

微波电子管 磁路设计手册



国防工业出版社

R 73.64
709
2

微波电子管磁路设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较全面、系统地介绍了微波电子管磁路设计方法。全书共分九章。第一章微波电子管中常用磁性材料；第二章设计原理；第三章正交场磁路设计；第四章均匀场磁路设计；第五章周期场磁路设计；第六章螺旋管设计；第七章电磁铁设计；第八章电子计算机设计计算磁路；第九章磁测量。

本书可供从事微波电子管磁路设计工作的工程技术人员阅读，也可供电子物理、电真空器件专业的高等院校师生和其它有关专业的工程技术人员参考。

微波电子管磁路设计手册

电子管设计手册编辑委员会 编

责任编辑 刘树兰

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $17\frac{1}{2}$ 插页2 447千字

1984年2月第一版 1984年2月第一次印刷 印数：0,001—4,000册

统一书号：15034·2580 定价：3.10元

前 言

磁系统是微波电子管的重要组成部分，它直接影响到微波电子管的工作频率、功率、效率、噪声系数、稳定性和寿命。微波电子管的重量主要取决于磁系统的重量。因此，磁场的建立、磁系统的设计制造是微波电子管研制工作中的一个重要内容。

本手册系统地阐述了磁路（包括永磁和电磁）设计原理，导出并验证了有关设计计算公式以及它们的应用条件和适用范围；详细地介绍了几种典型磁路的设计方法和设计步骤，并列举了各种设计方法的计算实例；较全面地收集了磁系统中常用的永磁材料、金属软磁材料、磁温度补偿材料的种类、牌号、磁特性以及其它物理性能。书末还附有常见的各种磁路结构形式及其各项主要参数，供从事这方面实际工作的读者参考。

参加编写的主要人员有黄畅勋（第一章），易敬曾（第二章），朱庆源（第三章），赵柏甲（第四章、第五章），赵家伟、余星锄（第六章、第七章），鲍广德、邵毓华、姚云甫（第八章），徐锦华（第九章）。全书由余星锄、黄畅勋、鲍广德、朱庆源等修改整理。李焯校阅了全书的文、图。此外，有关部门的许多同志也为本书的编写和出版做了许多工作，在此谨表谢意。

限于编写人员的水平，错误之处在所难免，请读者批评、指正。

目 录

第一章	微波电子管磁系统常用的磁性材料	1
§ 1.1	概述	1
1.1.1	磁的基本参量和磁化曲线	1
1.1.2	磁性材料	5
§ 1.2	永磁材料	6
1.2.1	铝镍钴合金	8
1.2.2	铁氧体永磁材料	12
1.2.3	稀土钴永磁材料	17
1.2.4	设计中应注意的材料工艺问题	19
§ 1.3	永磁材料的稳定性	20
1.3.1	永磁体在各种条件下的稳定性	21
1.3.2	磁体的稳定化处理	27
1.3.3	注意事项	28
§ 1.4	软磁材料	28
1.4.1	工业纯铁	30
1.4.2	铁钴钒软磁材料	39
1.4.3	铁镍合金	43
§ 1.5	磁温度补偿合金	51
第二章	磁路设计基本原理	60
§ 2.1	磁体	60
§ 2.2	磁路	62
§ 2.3	工作点	72
§ 2.4	磁导	92
2.4.1	自由磁体的磁导 G 及比磁导 G_u	93
2.4.2	两个不同磁势的等势面间的磁导	96
2.4.3	“磁通管”的磁导	99
2.4.4	近似公式	110
§ 2.5	磁路计算	111
§ 2.6	磁势方程	123
第三章	M型器件永磁磁路设计	132
§ 3.1	磁路设计中的几个共性问题	134
3.1.1	关于磁路设计中的几个参量的补充说明	135

