



永磁材料应用指南

*A Guide to Understanding,
Specifying and Using*

PERMANENT MAGNET MATERIALS

- I. Basic physics of permanent magnet materials
- II. Design relationships, figures of merit and optimizing techniques
- III. Measuring
- IV. Magnetizing
- V. Stabilizing and handling
- VI. Specifications, standards and communications
- VII. Bibliography

美国磁性材料生产者协会

编者按

美国磁性材料协会(MMPA)出版的此标准文件,对生产厂商和用户对永磁材料产品的接收或拒收提供了有意义的技术规范体系。此文件对我国永磁材料产品检测和质量合格标准等方面均有参考价值,所以本协会翻译出版了此资料。此资料仅供我国各永磁材料产品生产厂商和用户参考。生产厂商和用户之间对永磁产品质量的合格要求,可以根据双方自己达成的协议,磁体的磁性测试标准参照IEC和国家标准。

本协会根据机械电子工业部《关于机械电子工业部归口的行业协会协助部进行行业管理的暂行规定》精神,愿为本行业的国家标准和行业标准工作服务。

最后本协会感谢四川仪表19厂喻承寅同志对本资料进行的收集和翻译工作。

磁性材料与器件行业协会

机械电子工业部文件

机电改[1988]1259号

印发《关于机械电子工业部归口的行业协会
协助部进行行业管理的暂行规定》的通知

部归口各行业协会:

国务院批准的机械电子工业部“三定”方案中规定,行业协会要协助政府部门进行行业管理,政府部门职能由直接管理为主转向间接管理为主,由微观管理为主转向宏观管理为主。据此,部决定将政府部门过去直接管理企业的一部分工作和某些行业管理与决策前的咨询、调研工作委托给行业协会。为此,制订了《关于机械电子工业部归口各行业协会协助部进行行业管理的暂行规定》,现印

发给你们,请贯彻执行。

委托给各行

担部分任务,然后

委托行业协会

管理的科研院所

研究会的关系,另

际能力,先承

行业技术归口

协会、学会、

读者注意

1. 爱护公共图书切勿任意卷折和涂写,损坏或遗失照章赔偿。
2. 请在借书期限前送还以便他人阅读请赐予合作。

成1106-1

20673/05

附件：

关于机械电子工业部归口的行业协会 协助部进行行业管理的暂行规定

一、受行业归口部门委托，开展行业情况调查，提出本行业中、长期发展规划的咨询建议。

二、对本行业发展的技术经济政策、法规的制订进行研讨并提出建议，协助政府部门监督检查行业技术经济政策、法规的贯彻执行。

三、协助政府部门组织制订、修订本行业的国家标准和专业标准草案以及本行业的推荐性标准，并推进标准的贯彻实施。

四、协助政府部门组织制订、修订企业升级标准草案，进行企业升级的咨询服务，组织交流企业升级的做法和经验。

五、参加本行业产品质量的行业评比；对企业产品质量进行诊断与咨询；收集和反馈本行业产品质量信息；对推荐的国优、部优产品提出咨询建议。

六、开展新产品、新技术、新工艺、新材料和科技成果的推广应用并组织经验交流，组织先进技术的有偿转让。

七、对本行业的经济指标进行分析研究，组织本行业增产节约、增收节支等工作的经验交流，提高经济效益。

八、对本行业的环保、节能、安全生产等工作进行咨询、督促检查，并组织经验交流。

九、对本行业企业的税收、产品价格等情况进行调查分析，提出税收、产品价格调整的建议。

十、组织举办本行业全国性展览(销)会，与有关单位联合举办展览和来华展览会，并组织技术交流。

十一、组织本行业的技术情报和经济信息的收集与分析，进行市场调查预测，沟通交流信息，并组织编写本行业经济技术等方面的资料。

十二、总结交流企业改革、企业管理的经验，开展企业管理咨询，推进现代化管理。

十三、根据行业发展的需要，组织行业职工培训，推荐出国学习和培训人员，组织行业人才交流；对行业企业职工队伍素质、劳动管理、分配制度等进行调查分析，提出改革劳动、工资制度和加强职工队伍建设的建议。

