

# 铁氧体物理学

李荫远 李国棟

科学出版社

53.66  
269  
C.2

# 鉄 氧 体 物 理 学

李 蔭 远   李 国 栋

科 学 出 版 社

1962

## 內 容 簡 介

鉄氧体是一种新型的磁性材料,在微波通訊、自动控制、計算技术等尖端技术中有着广泛的应用。本书介紹鉄氧体物理学,主要内容包括(1)鉄氧体的基本物理性质;(2)超高频(微波)磁性的理論和器件原理;(3)軟磁、永磁、记忆元件、磁致伸縮的鉄氧体及其应用等三个方面。全书共分十二章,每章末并附有参考文献。本书可供高等学校固体物理、磁学、无綫电电子学、半导体等专门化高年级学生和有关的科学技术工作者参考。

## 鉄 氧 体 物 理 学

李蔭远 李国栋 著

\*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

\*

1962 年 11 月 第 一 版

书号: 2635

1962 年 11 月 第一次印刷

字数: 427,000

(京) 精: 1—2,600

开本: 850 × 1168 1/32

平: 1—2,300

印张: 16 5/8 插頁: 3

定价: 精装本 3.60 元  
平装本 3.00 元

序

210562/31

1958年以来,我国科学事业和其它各种事业一样,在党的坚强领导下,政治挂帅,方向明确,取得了巨大的成绩。铁氧体的制备和研究工作也得到了前所未有的进展。一年多以前,我们所在的单位为了工作上的需要,主办过一系列的铁氧体课程。当时很多同志要求把这些讲稿整理出来,作为经常工作中的参考;因此,我们决心编写一本比较完整地介绍铁氧体基本物理性质及其应用的参考书,同时也为综合大学磁学专门化或铁氧体专门化提供一本教学参考书。

“铁氧体物理学”这一名词在文献上还未经常见到,它自1946年以来才逐渐形成磁学和固体物理学的一个分支。关于铁氧体的总结性文献自1948年以来已出现不少,最近也有专书出版了;然而还没有一本符合上述目的的专著。在本书中,我们力求全面地介绍这一学科的新发展,争取作到理论和应用并重。我们在编写的过程中感到任务艰巨、时间仓促和自己水平的不够;书中一定会出现若干缺点和错误,希望同志们随时提出批评、指正和建议。由于历史发展的原因(见第一章§1),各章所引文献不免多半是荷兰、美、英、法等国的作品。另一方面,由于我们对苏联方面的文献学习得还不够,很可能忽略了一些应该征引的文章。这也是我们十分希望同志们指正的。

凡是我們已經看到的、最新近的重要研究成果一般都在本書中給以适当的介紹。鐵氧體研究工作的進展在這幾年內顯得突出地迅速,當這本書與讀者們見面時,必然已經又出現了一些新的、應該介紹的資料未能寫在裡面。