3.1.2	磁阻系数 K	147
3.1.3	磁路中软磁体 (极靴和磁扼) 的考虑	149
3.1.4	磁路结构的选择	150
3.1.5	磁路的初步估算	153
3.1.6	磁路的几何模拟	157
§ 3.2	磁导法	159
§ 3.3	漏磁系数法	166
§ 3.4	C-Π 形组合磁路的计算	176
3.4.1	C-Π形组合磁路的估算	177
3.4.2	设计步骤与举例	180
§ 3.5	稀土钴永磁磁路的计算	183
第四章	均匀场永磁系统的设计	190
§ 4.1	轴向磁化筒形磁体的设计	190
4.1.1	筒形磁体工作点和结构因子	190
4.1.2	均匀区与锥削度	193
4.1.3	设计举例	195
§ 4.2	条形磁体组成的均匀场永磁系统	199
§ 4.3	磁屏蔽	201
§ 4.4	校直器	202
4.4.1	横向场	202
4.4.2	横向场与内部空间磁场径向分量的关系	203
4.4.3	校直器的结构和它的磁导率	203
4.4.4	校直器的校直作用	204
4.4.5	设计举例	207
4.4.6	多层结构校直器	209
§ 4.5	阴极面磁场强度的升高	212
4.5.1	提高阴极面磁场强度的方法	212
4.5.2	磁收集器的计算	214
4.5.3	设计举例	217
§ 4.6	倒向场磁系统	218
§ 4.7	径向磁化均匀场永磁系统	221
4.7.1	径向磁化永磁系统	221
4.7.2	阶梯磁场的估算	222
4.7.3	设计举例	225
§ 4.8	轴向-径向磁化筒形磁体组合永磁系统	227
第五章	周期场磁系统的设计	230
§ 5.1	轴向磁化相斥排列周期磁系统的计算	231
5.1.1	磁导法计算周期磁系统	231

5.1.2	等效退磁因子法	237
5.1.3	设计步骤	240
5.1.4	设计举例	243
§ 5.2	磁温度补偿	246
5.2.1	磁温度补偿的原理和类型	246
5.2.2	磁温度补偿合金厚度的确定	247
§ 5.3	输能装置处的磁场结构	248
5.3.1	输能装置处轴向磁场畸变的几种补偿结构	248
5.3.2	碗形极靴补偿结构	250
5.3.3	过渡磁环的估算	254
§ 5.4	轴向磁化磁环场峰的计算	257
§ 5.5	关于聚焦调试和减小横向场的方法	260
5.5.1	聚焦调试的方法	260
5.5.2	关于聚焦调试中的问题	261
5.5.3	减小磁系统横向场及其影响的措施	262
§ 5.6	径向磁化周期磁系统	262
5.6.1	径向磁化周期磁系统的计算	262
5.6.2	设计步骤	268
5.6.3	计算举例	269
§ 5.7	其它型式的周期磁系统	270
5.7.1	轴向-径向磁化磁环组合周期磁系统	270
5.7.2	用极靴将磁块的N和S极交替引入工作空间的磁系统	271
第六章	螺线管磁场设计	274
§ 6.1	螺线管轴线上的磁场计算	274
6.1.1	常用的计算公式	275
6.1.2	图解法	278
§ 6.2	螺线管轴线外磁场的计算	282
§ 6.3	均匀场的计算	288
6.3.1	端屏的计算	288
6.3.2	分段线包的组合磁场	289
§ 6.4	脉冲磁场的计算	291
6.4.1	建立脉冲磁场的条件	291
6.4.2	脉冲磁场线圈的计算	292
6.4.3	计算举例	297
§ 6.5	螺线管线包的结构形式和设计步骤	299
6.5.1	线包的结构形式	300
6.5.2	设计步骤和举例	305
6.5.3	铜管、扁铜线的绕制方法	311
§ 6.6	线包的冷却计算	312

