/m$ ），因此，用软磁体氧体作磁芯时，涡流损耗小，具有良好的高频特性。软磁铁氧体的化学成分和制造技术从20世纪30年代起，就不断地发展和完善，其典型材料有MnZn、NiZn、MgZn、LiZn和平面六角晶系铁氧体系列产品，软磁铁氧体的制造理论与技术也日益成熟。

随着电子工业的发展，不断需求一些新型的软磁铁氧体材料，目前世界上已有许多专门部门研究和开发软磁铁氧体的新产品，特别是在高频领域内更是如此，尽管新近发展起来的非晶态和纳米晶等磁体引起了人们的高度重视，但是在高频应用和性价比上，仍不能与软磁铁氧体相比，可以预见，在今后较长的时间里，软磁铁氧体材料在高频领域内的应用，仍将处于优势地位。

但是，软磁铁氧体也有不足之处，它的饱和磁感应强度 $B_s$ 较低，最高约为 $0.6T$ ，而硅钢为 $2T$ ， $B_s$ 低不利于用作转换（或储存）能量的磁芯。就磁导率而言，软磁铁氧体的商业产品只有 $15000 \sim 18000$ ，实验室研究水平为 $40000$ 左右，还不及优良金属软磁材料，故在数千赫兹或更低频段内，金属软磁材料仍占很大的优势，另外，因软磁铁氧体材料的居里温度 $T_c$ 较低，在高频段内也有少数情况，例如要求居里温度 $T_c$ 高或磁导率的温度系数低的情况，宜采用磁性金属薄片或细粉（与绝缘粉末混合）制成的磁芯。因此，软磁铁氧体的出现与发展，并未降低金属软磁材料的使用价值，只是各自使用的频段和场合不同。目前，软磁铁氧体材料仍是高频领域内应用最好的磁性材料。

# 1.3 软磁铁氧体的发展史

由于 $Fe_3O_4$ 的饱和磁化强度仅仅是铁的 $1/4$ ，因此，长期以来，人们并没有将它作为一种有实用价值的磁性材料对待。直到20世纪30年代，高频无线电新技术迫切地要求既具有铁磁性而电阻率又很高的材料，高电阻铁磁介质的实际重要性使人们重新考虑磁石或其他磁性氧化物的利用问题。单纯的 $Fe_3O_4$ 的电阻率和磁导率都不够高，因此，有必要研制新的、

高电阻率磁性材料。在 1930~1940 年 10 年里,法、日、德、荷兰等国家都对铁氧体开展了一定的研究工作,其中以荷兰飞利浦实验室物理学家斯诺克的工作最有成效,他研究出了多种具有优良磁性能的含锌的尖晶石型铁氧体,明确了其制备工艺过程。

在 20 世纪 40 年代,尖晶石型软磁铁氧体得以迅速发展,进入了工业化生产的规模,1946 年,软磁铁氧体材料实现了工业化生产。在生产的推动下,理论和实践都得到了进一步的丰富和充实,1948 年,在反铁磁性理论的基础上,建立了亚铁磁性理论,这是对铁氧体的磁性,从感性到理性认识的一次飞跃。

20 世纪 50 年代,是铁氧体蓬勃发展的时期,1952 年,制成了磁铅石型永磁铁氧体;1956 年,又在此晶系中,发展出平面型的超高频软磁铁氧体;同年,发现了稀土族的石榴石型铁氧体,从而奠定了尖晶石型、磁铅石型、石榴石型三大晶系三足鼎立的局面。新材料的不断发现促进了材料制备工艺的发展,沿袭粉末冶金和陶瓷工业的基本工序,形成了铁氧体制备的工艺流程。许多国家对软磁铁氧体材料的成分和添加剂进行了深入的研究,从而使软磁铁氧体的性能和工业化生产获得了进一步发展。