書中第一到第四章和第六到第九章的絕大部分由李蔭遠執筆,第五、第十、十一、十二各章以及第一章§1、第六章§6和第八

06092

章 § 4 由李国栋写成。因之，各章取材的繁簡和叙述的詳略显然不尽相同，笔調也不一致。我們觉得这些也許是可以原諒的，故定稿时未曾多作形式上的統一。

最后，我們再一次誠懇地希望同志們給我們提出批評和建議，以便日后有可能把书修訂得更全面和更有用一些。

編写的过程中得到施汝为、孟宪振和其他一些同志的指正和建議，謹借此机会向他們致謝。

李蔭远 李国棟

1960年5月

\* \* \*

在本书初稿完成以后，关于鉄氧体的研究工作又发表了不少新的文献，我們对其中比較最有意义的工作作了一些簡短的报导附在各章之末。

著 者

1961年9月

# 目 录

序 .....	iii
<b>第一章 緒論</b> .....	1
§ 1. 鉄氧体的特性簡介 .....	2
§ 2. 鉄氧体的应用 .....	10
§ 3. 鉄氧体的制备 .....	14
<b>第二章 晶体結構和化学組成</b> .....	19
§ 1. 尖晶石型鉄氧体 .....	19
1. 晶体結構 .....	19
2. 晶体化学 .....	23
3. 阳离子的分布 .....	26
4. 有序-无序現象 .....	32
§ 2. 磁鉛石型鉄氧体 .....	35
§ 3. 石榴石型鉄氧体 .....	38
<b>第三章 亚鉄磁性(一)</b> .....	44
§ 1. 鉄磁性、反鉄磁性和亚鉄磁性 .....	44
§ 2. 离子磁矩(第一长周期和镧族元素) .....	50
§ 3. 单一鉄氧体的飽和磁矩 .....	52
§ 4. 磁結構与中子衍射分析 .....	57
§ 5. 从反鉄磁性到亚鉄磁性 .....	59
§ 6. 交换作用 .....	61
1. 交换积分 .....	62
2. 超交换作用 .....	63
3. 半共价交换作用 .....	65
4. 双交换作用 .....	66
5. 鉄氧体的居里点溫度 .....	68
<b>第四章、亚鉄磁性(二)</b> .....	73
§ 1. 分子場理論 .....	73
1. 分子場方法 .....	73

2. 涅耳理論 .....	77
§ 2. 抵消点現象 .....	85
§ 3. 三角形亚鉄磁結構 .....	89
§ 4. 复合鉄氧体的飽和磁矩 .....	94
<b>第五章 磁畴</b> .....	<b>105</b>
§ 1. 磁畴的起源 .....	106
§ 2. 畴壁的结构 .....	118
§ 3. 磁畴的結構 .....	121
§ 4. 技术磁化过程 .....	131
<b>第六章 旋磁性</b> .....	<b>140</b>
§ 1. 磁矩的进动 .....	141
§ 2. 旋磁磁导率和共振吸收現象 .....	146
1. 复数磁导率的意义 .....	146
2. 旋磁磁导率的张量性 .....	147
3. 进动方程的綫性解 .....	149
4. 共振吸收 .....	150
§ 3. 有限介質 .....	153
1. 退磁因子 .....	153
2. 传播因素 .....	155
§ 4. 电磁波在旋磁介質中的传播 .....	158
§ 5. 高功率現象 .....	162
§ 6. 实验方法 .....	168
1. 諧振腔的微扰理論 .....	169
2. 旋磁磁导率的測量 .....	179
3. 鉄磁共振的測量 .....	188
<b>第七章 鉄磁共振</b> .....	<b>198</b>
§ 1. 共振数据的分析 .....	199
1. 单晶体的鉄磁共振 .....	199
2. 多晶体的鉄磁共振 .....	203
§ 2. 一致共振与磁畴結構 .....	205
1. 复峯問題 .....	205
2. 自然共振 .....	213

§ 3. 靜磁型共振 .....	215
§ 4. 亞鐵磁共振 .....	224
§ 5. 共振峯寬度 .....	228
1. 峯寬与物理化学状态的关系 .....	230
2. 燒結鐵氧体的峯寬 .....	241
<b>第八章 鐵氧体微波器件 .....</b>	<b>247</b>
§ 1. 綫性器件 .....	248
§ 2. 倍頻效应 .....	255
§ 3. 鐵氧体参量放大器 .....	259
§ 4. 旋磁性(微波)鐵氧体材料 .....	271
<b>第九章 弛豫現象的理論分析 .....</b>	<b>290</b>
§ 1. 自旋波 .....	290
§ 2. 自旋波理論的半經典方法 .....	298
§ 3. 弛豫机制 .....	302
§ 4. 峯寬理論 .....	307
§ 5. 高功率現象 .....	313
<b>第十章 高頻磁化过程 .....</b>	<b>327</b>
§ 1. 磁譜和复磁导率 .....	328
§ 2. 决定磁譜的机制 .....	332
§ 3. 磁損耗的机制 .....	353
§ 4. 軟磁性鐵氧体材料 .....	371
<b>第十一章 矩磁性 .....</b>	<b>396</b>
§ 1. 磁滯迴綫 .....	397
§ 2. 靜态矩磁性 .....	406
1. 疇轉磁化过程 .....	407
2. 壁移磁化过程 .....	413
§ 3. 动态矩磁性 .....	417
1. 疇轉反磁化过程 .....	417
2. 壁移反磁化过程 .....	423
3. 动态矩磁性的其他問題 .....	428
§ 4. 矩磁性鐵氧体材料 .....	431