6.6.1	线包中的热传导	313
6.6.2	对流散热	323
第七章 电磁铁的设计		330
§ 7.1	设计上的几点考虑	330
7.1.1	电磁铁磁路的磁通分布	331
7.1.2	磁路的磁势分布	333
7.1.3	漏磁通的折合计算	334
7.1.4	磁势降的折合计算	338
§ 7.2	等效网络法	340
7.2.1	等效网络图	341
7.2.2	等效网络磁通和磁势的计算	346
7.2.3	设计举例	348
§ 7.3	节点漏磁系数法	354
7.3.1	计算步骤	356
7.3.2	设计举例	358
§ 7.4	强场电磁铁的计算	367
7.4.1	磁路各主要部件的计算	367
7.4.2	磁荷法	370
7.4.3	直接求解磁势法	375
§ 7.5	电源	396
7.5.1	整流电源的设计	397
7.5.2	稳流系统的设计	406
第八章 电子计算机设计计算磁路		413
§ 8.1	二维静磁场微分方程及边界条件	414
8.1.1	在不同坐标系中的磁场方程	414
8.1.2	边界条件	415
§ 8.2	离散化和差分方程	417
8.2.1	离散化和网格划分	418
8.2.2	差分方程	419
8.2.3	永磁体内 B 分量计算	424
8.2.4	永磁体边界点的处理	427
8.2.5	M 、 J_m 、 J_{ms} 和 B 的计算	427
§ 8.3	差分方程求解	431
8.3.1	一般迭代法	431
8.3.2	松弛迭代	432
8.3.3	松弛因子	433
8.3.4	迭代初值的选取	434
8.3.5	迭代方式和误差控制	435
8.3.6	B - H 曲线的使用	436

VIII

§ 8.4	程序设计	437
8.4.1	程序设计的原则	437
8.4.2	CILU 程序及其框图	438
§ 8.5	CILU 程序及程序说明	440
8.5.1	CILU-A 轴对称自屏蔽型磁路计算源程序	441
8.5.2	源程序解释	453
§ 8.6	设计步骤与举例	457
8.6.1	设计步骤	457
8.6.2	设计举例	457
§ 8.7	磁路分析计算及其应用	473
8.7.1	取向 AlNiCo8 自屏蔽磁路计算结果的分析	473
8.7.2	几种磁路的磁通分布图	476
第九章	磁系统的磁化和测试	485
§ 9.1	典型磁体的充磁方法	486
§ 9.2	充磁装置	491
§ 9.3	磁性材料和磁系统的测量方法	493
9.3.1	磁性材料的磁性能测量	493
9.3.2	磁系统的测量	495
9.3.3	磁稳定性测量	499
附录 I	名词术语符号和主要电磁单位换算表	502
附录 II	M 型器件永磁磁路汇编	503
附录 III	磁导公式推导	526
附录 IV	各种形状磁通管的磁导公式	543

第一章 微波电子管磁系统

常用的磁性材料

在微波电子管磁系统中应用着各种永磁材料和软磁材料。

磁系统建立的工作磁场强度、磁场的分布状况、磁系统的稳定性、整个磁系统的重量和体积等都与材料的性能密切相关。

不同的磁性材料，由于成分、晶体结构的不同以及工艺因素的影响而具有不同的特性。这种性能上的差异决定了材料的应用范围和使用效果。在进行磁路设计时，对磁性材料性能的了解是十分必要的。最佳设计常常是充分利用材料特性的结果。

从应用角度出发，物质基本磁性和技术磁化理论，是研制和应用磁性材料及其元器件的理论基础。

在本章中，我们首先介绍磁的基本特性和磁化过程，以及微波电子管中常用磁性材料的成分、性能和简单的制造工艺过程。

§ 1.1 概 述

1.1.1 磁的基本参量和磁化曲线

磁性是物质的基本物理性质之一。磁性物体吸引铁磁物质的现象，最早人们认为是由于其存在磁荷的缘故。理论上常用磁偶极子来描述磁场源。一个磁体的两端具有极性相反而强度相等的两个磁极（常称N极和S极）。当磁体无限小时，就成为一个磁偶极子。它所产生的外磁场与在同一位置上的一个无限小面积的电流回路（电流元）产生的外磁场等效。磁矩 m 则是表征磁偶极子的磁性强弱和方向的物理量。它定义为

