

软磁铁氧体 制造原理与技术

● 夏德贵 陆柏松 王洪奎 编著

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

软磁铁氧体制造原理与技术

夏德贵 陆柏松 王洪奎 编著

陕西出版集团
陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

软磁铁氧体制造原理与技术/夏德贵编著. —西安:
陕西科学技术出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 5369 - 4090 - 3

I. 软… II. 夏… III. 软磁材料 - 铁氧体 - 制造 IV.
TM277

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 156946 号

出 版 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话(029)87211894 传真(029)87218236
<http://www.snstp.com>

发 行 者 陕西出版集团 陕西科学技术出版社
电话(029)87212206 87260001

印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司

规 格 787mm × 1092mm 16 开本

印 张 36.75

字 数 950 千字

版 次 2010 年 12 月第 1 版
2010 年 12 月第 1 次印刷

定 价 96.00 元

版权所有 翻印必究

序

磁性材料是国民经济产业中一种基础的功能材料,随着世界经济的发展,人们的生活不断提高以及科学技术的迅速发展,尤其是电子信息社会的发展,磁性器件的应用范围也与日俱增,同时也对磁性材料不断提出高性能的要求。磁性材料的发展对整个国民经济相关行业的发展具有极其重要的意义。

目前,我国软磁铁氧体产量已居世界首位,但只是软磁大国,而不是软磁强国。编者带着强国梦,从磁学、电学、陶瓷工艺学等相关基础理论出发,汇集国内外有关报道并结合多年的工作经验,编著了《软磁铁氧体制造原理与技术》一书。

全书共分10章。第1章为绪论;第2至第4章分别论述了软磁铁氧体的化学组成、晶体结构、基本特征及工艺原理;第5至第9章阐述了锰锌、镍锌、镁锌、锂锌及平面六角晶系软磁铁氧体的制造原理与技术,重点介绍了高 μ_i 、高Bs和双高(高 μ_i 、高Bs)锰锌铁氧体材料;第10章介绍了新型软磁铁氧体材料。

本书对软磁铁氧体制造原理与技术论述得较为全面,具有一定的理论性、技术性和实用性。相信读者会从本书中得到有益启示,对我国软磁铁氧体的科研生产、应用推广和技术进步起到一些推动作用,从而提高磁性行业的整体发展水平。

沈仪俊

2009年12月

前 言

磁性材料分为金属和非金属磁性材料两大类,导电性是它们之间的主要差异。软磁铁氧体是非金属磁性材料中重要的一类,由于在高频下具有电阻率和 μ_i 值高、损耗低等特点而被广泛应用于工业、农业、电子信息及国防等领域。随着科学技术的发展,尤其是电子信息社会的发展,已成为国民经济产业中一种基础的功能材料。

软磁铁氧体是以氧化铁与其他金属氧化物为原料,用类似于陶瓷工艺制得的复合氧化物。在研制和生产过程中,涉及磁学、电学、电子学、陶瓷工艺学、物理学和化学等学科的理论和技术,所以软磁铁氧体的研制与生产是一门综合的技术。至今,国内外有许多关于软磁铁氧体材料研制和生产的报道,但是很难见到全面系统的软磁铁氧体制造原理与技术的专著。我们在总结多年工作经验的同时,收集了国内外有关资料,编著了《软磁铁氧体制造原理与技术》一书。全书共分10章,依据磁学、电学、陶瓷工艺学、物理和化学等学科相关的基础理论,较全面地论述了软磁铁氧体材料的制造原理、材料配方与制备工艺确定的依据以及材料性能与配方和工艺的关系,并结合有关资料阐述了MnZn、NiZn、MgZn、LiZn和平面六角晶系等主要软磁铁氧体的制造技术、部分材料制备工艺及主要工艺参数确定的原则。

由于国际磁性材料生产重心向发展中国家(地区)转移,这为我国铁氧体工业的发展创造了良好的机遇,编者期待通过本书,促进技术交流,为推进我国铁氧体材料的发展发挥一点积极的作用。本书可供从事铁氧体材料研究、设计和生产的工程技术人员、高等院校相关学科的本科生、研究生、教师参考;也可作为从事软磁铁氧体材料工作人员的技术手册及电子产品设计人员选用软磁铁氧体材料时的参考书。