---

<b>第十二章 永磁性和压磁性</b> .....	457
§ 1. 永磁性与单畴理論 .....	458
§ 2. 永磁性鉄氧体材料 .....	476
§ 3. 压磁性(磁致伸縮) .....	488
§ 4. 压磁性鉄氧体材料 .....	499
<b>附录 鉄氧体材料的型号和性能</b> .....	509

## 第一章 緒 論

鐵氧體是鐵和其他一種或多種適當的金屬元素的複合氧化物。就其導電性而論屬於半導體，但在應用上是作為磁性介質而被利用的。（通常稱為半導體的材料，如鎳、硅、氧化亞銅、硒等是作為載流介質而被利用的。）鐵氧體磁性材料和金屬或合金磁性材料之間最重要的差異就在於導電性。一般鐵氧體的電阻率是由  $10^2$  到  $10^8$  歐姆·厘米，例外的有低到  $10^{-2}$  歐姆·厘米和高到  $10^{11}$  歐姆·厘米的；而一般金屬或合金的電阻率則是由  $10^{-6}$  到  $10^{-4}$  歐姆·厘米。

鐵氧體（俄文為 феррит，英文為 ferrite）早一些時候曾稱為鐵滄氧磁物，或簡稱鐵滄氧。由於其生產過程及外觀類似陶瓷品，因而在工業上有時被稱為磁性瓷。

主要成分為  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的磁鐵礦是人類最早接觸到的鐵氧體，這種鐵礦的較為整塊的礦石古稱慈石<sup>1)</sup>，後又稱為磁石。磁石是在地磁場中被磁化而成為天然存在的永磁體。磁石的相互吸引和磁石吸引鐵是人類最初觀察到的磁現象。我國勞動人民最先發明用磁石制作方向指示器（指南針或司南）。遠在唐宋時代，我國已經使用鋼針代替磁石來指示方向，但仍舊還用磁石使鋼針磁化。到了電磁感應現象發現以後，磁石的使用很快地就成為文化史上的陳迹。本世紀的初期，電工技術基本上滿足於合金磁性材料；當時對於鐵氧體的研究大体上局限於對磁石單晶的磁性的精密測定和晶體結構分析以及其他一些零星的研究工作。一直到了卅年代，高頻無線電新技術迫切地要求既具有鐵磁性而電阻又很高的材料，非導體鐵磁介質的實際重要性使人們重新考慮磁石或其他磁性氧化物

1) 慈石這一名稱來自彼此相吸引和吸鐵的現象，古人想象為慈石吸鐵如母子相戀。東漢以前無“磁”字。

的利用問題。單純的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (二价和三价的鐵組成的复合氧化物) 的电阻率和磁导率都不够高, 因之, 有必要創制新的非导体磁性材料, 而且必須由研究工作来解决。在 1930 到 1940 年的十年間, 法、日、德、荷兰等国都对鐵氧体开展了一定数量的研究工作; 其中以荷兰飞利浦斯 (Philips) 實驗室物理学家斯諾克 (Snoek) 的工作最有成果, 研究出各种具有优良性能的含鋅鐵氧体, 明确了制备的工艺流程, 直接促成 1946 年鐵氧体軟磁材料的工业化。更早一些 (1933), 加藤与武井两人已在日本創制了含鈷鐵氧体的永磁材料。

經過十多年来的不断发展, 鐵氧体的应用方面早已不限于軟磁和永磁材料; 尤其在最近几年来, 鐵氧体的应用在尖端技术, 如雷达、微波(超高频)多路通訊、自动控制、射电天文、計算技术、鐵道号志、远程操纵等方面起了革命或革新的作用; 它在固体电子学中的重要性可以說是仅仅次于半导体。本书的主要目的是介紹鐵氧体物理性能的基本知識和必要的理論分析。鐵氧体近年来在尖端技术方面的进展, 例如微波器件的創造和設計, 完全是建立在基本研究的积累和理論工作的根基上的。

