

内 容 简 介

本书着重讲述铝镍钴永磁合金和稀土钴永磁合金整个生产工艺过程。它深入浅出地对永磁合金的工艺原理以及各种工艺因素对合金性能的影响作了较全面的介绍。

本书作为电子元器件专业工人技术培训教材,也可供从事这方面工作的干部、管理人员以及技工学校师生参考。

永磁合金工艺

电子元器件专业技术培训教材编写组

责任编辑: 边际

*

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

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.69 字数: 195千字

1984年12月第1版 1985年2月第1次印刷

印数: 4700 定价: 1.60元

统一书号: 15290·31

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、职业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。但由于电子元器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。

《永磁合金工艺》由仇仪俊同志担任主编，张业万同志

担任主审，徐锦华、苗习慧、陈子茂等参加了部分编写工作，林健康等参加了部分审稿工作。本书编写过程中得到了电子工业部四三九〇厂、七九八厂和八九九厂等单位的大力支持，在此表示感谢。

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 永磁合金的概况

第一节 永磁合金的发展历史	1
第二节 永磁合金的分类	5
一、淬火硬化型合金	5
二、析出(沉淀)硬化型合金	6
三、时效硬化型合金	6
四、有序硬化型合金	7
五、单相微粉永磁合金	7
六、稀土永磁合金	8
第三节 永磁合金的基本特性和主要磁性参数	9
思考题	12

第二章 铸造永磁合金的造型

第一节 型砂的性能	13
第二节 普通砂型铸造	15
一、造型材料	15
二、型砂制备	22
三、型砂的质量检验	24
四、砂型制造和烘干	25
第三节 铝矾土砂型铸造	27
一、型砂配比	27
二、型砂的配制工艺	28
三、造型操作工艺	28
四、砂型的烘烤	29
第四节 呋喃 I 型树脂砂铸造	29
一、造型材料	30
二、呋喃 I 型树脂砂的配制	33

三、砂型的制造与烘干	34
第五节 磁钢的模具及浇注系统	35
一、模具的设计	35
二、浇注系统的设计	37
三、型芯的应用与设计	48
思考题	50

第三章 铸造永磁合金的熔炼

第一节 铸造永磁合金所用原材料	51
一、杂质含量对合金性能的影响	51
二、铸造永磁合金所用原材料的技术标准	54
第二节 合金的熔炼	57
一、熔炼原理	57
二、感应炉的构造原理及使用与维护	58
第三节 坩埚的制作	60
一、对坩埚的要求	60
二、坩埚材料	61
三、坩埚的打结与烘烤	61
四、坩埚的使用和维护	63
第四节 配料	63
第五节 合金的熔炼工艺	65
第六节 合金的浇注	67
一、浇注前的准备工作	68
二、浇注	68
第七节 打箱清理和修正	70
第八节 制取定向结晶磁钢的方法	71
思考题	77

第四章 永磁合金的成分和热处理

第一节 铝镍钴系合金的相图及相结构	78
一、铁镍铝三元合金相图	79

II

二、铝镍钴系相图及相结构	81
三、Al-Ni-Co 合金的脱溶过程	83
第二节 铝镍钴合金的热处理工艺	86
一、固溶处理	87
二、磁场热处理	90
三、冷却速度	95
四、等温温度和时间对磁性能的影响	104
五、Al-Ni-Co 永磁合金的回火处理	104
六、AlNiCo5合金的低温热处理	114
第三节 热处理极头及设备	118
一、热处理使用的极头	118
二、热处理磁场设备示例	121
思考题	123

第五章 磁钢的磨加工

第一节 磨削的基本原理和概念	124
一、磨削的基本原理和过程	124
二、有关磨削的基本概念	126
三、冷却液的作用、要求和配制	128
第二节 砂轮	129
一、砂轮的特性	129
二、砂轮的选择	136
三、常用砂轮的规格	138
四、砂轮的安装和修整	139
第三节 磨夹具	140
一、通用夹具	141
二、磁性夹具	143
三、正弦夹具	143
四、专用夹具	143
第四节 磁钢磨加工质量	148

一、磨加工废品的种类	144
二、磨加工产生废品的原因	144
三、防止磨加工废品的办法	145
第五节 磨床的维护、保养和安全生产	146
第六节 磁钢的其他加工方法介绍	147
一、阳极切割	147
二、电解加工	149
三、电火花加工	150
四、线切割加工	150
思考题	152