书中所引用的资料尽量注明来源,但为编写体例的需要,部分做了取舍补充或变动。因涉及数量较多,没有一一说明,望原作者或原引用者谅解,并向引用参考资料的作者致以衷心的感谢。由于引用的资料使用的单位制不统一,在编写时大多已换算为国际单位制,但有些涉及图表或工业习惯用语的,仍保留原单位制。书后附有单位换算表,敬请读者参考换算。

本书在编写过程中得到了中国电子元件行业协会磁性材料与器件分会顾问教授级高级工程师仇仪俊、中国电子学会应用磁学分会副主任委员教授级高级工程师王会宗,高级工程师徐锦华、张正明等同志的大力支持和帮助,特别是南京14所魏克珠高级工程师,不顾工作繁忙,对本书逐字逐句进行了审定并提出了多处修改补充意见。高级物理教师成云翔,工程师梁冬菊、汪静宜在书稿的校正、修改、资料整理等方面做了大量的工作。在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者和同仁们批评指正。

编者

2009年2月

目 录

1. 绪论

1.1 磁性材料	(1)
1.2 铁氧体磁性材料	(2)
1.2.1 软磁铁氧体材料	(3)
1.2.2 硬磁铁氧体材料	(3)
1.2.3 旋磁铁氧体材料	(4)
1.2.4 矩磁铁氧体材料	(4)
1.2.5 压磁铁氧体材料	(5)
1.3 软磁材料与软磁铁氧体材料	(6)
1.3.1 金属软磁材料	(6)
1.3.2 软磁铁氧体材料	(6)
1.4 软磁铁氧体的发展史	(7)
1.5 软磁铁氧体材料的分类	(9)
1.6 软磁铁氧体材料的应用	(10)
参考文献	(11)

2. 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	(12)
2.1.1 单组分铁氧体	(12)
2.1.2 复合铁氧体	(14)
2.2 铁氧体晶体化学	(16)
2.2.1 铁氧体晶体中的化学键	(16)
2.2.2 球体密堆原理和鲍林规则	(17)
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	(21)
2.3 软磁铁氧体的晶体结构类型	(23)
2.4 尖晶石型铁氧体的晶体结构	(24)
2.5 尖晶石型铁氧体中金属离子分布规模及其影响因素	(26)
2.6 磁铅石型晶体结构与平面六角晶系铁氧体	(29)
2.6.1 磁铅石型铁氧体的晶体结构	(29)
2.6.2 磁铅石型复合铁氧体的晶体结构	(31)
2.6.3 平面六角晶系铁氧体	(31)
2.7 软磁铁氧体的微观结构与性能的关系	(32)
2.7.1 晶粒大小对性能的影响	(33)

2.7.2	晶界对性能的影响	(34)
2.7.3	晶粒均匀性对性能的影响	(34)
2.7.4	气孔对性能的影响	(34)
2.7.5	夹杂物对性能的影响	(36)
2.7.6	微观结构分析对改进材料制备工艺和提高材料性能的指导意义	(36)
参考文献		(37)
3. 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	(38)
3.2	尖晶石型铁氧体的磁性	(40)
3.3	磁畴和磁畴壁	(41)
3.4	决定软磁铁氧体基本磁性的主要因素	(42)
3.5	软磁铁氧体主要的内禀磁性	(44)
3.5.1	饱和磁化强度(M_s)	(44)
3.5.2	居里点或奈尔点(T_C 或 θ_N)	(45)
3.5.3	磁晶各向异性常数(K_1)	(48)
3.5.4	饱和磁致伸缩系数(λ_s)	(50)
3.6	软磁铁氧体的磁化特性	(52)
3.6.1	自发磁化与技术磁化	(52)
3.6.2	磁化曲线和磁化过程	(53)
3.6.3	以磁畴转动为主的磁化过程	(55)
3.6.4	以磁畴壁移动为主的磁化过程	(57)
3.6.5	磁滞和磁滞回线	(60)
3.6.6	磁性材料的磁导率	(62)
3.6.7	起始磁导率的理论概述	(64)
3.6.8	影响起始磁导率 μ_i 的主要因素	(65)
3.7	软磁铁氧体的频率特性	(66)
3.7.1	复数磁导率	(66)
3.7.2	铁氧体磁谱	(67)
3.7.3	影响磁谱的因素	(68)
3.7.4	软磁铁氧体的截止频率(f_r)	(73)
3.7.5	提高截止频率的方法	(74)
3.8	软磁铁氧体材料的损耗	(77)
3.8.1	磁损耗的分类	(77)
3.8.2	软磁铁氧体材料损耗产生的机理及影响因素	(79)
3.8.3	降低磁损耗的方法	(81)
3.9	软磁铁氧体材料的稳定性	(85)
3.9.1	软磁铁氧体材料的温度稳定性	(85)
3.9.2	软磁铁氧体材料的时间稳定性	(95)
3.9.3	软磁铁氧体材料的频率稳定性	(102)

