

RUANCI HEJIN
SHOUCE

软磁合金手册

冶金工业出版社

79.52.2-62

11 11

软磁合金手册

《软磁合金手册》编写组



冶金工业出版社

202743

软磁合金手册

《软磁合金手册》编写组

(内部发行)

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/32 印张 20 1/4 插页 1 字数 476 千字

1975年9月第一版 1975年9月第一次印刷

印数0,001~8,000册

统一书号: 15062·3148 定价(科三) 1.65 元

毛主席语录

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

序 言

磁性材料分为软磁和永磁两大类。软磁材料包括金属软磁、铁氧体软磁材料，金属磁粉材料和磁性薄膜等。在金属软磁材料中又分铁镍、铁铝、铁硅、铁钴、铁硅铝系，磁温度补偿合金和恒导磁合金等几类。本手册只介绍铁镍、铁铝、铁钴系金属软磁合金，磁温度补偿合金和恒导磁合金。

软磁合金主要在交流状态下使用，而标准只提供直流参数，两者相差甚多，至使应用、设计部门普遍要求提供交流磁性数据。为此，本手册提供了某些动态曲线及参数。但因动态参数远比静态参数多，频率范围也较宽，故本手册尚未满足所有要求。

本手册主要内容：概述了上述五类软磁合金的金属学及热处理对磁性的影响，给出了铁镍系软磁合金部标准15个牌号中的九个牌号的动态曲线及参数。叙述了静态与动态的测量方法和测试条件。扼要的介绍了热处理设备、磁性元件参数与磁性材料参数之间的对应关系。对某些牌号的合金也给出了温度、压力、时效、腐蚀等影响的数据；此外，书后还有必要附录。

本手册的资料数据来源，除极少数附有〔•〕的图表、参数外，均系编著单位及国内有关单位在三大革命斗争实践中的长期积累。可供国内有关生产、科研、使用单位的工人、工程技术人员和干部参考。

参加本手册的编著单位有：冶金部钢铁研究院，上海钢铁研究所，西安钢厂，大连钢厂，重庆特殊钢厂，北京冶金试验厂，东北工学院及天津材料研究所。编写中曾得到北京、上海等有关单位领导和同志们的大力支持，特此致谢。

由于我们对马列主义、毛泽东思想学习不够，路线觉悟不高，加之业务水平所限；书中可能有缺点或错误，望广大读者批评指正。

《软磁合金手册》编写组

1974年元月

目 录

第一章 铁镍系软磁合金

一、概述	1
二、铁镍系软磁合金的基本特性	8
1. 1J50类合金	8
(1) 1J50合金 (0.35毫米带厚)	9
(2) 1J50合金 (0.1毫米带厚)	9
(3) 1J50合金 (0.05毫米带厚)	15
(4) 压应力对1J50合金静态磁性能的影响	21
(5) 1J54合金 (0.35毫米带厚)	21
(6) 1J54合金 (0.1毫米带厚)	22
(7) 1J54合金 (0.05毫米带厚)	24
(8) 压应力对1J54合金静态磁性能的影响	25
2. 1J51类合金	27
(1) 1J51合金 (0.05毫米带厚)	27
(2) 1J51合金 (0.02毫米带厚)	27
(3) 1J52合金 (0.05毫米带厚)	27
(4) 1J52合金 (0.02毫米带厚)	27
(5) 1J34合金 (0.05毫米带厚)	27
(6) 1J34合金 (0.02毫米带厚)	27
3. 1J65类合金	42
4. 1J79类合金	42
(1) 1J79合金 (0.35毫米带厚); 压应力对静态磁性能的影响	43
(2) 1J79合金 (0.1毫米带厚)	48
(3) 1J79合金 (0.05毫米带厚)	51
(4) 1J79合金 (0.02毫米带厚)	57
(5) 1J80合金 (0.35毫米带厚); 压应力对静态磁性能的影响	60
(6) 1J80合金 (0.1毫米带厚)	63
(7) 1J80合金 (0.05毫米带厚)	65
(8) 1J80合金 (0.02毫米带厚)	67
(9) 1J76合金 (0.05毫米带厚); 压应力对静态磁性的影响	69
5. 1J85类合金	75
(1) 1J85合金 (0.35毫米带厚); 压应力对静态磁性的影响	75