20 世纪 60 年代,是软磁氧体发展历程中重要的时候。1960 年,开始对 MnZn 铁氧体的生成气氛进行研究,对控制  $\text{Fe}^{2+}$  浓度、Mn 离子的变价,起着十分重要的作用,从而为制备高质量 MnZn 铁氧体铺平了道路。对软磁铁氧体气氛的探索,一直延续地进行:1975 年,Morinean 等人对  $\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$  等作出了具有实用参考意义的平衡气氛图。1961 年开始对湿法(化学)制备 MnZn 铁氧体展开了研究,为 70 年代湿法制备高质量软磁铁氧体奠定了基础,同年,对 MnO-ZnO- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  三元相图的组成与起始磁导率的关系进行了研究,开始注意到少量添加物处于晶界时,对制备低损耗 MnZn 铁氧体的作用。1962 年对 MnZn 铁氧体的减落现象进行了实验和理论研究。1963 年系统地研究了 MnO-ZnO- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  三元相图组成与  $K_1$ 、 $\lambda_s$  的关系,为 MnZn 铁氧体的制备、走向分子设计的道路创造了条件。1966 年德国研究制成  $\mu_i = 4 \times 10^4$  的高磁导率材料。60 年代的基础研究成果在 70 年代的生产中发挥了重大的作用。

20 世纪 70 年代软磁铁氧体的生产水平已达到了新的高度,例如,磁导率显著提高,损耗下降,频带展宽,国外软磁铁氧体的工业生产已步入成熟期。由于电子产品的调整与发展,对软磁铁氧体材料提出了许多更高的要求。例如,作为彩色电视机的大型偏转磁芯,要求其外径达 15cm,作为磁记录磁头用的材料要求高密度和低磨损率;随着集成电路的发展,又要求微型化的电感器等,这些要求给传统的陶瓷工艺带来了困难。湿法制备铁氧体粉料的方法得到了发展。例如,化学共沉法、喷雾焙烧法和喷雾造粒等工艺,开始了工业化的生产,制出了综合磁性能更高的软磁铁氧体材料。

20 世纪 80 年代以后,软磁铁氧体向着高性能、生产自动化、规模化方向发展。在传统的陶瓷工艺中,改进了球磨、造粒与成型等设备及工艺,如采用砂磨机、气流磨、喷雾造粒、回转窑、自动成型等设备,实现了自动化的工艺流程,提高了产量,保证了质量,降低了劳动强度。现在电子产品正向着轻、薄、小型化、高频、宽带化、高功率、低损耗方向发展,软磁铁氧体材料也随着电子产品的这些要求发展。

我国的铁氧体起步于 20 世纪 50 年代,当时在研究所及工厂试验室里研制。1957 年由东德援建的 798 厂开始生产软磁铁氧体。60 年代,南京、宜宾、宝鸡等部属厂及北京、天津、上海、济南、徐州、无锡等大中城市相继建立了磁性材料厂。这个阶段的主要产品是天线棒、中周磁芯、电感磁芯、载波通信用的罐形磁芯及变压器磁芯等。

20 世纪 80 年代是我国铁氧体工业的发展时期。首先由 898 厂、4390 厂、上海磁性材料

厂、899厂、梅州磁性材料厂等从德国、意大利及东欧引进了先进的生产设备及技术。这些企业的技术改造为我国铁氧体工业的发展提供了一个参照模式，为专用设备的国产化提供了样板，同时，培养和造就了一批技术人才，取得了巨大的经济效益和社会效益，80年代中期，我国磁性材料工厂在全国各地像雨后春笋般地发展起来，粗略统计，大小共500多家磁性材料厂。这期间，又投资约4亿元，有20家企业引进了软磁铁氧体生产设备。所生产的产品，多是电视机等家电产品和电子仪表用的中低档产品。

20世纪90年代是我国磁性材料工业高速发展时期。随着我国经济的高速发展，家电产品的市场需求以及出口的逐年增加，我国铁氧体工业进入了高速发展时期。不仅产量增长，同时，也注意到了产品质量和档次的提高，国产化铁氧体生产设备的质量，基本上得到了保证。生产技术的扩散和普及，使软磁铁氧体的产量迅猛增长，到1998年，软磁铁氧体产量已达到4.2万吨，同时，以提升产品质量和档次为目的，继续引进国外先进生产设备，“八五”期间，全行业有十余家企业进行了较大规模的技术改造。“九五”期间，又有十余家企业进行了技术改造。近年来，工业发达国家和地区将铁氧体工业向发展中国家转移，日本、欧洲及中国台湾地区的一些公司，已在大陆建立合资或独资的软磁铁氧体生产企业，其规模和产量也在增加。产品除供给国内需求外，正走向世界。