第六章 烧结磁钢的工艺

第一节 概述	153
第二节 金属粉末的制备	155
一、金属粉末的生产方法	156
二、金属粉末的性能	161
三、烧结磁钢生产用金属粉末的制备	165
四、烧结磁钢合金粉末的配料与混合	168
五、制备中间合金的新工艺	170
第三节 烧结磁钢的压制	171
一、压模	172
二、烧结磁钢的压制工艺	176
第四节 烧结磁钢的烧结	180
一、烧结的定义	180
二、烧结的方法	181
三、合金的烧结过程和烧结制度	183
四、真空烧结工艺	187
第五节 高矫顽力的铝镍钴钛永磁合金的烧结工艺	189
一、配方	189
二、烧结	190

三、热处理	191
思考题	192
第七章 磁钢的检验和质量分析	
第一节 磁性能的检验	193
一、材料磁性参数的测量——冲击法	194
二、产品磁性能的检验	196
三、磁钢的例行试验	210
第二节 磁钢的尺寸及外观检验	211
一、磁钢的尺寸检验	211
二、磁钢的外观检验	215
第三节 磁钢产品的质量分析	216
一、磁性能不合格的原因及防止方法	216
二、产品的外观和几何尺寸不合格的原因及防止办法	218
三、磁钢的内部缺陷	221
思考题	226
第八章 稀土钴永磁合金	
第一节 稀土钴金属间化合物及其物理性能	227
第二节 稀土钴永磁合金的制造	231
一、烧结稀土钴永磁合金的制造	231
二、粘结稀土钴永磁体的制造	254
三、稀土钴永磁合金的加工	259
四、稀土钴永磁合金的充磁和检验	259
第三节 稀土永磁合金的发展和应用	261
一、稀土永磁合金的发展方向	261
二、稀土永磁合金的应用	261
思考题	263
附表1 铝镍钴永磁合金新旧牌号对照及磁特性表	
附表2 MKSA 制和 CGSM 制磁学单位换算表	

第一章 永磁合金的概况

第一节 永磁合金的发展历史

永磁合金的生产和应用已有很长的历史。在公元前四百多年，我国劳动人民在与自然界斗争中发现了磁石吸铁的现象，进而创造了司南和罗盘仪。十九世纪以来，随着工业和科学技术的不断发展，永磁合金的生产和应用也有了很大的进展。

约在 1880 年前就开始用碳钢来制造永磁体，最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 只有 0.2 兆高·奥。1873 年出现加入钨以改善磁性的钨钢。到 1885 年为了进一步改善碳钢的磁性而加入铬，制成铬钢。1916 年发现了加入钴的作用，试制出比碳钢、钨钢和铬钢的磁性要超过好几倍的钴钢，其矫顽力 H_{CB} 可达 260 奥。继高钴钢以后，又发展了不同含钴量的低钴钢和中钴钢。1931 年制成了以铁镍铝为基的磁体。1934 年和 1938 年相继试制成功了铝镍钴永磁体，并发现了磁场热处理的作用，从而使永磁体的磁性能出现了一个新的突破。与此同时，在 1931~1940 年期间还发现了铁钨钴和铁钼钴系合金以及铁钒合金，这种合金能够制造薄带和小型复杂的零件。1945 年又制成了 $H_{CB}=200$ 奥的铝钢，可以代替部分铬钢和钴钢。

自从铁镍铝三元合金出现以来，人们在合金成分，最佳热处理工艺（磁场热处理等）和结晶取向（柱状晶）的控制等方面做了大量的科学试验工作。1960 年 AlNiCo_5 的柱状

结晶由于采用了高温铸型定向浇注和区域熔炼法，使磁性能获得了很大的提高。1962年前后又发现了添加各种合金元素对柱状晶能起到促进长大的作用，同时集中对含钛高钴的 AlNiCo_8 永磁合金作了系统的研究，并实现了商品化生产。荷兰在1966年试制出 Ticonal X X 单晶体， $(BH)_{\max}$ 达 13.4 兆高·奥。苏联在1970年试制出单晶体， $(BH)_{\max}$ 达 12.6 兆高·奥。我国于1971年试制成功了最大磁能积为 12.5~13.5 兆高·奥的 AlNiCo_8 永磁合金。