3.9.4 软磁铁氧体材料的机械稳定性	(103)
3.9.5 软磁铁氧体材料的环境适应性	(103)
3.10 软磁铁氧体的电学性能	(103)
3.10.1 铁氧体的电阻率 ρ	(104)
3.10.2 铁氧体的导电机制	(104)
3.10.3 提高铁氧体电阻率的途径	(106)
3.10.4 铁氧体的介电特性	(108)
3.11 软磁铁氧体的其他物理性能	(110)
3.11.1 机械性能	(110)
3.11.2 热学性能	(114)
3.11.3 软磁铁氧体材料的吸湿性	(116)
3.11.4 密度	(117)
参考文献	(119)
4 软磁铁氧体制造工艺原理	
4.1 软磁铁氧体制造工艺的理论依据	(120)
4.2 软磁铁氧体材料的制造方法及工艺流程	(122)
4.2.1 氧化物法	(122)
4.2.2 化学共沉淀法	(123)
4.2.3 盐类分解法	(123)
4.2.4 喷雾培烧法	(124)
4.2.5 电解共沉淀法	(124)
4.2.6 金属醇盐法	(124)
4.2.7 熔融盐类法	(125)
4.2.8 冷冻法	(125)
4.3 制备软磁铁氧体的原材料	(125)
4.3.1 主要原材料	(126)
4.3.2 辅助材料	(144)
4.3.3 衡量软磁铁氧体原材料质量的主要指标	(154)
4.3.4 原材料质量对软磁铁氧体性能的影响	(156)
4.3.5 影响软磁铁氧体原料质量的主要因素以及选择原材料的一般原则	(158)
4.4 软磁铁氧体的配方	(159)
4.4.1 软磁铁氧体的配方组成	(159)
4.4.2 三元相图及主配方的选取	(159)
4.4.3 副配方的作用	(160)
4.4.4 原料中固有杂质和制造过程中“加杂”的关系	(164)
4.4.5 配方设计的主要原则及确定配方的步骤	(165)
4.4.6 软磁铁氧体配方的表示方式及配方计算	(165)
4.5 粉料制备技术	(167)
4.5.1 粉料制备技术的发展历程	(167)