(2) 1J85合金 (0.1毫米带厚)	79
(3) 1J85合金 (0.05毫米带厚)	79

第二章 铁铝系软磁合金

一、概述	86
二、铁铝系合金的组织结构、热处理和特性	87
1. 1J16高导磁合金	88
1) 合金的组织结构	89
2) 合金的热处理	90
3) 合金诸特性	92
(1) 合金直流磁性能	92
(2) 合金交直流磁性能曲线	93
(3) 合金的电阻率、硬度及比重	93
(4) 合金应力特性	93
(5) 合金时效现象	95
(6) 合金温度稳定性	96
4) 合金在应用中的注意事项	141
2. 1J13饱和磁致伸缩合金	141
1) 合金特性	141
2) 合金在应用中的注意事项	142
3. 1J12合金	143
1) 合金的组织结构和热处理	143
2) 合金特性	144
(1) 合金直流磁性能	144
(2) 合金交直流磁性能曲线	144
(3) 合金的应力特性	144
(4) 合金的时效现象	145
(5) 合金温度稳定性	145
3) 合金在应用中的注意事项	173
4. 1J6合金	173
1) 合金的组织结构和热处理	173
2) 合金特性	173
(1) 合金的直流磁性与铁损	173
(2) 合金交直流磁性能曲线	174
(3) 晶体取向和磁场退火效应	174
(4) 合金的应力特性	175
(5) 合金的时效现象	175
(6) 合金的腐蚀性	175
3) 合金应用举例	203

第三章 1J22铁钴钒软磁合金

第四章 1J66恒导磁合金

一、概述	216
二、1J66合金的磁特性	216
三、热处理	224

第五章 磁温度补偿合金

一、特点	226
二、分类及用途	226
三、技术特性	227

第六章 测试方法和试验条件

一、静态磁性能的测量	232
二、动态磁性能的测量	236
1. 交流磁化曲线, 峰值导磁率 μ_p 和阻抗导磁率 μ_z 的测量	237
2. 交直流叠加磁化曲线的测量	238
3. 交流回线的测量	239
1) 铁磁仪法	240
2) 描述器法	241
4. 复数导磁率、弹性和粘性导磁率的测量	242
5. 比铁损 P 和感应导磁率 μ_L 的测量	245
6. 高频导磁率的测量	248
7. 脉冲导磁率 μ_{pL} 的测量	248
三、磁致伸缩系数 λ 的测量	250
四、试验条件	251
1. 横向压应力试验	251
2. 温度试验	252
3. 时效试验	252
4. 耐腐蚀试验	252

第七章 热处理与涂层

一、热处理原理	253
二、涂层及其对磁性的影响	255
1. 涂层工艺	255
2. 涂层对磁性的影响	256
三、热处理设备	256
1. 氢气发生装置	256
2. 氢气净化装置	257

3. 高温热处理炉	258
4. 纵向磁场热处理炉	260
5. 横向磁场热处理炉	261
四、热处理注意事项	262

第八章 磁性器件与材料要求

一、磁放大器	263
二、直流电压变换器	268
三、电源变压器	269
四、音频变压器	271
五、脉冲变压器	273
六、微电机	277
七、电流互感器	279
八、阻流圈	281
九、电磁铁及继电器	283