在这一章中, 首先叙述鐵氧体磁性的特点和其应用的五个方面, 其次对鐵氧体的制备工艺作一簡要的說明, 最后談一下鐵氧体磁性的特点。

### § 1. 鐵氧体的特性簡介

在磁学和磁性材料的研究及应用的发展过程中, 金属磁性材料已經有很長久的历史(表 1.1)和很广闊的領域, 也是一般讀者較为熟悉的。鐵氧体的較系統的研究和在各方面的应用, 其历史还很短(表 1.2), 更由于它的发展十分迅速, 应用范围不断扩大, 因此对于一般讀者說来, 它就显得很陌生了。为了便于一般讀者在較为深入地学习鐵氧体物理以前能对鐵氧体的一般特性有所了解, 并且在系統地專門地了解鐵氧体的各种問題之先掌握一些这方面的感性知識, 我們在这里对鐵氧体的一般特性簡單地介紹一下, 并

尽量与金属磁性材料相比较,着重討論它們之間的差別(在这里只触及它們之間宏觀性質的差別,关于更本質的区分詳見第三章)。

前面已經提到,鐵氧体是鐵和其他一种或多种适当的金属元素的复合氧化物;但也有少数不含鐵的磁性氧化物将要包括在本书所討論的范围内。在早期的文献中,鐵氧体仅指化学式为  $MFe_2O_4 = MO \cdot Fe_2O_3$  的复合氧化物(其中M为二价金属离子),这是最早系統地被研究的一类鐵氧体(尖晶石型鐵氧体),也是目前种类最多、应用最广泛的鐵氧体材料(参閱第十章 § 4)。由于加入了  $Fe_2O_3$  以外的其他氧化物,这一类材料的品种很多,正如金属磁性材料虽多由 Fe、Ni 或 Co 等鐵磁性元素組成,但由于加入其他元素而构成了多組元的、种类极多的鐵磁性合金一样。至于广义的鐵氧体,則包括的种类自然就更多了。

表 1.1. 磁学和金属磁性材料的重要进展年表

公元前 ~3000—2500年	Fe 的发现。
~12 世紀	指南針用于航海(中国)。
1600	第一部磁学专著(Gilbert)。
1751	Ni 的发现。
1773	Co 的发现。
1785	磁极間相互作用定律(Coulomb)。
1820	电流的磁效应(Oersted)。
1831	电磁感应定律(Faraday)。
1865—6	电动机和发电机的发明。
1900	Si-Fe 合金(硅鋼)。
1905	物質的抗磁性和順磁性理論(Langevin)。
1907	鐵磁性学說(分子場和磁畴)(Weiss P.)。
1920	Fe-Ni 合金(厄姆合金)。
1928	分子場的量子力学解释(Френкель-Heisenberg)。
1931, 35	磁畴的实驗証明(Акулов-Bitter)和理論解释(Ландау-Лифшиц)。
1932	呂泉古(Alnico)型永磁合金。
1946	金属的鐵磁共振現象(Griffiths)。
~1946	金属微粉永磁材料。
1959	超导性鐵磁合金。

表 1.2. 鐵氧体的重要进展年表

公元前 4 世紀	$Fe_3O_4$ (磁铁矿, 即铁的鐵氧体) 的磁性的記載(中国).
公元前 3 世紀	最早的指南器(司南)的发明(中国).
1909	合成鐵氧体.
1932—3	反鐵磁理論(Néel, Ландау).
1935	軟磁鐵氧体(尖晶石型)的系統研究(Snoek).
1946	軟磁鐵氧体的商品生产.
1948	亚鐵磁性理論(Néel).
1948	鐵氧体的鐵磁共振.
1949	旋磁性和张量磁导率理論(Polder).
1951	鐵氧体的法拉第旋轉效应.
1952	鐵氧体微波非互易器件(Hogan).
1952	鎢鐵氧体(磁鉛石型)(Went-Rathenau-Gorter-van Oosterhout).
1953—4	矩磁鐵氧体(Williams 等, Albers-Shoenberg).
~1953—4	矩磁鐵氧体在电子计算机中的应用.
1953—6	鐵氧体的高功率現象(Damon, Bloembergen-王适)和非綫性理論(Suhl等).
1956	石榴石型稀土鐵氧体(Bertaut-Forrat-Geller-Gilleo).
1956	超高頻鐵氧体(Ferroxplana)(Jonker-Wijn-Braun).
1957	鐵氧体微波放大器(Mavar)(Weiss M. T.).
1958	磁性(变参量元件)电子计算机.
1959	压电性鐵氧体(Remeika), 铁电性鐵氧体(Fang-Roth).