1111728

$$m = q_m \cdot l$$

式中 q_m ——磁荷；

l ——方向从负磁荷 $-q_m$ 到正磁荷 $+q_m$ 的长度矢量。

磁偶极子的磁（面积）矩为

$$m = i \cdot s$$

式中 i ——电流强度（安）；

s ——电流回路的面积（厘米²）。

在磁体的四周和磁体内部都存在磁场。位于磁场中的磁体则受磁力的作用。磁场的性质是用磁场强度矢量 H 来描述的。它定义为

$$H = \frac{F}{q_m} \quad (1.1)$$

式中 F ——磁体在磁场中所受的力（达因）；

q_m ——磁体所具有的磁荷。

该式表明磁场中某点的磁场强度，在数值上等于在该点带单位磁荷的磁极所受的作用力；磁场强度的方向是处在该点的N磁极所受力的方向。在CGS单位制中，磁场强度的单位为奥斯特（记为Oe），即一个单位磁荷在磁场中某点受到的作用力为1达因时，该点的磁场强度为1奥斯特。

磁场的分布可以形象地用磁力线（ H 线）来描绘。磁力线是一些有方向的曲线，曲线上每一点的切线方向即表示该点磁场强度的方向。图1.1示出了条形磁体的磁力线的分布。

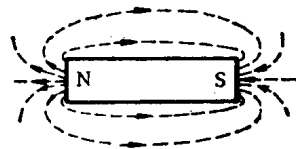


图1.1 条形磁体外部磁力线的分布

磁力线还可以定量地表示磁场强度的大小。规定和磁力线方向正交的单位面积上的磁力线数为该点磁场强度的大小。

一切物质在磁场中将或多或少地被磁化。用磁化强度 M 来描述物质被磁化的程度和方向，其值为单位体积内磁矩的矢量和

$$M = \frac{\sum m}{V}$$

式中 m ——磁矩；
 V ——体积。

磁化强度 M 的方向是从磁化部分的 S 极指向 N 极。

工程技术上经常使用磁感应强度 B 描述物质的磁化程度。在磁场作用下，物质具有磁化强度 M ，则定义磁感应强度 B 为

$$B = H + 4\pi M \quad (\text{CGS 单位制}) \quad (1.2)$$

上式表明物质在磁场作用下所具有的磁感应强度 B 由两部分组成：磁场强度 H 和磁化强度 M 。有时 $4\pi M$ 表示为 B_i ，称为内禀磁感应强度。

和磁力线一样，有时用磁感应线 (B 线) 来形象地描述物质在磁场作用下的磁化状态。磁感应线的多少常用磁通量来表示。磁通量是垂直于磁感应线方向的某一平面 S 上所通过的磁感应线的数目。磁通量用符号 Φ 表示

$$\Phi = B \cdot S \quad (1.3)$$

式中 Φ ——磁通量 (麦克斯韦)；
 B ——磁感应强度 (高斯)；
 S ——面积 (厘米²)。

物质在磁场中被磁化的程度与该物质的性质有关，同时与磁场的强弱有关。物质的磁化程度常用下面两个物理量来表示：磁化率 κ 和磁导率 μ 。

磁化率 κ 为磁化强度 M 与磁场强度 H 之比。

$$M = \kappa H \quad (1.4)$$

磁导率 μ 为磁感应强度 B 和磁场强度 H 之比。

$$B = \mu H \quad (1.5)$$

由式 (1.2)、(1.4) 和 (1.5) 得

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa$$

可以看出，磁场强度 H 是只决定于“磁荷”和产生磁场的

电流，而与介质无关的一个量。磁感应强度 B 则受介质的影响。

不同的物质在磁场中的磁化程度不一样， μ 、 κ 值也很不相同。因此根据 μ 、 κ 的数值把物质分为三大类：

- (1) $\kappa \gg 0$ 、 $\mu \gg 1$ ，这类物质称为铁磁性物质；
- (2) $\kappa > 0$ 、 $\mu > 1$ ，这类物质称为顺磁性物质；
- (3) $\kappa < 0$ 、 $\mu < 1$ ，这类物质称为抗磁性物质。

