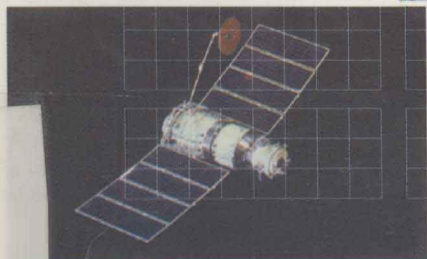
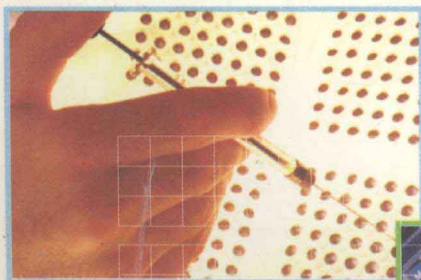


抗电磁干扰材料 及元器件工艺

张怀武 周海涛 刘颖力 编著



电子科技大学出版社

URL: <http://www.uestcp.com.cn>

抗电磁干扰材料及 元器件工艺

张怀武 周海涛 刘颖力 编著

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

抗电磁干扰材料及元器件工艺/张怀武编著.—成都:
电子科技大学出版社, 2001.4
ISBN 7—81065—662—7

I. 抗... II. 张... III. ①抗磁性—磁性材料②抗
磁性—电子元件—生产工艺 IV. TN605

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 25101 号

内 容 提 要

本书主要内容包括抗电磁干扰材料和滤波器的基本概念和原理, 非晶软磁铁氧体的热处理分析, 软磁铁氧体的具体制作工艺分析, 抗电磁干扰滤波器的 CAA/CAD 原理, 多种宽频抗电磁干扰滤波器的设计与制作, 列举了抗电磁干扰元器件的应用实例。全书分三篇: 第一篇“非晶软磁抗 EMI 材料工艺”; 第二篇“铁氧体抗 EMI 材料工艺”; 第三篇“抗 EMI 滤波器设计”。

本书可作为高校“磁性物理与器件”专业教材, 同时也可作为磁性材料和电子设备生产、研制等单位不可缺少的重要参考资料。

抗电磁干扰材料及元器件工艺

张怀武 周海涛 刘颖力 编著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号, 邮编: 610054)

责任编辑: 杨铁铎

发 行: 电子科技大学出版社

印 刷: 西南冶金地质印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张 13.75 字数 334 千字

版 次: 2001 年 5 月第一版

印 次: 2001 年 5 月第一次印刷

书 号: ISBN 7—81065—662—7/TN·30

印 数: 1—2000 册

定 价: 25.00 元

前 言

电磁干扰 (EMI) 是电子设备中普遍存在的一个问题, 其对公共环境和人身安全的危害已被世界各国所公认, 且随着电子产品使用密度的不断增加, 其危害性越来越大。目前强制性的电磁兼容 (EMC) 标准已在世界范围内执行。因此, 各国正以电磁兼容理论和电磁环境科学为基础, 积极开发各种抗电磁干扰材料及器件。

本书对抗电磁干扰材料工艺原理及抗电磁干扰滤波器的设计进行了详细的介绍。全书分三篇十三章: 第一篇“非晶软磁抗 EMI 材料工艺”分析了非晶软磁的脉冲热处理工艺; 第二篇“铁氧体抗 EMI 材料工艺”详细介绍了铁氧体原料选择、粉碎、坯件成型、固相反应与烧结等制备工艺过程, 并以 NiCuZn 铁氧体的研制为例进行了具体分析; 第三篇“抗 EMI 滤波器设计”介绍了宽频抗 EMI 滤波器的设计原理、滤波器 CAA/CAD 原理, 并以多层片式抗 EMI 滤波器和 LC 薄膜滤波器为例介绍了具体设计制作过程, 最后列举了多种抗 EMI 元件的应用实例。

本书是作者对抗电磁干扰材料工艺与滤波器设计的教学和科研实践中的经验总结, 书中所列举的例子都是经过作者实验检验过的, 这对于从事抗电磁干扰研究的读者具有很强的指导作用。本书可作为磁性物理与器件专业教材, 同时也可作为磁性材料和电子设备生产、研制等单位不可缺少的重要参考资料。