4.5.2	配料	(168)
4.5.3	混合	(169)
4.5.4	预烧	(169)
4.5.5	球磨	(171)
4.5.6	造粒	(179)
4.5.7	两次喷雾造粒的工艺技术及特点	(184)
4.6	成型	(185)
4.6.1	干压成型	(185)
4.6.2	热压铸成型	(191)
4.6.3	等静压成型	(194)
4.6.4	加热成型	(196)
4.6.5	热压成型	(197)
4.6.6	注浆成型	(198)
4.6.7	高能成型	(199)
4.6.8	印刷成型	(200)
4.6.9	成型坯体的质量测控	(200)
4.7	烧结	(200)
4.7.1	固相烧结机理	(201)
4.7.2	固相反应	(211)
4.7.3	烧结设备	(218)
4.7.4	软磁铁氧体材料的烧结方法	(227)
4.7.5	软磁铁氧体的烧成制度与烧结工艺	(230)
4.8	软磁铁氧体材料生产中的质量控制	(233)
4.9	烧结产品的检测与处理	(235)
4.9.1	产品质量检测	(235)
4.9.2	烧后处理	(235)
参考文献		(237)
5	锰锌铁氧体制造原理与技术	
5.1	MnZn 铁氧体的基本特性及其应用	(239)
5.2	MnZn 铁氧体材料的分类	(240)
5.2.1	低 μ_i MnZn 铁氧体材料	(240)
5.2.2	高 μ_i MnZn 铁氧体材料	(240)
5.2.3	中 μ_i MnZn 铁氧体材料	(240)
5.2.4	双高 MnZn 铁氧体材料	(240)
5.2.5	高密度 MnZn 铁氧体材料	(241)
5.3	MnZn 铁氧体的配方设计	(241)
5.3.1	MnZn 系固溶体范围及 MnZn 铁氧体的最优配方点	(241)
5.3.2	MnZn 铁氧体的相图	(242)
5.3.3	MnZn 铁氧体配方设计的特殊性及配方设计步骤	(250)

5.3.4 MnZn 铁氧体主配方的设计	(250)
5.3.5 MnZn 铁氧体副配方的设计与主要添加剂的作用	(252)
5.4 选择 MnZn 铁氧体原材料的原则	(261)
5.5 生成 Mn 铁氧体和 MnZn 铁氧体的化学反应及其生成条件	(262)
5.5.1 Mn 离子的变价问题	(262)
5.5.2 Fe 离子的变价问题	(263)
5.5.3 生成 Mn 和 MnZn 铁氧体化学反应及生成条件	(263)
5.6 Zn 铁氧体的特性及对 MnZn 铁氧体性能的影响	(265)
5.7 烧结条件对 Mn 和 MnZn 铁氧体性能的影响	(267)
5.7.1 烧结温度对性能的影响	(267)
5.7.2 烧结气氛对性能的影响	(268)
5.7.3 冷却条件对性能的影响	(269)
5.8 MnZn 铁氧体材料的烧结方式与烧结方法	(271)
5.8.1 烧结方式	(271)
5.8.2 烧结方法	(272)
5.9 MnZn 铁氧体的平衡气氛烧结	(277)
5.9.1 平衡气氛烧结的基本原理	(277)
5.9.2 平衡气氛烧结的方法	(278)
5.10 低 μ_i MnZn 铁氧体材料	(282)
5.10.1 低 μ_i 材料主要技术指标范围	(282)
5.10.2 低 μ_i 材料的配方及制造工艺	(282)
5.10.3 低 μ_i MnZn 铁氧体材料生产的主要产品	(283)
5.10.4 用廉价原材料制备低 μ_i MnZn 铁氧体材料	(287)
5.11 高磁导率 MnZn 铁氧体材料	(289)
5.11.1 高 μ_i 材料的现状	(289)
5.11.2 高 μ_i 材料的主要特性及应用	(290)
5.11.3 提高起始磁导率 μ_i 的方法	(291)
5.11.4 生产高 μ_i 材料的原材料	(294)
5.11.5 高 μ_i MnZn 铁氧体的配方	(295)
5.11.6 高 μ_i 材料的制造工艺	(297)
5.11.7 高 μ_i MnZn 铁氧体材料生产技术实例	(301)
5.11.8 宽频高磁导率 MnZn 铁氧体材料	(303)
5.11.9 高导低损耗 MnZn 铁氧体制造方法	(308)
5.12 功率铁氧体材料	(309)
5.12.1 开关电源技术发展动向及对功率铁氧体的要求	(309)
5.12.2 功率铁氧体材料的发展历程及其现状	(310)
5.12.3 功率铁氧体的配方	(314)
5.12.4 功率铁氧体制造工艺	(315)
5.12.5 低损耗功率铁氧体材料	(317)