附录一 名词解释	284
附录二 常用公式及单位换算	292
附录三 软磁合金的一些物理常数	296
附录四 退磁因子表	298
附录五 软磁合金国内新老代号及国外牌号对照表	299
附录六 标准摘要	301
附录七 铁铝合金温轧带软化处理工艺	310
附录八 TiH ₄ 制作工艺	310
附录九 化学元素周期表	插页
附录十 符号说明	311

第一章 铁镍系软磁合金

一、概 述

对合金结构的研究表明：含镍40%至90%的铁镍系合金是属于面心立方结构的单相固溶体，并且具有铁磁性。因此在相当大的成份区域中，铁镍系合金是一个有实际应用意义的软磁材料。超结构相 Ni_3Fe 的存在是该合金的一个极为重要的性质。它不但与有序化问题的研究对象；而且对技术应用有直接的影响。 Ni_3Fe 超结构相的有序无序转变温度为506°C，相当这个成份的合金的居里点是611°C；且根据这方面的工作说明有序相对居里点是有影响的。有关磁性转变曲线的工作表明，其最大点位于接近68% Ni 的地方，它将稍低于 Ni_3Fe 的成份。铁镍系合金的相图示于图1—1。

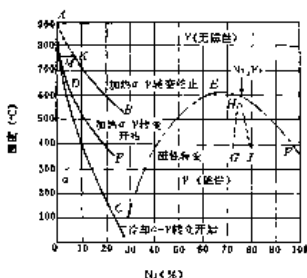


图 1—1 铁镍系相图 (°C)
(G. 礼智, 金属相图材料)

铁镍系合金 α 相和 γ 相的各种不同温度下的晶格常数示于图1—2，从X光数据计算的密度示于图1—3。

图1—4表示了在各种温度下的电阻率值，应该注意到电阻率除了主要受成份控制之外还受纯度，相变及原子有序温度的影响。原子有序化对于电阻率的影响示于图1—5。

饱和磁感值是铁磁物质的一个重要本征参数，它是结构不灵敏量，即一般不敏感于化学纯度、热处理或工艺过程。合金成份与饱和磁感值的关系可由图1—6来说明。在靠近

30%Ni处的断线是由于 α 和 γ 相来确定的比例的影响所致。决定合金饱和磁感值的每一原子玻尔磁子数与镍含量的关系示于图1-7，以图中可以查出随着镍含量的增加玻尔磁子数有单调的下降。

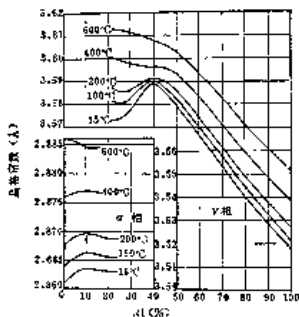


图 1-2 体心立方 α 和面心 γ 态Fe-Ni合金的饱和磁感 B_s (*)
(Bozorth, Ferromagnetism)

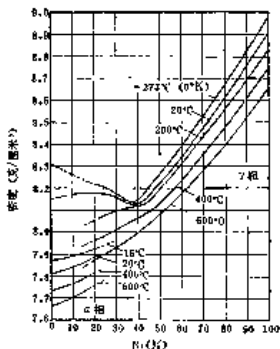


图 1-3 从X光数据计算的Fe-Ni合金浓度 x (*)
(Bozorth, Ferromagnetism)

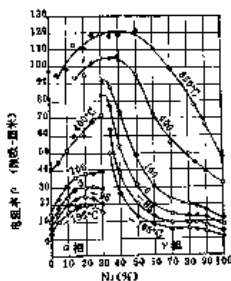


图 1-4 在不同温度下Fe-Ni合金的电阻率 ρ (*)
(R.M. Bozorth, Ferromagnetism)

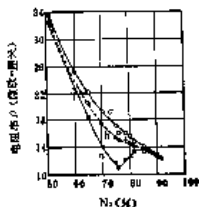


图 1-5 原子有序对电阻率的影响 ρ (*)
b—慢冷; b—20°C/时冷却; c—800°C/时冷
(Bozorth, Ferromagnetism)