此外, 本书在编著过程中得到了信息产业部电子九所马昌贵高级工程师和电子科技大学黄永杰教授的帮助和支持, 在此向他们表示感谢。

由于抗电磁干扰材料和器件涉及面广, 且发展迅速, 加之作者水平有限, 书中难免有不妥之处, 敬请读者不吝赐教。

作 者
2000 年 4 月

目 录

第一篇 非晶和纳米晶软磁抗 EMI 材料工艺

第一章 绪论	1
§1.1 引言	1
§1.2 国际国内研究动态	2
§1.3 抗 EMI 滤波器材料概述	2
第二章 抗 EMI 软磁材料研制	5
§2.1 磁场纳米晶化的理论溯源	5
§2.2 磁场退火与纳米晶化	7
§2.3 内层绝缘与磁耦合	9
§2.4 非晶软磁热处理的作用	11
第三章 非晶软磁的脉冲热处理	22
§3.1 热处理理论	22
§3.2 脉冲热处理的初步研究	23
§3.3 工艺条件的进一步优化	27
§3.4 脉冲退火处理对材料频率特性的影响	30
§3.5 快速退火对铁基非晶合金磁特性的影响	34

第二篇 铁氧体抗 EMI 材料工艺

第四章 铁氧体的原料与粉碎	40
§4.1 原料的种类与性能	40
§4.2 原料的混合与粉碎	54
§4.3 铁氧体的配料计算	60
§4.4 铁氧体粉料的工艺性质	63
第五章 铁氧体的坯件成型	64
§5.1 干压成型	64

§5.2 磁场成型	68
§5.3 应力取向成型	73
§5.4 铸浆成型	76
§5.5 热压铸成型	76
第六章 固相反应与烧结	79
§6.1 固相反应	79
§6.2 铁氧体的烧结	84
§6.3 铁氧体多晶生长过程	91
§6.4 铁氧体在烧结过程中的扩散特性	98
§6.5 锌的游离与挥发	102
§6.6 铁氧体的氧化与还原	103
§6.7 热压烧结	118
第七章 NiCuZn 铁氧体材料性能分析及研制	121
§7.1 NiZn 系铁氧体材料概述	121
§7.2 成分分析	112
§7.3 工艺对材料性能的影响	124
§7.4 NiCuZn 铁氧体材料的低温烧结	125
§7.5 实验及分析	125

第三篇 抗 EMI 滤波器设计部分

第八章 抗 EMI 滤波器 CAA/CAD 原理	132
§8.1 抗 EMI 滤波器设计原理	132
§8.2 磁芯损耗分析原理	134
§8.3 软件实现	142
第九章 多层片式抗 EMI 滤波器制作	147
§9.1 抗 EMI 滤波器概述	147
§9.2 多层片式电感器制作	149
§9.3 片式抗 EMI 滤波器的设计与制作	152
§9.4 测试及性能分析	153
§9.5 小型柱状滤波器	155
第十章 LC 薄膜滤波器的设计方案	157
§10.1 材料制备	157

§10.2	薄膜的制备方法	158
§10.3	薄膜 LC 滤波器的制作	160
§10.4	测试数据与分析	161
第十一章	抗 EMI 滤波器的设计	165
§11.1	电磁干扰滤波器的原理和设计	165
§11.2	噪声滤波器	174
§11.3	防止电子设备用微机中电磁干扰的磁芯滤波器	183
§11.4	多元件型 EMI 滤波器	188
§11.5	电源线路用片式 EMI 滤波器与普通片 EMI 滤波器的区别	190
§11.6	高频需求呼声急的片式电感	192
§11.7	2525 型小型片式滤波器	195
§11.8	片式固定电感器的的发展及其应用	197
第十二章	宽频抗 EMI 滤波器的设计	200
§12.1	抗 EMI 滤波器设计理论	200
§12.2	几种基本的低通抗 EMI 滤波器的插损计算	201
第十三章	抗电磁波干扰元器件的应用实例	206
参考文献		211