表 V-1

铁铬钴 永磁材料的典型磁性能和化学成分

牌号	MMPA 类别	IEC 代号	磁性能		标称值 BH _{max} (MGO)
			B _r (kilogauss)	H _c (oersteds)	
各 向 同 性					
1.6/0.46	Fe Cr Co 1	R6	8800	460	1.6
1.6/0.35	Fe Cr Co 2		9900	350	1.6
1.0/0.20	Fe Cr Co		10500	200	1.0
各 向 异 性					
5.2/0.61	Fe Cr Co 5	R6	13500	600	5.25
2.0/0.25	Fe Cr Co 250	R6	14000	250	2.0

成分为的铬：5—20%wt)的钴；其余为铁，以及其他添加的少量元素。

表 V-2

铁铬钴 磁性材料产品的公差：

	尺寸(英寸)	公差(英寸)
轧制的棒材 “ 圆形或方形	0 to .312	± .010
	.312 to .625	± .015
	.625 & over	± .020
轧制的板材 厚 度	.002 to .014	± 5%
	.014 to .095	± 5%
	0 to .125	± .010
	.125 to .250	± .015
	.250 to .500	± .020
	.250 to .500	± .020
	.125 to 8.000	± .005
	1.000 to 8.000	± .010
	0 to .500	± .015
	0 to .750	± .020
宽 度	.750 to 1.000	± .025
无心磨加工的棒材 D BARS 直 径：	0 to 1	± .002
拉拔的棒材 直 径：	0 to .190	± .003

T 表 V-3
铁铬钴 永磁材料的物理性能

牌号	MMPA 类别	IEC 代号	密度		电阻率 ohm-cm x 10 ⁻⁶ (at 20°C)	导热系数 Cal/cm sec °C	热膨胀系数 x10 ⁻⁶ /°C
			lb/in ³	g/cm ³			
1.6/0.35	FeCrCo 2	R6	.278	7.7	70	.05	10
5.2/0.61	FeCrCo 5	R6	.278	7.7	70	.05	10
2.0/0.25	FeCrCo 250	R6	.278	7.7	70	.05	10

T 表 V-4
铁铬钴 永磁材料的温度性能

牌号	MMPA Class	IEC Ref	Br的可逆温度系数 Reversible -50 to +200°C	居里点 °C	最高工作温度
1.6/0.35	FeCrCo 2	R6	.036	640	500
5.2/0.61	FeCrCo 5	R6	.02	640	500
2.0/0.25	FeCrCo 250	R6	.03	640	500

表 V-5
正常检查的一次抽样方案

批量范围	Level II	AQL 1-5
	样品大小	不合格判定数
1-15	100%	1
16-25	5	1
26-50	8	1
51-90	13	1
91-150	20	1
151-280	32	2
281-500	50	3
501-1,200	80	4
1,201-3,200	125	6
3,201-10,000	200	8
10,001-35,000	315	11
35,001-150,000	500	15

前 言

作为美国磁性材料生产者协会标准(MMPA No. 0100)的一本补充读物,《永磁材料应用指南》叙述了标准中所列出的数据资料,与实际永磁磁路问题之间的关系。在某个给定的磁路环境中,建立的具有一定的尺寸和几何形状的永磁磁路,即构成了永磁部件。《永磁材料应用指南》这本书的目的,就在于阐明这类永磁部件与某组适当的数据之间的相互关系。(MMPA No. 0100)标准中,详细地规定了各类永磁材料的磁性能、温度特性、物理性能和机械性能。这该标准之中,所列出的各种参数,只是表明了其实质,并不是要将这些所列出的各种性能参数,作为用户对永磁材料产品的接收或拒收的依据。

相对而言,磁性测试与电学测试相比,较为困难一些,而且测试的精度也要差得多。如果在不同的场合下,需要对磁学量进行比较,生产厂商与用户之间,要必须经常地、详细交换值得双方重视的信息。(MMPA)协会的成员单位都认为,本出版物有助于使生产厂商和用户双方就某个实际的,有意义的技术规范体系,取得一致的意见。

鸣 谢

磁性材料生产者协会衷心地感谢本协会的技术顾问Rollin J. Parker先生对永磁材料行业,应用永磁材料产品的设计人员,以及制造厂商所作出的杰出贡献。Parker先生纂和撰写了这份文献。

磁性材料生产者协会也在此向审阅和编辑了这份文献的(MMPA)协会的标准和工程位员会表示感谢。

目 录

本《指南》由以下部分组成:

术语汇编和换算表——

了解磁性材料工业的一个非常重要的起点,包括规定的单位性能的测试;信息的完整基础等。

I、永磁材料的基础理论——

弄清永磁磁学理论是研究永磁材料的重要环节

II、设计关系、质量因素及最佳工艺——

表明了应该允许对材料进行比较,在电磁装置和系统中,质量因素是可决定能量转换过程有效应用的单位性能的最好选择。

III、测试

IV、磁化

V、稳定和控制

VI、技术要求、标准和信息交流

VII、参考文献

在测试、磁化以及稳定和控制这几部分中,包含了允许用户在特定的磁组合件和工作环境中,选择最合适的工艺技术参数的人—基本考虑。

术 语 表

Ag 气隙面积 Ag Area of the air gap

或称为与磁路中磁力线方向相垂直的气隙的横截面积, 是发生相互感应作用的那部分气隙的横截面积的平均值。该面积由垂直于气隙中心磁力线的平面测得。测量单位为平方厘米。

Am 磁体面积 Am Area of the magnet

通过沿磁体长度方向的任何一点, 与磁体中心磁力线垂直的磁体横截面积, 测量单位为平方厘米。设计上, Am通常被认为是磁体的中性区的面积。

B 磁感应强度 B Magnetic Induction

在某个给定点上, 由磁场H感生的磁场, 材料内部每点上的磁感应强度为该点的磁场强度及其感生的内禀磁感应强度的矢量和。磁感应强度是垂直于磁力线方向的单位面积上的磁通量。