用粉末冶金法制造的铁镍铝合金也获得了相应的发展。这种工艺方法，特别适合于体积小、尺寸精度高和大批量生产的零件，且能节省原材料。用这种方法制造的磁性能较低。据报导西德的烧结 AlNiCo_8 的磁性能已达到 $B_r = 7800$ 高斯， $H_{CB} = 1850$ 奥、 $(BH)_{\max} = 5.2$ 兆高·奥的水平。国内试制的烧结 AlNiCo_8 的磁性能为 $B_r = 7000 \sim 8000$ 高斯、 $H_{CB} = 1200 \sim 1450$ 奥、 $(BH)_{\max} = 3.5 \sim 4.5$ 兆高·奥。

与铝镍钴系永磁合金相继发展的永磁合金的种类还很多，例如成本低的 Mn-Al 合金，磁滞马达用的 Fe-Mn 合金，可加工 Pt-Co 合金以及新近发现的 Fe-Cr 系合金和 Ce-Cu-Co 系合金等等。

特别是在1970年日本金子秀夫发明了 Fe-Cr-Co 系永磁合金，由于它的永磁特性与 Al-Ni-Co 系相近似，而又具有突出的延展性，发展速度较快。 Fe-Cr-Co 系合金的磁各向异性和高磁能一般是通过磁场热处理达到的。1979年日本报导成分为 15%Co-22%Cr-1.5%Ti-Fe 合金的等轴晶的磁性能 $B_r = 15600$ 高斯、 $H_{CB} = 647$ 奥、 $(BH)_{\max} = 8.3$ 兆高·奥。成分为 15%Co-24%Cr-3%Mo-1%Ti-Fe 合金的柱状晶样品的磁性能： $B_r = 15300$ 高斯、 $H_{CB} = 837$ 奥、 $(BH)_{\max} = 9.5$

兆高·奥。1980年国外研究了用“变形时效”工艺来代替磁场热处理，变形时效 Cr-Co-Cu-Fe 合金含钴量为 16% 时 $(BH)_{\max}$ 可达 8 兆高·奥，含钴量 23% 时， $(BH)_{\max}$ 可达 10 兆高·奥。

Fe-Cr-Co 永磁合金的研究方向向低钴方面发展，从而减少了贵重金属钴的消耗，降低了成本。目前含钴量仅 2.5% 的合金 $(BH)_{\max}$ 值已达 4.2 兆高·奥，含钴量为 5% 的合金 $(BH)_{\max}$ 值已达 4.4 兆高·奥、含钴量为 9% 的合金 $(BH)_{\max}$ 值可达 6.2 兆高·奥。

近年来又出现兼有高磁能积和高矫顽力的稀土金属间化合物永磁材料，又称稀土永磁合金。从五十年代末开始，许多科学家在研究中发现稀土元素(La、Ce、Pr、Sm 等)和过渡族金属(如Fe、Co、Ni 等)可以形成多种金属间化合物。其中稀土金属和钴形成 RCo_5 型化合物具有很高的晶体各向异性和饱和磁化强度，具有很高的居里点，仅在短短的几十年中就获得了迅速的发展。目前这种永磁材料工艺成熟，早已实现商品化生产，并形成了许多系列。其中最主要的有 $SmCo_5$ 、 $Sm_{0.5}Pr_{0.5}Co_5$ 、 $Ce(Co, Cu, Fe)_5$ (1:5 型)、 $Sm_2(Co, Cu, Fe, Er)_{17}$ (2:17 型)等。最大磁能积高达 30.2 兆高·奥。1983年在我国召开的第七届国际稀土钴永磁及其应用的会议上，日本的金子秀夫宣称：日本住友金属公司已研制出高性能的钕铁永磁合金($NdFe_2$)，其磁性能 $Br = 12.5$ 千高斯， $H_{CJ} = 12.3$ 千奥， $H_{CB} = 11.1$ 千奥， $(BH)_{\max} = 38$ 兆高·奥，居里温度为 $350^{\circ}C$ 。这种材料我国也已达到较高水平。