## 1.4 软磁铁氧体的分类与产品名称的识别

### 1.4.1 软磁铁氧体的分类

软磁铁氧体材料种类繁多，性能和用途差异较大。

① 按晶体结构分类，可分为尖晶石型铁氧体和平面型六角晶系铁氧体两大类，前者主要用于音频、中频和高频范围，后者可以在甚高频和超高频频率范围内应用。

② 按微观结构分类，可分为多晶和单晶软磁铁氧体，多晶铁氧体应用广泛，生产量占99%以上。本书以介绍多晶软磁铁氧体材料为主，如没有特殊说明，均指多晶铁氧体材料。

③ 按材料组成分类，可分为单组分软磁铁氧体和复合软磁铁氧体。单组分软磁铁氧体又称简单铁氧体，是氧化铁和另一种金属氧化物组成的复合氧化物，其通式为 $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ （Me为二价金属元素），常用的有 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 等。

复合软磁铁氧体是由氧化铁和另外两种或两种以上的金属氧化物组成的复合氧化物，也可视为两种或两种以上的单组分铁氧体复合而成。常用的有 $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 和平面六角晶系铁氧体等（ $x$ 为组成中Zn的含量）。

④ 按材料的性能和用途分类，软磁铁氧体材料可分为下列几类：

a. 高磁导率软磁铁氧体，简称高 $\mu_i$ 材料，指 $\mu_i$ 值大于5000的软磁铁氧体材料。主要用于低频宽带变压器、小型脉冲变压器和电感器等。提高 $\mu_i$ 值可以缩小电子元器件的体积。

b. 低损耗软磁铁氧体材料，要求 $\mu_i Q$ 高，一般为 $(50\sim 10)\times 10^4$ ，甚至更高，主要用作

低、中频载波机的滤波器磁芯、高频调谐回路的电感磁芯，目的是缩小体积，增加通信路数，提高频率范围。

c. 低损耗高稳定性软磁铁氧体材料，即超优铁氧体。主要用于通信滤波器磁芯，可以提高频率可靠性，减小失真，增加通信路数，缩小体积。

d. 高频大磁场材料，这种 NiZn 铁氧体材料在高频大磁场下，损耗低，既能承受较高的功率，又能稳定地传递高频信号。例如： $f=3.0\sim 5.5\text{MHz}$ ，直流偏场  $H_{dc}=240\sim 2400\text{A/M}$  时，其  $\mu Qf \geq 7 \times 10^{10}$ ，这类材料主要用于质子同步加速器的空间谐振器、发射机终端的极间耦合变压器、跟踪接收机高功率变压器等。

e. 特高频软磁铁氧体材料，这类材料存在两种磁晶各向异性场  $H_\psi$  和  $H_\theta$ ，使应用频率提高至 2000MHz，直接与超高频段相连接，主要用于扫频仪的电扫描磁芯、彩电宽带变压器磁芯及微波天线等。

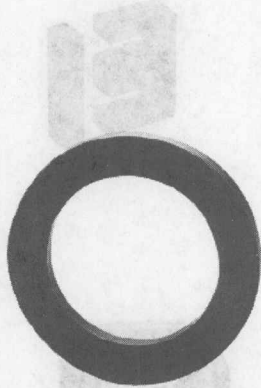
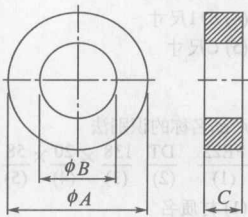
f. 高密度软磁铁氧体材料，主要用于录音、录像磁头及计算机外存储器中的磁头。除要求高磁导率、低矫顽力以及高磁通密度外，还要求高密度、高硬度和好的耐腐蚀性、抗剥落性，以提高记录的质量和使用寿命。