Bd 剩余磁感应强度 Bd Remanent induction

当外加的饱和磁化场强度 H_s 移去之后, 在磁性材料内保留下来的磁感应强度。(Bd是在退磁曲线, 任意一点上的磁感应强度。测量单位为高斯)。

Bd/Hd 工作线斜率 Bd/Hd Slope of the operating line

是剩磁感应Bd和退磁场Hd之间的比值, 又叫做导磁系数、切线、负载线和单位磁导。

BdHd 磁能积 BdHd Energy product

表示磁性材料在其退磁曲线上任意一点工作时, 能向外部磁路供的能量。测量单位为兆高奥。

(BH)max 最大磁能积 (BH)max Maximum energy product

可从退磁曲线上获得的Bd和Hd乘积的最大值。

Bis(或Js) 饱和内禀矫磁感应强度 Bis(or J) Saturation intrinsic induction

某种材料中可能达到的内禀磁感应强度的最大值。

Bg 气隙中的磁感应强度 Bg Magnetic induction in the air gap

气隙面积Ag上磁感应强度的平均质; 或气隙中某一特定点上测得的磁感应强度。

测量单位为高斯。

Bi(J) 内禀磁感应强度 Bi(or J) intrinsic induction

磁性材料对总的磁感应强度B的贡献。其值为材料中的磁感应强度和在同一磁场强度下，真空中存在的磁感应强度的矢量差。这种关系可用下面的方程式来表示：

$$B_i = B - H$$

其中：Bi=内禀磁感应强度，单位为高斯。

B=磁感应强度，单位为高斯。

H=磁场强度，单位为奥斯特。

B_m 回复磁感应强度 B_m Recoil induction

磁化后，在最终使用状况下磁性材料中保留的磁感应强度，测量单位为高斯。

B₀ 磁感应强度 B₀ Magnetic induction

在最大磁能积(BH)_{max}点上的磁感应强度。测量单位为高斯。

B_r 剩余磁感应强度(或称磁通密度) B_r Residual induction

在闭合磁路中的磁性材料，经饱和磁化后，对应于磁场强度为零的那一点的磁感应强度。测量单位为高斯。

f 磁阻因子 f Reluctance factor

用于计算现在的磁路磁阻，当将H_m和H_g当作常数处理时需用此因子。

F 漏磁因子 F Leakage factor

用于计算磁路中的漏磁通，其值为磁体中性区域的磁通量与空气隙中的磁通量之比。 $F = (B_m A_m) / (B_g A_g)$ 。

F 磁通势(磁势差) F Magnetomotive force

在任意两点P₁和P₂之间磁场强度H的线积分： $F = \int_{P_1}^{P_2} H dl$

式中：F=磁通势，单位为吉(伯)；

H=磁场强度，单位为奥斯特；

dl=两点间的长度元，单位为厘米。

H 磁场强度(磁化或退磁力) H Magnetic field strength

以矢量表示的磁学量，表示电流或磁体在已知点上感生磁场的的能力。测量单位为奥斯特。

Hc 矫顽力 Hc Coercive force

材料的矫顽力等于该材料在磁场中磁化饱和后, 将剩余磁感应强度Br降至零时, 所需要的磁化力。单位为奥斯特。

Hci 内禀矫顽力 Hci Intrinsic coercive force

材料的内禀矫顽力表示其抗退磁的能力。它在数值上等于材料磁化饱和之后, 将材料中的内禀磁感应强度Bi降为零所需要的退磁场强度。测量单位为奥斯特。

Hd 对应于剩余磁感应强度Bd的H值。测量单位为奥斯特。

Hm 对应于回复磁感应强度Bm的H值。测量单位为奥斯特。

Ho 在最大磁能积(BH)_{max}点上的磁场强度。测量单位为奥斯特。

Hs 净有效磁化力 Hs Net effective magnetizing force

材料磁化至饱和所需的磁化力, 测量单位为奥斯特。

J 参见Bi内禀磁感应强度。

Js 参见Bis饱和内禀磁感应强度。

lg 气隙长度 lg Length of the air gap

气隙中心磁力线的长度。测量单位为厘米。

lm 磁体长度 lm Length of the magnet

磁路中心线在一个完整的循环内所穿越的永磁材料的总长度。测量单位为厘米。

lm/D 尺寸比 lm/D Dimension ratio

是磁体长度与其直径之比; 或这是磁体长度与其面积(等于磁体横截面积的圆), 即等效圆面积的直径之比。对于简单的几何形状如棒状或柱状磁体, 尺寸比与磁体负载线的斜率Bd/Hd有关。

P 磁导 P Permeance

磁导是磁阻R的倒数。

测量单位为: 麦克斯韦/吉(伯)。

R 磁阻 R reluctance

磁阻与电阻有些类似, 这个量确定了磁通势F所产生的磁通量的大小。即:

$$R = F/\phi$$

其中: R=磁阻, 单位为吉(伯)/麦克斯韦;

F = 磁通势, 单位吉(伯);

Φ = 磁通量, 单位为麦克斯韦。

T_c 居里温度 T_c Curie temperature

T_c 为转变温度, 高于此温度, 材料将失去磁性。

T_{max} 最高工作温度 T_{max} Maximum service temperature

磁体保持无明显长程不稳定性或结构转变的最高温度。

V_g 气隙体积 V_g Air gap volume

两磁极间的空气或非导磁材料的有效体积。测量单位为立方厘米。

μ 磁导率 μ permeability

磁导率 μ 是用来表示磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间变化关系的通用术语。

μ_{re} 回复磁导率 μ_{re} recoil permeability

回复磁导率是回复磁滞回线的平均斜率。又叫局部回线。

Φ 磁通量 Φ magnetic flux

设想出的但又能被测量的一个概念, 用来描述磁场的“流动”趋势。在数学上, 它是磁感应强度上的法线分量对面积 A 的面积分。

$$\text{即: } \Phi = \int \int B \cdot dA$$

式中: Φ = 磁通量, 单位为麦克斯韦;

B = 磁感应强度, 单位为高斯;

dA = 面积元, 单位为平方厘米。

当磁感应强度 B 均匀分布, 且其方向垂直于面积 A 时, 磁通量 $\Phi = BA$ 。

闭合磁路状态 Closed circuit condition

当永磁体的外部被高导磁材料所闭合时, 即呈现闭合磁路状态。

退磁曲线 The demagnetization curve

极限磁滞回线的第二(或第四)象限部分叫做退磁曲线。曲线上的各点用座标 B_d 和 H_d 表示。

磁通表 fluxmeter

用一只探测线圈来测量磁通量变化的一种仪器。

高斯 The gauss

Cgs电磁单位制中磁感应强度B的单位。1高斯等于每平方厘米1麦克斯韦。

高斯计 gaussmeter

用于测量磁感应强度B的瞬时值的一种仪器。其工作原理通常基于：霍尔效应、核磁共振(NMR)或旋转线圈等原理。

吉(伯) gilbert

Cgs电磁单位制中磁通势F的单位。

磁滞回线 hysteresis loop

使材料的磁化状态在一定的磁化场强度H或磁感应强度B的变化范围内，经历一个完整的周期变化，根据此变化过程中B为纵坐标，H为横坐标的对应关系，绘制出一条闭合曲线，该闭合曲线称为磁滞回线。