按照鐵氧体的特性和用途, 可把鐵氧体分为永磁、軟磁、矩磁、旋磁和压磁等五类(第一章 § 2)。如果按照鐵氧体的晶格类型来分类, 最重要的有尖晶石型、石榴石型和磁鉛石型等三大类(第二

表 1.3. 几种不同结构的鐵氧体

结 构	晶系	实 例	特 点
尖晶石型	立方	$NiFe_2O_4$	軟磁、旋磁鐵氧体
石榴石型	立方	$Y_3Fe_5O_{12}$	旋磁鐵氧体
磁鉛石型	六角	$BaFe_{12}O_{19}$	永磁鐵氧体
鈣鈦石型	立方 <sup>1)</sup>	$LaFeO_3$	目前尚无实用价值
鈦鐵石型	三角	$MnNiO_3$	目前尚无实用价值
鎢-青銅型	—	$(Ba_4Gd_2)(Nb_3Fe_2)O_{30}$	铁电性鐵氧体, 目前尚未进入实用阶段

1) 严格說来, 是有畸变的类鈣鈦石结构, 已非立方晶系。

章)。但目前已經发现和研究过的类型并不只此,而且新的类型还在不断地出現。

表 1.3 中列出鉄氧体的一些类型,其中最后一种类型是 1959 年才发现的,这是很早就希望获得的一种同时具有鉄磁性和鉄电性的物质,它在需要具有介电-磁性耦合的电子元件或同时具有高介电恆量和高磁导率的电子元件中可能有着发展前途。

在基本(内禀)磁性方面,鉄氧体与金属磁性材料之間的差别的一个主要表现是鉄氧体的飽和磁化強度( $4\pi M_s$ )低(表 1.4),因此单位体积中儲存的磁能也較低,使它难于在需要高磁能密度的情形下应用(例如电力工业)。这一点是由于鉄氧体磁性来源于未抵消的反鉄磁性(亚鉄磁性)的緣故(參閱第三章 § 1),它的飽和磁化強度是两个(或更多)次晶格的磁矩之差。

表 1.4: 鉄氧体和金属的一些内禀性质的比較

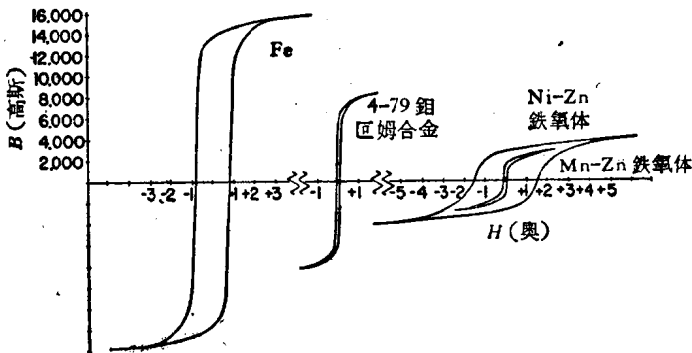
	晶格恆量 $a$ (Å)	密度 $d$ (克/厘米 <sup>3</sup> )	飽和磁化強度 $4\pi M_0$ (高斯) (0°K)	飽和磁化強度 $4\pi M_s$ (高斯) (室溫)	飽和磁矩 $m$ ( $\mu_B$ /分子)	居里点 $\theta_f$ (°C)
Fe	2.861	7.874	21,803	21,580	2.218	770
Co	$a = 2.5020$ $c = 4.0611$	8.84	18,150	17,870	1.714	1131
Ni	3.5168	8.90	6394	6084	0.604	358
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	8.30	5.24	6400	6000	4.2	585
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8.38	5.29	6000	5300	3.3	520
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	8.34	5.38	3800	3400	2.3	585
Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	12.36	5.17	2350	1740	4.72	287
BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>	$a = 5.88$ $c = 23.2$	5.28	~7350	~4680	19.7	450