第一篇 非晶和纳米晶软磁 抗 EMI 材料工艺

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

电磁干扰(EMI)对公共环境和人身安全的危害已被世界各国所公认,欧洲从 1996 年 1 月起实施欧洲电磁兼容标准(EN),表明进入欧洲市场的电气产品都必须符合 RFI/EMI 及抗干扰度要求。这强制性的规定在世界范围内引起强烈反响。以此为契机,努力发展我国抗电磁干扰(EMI)技术已刻不容缓。

作为抑制电磁干扰三大技术——屏蔽、接地、滤波之一的滤波技术是目前抑制电磁干扰最有效最经济的手段。运用方法非常简单,在电气设备电源线的入口处插入抗 EMI 滤波器(EMIF),滤波器将通过电源线传导的电磁干扰给予充分地抑制,换言之,它既能抑制电气设备内部产生的电磁干扰,又能抑制外界电网传入的电磁干扰。

由于 EMIF 应用范围广泛,它与传统滤波器相比有其特殊性。首先是 EMIF 要求有尽可能宽的阻带,它可被理解为,除工频(50~400Hz)以外都可视为有害的干扰频率。另外,由于电子技术向高频化、小型化发展,EMIF 也相应趋于小型化、片式化。这些要求对 EMI 滤波器材料和器件的设计都提出了新的挑战。

作为 EMIF 的材料必须具备以下两个基本条件:其一,具有高磁导率和高饱和磁化强度,使 EMIF 在低频端具有最小匝数,减小绕线电容,并扩展工作范围;其二,EMIF 必须具有极低的芯损,以提高工作效率和降低成本。目前国际上研制开发的材料系列主要分为铁氧体系列和纳米晶软磁系列。

§ 1.2 国际国内研究动态

在抗 EMI 材料方面,美国早在 20 世纪 70 年代就开始了铁氧体材料的研究,目前已能生产各类抗电磁干扰材料和器件。通过铁氧体复数磁导率 (μ' 和 μ'') 与频率的关系,改变不同成分配方及掺杂来实现阻抗的频率特性和衰减频域,因而制成宽频域抗 EMI 滤波器。美国的 STEWARD, FILTER, CONECPIS 等公司分别研制成 14 个系列和 4 个系列的抗 EMI 软磁材料,并应用于 IBM 公司、ZENITH 公司和 MOTOROLA 公司的各种卫星计算机、数字设备以及 ATT 信息系统,已取得了良好的效果。同时,抗 EMI 软磁材料也大量用于军用电子装备上,使其更加完善。日本 TDK 公司有五大类抗 EMI 材料研制成功,它主要用于 PC 联网、数字设备中。富士公司则集中于 MMIC 及 IC 用抗电磁干扰滤波器开发。FAIR-RITE 公司主要产品集中在 NiZn 材料和器件上。另外,德国、韩国在抗 EMI 材料和器件方面也有较大的进展,在纳米晶软磁材料及抗 EMI 器件方面已有 CY、HK 等型号出售。

国内方面,从事抗 EMI 材料及器件开始于 20 世纪 80 年代末,主要在铁氧体材料和器件方面进行了大量的研究,电子科技大学、国营八九九厂、信息产业部九所等单位都相继开发出相关产品并有了初步应用。但与国外的材料及抗 EMI 器件相比,仍存在很大差距。

总而言之,抗 EMI 磁芯及元器件的市场与计算机、开关电源的普及和数字通信设备的迅速发展密切关联。近年来,移动通信、汽车电子化装备、军事无线电装备发展很快,它们必将成为抗 EMI 元器件应用的重要市场,发展前景令人乐观。我国在此方面起步较晚,更应集中优势力量,迎头赶上。

§ 1.3 抗 EMI 滤波器材料概述

作为抗 EMI 滤波器材料,要求衰减速度快,频带范围宽,同时应保证工作频率范围内信号不失真,能适应各种环境使用,这就对其磁芯材料提出了以下要求:

- (1) 高 μ_i , 高 B_s , 抗 EMI 滤波器的电感器尽量减少匝数,以得到小的分布电容,改善高频性能,扩展频带范围;
- (2) 低 H_c , 从而减小磁滞损耗;
- (3) 高 ρ , 减小高频下涡流损耗;
- (4) 高 ω_r (f_r), 适当的截止频率,以展宽频段;
- (5) 高 T_c , 以适应各类环境。

目前主要开发的抗 EMI 滤波器材料系列主要分为铁氧体系列、纳米晶软磁系列和复合材料系列。

一、铁氧体材料

实践证明,在种类繁多的抗 EMI 材料中软磁铁氧体不失为一种高效廉价的材料,尤其在电子设备向高频化方向发展,它的作用更加突出。作为新型抗 EMI 材料,有非晶磁合金和磁晶软磁材料,但从成本等因素考虑,软磁铁氧体的开发利用仍将蓬勃发展。软磁铁氧体最早由荷兰人菲利普实验室的司洛克于 1935 年研制成功,迄今为止已有 60 年的历史。按其晶体结构可分为尖晶石和平面六角晶系。前者适用于低频、中频、高频,后者适用于特高频。如 $\text{MnZn}(\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ 铁氧体用于小于 1MHz 范围的扼流圈和磁芯材料; $\text{NiZn}(\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ 铁氧体则用于 1~300MHz 的射频段抗 EMI 开关网络滤波器; NiZnCu 铁氧体用于 10~1000MHz 的射频段材料;而六面钡铁氧体用于 200~4GHz 频率范围的吸波材料。

铁氧体的制备工艺分为三种:其一是化学共沉淀法;其二是氧化分解法;其三是高温助熔热分解法。根据对性能、工作频率范围、粒度、极限频率 f_r 的要求不同,可选择不同的配方和工艺途径。

二、纳米晶软磁薄带材料

1988 年,日本日立公司的吉三尺克仁等人在研究降低 Fe 基非晶材料磁致伸缩系数,以提高软磁性能时,发现了一种称为 Finemet 的新型材料(纳米晶),它具有高的起始磁导率($\mu_i > 1000$, 最高可达 17 000),低的高频损耗,性能接近 Co 基非晶材料。作为新一代急冷软磁材料,它几乎可以覆盖所有的非金属软磁材料(高 μ_i , 高 μ_m , 低 ρ , 高 B_s),且高频特性好。将纳米晶薄带绕制成电感,可制作成性能优良的抗 EMI 器件。为什么纳米晶软磁薄带材料具有如此优良的性能呢?让我们来考察其结构,它的制备是利用非晶薄带工艺,首先获得 FeNbCuSiB 非晶薄带,经热处理后获得直径为 10~20nm 的微晶粒组成的材料,从而称为微晶或纳米晶材料,又因其外形多为薄带,故称为纳米晶和磁薄带材料。

在 480~600℃ 的范围内热处理 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_{3.0}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 材料,就可使无定型结构转变成 bccFe 固溶体结构,晶粒大约为 10~20nm, B_s 高达 1.27,最低损耗为 40W/kg(100kHz)。

用透射电镜观察上述退火材料,同时用 X 射线衍射仪分析,并用扫描法测定(222)、(310)、(211)、(200)、(110)这 5 个峰的衍射积分限制,利用 Horta 法,分别计算以上 5 个晶面的相密度。分析指出在 550℃ 左右退火处理 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_{1.0}\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$,生长出的相当数量的纳米级微小晶粒是导致纳米晶软磁最佳性能的原因。

在具有低 λ_s 的非晶基体上存在高度分散的均匀微细晶粒,使磁畴细化,域各向异性减小。(根据无序各向异性模型 $K = K_1^4 D^6 / A^3$, 其中 $K_1 = 10\text{kJ/m}^3$ 和 $A = 10^{-11}\text{J/m}$, 由于微晶 D 只有 10~20nm, 因此 $K \approx 10^{-3}K_1$ 。)因此,软磁性能,特别是高频损耗明显降低;另外,因为在纳米晶 Fe、Co 基材料中,Fe 母质或 Co 母质金属中一般掺有非金属或非磁性原子,使导电载流子散射中心增多,因而电阻率增大。