稀土钴永磁合金广泛地应用于行波管、速调管、电子手表、音响器件、薄型扬声器、电机和磁悬轴承中。

1962年~1968年由日本发明廉价的 Mn-Al-C 合金，首

次在直接驱动型电唱机用的 DD 马达中得到了应用。1964 年牧野在合金中加入 Ti，冷锻回火后得到 $(BH)_{\max}$ 达 4.5 兆高·奥的各向异性磁体。1974 年苏联通过添加 Fe、Co、C、Ti、Mo 等元素进一步合金化，并通过冷加工， $(BH)_{\max}$ 达到 6.0 兆高·奥。1975 年日本报导了 $(BH)_{\max}$ 达 9.2 兆高·奥的单晶体，多晶体的性能为 8.4 兆高·奥，由于这种合金工艺比较复杂，生产量受到一定限制。

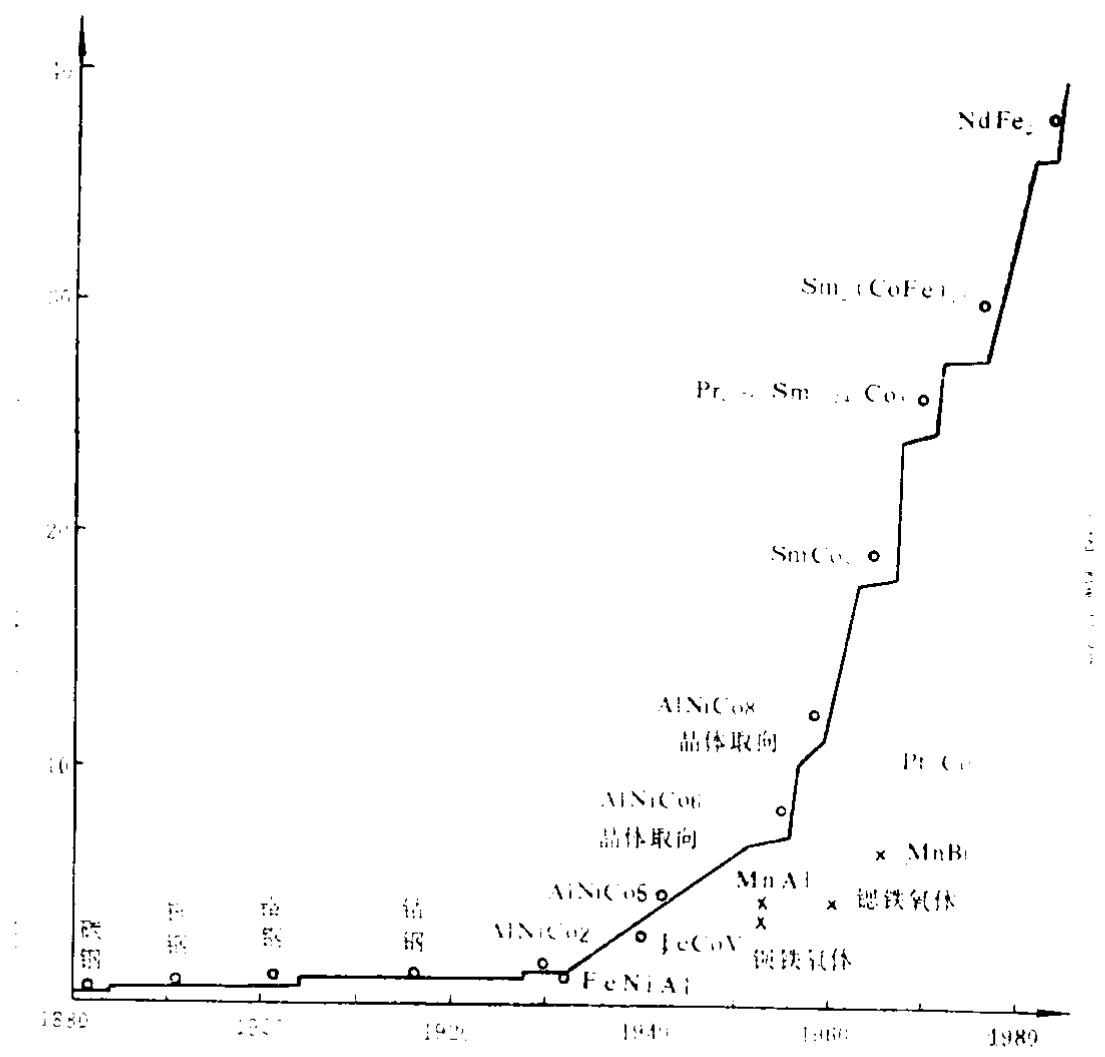


图 1-1 近一百年来永磁合金磁能积 $(BH)_{\max}$ (兆高·奥)的发展情况

图 1-1 示出了近一百年来永磁合金磁能积的提高和新品种出现的情况，可以看出在近一百年间，永磁合金的磁能积

提高了一百八十多倍。

第二节 永磁合金的分类

所谓永磁材料是指被充磁磁化后，去掉磁化场也仍然保留着强磁性的材料。金属永磁材料又称永磁合金或硬磁合金，在工厂中俗称磁钢。

永磁合金按生产工艺可分为浇注永磁合金、烧结永磁合金（粉末永磁合金）、单畴微粉永磁合金和可加工永磁合金。

按照永磁性能形成的机理，即按金属学的原理，永磁合金可分为下列各类：

一、淬火硬化型合金

属于这类的有碳钢、钨钢、铬钢、钴钢和铝钢。古代就是用碳钢来做永久磁铁，如指南针。这类永磁合金的磁能积和矫顽力都比较低（见表1-1）。它主要是通过高温淬火奥氏体转变为马氏体时产生应力来获得永磁特性。这类永磁合金由于磁性能低目前已极少采用。

表 1-1 淬火硬化型永磁合金磁性

名 称	成分(重量百分比)	B_r (高斯)	H_{CB} (奥)	$(BH)_{max}$ (兆高·奥)
碳钢	0.9%C、余Fe	9500	50	0.2
钨钢	0.7%C、0.3%Cr、6%W、余Fe	10500	66	0.3
铬钢	0.9%C、3.4%Cr、余Fe	9000	55	0.25