g. 电磁波吸收材料，这类材料工作在截止频率以上时，损耗会急剧增加，利用这一特点来吸收电磁波能量，广泛地应用于抗电磁干扰和隐身技术中。

### 1.4.2 软磁铁氧体产品名称的识别

行业里常参照 TDK 公司对其产品的识别方式，对软磁铁氧体元件进行识别，具体如下：

T型磁芯

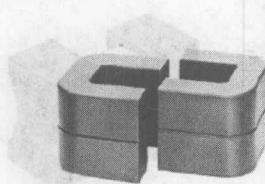
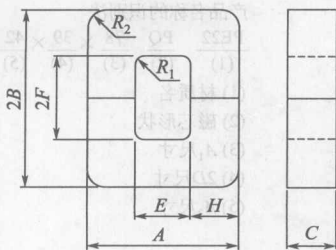


产品名称的识别法

PE22	T	51	13	31
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) C尺寸
- (5) B尺寸

UU磁芯



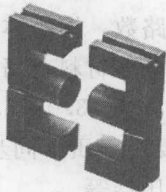
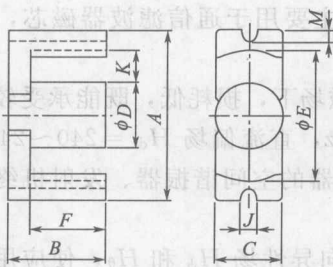
产品名称的识别法

PE22	UU	79	129	31
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) 2B尺寸
- (5) C尺寸



EC磁芯

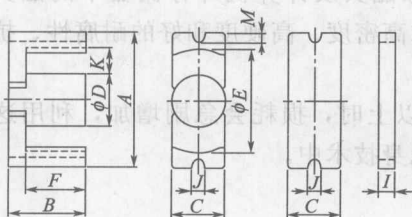


产品名称的识别法

PE22	EC	$\frac{90}{90} \times \frac{90}{90} \times \frac{30}{30}$
(1)	(2)	(3) (4) (5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) B尺寸×2
- (5) C尺寸

EIC磁芯

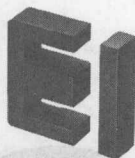
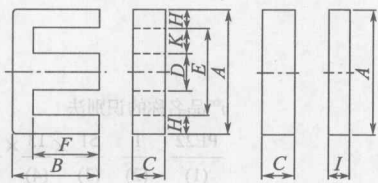


产品名称的识别法

PE22	EIC	$\frac{90}{90} \times \frac{55}{55} \times \frac{30}{30}$
(1)	(2)	(3) (4) (5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) B+1尺寸
- (5) C尺寸

EI磁芯

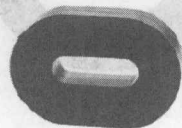
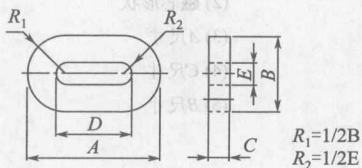


产品名称的识别法

PE22	EI	$\frac{70}{70} \times \frac{55}{55} \times \frac{19}{19}$
(1)	(2)	(3) (4) (5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) B+1尺寸
- (5) C尺寸

DT磁芯

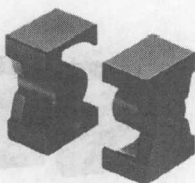
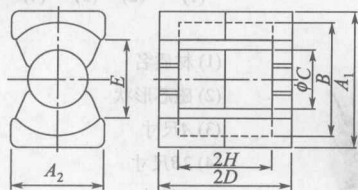


产品名称的识别法

PE22	DT	$\frac{138}{138} \times \frac{20}{20} \times \frac{58}{58}$
(1)	(2)	(3) (4) (5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A尺寸
- (4) C尺寸
- (5) D尺寸

PQ磁芯



产品名称的识别法

PE22	PQ	$\frac{78}{78} \times \frac{39}{39} \times \frac{42}{42}$
(1)	(2)	(3) (4) (5)

- (1) 材质名
- (2) 磁芯形状
- (3) A<sub>1</sub>尺寸
- (4) 2D尺寸
- (5) A<sub>2</sub>尺寸