以往没有一种甚至一类软磁材料可以全面或基本上满足上述对软磁材料的全面要求。作为系列的纳米晶材料，通过不同的热处理方法，一种超微晶材料可以基本上满足不同场合下对软磁材料的使用要求。20 世纪 90 年代，纳米晶软磁薄带材料的开发和应用出现高潮。将这种材料系列用于抗 EMI 材料，取得了满意的结果。该材料的磁导率比传统的铁氧体高 10 倍以上，矫顽力小于 100mOe，居里温度高达 400℃，电阻率居于铁氧体与金属之间，一般为 $100\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

第二章 抗 EMI 软磁材料研制

§ 2.1 磁场纳米晶化的理论溯源

虽然理想的非晶软磁是一个均匀的各向异性的连续体，然而实际的非晶态软磁合金无论是薄带还是薄膜，在制备过程中可能形成一些几何或化学结构，造成种种各向异性，这些各向异性及局部涨落和样品的形状，一起决定样品的磁畴结构，从而直接决定样品的静态与动态特性。

经过热处理后的非晶态合金薄带的畴结构相对简单，由于应力的释放，样品应力分布大大减弱，甚至消失，同时热处理还有助于结构的均匀化，磁各向异性将大大减小。特别是经过磁场热处理或应力热处理后，非晶态合金中将具有宽的平行条状的畴结构。非晶态金属由于结构上的均匀和连续，并且各向异性小，畴壁位移和畴转受阻力小，因此矫顽力和磁滞损耗比相应晶态小。另外，经过磁场处理后， μ_i 、 μ_m 都将增大，故经过磁场退火处理，纳米晶软磁可获得较好的晶态软磁特性。

图 2.1.1 示出磁场热处理对高频性能的改善。

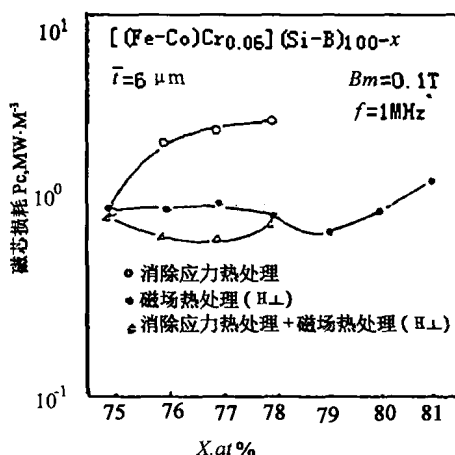


图 2.1.1 各种热处理对高频磁芯损耗的影响

磁场热处理使非晶态的结构产生微晶相，反向畴生成核增多，磁畴细化，从而可以降低高频损耗。

纳米晶软磁的交流动态损耗的组成为：

$$W = W_a + W_e + W_c \quad (2.1.1)$$

式中, W_a 为磁滞损耗, 可由静态磁滞回线算出, 通过退火, 可以降低 H_c , 从而降低 W_a ; W_e 为反常损耗, 由于畴壁运动时, 在其附近的磁感变化比其他地方大的多, 因此在畴壁附近产生微涡流。退火使反向畴生成核增多、磁畴细化, 从而降低高频损耗; W_c 为宏观涡流, 可以通过涂 PI 膜, 使层与层之间绝缘, 以防涡流。

以上从宏观角度探讨了磁场纳米晶化改善纳米晶软磁特性的原理, 以下将从微观角度进一步分析。

将 Polaks 钉扎模型应用于软磁薄带, 如图 2.1.2 所示。

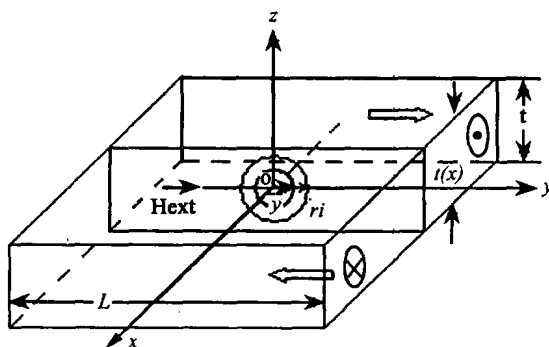


图 2.1.2 磁畴模型

由 180° 的 Bloch 壁分开的两个相等的畴如图 2.1.2 所示。

整个系统能量可写为磁畴壁能 E_w 和塞曼能 E_z 之和。

$$E = E_w + E_z \quad (2.1.2)$$

而畴壁能密度在掺杂时可写为:

$$\gamma'(x, y) = \gamma(x) \left[1 - \pi \sum_{i=0}^N (r_i^2 - y^2) n_i \right] \quad (y \leq r_i) \quad (2.1.3)$$

$$E_w = \gamma'(x, y) t(x) L \quad (2.1.4)$$

$$E_z = -2H_e x M_S L \int_0^L i(x') dx' \quad (2.1.5)$$

其中, r_i 为杂质半径; n_i 为杂质粒子密度; γ' 为畴壁能密度; $t(x)$ 为薄带厚度; L 为薄带长度。

对式(2.1.2)求偏微分:

$$\frac{\partial E_w}{\partial x} + \frac{\partial E_w}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial x} = 0 \quad (2.1.6)$$

将式(2.1.4)、式(2.1.5)代入式 (2.1.6), 整理得:

$$H_c = \left(\frac{1}{2M_S} \right) \left| \frac{\partial \gamma^2}{\partial x} \right|_{\max} + \left(\frac{1}{2M_S} \right) \left| \left(\frac{\gamma^2}{t} \right) \frac{\partial t(x)}{\partial x} \right|_{\max} + \left(\frac{1}{M_S} \right) \left| \gamma^2(x) \right|_{\max} \pi \sum_{i=0}^N r_i n_i$$

$$=H_c^{po} + H_c^d + H_c^{in} \quad (2.1.7)$$

由 Herzer 异晶模型得

$$\left. \begin{aligned} \mu &= P_\mu P_c \frac{M_s}{\mu_0 H_c} \\ \mu &= P_\mu \left[\frac{M_s^2 A^2}{\mu_0 K^4 D^6} \right] \\ H_c &= P_c \left[\frac{K^4 D^6}{M_s^2 A^3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.1.8)$$

P_c 、 P_μ 为常数， A 为交换能， K 为磁晶各向异性常数， M_s 为饱和磁化强度， D 为晶粒直径。

由式(2.1.8)可知，为了改善纳米晶材料的软磁性能，必须细化其晶粒。在退火处理时，对各种退火方式进行比较，选择出一种新颖的快速循环退火方式(RRTA)，能有效地抑制晶粒长大，具体讨论见本书§2.2节。

§ 2.2 磁场退火与纳米晶化

将非晶薄带绕于合金骨架之上，其上再横向绕航空漆包线，漆包线两端接直流电源。横向绕线的目的，是为了保证进行横向外加磁场退火，如图2.2.1所示。

下面我们将对样品进行三种退火工艺处理：常规退火、快速冷却退火和快速循环退火(RRTA)。

一、常规退火(300℃)

工艺步骤如下：

- (1) 将样品放入炉腔中部；
- (2) 密封炉口，开真空机；
- (3) 加60V电压，升温；
- (4) 升温至100℃时，加直流0.6A(形成磁场)；
- (5) 升温至300℃，恒温60min；
- (6) 去掉电压，自然冷却，继续抽真空，通电流。

二、快速冷却退火(300℃)

工艺步骤如下：

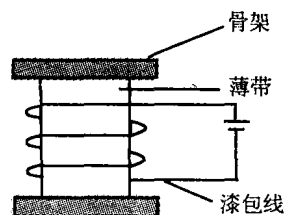


图 2.2.1 绕线示意图

(1)、(2)、(3)、(4)、(5) 步骤与常规退火相同；(6) 步骤为去掉电压，急速冷却，冷却速率为 20~30℃/min。

三、快速循环退火 (300℃)

工艺步骤如下：

- (1) 将样品放入炉中，加压升温，速率为 50~80℃/min；
- (2) 升温至 100℃，加 0.6A 电流；
- (3) 升温至 300℃，恒温 5min，然后以 80~120℃ /min 速率降温。
- (4) 降温至 100℃，继续步骤 2、步骤 3；
- (5) 如此反复 N 次， N 由晶化尺寸要求而定。