其次,鉄氧体的居里点  $\theta_f$  一般也較低(表 1.4),尤其是工业上广泛应用的加 Zn 的軟磁鉄氧体和用 Al 或 Cr 代 Fe 的旋磁(微波)鉄氧体,居里点更低( $\sim 100-150^\circ\text{C}$ )。这也是实际应用(例如高温、高功率)时应当注意的。居里点的高低表示晶格陣点上离子間交換作用的強弱,由于鉄氧体中的金属磁性离子間距离較大且

有氧离子間隔着，故其交換作用是較為复杂的（參閱第三章 § 5），要滿足交換作用強（居里點高）的條件也較為困難。用非磁性离子（如  $Zn^{2+}$  和  $Al^{3+}$ ）取代磁性离子也會使交換作用減弱，從而使居里點降低。另外在少數鐵氧體中還會出現磁化強度在低於居里點的某一溫度下等於零的現象，這樣的溫度稱為抵消點（例如  $Gd_3Fe_5O_{12}$  的抵消點為  $17^\circ C$ ）（參閱第四章 § 2）。這是亞鐵磁性所特有的現象，但在鐵氧體中並不是普遍出現。在抵消點附近，其他一些性質 [例如  $g$  因子、法拉第 (Faraday) 旋轉效應等] 也會呈現反常。

在與磁畴的結構和運動特性有關的一些磁性方面，鐵氧體也表現了許多與金屬磁性材料不同的特點。

首先，在靜態磁性方面，由於鐵氧體的磁化強度低，在高矯頑力的永磁鐵氧體中，就必須仔細區別使磁感應強度  $B$  為零的矯頑力  $BH_c$  和使磁化強度  $M$  為零的矯頑力  $MH_c$ （參閱第十二章 § 1），例如鋇鐵氧體的  $BH_c = 1450$  奧，而  $MH_c = 2400$  奧。這樣顯著的差別是會在一般金屬永磁材料中出現的。同樣由於鐵氧體的磁化強度低，較易滿足矩形比高的條件（參閱第十一章 § 2），目前看來只有在鐵氧體中才能獲得自發矩磁性，而金屬一般只表現誘發的矩磁性。圖 1.1 是鐵氧體與金屬磁性材料的磁滯迴線的比較。



· 圖 1.1. 鐵氧體與金屬磁性材料的磁滯迴線的比較

其次，在動態磁性方面，由於鐵氧體的電阻率遠較金屬高（約

大  $10^6-10^{16}$  倍), 在交变磁場中的涡流損耗和趋肤效应都非常小, 因此, 不必象金属磁性材料那样必須軋成薄片或制成細粉再加以絕緣, 这样不但簡化了材料的工艺过程, 而且也提高了材料的填集因数和均匀性. 更为重要的是提高了材料使用的頻率上限和改善了頻率响应特性. 图 1.2 是 Ni-Zn 鉄氧体和 Mn-Zn 鉄氧体同几种金属粉芯或薄带的損耗因子  $\frac{R_m}{\mu f L}$  (参閱第十章 § 3) 随頻率的变化曲綫, 以及这几种材料在 100 千赫下的涡流、磁滯及剩余等三种損耗所占的比例的比較. 图 1.3 是 Ni-Zn (A)、Mn-Zn (B), 加少量 Mg、Mn、Co 或 Cu 的 Ni-Zn 鉄氧体 (C, E) 和 Ni- 鉄氧体 (G) 的若干靜态和动态磁性及电性同 Fe 和巨姆合金的比較. 目前从低頻一直到微波这么广闊的頻率范围内都有了可用的鉄氧体磁性材料, 这在金属是无法实现的.