5.12.6	高频低损耗功率铁氧体材料	(319)
5.12.7	高温高 B_s 功率铁氧体材料	(320)
5.12.8	低常温功耗宽温功率铁氧体材料	(321)
5.13	贫铁 MnZn 铁氧体材料	(323)
5.13.1	贫铁 MnZn 铁氧体的配方、制造工艺及其特性	(323)
5.14.2	贫铁 MnZn 铁氧体磁芯在共模扼流圈中的作用	(324)
5.14	低损耗高稳定性 MnZn 铁氧体材料	(324)
5.14.1	超优 MnZn 铁氧体的特性及有关物理参数	(324)
5.14.2	超优 MnZn 铁氧体的配方条件	(326)
5.14.3	添加剂对性能的改进	(327)
5.14.4	制备超优 MnZn 铁氧体的主要工艺参数	(327)
5.14.5	等导铁氧体与稳定化巨明伐铁氧体	(328)
5.15	化学共沉淀法制备高性能软磁铁氧体材料	(330)
5.15.1	化学共沉淀机理及沉淀方法与条件	(330)
5.15.2	化学共沉淀法的工艺特点及应用	(332)
5.15.3	化学共沉淀法制造高性能软磁铁氧体的工艺流程及其共沉淀设备	(333)
5.15.4	碳酸盐共沉淀法制备锰锌铁氧体材料	(334)
5.15.5	化学共沉淀法制备超优铁氧体材料	(337)
5.15.6	化学共沉淀法的其他用途	(339)
5.16	双高 MnZn 铁氧体材料	(340)
5.16.1	双高材料的发展及主要特性	(340)
5.16.2	双高材料的制备方法概述	(341)
5.16.3	用氧化物法制备双高 MnZn 铁氧体材料	(342)
5.16.4	化学共沉淀法制备双高 MnZn 铁氧体材料	(343)
5.16.5	勾兑法制备双高 MnZn 铁氧体材料	(344)
5.16.6	等静压成型制造双高 MnZn 铁氧体材料	(345)
5.17	MnZn 铁氧体材料和磁芯的直流叠加特性及其改善途径	(346)
5.17.1	偏磁化及增量磁导率	(346)
5.17.2	直流叠加特性	(347)
5.17.3	电感直流叠加特性的表示形式及测试方法	(349)
5.17.4	改善直流叠加特性的主要途径	(349)
参考文献		(352)
6 镍锌铁氧体制造原理与技术		
6.1	NiZn 铁氧体材料的主要特性及其应用	(355)
6.2	NiZn 铁氧体材料的分类	(356)
6.3	NiZn 铁氧体的配方设计	(357)
6.3.1	NiZn 系固溶体范围及 NiZn 铁氧体的最优配方区	(357)
6.3.2	NiZn 铁氧体的相图	(358)
6.3.3	NiZn 铁氧体的基本特性与组成的关系	(362)

6.3.4	NiZn 铁氧体的主配方设计	(364)
6.3.5	多元复合铁氧体	(366)
6.3.6	添加剂对 NiZn 铁氧体性能的影响及副配方设计	(367)
6.4	NiZn 铁氧体的制造工艺原理及确定主要工艺参数的理论依据	(375)
6.4.1	氧化锌的凝聚和 ZnO、NiO、Fe ₂ O ₃ 的混合	(375)
6.4.2	NiZn 铁氧体预烧和氧化锌的异常膨胀	(376)
6.4.3	脱锌和 NiZn 铁氧体的烧结	(377)
6.4.4	冷却方式对 NiO - ZnO - Fe ₂ O ₃ 系各区域相组成的影响	(378)
6.5	NiZn 铁氧体的制造工艺及设备	(379)
6.6	高频 NiZn 铁氧体材料	(381)
6.6.1	配方的选择	(381)
6.6.2	制造工艺	(382)
6.6.3	生产技术实例	(382)
6.7	大功率 NiZn 铁氧体材料	(383)
6.7.1	大功率 NiZn 铁氧体的基本特性及应用	(383)
6.7.2	机理分析	(384)
6.7.3	配方的选择	(384)
6.7.4	提高临界场 h_c 的方法及制造工艺概述	(385)
6.7.5	大功率 NiZn 铁氧体材料实例	(387)
6.8	高温稳定性 NiZn 铁氧体材料	(388)
6.8.1	负温度系数 NiZn 铁氧体材料	(388)
6.8.2	线性—小温度系数 NiZn 铁氧体材料	(389)
6.8.3	高频低损耗线性—小温度系数 NiZn 铁氧体材料	(390)
6.8.4	低减落可控温度系数 NiZn 铁氧体材料	(391)
6.9	低温烧结 NiCuZn 铁氧体材料	(392)
6.9.1	降低 NiZn 铁氧体烧结温度的方法	(393)
6.9.2	NiCuZn 铁氧体的烧结机制	(393)
6.9.3	NiCuZn 铁氧体的主配方	(393)
6.9.4	助溶剂的作用	(394)
6.9.5	添加剂对 NiCuZn 铁氧体性能的影响	(396)
6.9.6	生产低温烧结 NiCuZn 铁氧体的原材料	(401)
6.9.7	低温烧结 NiCuZn 铁氧体制造工艺的特殊性	(401)
6.9.8	高电阻率低损耗 NiCuZn 铁氧体材料	(404)
6.9.9	高韧性和抗弯强度高的 NiCuZn 铁氧体材料	(405)
6.9.10	缺铁 NiCuZn 铁氧体材料	(405)
6.9.11	低温烧结 NiCuZn 铁氧体磁粉	(408)
6.10	化学共沉淀法制备高性能镍锌铁氧体材料	(409)
6.10.1	草酸盐共沉淀法制备 NiZn 铁氧体的工艺流程及共沉淀工艺	(410)
6.10.2	化学共沉淀条件	(410)