将上述三种退火方法的测量结果比较如图 2.2.2 所示。

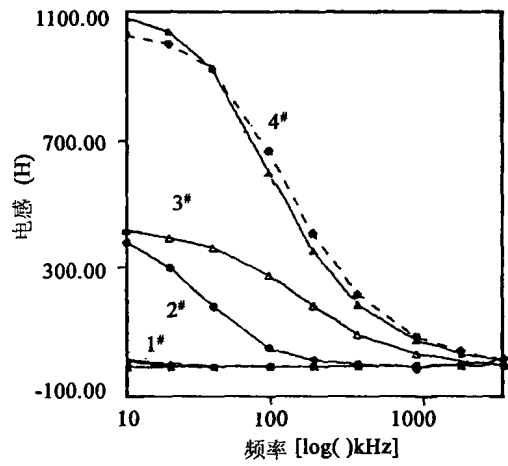


图 2.2.2 热处理工艺比较

图 2.2.2 中所示样品 1#、2#、3#为退火前 Co 基材料；样品 2#为真空炉 300℃常规退火，样品 3#为 320~330℃快速冷却退火，样品 4#为 350~360℃快速循环退火。

由图 2.2.2 可知，采用快速循环退火工艺样品，其电感值比未退火样品高出 2~3 个数量级，比常规退火方式高 4 倍以上，同时也比快速冷却退火样品高出很多。从物理性能来看，采用常规退火工艺，材料晶化后易脆，不易加工，而快速冷却材料性能略有改善，快速循环退火材料则柔性和磁性能均好。

快速循环退火(RRTA)之所以有如此的优点，主要机理在于其过程是一个自发催化、晶化过程，在晶化过程中大量晶胞的产生抑制了晶粒生长，从而能够有效地控制晶粒尺寸，使晶粒细化，结合 Herzer 理论，可知其软磁性能必然提高。

从晶化工艺的角度讲，最佳工艺条件为：升温速率为 30~100℃/min，恒温温度为 330~350℃，时间 3min，循环次数大于 3 次为好。

§ 2.3 内层绝缘与磁耦合

本节将探讨内层绝缘层问题。我们将采用 PI+铁氧体粉末成膜作为绝缘层，达到绝缘与磁耦合的双重目的。

一、PI 概述

电子元器件常用的绝缘层一般分为无机介质膜和有机介质膜。无机介质膜又可分为自体氧化膜和异体介质膜。有机介质膜是高分子化合物，膜结构致密，抗酸碱能力强，容易形成厚膜，这种优越性是无机介质膜无法比拟的。聚酰亚胺(PI)薄膜是现在国内外广为应用的一种有机介质膜，它是性能很好的高分子化合物，具有很好的热稳定性、电绝缘性、尺寸稳定性和抗碱性以及抗辐射性，它与金属和半导体的粘附性好，剩余应力小，且为低温工艺，易形成较厚的膜(5~10nm)。