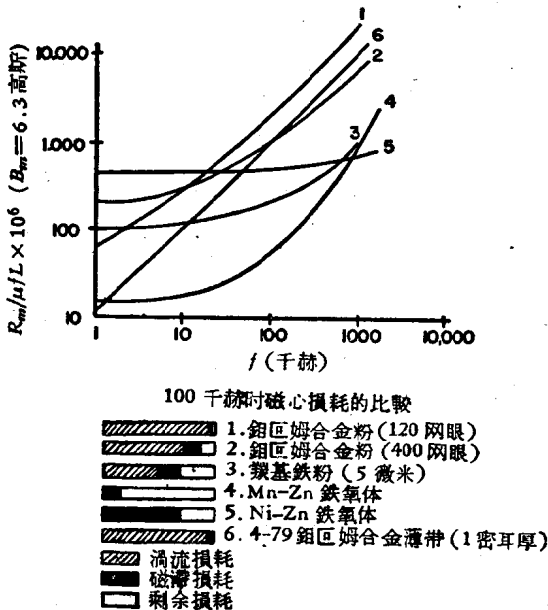


图 1.2. 几种鉄氧体与金属磁性材料的动态性能的比较



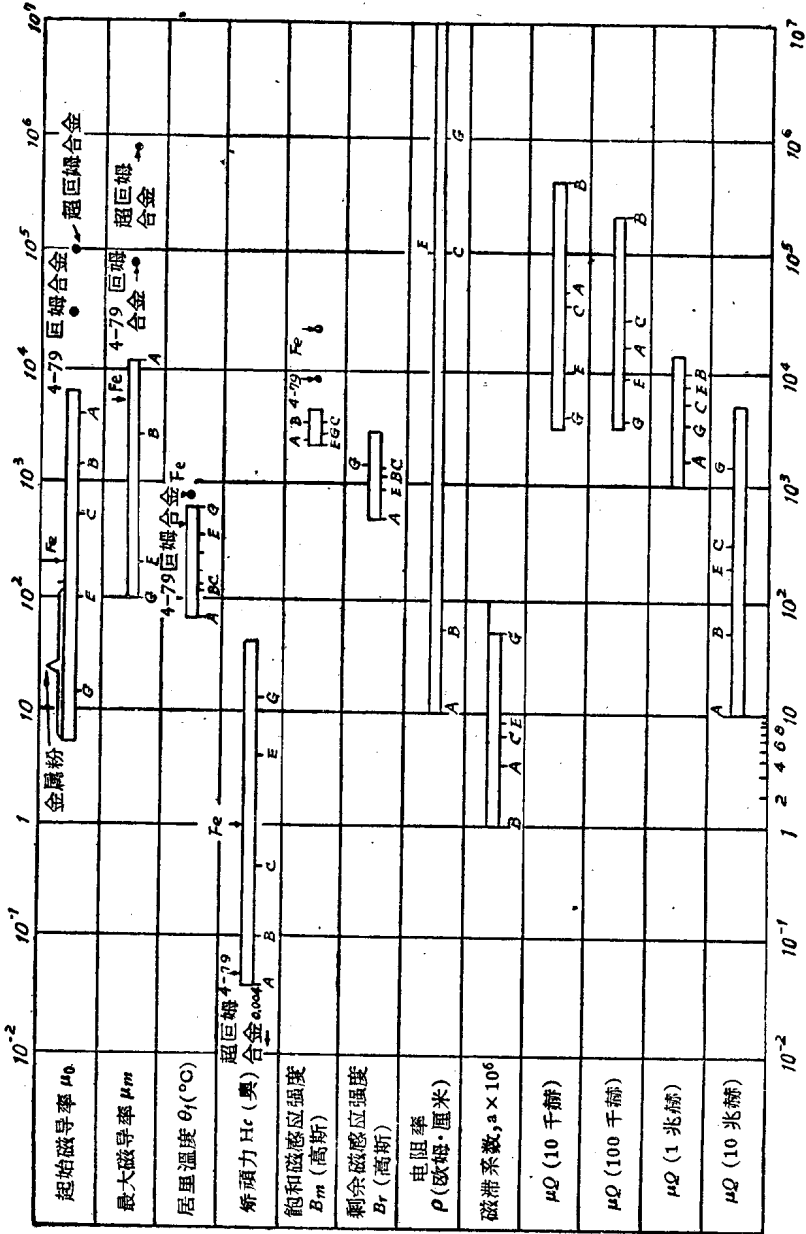


图 1.3. 若干铁氧体与金属磁性材料的电磁性能的比较

A——Ni-Zn 铁氧体； B——Mn-Zn 铁氧体； C, E——加 Mg, Mn, Co 或 Cu 的 Ni-Zn 铁氧体； G——Ni 铁氧体。