工业上研究和应用的磁性材料系指铁磁性物质和组成化合物后而具有铁磁性的物质，如过渡族元素 Fe、Ni 和 Co，镧系元素 Ce、Pr 和 Sm 等，以及它们的合金和化合物。

磁性材料在磁场的作用下，磁场强度 H 与磁感应强度 B 的关系比较复杂，呈非线性的关系。 $B = f(H)$ 关系曲线示于图 1.2。未磁化磁性材料在磁场作用下，当磁场 (O 点处， $H = 0$ 、 $B = 0$) 逐渐升高时， B 按

$oabc$ 曲线变化。开始时接近线性，到 a 点逐渐缓慢，在 b 点达到饱和。 b 点之磁感应强度用 B_s 来表示，称为饱和磁感应强度。磁感应强度饱和时的磁场强度用 H_s 表示，称为饱和磁场强度。不同材料有不同的 H_s 值。材料达到饱和后，如果逐渐减小 H ，由于磁

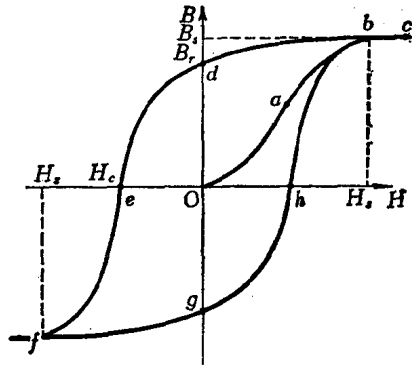


图1.2 磁性材料的磁滞回线

滞现象， B 值沿 $cbde$ 曲线变化。在 $H = 0$ 时， B 并未消失。这时的 B 用 B_r 表示，称为剩磁。从 d 点开始，加以逐渐增大的反方向磁场， B 则逐渐降低，在 e 点消失。此时的磁场强度 H 称为矫顽力，以 H_c 表示。进一步升高磁场， B 值在 f 点再度达到饱和。再减小磁场时， B 值将沿曲线 $fghb$ 变化。这是与 $bdef$ 对称的曲线。整个过程中形成的封闭曲线称之为磁滞回线。曲线 $oabc$ 称之为初始磁化曲线，通常简称为磁化曲线。不同的材料，

磁滞回线的形状有所差异。磁性材料的磁化曲线和磁滞回线表征材料的磁特性，描述了材料在磁化过程中的磁滞现象。这在理论研究和实际应用中都是十分重要的。

1.1.2 磁性材料

磁性材料可分为金属磁性材料和铁氧体磁性材料两大类。按其磁特性和应用又可分为软磁、永磁、磁记录、矩磁、旋磁、压磁和磁光等材料。

在微波电子管中应用的金属永磁材料有铝镍钴、铝镍钴钛和稀土钴；铁氧体永磁材料有钡铁氧体和锶铁氧体（分为各向同性和各向异性两类）。软磁材料有工业纯铁（以及代用材料A3钢、10号钢和灰铸铁）、铁镍合金、铁钴钒合金和热磁补偿合金等。永磁材料主要用来产生恒定磁场。软磁材料用来作各种磁路中的极靴、磁轭以及磁屏蔽罩、场校直器和温度补偿片等。

永磁材料的研制工作目前集中于稀土钴材料和可加工永磁材料铁铬钴、锰铝碳合金等[●]。而对于大量使用的、比较成熟的铝镍钴系材料和铁氧体永磁材料则主要着重于：（1）提高以矫顽力为中心的磁性能；（2）改善机械加工性能；（3）提高稳定性。