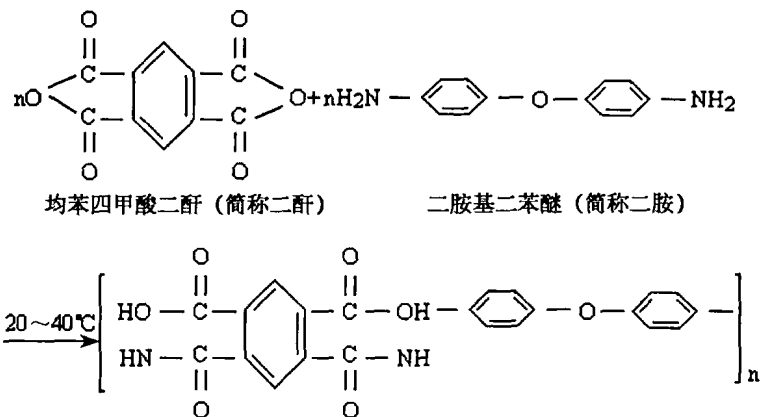
二、磁耦合

PI 膜有良好的绝缘性能，将其作为抗 EMI 器件的内层绝缘层，能有效地降低涡流损耗。但它作为磁疏介质，也不可避免地带来磁芯的电感量下降，磁损增加，分布电容增大等问题。因此，本节采用了“PI+铁氧体”的复合成膜技术。由于铁氧体的电阻率很大，可达 10^6 数量级以上，涡流损耗可忽略；同时，作为磁密介质，也可起到磁耦合作用。采用这样的复合成膜技术，既能达到层间绝缘的作用，又能增大层与层之间的磁耦合，从而增大电感量，减小磁损。

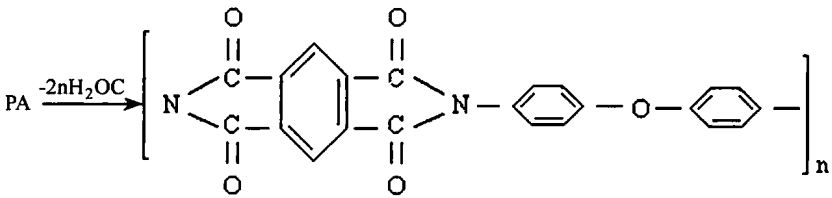
三、PI 膜成膜原理

下面介绍近年来广泛应用的合成聚酰亚胺的两步缩聚法。其过程为：在二甲基乙酰胺溶剂中配制成 PA 溶液，涂敷成型后进行热处理（亚胺化），使之转化成聚酰亚胺(PI)。

1. 聚酰亚胺酸(PA)的合成



2. 用热处理干燥层亚胺化制聚酰亚胺(PI)



在这一步中，通过阶梯升温、阶段保温，先在低温阶段（200℃以下）除去溶剂，再在高温阶段（200℃以上）使 PA 亚胺化（环化脱水）成 PI，在高温阶段，PA 生成 PI 过程中，还发生交联反应，使 PI 的某些性能更加增进。

四、PI 膜涂布工艺及电性能

1. 基本工艺流程

先将 PI 胶体溶液与适量的铁氧体微粉混合均匀，接着采用涂敷的方法进行镀膜，利用现有设备，采用烘箱法，通过阶梯升温、阶段保温，在 200℃ 以上使 PA 亚胺化（环化脱水），即得 PI。

2. 电学性能测试与分析

由于抗 EMI 器件对芯带材料绝缘技术有具体要求，在此只介绍抗 EMI 器件芯带材料镀制 PI 膜后，对其上 PI 膜作出测试分析。

其电学性能测试数据如表 2.3.1 所示。

表 2.3.1 PI 膜电学性能测试

材料	R(mΩ)		C(pF)		ε	tg δ		ρ (Ω · cm ³)	
PI ₁	10V 1.5×10 ⁵	100V 6×10 ⁴	47.7		0.424	0.038		10V 2.14×10 ¹⁴	100V 8.5×10 ¹³
PI ₂	2.6×10 ⁵	3.2×10 ⁴	74.9		0.6658	0.03		3.69×10 ¹⁴	4.54×10 ¹⁴
PI ₃	202.81KΩ	408KΩ	281.0	189.34	2.498	1.683	/	5.783×10 ⁸	2.878×10 ⁸
PI ₄	293.5	614	225.1	149.7	2.001	1.331	/	8.073×10 ⁸	4.160×10 ⁸
PI ₅	217.31	454	310	174.96	2.756	1.555	/	6.435×10 ⁸	3.080×10 ⁸
PI ₆	662	1078	76.4	52.5	0.679	0.404	/	1.528×10 ⁸	9.384×10 ⁸
频率	1kHz	10kHz	1kHz	10kHz	1kHz	10kHz	/	1kHz	10kHz

测试条件：基片直径 φ=9mm，温度 25℃，湿度 70%。

换算公式：

$$\epsilon = 14.4 \times \frac{C(\text{pF}) \cdot t(\text{cm})}{\phi \times \phi(\text{cm})}$$
$$\rho = \frac{R\phi^2}{t} \times 0.875$$