6.10.3	共沉物的烘干与热分解反应	(411)
6.10.4	预烧温度与粉料活性及颗粒度的关系	(412)
6.10.5	粉料预烧温度对铁氧体性能的影响	(412)
6.10.6	球磨	(413)
6.10.7	磁芯的制备	(413)
参考文献		(413)
7 镁锌和锂锌软磁铁氧体制造原理与技术		
7.1	MgZn 铁氧体的基本特性及其应用	(415)
7.2	MgZn 铁氧体的配方设计	(415)
7.2.1	Mg 铁氧体的特性	(416)
7.2.2	MgZn 铁氧体的组成及 Zn 含量对其性能的影响	(416)
7.2.3	MgZn 铁氧体的主配方范围	(419)
7.2.4	添加剂	(419)
7.3	MgZn 铁氧体材料的工艺特点及制造工艺	(420)
7.3.1	制造 MgZn 铁氧体材料的工艺特点	(420)
7.3.2	烧结条件对 MgZn 铁氧体性能的影响	(422)
7.3.3	热处理对 MgZn 铁氧体性能的影响	(423)
7.3.4	MgZn 铁氧体材料的制造工艺细则	(425)
7.4	低损耗 MgZn 铁氧体材料	(426)
7.4.1	配方的选择	(427)
7.4.2	制造工艺对 MgZn 铁氧体功耗的影响	(427)
7.4.3	制造工艺	(428)
7.5	低温烧结 MgCuZn 铁氧体材料	(429)
7.6	MgZn 铁氧体天线磁芯制造技术	(429)
7.6.1	低温淬火制造 MgZn 铁氧体中短波磁芯	(430)
7.6.2	加入 CaCO_3 提高 MgZn 铁氧体磁芯的短波性能	(431)
7.6.3	用富铁矿(Fe_3O_4)制造 MgZn 铁氧体天线磁芯	(431)
7.6.4	用铁磷代替氧化铁制造 MgZn 铁氧体中短波天线磁芯	(432)
7.7	彩色偏转磁芯及彩偏铁氧体材料	(432)
7.7.1	彩色偏转磁芯	(433)
7.7.2	高清晰度偏转铁氧体材料	(436)
7.7.3	彩偏磁芯的制造技术	(438)
7.8	Li 和 LiZn 软磁铁氧体材料的特性及应用	(441)
7.9	LiZn 铁氧体的配方	(442)
7.9.1	主配方	(442)
7.9.2	添加剂(副配方)的作用	(443)
7.10	LiZn 铁氧体的制造工艺原理及制造工艺	(444)
7.10.1	原材料与混料	(445)
7.10.2	生成 LiZn 铁氧体的化学反应	(445)