软磁材料目前相当多的工作是围绕解决不断发展的科技方面所提出的特殊要求（如耐磨、磁导率恒定和导磁性能随温度变化而变化等）。从成分和工艺方面加以调整，以满足“特殊”条件下的应用。如磁头材料、宽温材料、恒导磁材料和热磁材料等，都是为满足某种特殊用途而研制的。

材料性能的提高，新材料的出现，为设计制造体积小、重量轻和高稳定性的磁性器件提供了有利条件。但对于磁性器件设计者来说，在设计制造过程中合理地选择材料亦是十分重要的。这不仅影响到磁系统的体积、重量和稳定性，而且决定了磁系统的

● 铁铬钴、锰铝碳合金目前国内仍在研制过程中，本手册未作介绍。

成本。另外，还须要考虑到现行的材料制造工艺条件。工艺条件关系到整个器件结构设计方案能否实现。最佳设计方案有时会因为工艺条件的限制而不可能实现。

本章中，介绍了国内一些工厂生产的微波器件中常用的永磁材料和软磁材料的牌号，成分和磁性性能（包括物理性能），同时给出了材料生产的工艺流程图。

§1.2 永磁材料

永磁材料是一类应用很广泛的、重要的电工材料。其主要特征是具有较高的矫顽力。为了应用上的需要，了解永磁材料以下几方面的特性是必要的。

1. 退磁曲线

永磁材料的特性是用退磁曲线来描述的，见图 1.3。它是磁滞回线中位于第二象限的那一部分，是鉴定永磁材料所依据的特征曲线。永磁材料的特征参数 B_r 、 H_c 也在该曲线上标出。在退磁曲线上 B 和 H 满足 $B = H + 4\pi M$ ，如令 $4\pi M = B - H$ ，我们可以在同一坐标图上画出 $4\pi M$ 对 H 的关系曲线，见图 1.3。这里有两个矫顽力 ${}_B H_c$ 和 ${}_M H_c$ ，前者是 B 退到零时的磁场强度，后者是 M 退到零时的磁场强度（称为内禀矫顽力），且 $|{}_M H_c| > |{}_B H_c|$ 。这两个数值在高矫顽力材料（如稀土钴永磁材料）中差别很大，须加以区别。通常给出的 H_c 是指 ${}_B H_c$ 。

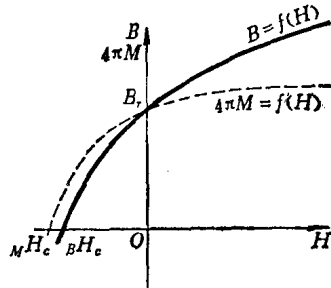


图 1.3 永磁材料的退磁曲线

在退磁曲线上，如图 1.4 左半图所示，由于 $B_d/H_d \approx B_r/H_c$ ，可以通过作图法，求得退磁曲线上的 $(BH)_{\max}$ 点。方法是由退磁曲线上的 B_r 和 H_c 两点分别作平行于 H 轴和 B 轴的直线相交于 A 点，联接 OA ，它与退磁曲线的交点 P ，即 $(BH)_{\max}$ 点。同

时,也可以将退磁曲线上每点相应的 BH 值,绘出以 B 为纵坐标, BH 为横坐标的磁能积曲线,如图 1.4 中右半图所示。 BH - B 曲线中, BH 最大点亦为 $(BH)_{\max}$ 点。