不可逆损失 Irreversible losses

磁体因高温、低温、外磁场以及其他因素所引起的部分退磁，这类损失可以通过再次磁化而恢复。磁体由于温度循环或外部磁场引起的部分退磁，能够提高其对不可逆损失的稳定性。

衔铁 Keeper

置于永磁体两极面之上或之间的一块(或多块)软铁，用于减少气隙中的磁阻，并因而减少了磁体的漏磁通，也可使磁体减少对退磁影响的敏感性。

漏磁通 Leakage flux

在有效磁路或设计磁路之外的磁通量 ϕ ，测量单位为麦克斯韦。

饱和磁滞回线 The major hysteresis loop

材料在正反饱和磁化状态之间循环时而得到的一条闭合的磁滞回线。

麦克斯韦 The maxwell

Cgs电磁单位制中磁通量的单位。1麦克斯韦等于一条磁力线。

中性区 The neutral section

永磁体的中性区是一个穿过磁体的平面，该平面位于磁通最大值的点上，并与通过该平面的中心磁力线相垂直。

奥斯特 The oersted

Cgs电磁单位制中磁场强度H的单位，1奥斯特等于磁通路径上，每厘米具有1吉

(伯)的磁通势。

开路状态 An open circuit condition

除了磁化后的磁体本身而无高磁导率材料构成外部磁通路时, 即呈开路磁路状态。

工作线 The operating line

一个给定的永久磁体磁路的工作线, 是一条通过退磁曲线坐标原点, 斜率为 $-B_d/H_d$ 的直线(也叫做导磁系数线)。

工作点 The operating point

永磁体的工作点是退磁曲线上座标为 (B_d, H_d) 的点, 或者是退磁曲线内座标为 (B_m, H_m) 的点。

取向(各向异性)材料 An oriented(anisotropic) material

在一个规定的方向上具有较高磁性能的材料。

磁导计 permeameter

能够用于测量并且通常还可记录样品磁特性的仪器。

可逆温度系数 Reversible temperature coefficients

表示磁通量随温度的变化, 这种变化随温度的恢复而自发地得到恢复。

磁饱和状态 Magnetic saturation

当磁场强度 H 的增大不再导致材料中的内禀磁感应强度 B 的增大时, 材料即处于饱和状态。

探测线圈 search coil

是一种由导线绕制而成的线圈, 通常已知其面积和匝数, 该线圈与磁通表一起, 用来测量磁通链的变化。

温度系数 The temperature coefficient

用来描述磁性能随温度而可逆变化的因子。当温度循环回到原来位置时, 磁性能亦相应复原, 通常以每单位温度变化的百分数($\%/^{\circ}\text{C}$)来表示。

非取向(各向同性)材料 An unoriented(isotropic) material

所有方向的磁性能均相等的材料。

磁学量、符号、单位和换算因子

磁学量	单位	C.G.S.制	单位	S.I.制	(S.I.)/(C.G.S.)换算率
长度	l	厘米 cm	米 m		10^2
质量		克 g	千克 Kg		10^3
时间	t	秒 s	秒 s		1
电流	I	安培(绝对安培)	安培 A		10^{-1}
温度	T	摄氏温度 °C	绝对温度 K		$(K = ^\circ C + 273.16)$
力		达因 dyn	牛顿 N		10^5
功或能		尔格 = dyn · cm	焦耳 J = N · m		10^7
功率		尔格/秒 erg/s	瓦特 W = J/s		10^7
磁通	Φ	麦克斯韦	韦伯 Wb		10^8
磁通密度	B	高斯 G	特斯拉 T = b/m ²		10^4
磁性常数	μ_0 (真空磁导率)	(一单位)	亨/m H/m		$10^3/4\pi$
磁化强度	J	电磁单位 emu = G/4 π	特斯拉 T = N/Am		$10^3/4\pi$
磁极偶矩	j	电磁单位 emu = 达因/厘米·奥斯特	Wb·m/Nm ² /A		$10^{-2}/4\pi$
磁极强度	P	电磁单位 emu	Wb		$10^3/4\pi$
磁场强度	H	奥斯特 Oe	安培/米 A/m		$4\pi/10^3$
磁通势	F	吉(伯)	安培 A		$4\pi/10$
绝对磁导率	$\mu = B/H$	——	亨/米 H/m		$10^3/4\pi$
相对磁导率	$\mu = B/\mu_0 H$	——	——		1
磁阻	R_m	吉(伯)·麦克斯韦	1/亨 H ⁻¹		$4\pi/10^9$
磁导 (磁阻的倒数)		麦克斯韦/吉(伯)	亨 H		$10^9/4\pi$
磁化率(相对值)% = $J/\mu_0 H$		电磁单位 emu	系数		1/4 π