7.10.3 LiZn 铁氧体的致密化过程	(445)
7.10.4 制造工艺	(446)
7.11 具有高电阻率的 LiTiZn 软磁铁氧体材料	(447)
7.12 低温烧结 LiZn 软磁铁氧体材料	(447)
参考文献	(448)
8 平面六角晶系铁氧体制造原理与技术	
8.1 平面六角晶系铁氧体材料的现状及应用	(449)
8.2 六角晶系铁氧体的各向异性与平面六角晶系铁氧体	(450)
8.3 平面六角晶系铁氧体的种类	(454)
8.3.1 按化学组成分类	(454)
8.3.2 按晶体结构分类	(455)
8.4 平面六角晶系铁氧体的基本磁性	(455)
8.4.1 自然共振频率	(456)
8.4.2 起始磁导率	(456)
8.4.3 六角晶系铁氧体的饱和磁化强度与居里点	(457)
8.4.4 离子取代对六角晶系铁氧体性能的影响	(461)
8.5 平面六角晶系铁氧体的化学组成与配方	(462)
8.5.1 六角晶系铁氧体的化学组成	(462)
8.5.2 平面六角晶系铁氧体的配方	(463)
8.6 平面六角晶系铁氧体的制造方法与制造工艺	(464)
8.6.1 一般氧化物法	(464)
8.6.2 拓扑反应工艺	(465)
8.6.3 决定平面型铁氧体磁性能的主要参数——取向度 f	(465)
8.6.4 提高平面型铁体取向度 f 的方法	(466)
8.6.5 制造工艺流程及工艺细则	(467)
8.7 Me_2Y 型平面六角晶系铁氧体材料	(467)
8.8 Co_2Z 型平面六角晶系铁氧体材料	(469)
8.8.1 Co^{2+} 离子的作用	(470)
8.8.2 离子取代对 Co_2Z 型铁氧体性能的影响	(471)
8.8.3 掺杂对 Co_2Z 型铁氧体性能的影响	(472)
8.8.4 制造 Co_2Z 型铁氧体材料的主要工艺参数	(472)
8.9 低温烧结平面六角晶系铁氧体材料	(472)
参考文献	(474)
9 铁氧体电磁波吸收材料的制造原理与技术	
9.1 电磁波吸收材料吸波的基本原理	(476)
9.1.1 干涉作用	(476)
9.1.2 吸收作用	(477)
9.2 电磁波吸收材料的种类	(478)
9.2.1 按吸收机理分类	(478)

9.2.2	按成型工艺和承载能力分类	(478)
9.2.3	按电磁波吸收剂分类	(478)
9.2.4	按频段分类	(479)
9.2.5	电磁波吸收材料分类的新提法	(480)
9.3	吸波材料吸波性能的表征及主要参数	(480)
9.4	铁氧体电磁波吸收材料的现状、种类、特性及其发展	(481)
9.4.1	铁氧体电磁波吸收材料的现状	(481)
9.4.2	铁氧体电磁波吸收材料的种类	(482)
9.4.3	铁氧体电磁波吸收材料的主要特性	(483)
9.4.4	铁氧体电磁波吸收材料的发展	(483)
9.5	铁氧体电磁波吸收材料的设计原理	(484)
9.5.1	铁氧体吸收壁原理	(484)
9.5.2	铁氧体电磁波吸收材料的设计	(485)
9.5.3	铁氧体电磁波吸收材料的匹配频率 f_m 与匹配厚度 t_m 的确定方法	(487)
9.6	铁氧体吸收剂	(488)
9.6.1	铁氧体吸收剂的现状与研究进展	(488)
9.6.2	铁氧体吸收剂的磁损耗机理	(490)
9.6.3	吸收剂性能的表征	(491)
9.6.4	铁氧体吸收剂的工艺特点及其制造方法	(493)
9.7	胶黏剂与添加剂	(496)
9.7.1	胶黏剂的基本技术性能	(496)
9.7.2	常用的胶黏剂	(496)
9.7.3	胶黏剂的比较	(497)
9.7.4	胶黏剂的选择原则	(498)
9.7.5	添加剂	(499)
9.8	复合铁氧体电磁波吸收材料的制备方法	(499)
9.8.1	复合铁氧体电磁波吸收材料制造工艺流程	(499)
9.8.2	压延成型	(500)
9.8.3	挤压成型	(501)
9.8.4	注射成型	(501)
9.8.5	模压成型	(502)
9.9	平板型烧结铁氧体吸波材料的制造工艺及其特点	(502)
9.9.1	制造工艺	(503)
9.9.2	制造工艺的特点	(503)
9.10	单层平板型复合铁氧体电磁波吸收材料	(504)
9.11	双层及多层复合铁氧体电磁波吸收材料	(506)
9.12	结构型吸波材料	(508)
9.12.1	层压平板型结构复合吸波材料	(508)
9.12.2	夹层(芯)型结构复合吸波材料	(509)