永磁材料的 B_r 、 H_c 、 $(BH)_{\max}$ 三个参数是互相关联的,其值取决于材料的成分和工艺条件。

2. 最大磁能积

最大磁能积是永磁材料的一个质量参数。当工作气隙一定时,对一定形状和结构的永磁体而言,如果磁体工作在 $(BH)_{\max}$ 点上则可获得最大的工作气隙磁场。 $(BH)_{\max}$ 越大,工作气隙磁场越大。当工作气隙磁场要求一定时,磁体若工作在 $(BH)_{\max}$ 点上,则磁体的体积最小。永磁体提供磁能的大小,不仅与材料的磁性能有关,而且与磁体的形状尺寸有关。工作点的位置决定于退磁因子 N 。对于均匀磁化的磁体,退磁因子仅决定于磁体的形状尺寸。对于非均匀磁化的磁体,退磁因子已不仅仅具有简单的几何意义,它本身亦是磁化强度 M 的函数。

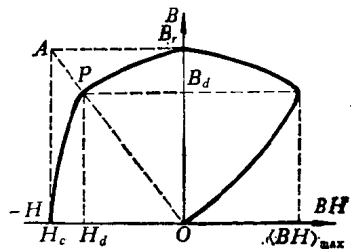


图 1.4 永磁材料的磁能积曲线

工作点的位置决定于退磁因子 N 。对于均匀磁化的磁体,退磁因子仅决定于磁体的形状尺寸。对于非均匀磁化的磁体,退磁因子已不仅仅具有简单的几何意义,它本身亦是磁化强度 M 的函数。

3. 回复特性

磁路中的永磁体,在去掉磁化场后,工作在退磁曲线上的某一点上。在其退磁场减小(如减小磁路的磁阻)时,磁体的工作点不是沿着退磁曲线恢复,而是沿着一个局部磁滞回线 CD 恢复到某一点。这种状态常称为回复状态。局部磁滞回线如图 1.5 所示,通常称之为回复曲线。回复曲线很狭窄,可以近似地把它看成直线,故亦称回复线。回复线的斜率称为回复磁导率 $\mu_{r, \dots}$ 。

4. 稳定性

磁体在使用过程中,由于种种原因,其磁化强度将发生变化。这种变化可以分为可逆变化和不可逆变化两种情况。本章

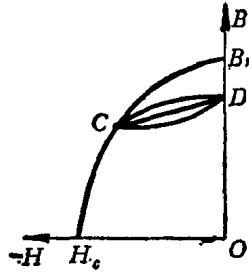


图1.5 回复线

§1.3 中，给出了各种永磁材料在不同条件下的磁性变化值的大小，以及提高永磁材料稳定性的措施。

1.2.1 铝镍钴合金

在铝镍合金基础上发展起来的铝镍钴合金，是目前应用十分广泛的一种重要永磁材料。这类合金磁性性能良好。在永磁材料中，它的剩磁 B_r 较高（10000~14000 高斯）。矫顽力在 500~2000 奥斯特范围内（低于铁氧体永磁和稀土钴永磁）。温度稳定性较好。温度系数 α 小（约为 0.02%/°C）。

微波电子管中应用的铝镍钴合金（我国生产的合金牌号）有铝镍钴 32(LNG32)、铝镍钴 40(LNG40)、铝镍钴 52(LNG52)（以上统称为铝镍钴 5 或 AlNiCo5 ）、铝镍钴钛 32(LNGT32)、铝镍钴钛 56(LNGT56)、铝镍钴钛 72(LNGT72)（以上统称为铝镍钴 8 或 AlNiCo8 ）。另外，高钴高钛铝镍钴合金也在微波电子管中得到应用。

铝镍钴永磁材料的生产方法，有铸造法和粉末冶金法两种。微波电子管用铝镍钴磁体一般采用铸造法生产。其工艺流程如图 1.6。对于非取向产品，将原料（常制成块状或棒状）按一定配比（见表 1.1），熔化成钢液，浇注入按磁体要求做成的一定形状和尺寸的砂型型腔内，冷却后除去型砂即得产品毛坯。对于取向产品，则须将砂型经高温加热，然后置于冷却器上（如图 1.7 所示），立即注入钢液，进行控速冷却，去除型砂即得产品毛坯。