钴钢	0.74%Cr、7%W、35%Co、余Fe	12000	260	1.0
铝钢	2%C、8%Al、余Fe	6000	200	0.5

二、析出(沉淀)硬化型合金

这类永磁合金是以 Fe-Ni-Al 和 Fe-Ni-Al-Co 为基的高磁能积高矫顽力合金。其特点是在高温下合金呈单相状态(α 相),当冷却到两相区时,在一定的冷却速度下,利用 α 相析出磁性相 α_1 和非磁性相 α_2 而得到永磁性。目前最高磁能积可达 13.5 兆高·奥。

三、时效硬化型合金

这类永磁合金经过淬火以后具有可塑性而适于机械加工。合金的高矫顽力是通过淬火、塑性变形和时效硬化(回火)之后得到的。属于这类型的有四种:

1. α 铁基合金 包括钴钼、铁钨钴和铁钼钴, $(BH)_{\max}$ 大约在 1 兆高·奥左右,一般用在电话接收机上。

2. 铁锰钛和铁钴钒合金 铁锰钛合金的性能相当于低钴钢,但重要的是它不需要贵重金属。经冷轧和回火后可进行切削、弯曲和冲压等加工,一般用来制造指南针、仪表零件和磁录音元件等。铁钴钒合金的 $(BH)_{\max}$ 可达 3~4.2 兆高·奥。其工艺特点是铸造后不必淬火。为了提高磁性能在回火前必须经冷变形,而且含钒量越高,形变度越大,则获得的磁性也越好。

3. 铜基合金 包括铜镍铁和铜镍钴两种,最大磁能积在 0.8~1.9 兆高·奥之间。

4. 铁铬钴合金 磁性能可与 Al-Ni-Co 系合金相媲美,但机械加工性能比 Al-Ni-Co 系合金好得多,能够承受冷热塑性变形,通过压力加工可以制成丝、管、带、棒等。形变时效的 Cr-Co-Cu-Fe 合金含钴量 16% 时 $(BH)_{\max}$ 可达 8 兆

高·奥。含钴量为 23% 时可达 10 兆高·奥。

四、有序硬化型合金

这类永磁合金包括银锰钴、钴铂、铁铂和锰铝合金。在高温时，这类合金处于无序状态。经过淬火和回火以后由无序相中析出弥散状态的有序相，从而提高矫顽力。其磁性能见表 1-2。一般这种合金用来制造磁性弹簧、小型仪表元件和小型磁力马达的磁系统等。另外铂钴合金具有很强的耐腐蚀性，因而可以用于化学工业和测量、调节腐蚀性液体的仪表中。