9.12.3 复合铁氧体吸波板材及棒材	(510)
9.13 铁氧体电磁波吸收涂料及吸波腻子	(510)
9.13.1 铁氧体吸波涂料的制造工艺	(511)
9.13.2 吸波腻子	(511)
9.14 铁氧体吸波材料的应用	(512)
9.14.1 铁氧体吸波材料在隐形技术领域中的应用	(512)
9.14.2 防止电磁辐射减少电磁污染	(513)
9.14.3 消除国防设备中的电磁干扰改善整机性能	(514)
9.14.4 铁氧体电磁波吸收材料在微波暗室中的应用	(514)
9.14.5 安全防护	(515)
9.14.6 保护机密电磁信息	(515)
9.14.7 消除电视重影	(515)
9.14.8 利用铁氧体吸波材料制作波导与同轴吸收元件及吸收与承载复合部件	(515)
9.15 “电磁兼容”及抗电磁波干扰铁氧体材料	(516)
9.15.1 电磁兼容及其标准体系	(516)
9.15.2 电磁兼容中构成电磁干扰的主要因素	(517)
9.15.3 电磁兼容中的抗电磁干扰技术	(518)
9.15.4 抗 EMI 的软磁铁氧体材料及器材	(518)
9.15.5 抗电磁干扰磁性材料在电磁兼容控制中的应用	(520)
参考文献	(521)
10 新型软磁铁氧体材料	
10.1 单晶软磁铁氧体材料	(522)
10.1.1 单晶铁氧体的特性及应用	(522)
10.1.2 单晶铁氧体的制造方法	(522)
10.2 纳米铁氧体材料	(525)
10.2.1 纳米磁性材料的磁性	(525)
10.2.2 纳米材料的类型及纳米磁性材料的分类	(525)
10.2.3 纳米铁氧体磁性材料的制备方法	(526)
10.2.4 纳米铁氧体材料的现状、应用及研究方向	(530)
10.3 高密度微晶软磁铁氧体材料	(531)
10.3.1 喷雾焙烧法	(531)
10.3.2 水热合成法	(531)
10.4 铁氧体薄膜	(533)
10.4.1 铁氧体薄膜在电子产品小型化中的作用及其应用	(533)
10.4.2 铁氧体薄膜的制备	(534)
10.5 铁氧体复合材料	(541)
10.5.1 功能复合材料	(542)
10.5.2 磁性复合材料与铁氧体复合材料的种类、特性及应用	(542)

10.5.3 铁氧体复合材料的制备	(544)
10.6 磁性液体	(545)
10.6.1 磁性液体的发展与现状	(545)
10.6.2 磁性液体的特性	(546)
10.6.3 磁性液体的种类	(547)
10.6.4 磁性液体的制备	(549)
10.6.5 磁性液体的主要应用	(553)
10.7 磁性微球	(556)
10.7.1 磁性微球的分类及特性	(556)
10.7.2 磁性微球的组成及制造方法	(556)
10.7.3 生物高分子磁性微球	(558)
10.8 敏感铁氧体材料	(560)
10.8.1 温敏铁氧体材料	(561)
10.8.2 力敏铁氧体材料	(563)
10.8.3 湿敏铁氧体材料	(566)
10.8.4 气敏铁氧体材料	(567)
参考文献	(568)