* 磁通势 F 的 S.I 单位，在 MMPA No 0100—87 标准中的附录 C 中为安·匝 (Ampere · Turn)

第I部分

永磁特性的起源和基础理论

大约六十年以前,法国物理学家Pierre Weiss(外斯)就作出了如下的假设:铁磁体可能是由一些磁畴区域所组成,每一个磁畴都被磁化至饱和状态。但是,磁畴与磁畴之间,其磁化方向并不平行排列。所以,当一块磁体被退磁之后,从观察材料外步这一角度而言,磁体仅表现为对外不显出磁性。人为的外加磁场,只是用来控制磁体内部势能平衡的变化。这一理论,仍然被作为当今高度完善的基础知识的基本理论,这个理论非常满意地解释了所研究的铁磁材料的各项特性,并为进一步研究、改进这种材料,提供了明确的理论指导。

一般认为,关于诸如铁、钴、镍以及许多化合物等等,其元素内部的原子磁矩,起源于在一定的电子层中,电子自旋的不平衡净值。例如在铁原子的第三层电子层中,向某一方向自旋的电子的数量,比与其自旋方向相反的电子要多一些。具有内部原子磁矩,只是物质显示出铁磁性的必要条件,但不是其充分条件。另外,同时一定还存在着某种原子间的交换作用力,来保持相邻原子的平行排列。人们对这些作用的确切性质或准确数值的了解不多,但经观察表明,它们是呈静电型的。已经证实了,在铁磁性材料中,存在不平衡的电子壳层的直径,与原子间的距离的比值,同那些不显现铁磁性的材料相比,要大得多。

图 I - 1 是铁磁性材料的体积分解图。图中给出了原子、磁畴、以及晶粒的相应尺寸和体积。

原子的交换作用也产生磁致伸缩效应,同时并使磁性材料的结晶构造在某种程度上显示出各向异性,或者相应于晶轴的方向关系。在图 I - 2 中,表明了铁元素沿不同方向的磁化曲线,明显可见其易磁化轴为沿六面体的(100)边。

我们可以把磁畴看作是一个由许多原子磁矩共同作用的区域。在外加磁场的作用下,可使一个普通的磁矩发生旋转,磁畴的尺寸,不是物理学中固定的常数,其值的范围很大,取决于材料的化学成分、纯度和变形状态,以及一些非常重要的能量关系。图 I - 3 显示了两个磁畴之间的边界区域。边界区域这一概念及其重要意义是由Bloch(布洛赫)首次提出的。

布洛赫(Bloch)壁是包含有许多原子平面的过渡区域,磁化强度必须通过相当大的距离,而发生一百八十度的转向,并使畴壁中存在的势能减少到最低的程度。然而,由于结晶各向异性影响的制约,(晶轴方面的磁性方向关系),限制了畴壁的宽度。图 I-4 用图解的方式说明了外加能量的关系。外加的能量影响着畴尺寸的大小,并涉及到已磁化磁体在其周围产生的静磁能或磁场的大小。磁化体有将自身再细分的倾向,在能量方面其有可能细分至如图 I-4 中所示的那样,直至静磁能降低到比与布洛赫(Bloch)壁形成有关的势能还低的状态。在这一点上,我们可以说一种与铁磁性材料中的畴体积有关的磁化强度矢量的排列,造成了一种复杂的能量平衡,这样的排列使系统中总的势能处于最小值。在使用外加磁场进行磁化和退磁时,仅仅涉及到对势能平衡的干扰,大家熟悉的 S 形状的磁化曲线,就是记录了由于外加磁场的影响这方面,对能量平衡产生的改变情况。图 I-5 用图解的方式表明了当一棒状铁磁性材料,被磁化时所发生的变化。