表 1-2 有序硬化型永磁合金的磁性

名 称	成分(重量百分比)	B_r (高斯)	H_{CB} (奥)	H_{CI} (奥)	$(BH)_{max}$ (兆高·奥)
铂 钴	76.8%Pt、23.2%Co	6300	4100	4950	9.0
铁 铂	77.8%Pt、22.2%Fe	5830	1570		3.07
银锰铝	86.75%Ag、8.8%Mn、 4.45%Al	590	550	6700	0.08
锰 铝	72%Mn、28%Al	4280	2750	4600	3.5

五、单畴微粉永磁合金

单畴微粉永磁是最近几十年来随着单畴理论的发展研制成的一种新型永磁材料。属于这类材料的有锰铋合金、球形微铁粉和铁钴粉以及针状微铁粉和铁钴粉等三种。这种材料的磁铁都是由金属或合金的粉末在一定条件下压制而成的。微粉的颗粒只有单畴大小（一般为 1~0.01 微米）。压制成型后，基本上保持单畴状态。磁能积的大小主要取决于微粒

的形状各向异性，但其他许多因素也有影响。目前还只处在试制生产或小量生产阶段。锰铈合金最大磁能积可达 5.4 兆高·奥，球形微铁粉达 3.5 兆高·奥，针形微铁粉达 5 兆高·奥，见表1-3。

表 1-3 单畴微粉永磁材料磁性的理论值和实验值

名 称	数据来源	B_r (高斯)	H_{CB} (奥)	$(BH)_{max}$ (兆高·奥)
锰 铈 合 金 (1952年)	理论值	7800	7800	15.2
	实验值	4800	3050	5.4
球形微铁粉 (1955年)	理论值	14300	3600	38.5
	实验值	9000	700	3.5
针形微铁粉 (1957年)	理论值	16300	4100	49.9
	实验值	9050	1025	5.0
铁 钴 微 粉 (1962年)	理论值	—	—	—
	实验值	10800	980	6.5

六、 稀 土 永 磁 合 金

这是不同的稀土族元素和钴组成的金属间化合物。这类新发现的稀土钴永磁合金具有理想的永磁性能——相当高的饱和磁化强度和剩磁，极高的矫顽力和最大磁能积，极强的抗退磁能力，它的居里温度很高，可逆磁导率又接近于 1，所以在短短的几年内就获得了迅速的发展。一般可以用在较高温度和动态情况下工作的元件上，例如电子钟表、微型继电器、微型直流马达和发电机、助听器、薄型扬声器、行波管等微波通信器件、控制电路等方面。

第三节 永磁合金的基本特性和主要磁性参数

衡量永磁合金磁性主要有以下四个指标：剩磁 B_r 、矫顽力 H_{CB} 、磁极化强度矫顽力（内禀矫顽力） H_{CI} 和最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 。它们可以用退磁曲线来表示。

（一）剩磁 B_r

从磁性体的饱和状态，把磁场（包括自退磁场）沿饱和磁滞回线单调地减小到零时的磁感应强度（磁通密度）称为剩磁，用符号 B_r 来表示。单位在国际单位制（SI）中为毫特斯拉（mT），在厘米·克·秒制（CGS）中为高斯（Gs）。 $1 \text{ mT} = 10 \text{Gs}$ 。

（二）矫顽力 H_{CB}

从磁性体的饱和磁化状态，沿饱和磁滞回线单调改变磁场，使磁通密度为零时的磁场强度称为矫顽力。用符号 H_{CB} 表示。在 SI 制中单位为千安培/米（kA/m），在 CGS 制中单位为奥（Oe）。 $1 \text{kA/m} = 4\pi \text{Oe}$ 。

（三）磁极化强度矫顽力（内禀矫顽力） H_{CI}

从磁性体的饱和磁化状态，沿饱和磁滞回线单调改变磁场，使磁化强度减到零时的磁场强度称为磁极化强度矫顽力或内禀矫顽力，用符号 H_{CI} 表示，单位同 H_{CB} 。

（四）最大磁能积 $(BH)_{\max}$

永磁体在磁极间，即北极与南极间有吸力。例如两块磁体，一块可以把另一块从桌子上吸起来，可见磁铁的磁极附近空间存在能量，两磁极的空间也有能量，这个能便称为磁能。所谓磁能就是单位体积永磁体在它产生的外磁场中贮存