退磁状态(A),是由于磁体内部磁化强度矢量的方向排列不一致,而相互抵消;在(B)这一区域,当施加较低的外磁场之后,外场的作用使某个畴壁边界产生延伸现象,通常在一些有缺陷的地方,容易产生这种现象。这是一个可逆的转变过程(磁化强度可逆转变的过程是指在除去外加磁场 H 之后,磁化强度矢量按其原来的位置重新排列的过程)。当外磁场增加,区域(C)中的畴壁边界破裂,并贯穿整个材料,有利于取向排列的区域越多,则与其相邻的不利于取向的区域越少,因此,产生了磁感应强度的大量增加。这是一个可逆的转变过程,在这种转变过程中,磁化强度矢量在外加磁场去除之后,倾向于保持其新的位置。

在区域(D)中,外加磁化力的值还处于较高的水平,磁化强度矢量克服了变形力和结晶各向异性而发生旋转,这就使磁体被磁化饱和。去除外加磁化力之后,会引起松驰现象的产生:畴壁旋转至磁化强度的易磁化方向(可逆过程),这种松驰现象,在磁化强度的易磁化方向与所希望的磁体磁场方向一致时,能被降至最小的程度。

对磁体施行退磁,使畴壁边界又回到与其在(A)区域时所处的原始位置相似的状态,从而磁体呈现出退磁状态。在正常情况下,永久磁体是在磁滞回线的第二象限部分使用,磁体的工作点,将是在如图 I-5 中所示的(d)点上。这里每单位

长度的一 Hd 和每单位面积的磁感应强度 $+Bd$ 形成一个磁势。对于优良的磁体，要使畴壁产生移动和使磁化强度矢量产生旋转都是困难的。磁性系统被磁化饱和所需要的外加能量越大，该系统退磁所需的能量也就越大，因此，用于该系统中的这块磁体的质量也就越好。

图1-5令人满意地描述了对于具有矫顽力(H_c)约为三百奥斯特的磁性材料的磁化过程。相信早期使用的碳钢、铁钢和钴钢等永磁材料产品的矫顽力，就是由于畴壁运动受到阻碍而产生的结果。这类淬火硬化型磁钢的畴壁边界区域聚集着一些非磁性的杂质，这些杂质妨碍了畴壁的移动，这种作用过程机理，仅仅在外加磁场的强度相对较低时，才被认为是重要的。

现代永久磁体显示出的矫顽力水平，比由畴壁的移动这一解释所得到的水平，要高出许多。所以，人们必须寻找一种需要很大的能量输入的磁化机理。由于Frenkel和Dorfman俩人的启示，而出现了理解永久磁体性能的一个重要的里程碑：如果所制备的小颗粒的尺寸，小于畴壁边界的宽度，这样的颗粒之间将没有边界存在。这种解释在微细颗粒磁体理论中，形成了主要的概念，并且对现代高矫顽力的磁性材料，如钕铁钴、铁氧体、稀土钴和稀土铁等等，作出了令人满意的解释。

可以从畴壁能和静磁能的原理，推断出单畴体的尺寸。对于球体，畴壁能与横截面积或者半径的平方成正比；静磁能则是与球体的体积或者半径的立方成正比。当这两种能量平衡时，半径的极限存在，等于或低于这个值时，从能量这方面而言，边界的存在是不可能的。没有畴壁边界，仅仅由与畴壁体积相关的磁矩的旋转，而使一永久磁体的磁化强度发生改变，这个过程比起畴壁移动来说，则要求更高的能量输入。磁矩旋转的困难程度，取决于各向异性或者决定一个畴壁的磁化强度方向的作用力。

在钕铁钴永久磁体中，在沉淀期间，细长的畴壁区域在较少数量的母相中形球。其长轴就是磁化强度的易磁化轴，并且，细长区域比球状区域表现出了更高的矫顽力。现在，对永久磁体，进行的研究中，大多数都是关于材料表面呈现的结晶各向异性。由于磁化强度对结晶品轴的强烈依附，所以铁氧体磁钢、稀土钴和稀土铁磁钢，均显现出很高的矫顽力。

各向异性的两种主要类型和性能的相互关系如图1-6所示。由于具有形状各