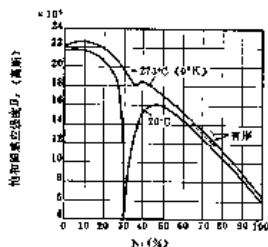


图 1-6 室温和10°C的饱和磁感 (●)

(F. M. Borzoff, Ferromagnetism)

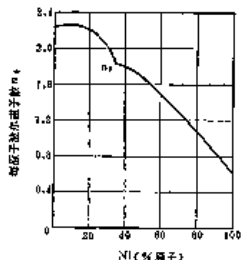


图 1-7 铁在铁中原子百分数与饱和磁感的关系 (●)

(R. M. Borzoff, Ferromagnetism)

铁镍合金系从1859年厄普金森(Hopkinson)的研究开始经历了开世纪初期的一些试验工作及至1913年厄尔门(Eisen)首先广泛地研究这种材料在弱及中磁场下的特性。并把它应用到电话通讯中,从而认识到铁镍合金系是一种重要的软磁材料。其后由于坡莫(Penm)热处理法的发现以及真空冶炼的采用,使合金特性得到了较大的提高。在,这些工作的基础上,随着研究工作的进一步发展以及应用的需要,在二元系中加入了钨、铜、铬等其它元素,并因此创造了著名的超坡莫合金,具有较高的初始导磁率、高磁导率合金,以及具有较高电阻率的铁镍合金等系列的材料。这些第三种元素的作用,从本质上讲都是通过复杂的电子迁移现象,通过对原子间相互作用的影响,以及通过对合金有序度及其分布的影响来实现的。与上述现象密切相关的两个基本参数是:磁晶各向异性常数和磁致伸缩系数,它们决定着合金的技术磁化过程,决定着合金的磁性能。

铁镍合金磁晶各向异性常数 K_1 与合金成份及有序度的关系可由图1-8表示,它说明了有序度和磁晶各向异性常数的影响,即决定 K_1 值大小的磁原子对的偶极相互作用受原子有序度的影响。

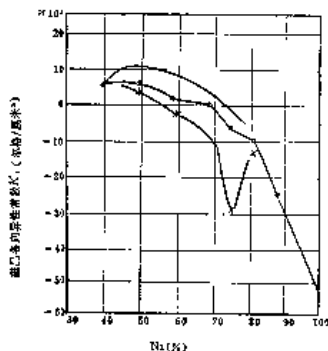


图 1-8 Fe-Ni 合金的磁晶各向异性常数 K_1 (●)

× 有序, ○ 无序, — 中间
(Teblett, Magnetic Materials)

合金的磁致伸缩系数示于图1-9和图1-10，实验曲线说明磁致伸缩系数依赖于晶格方向，且也部份的受原子有序度的影响。

多元铁合金兼具应用价值来说以铁镍和铁镍铜最为重要。铁镍合金在室温的相图示于图1-11。从图中看出有实用意义的软磁材料都落在单相固溶体 γ_M 区域中。

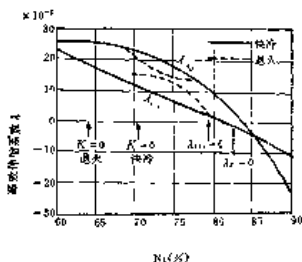


图 1-9 Fe-Ni 合金磁致伸缩系数

λ_{10} 及 λ_{111} (°)

——快冷，---退火

(Kneeller, Ferromagnetismus)

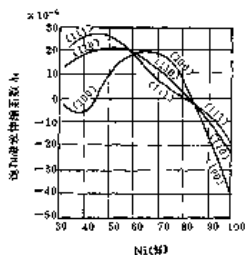


图 1-10 Fe-Ni 合金单晶体的磁致伸缩

系数 (°)

(R. M. Bozorth, Ferromagnetism)

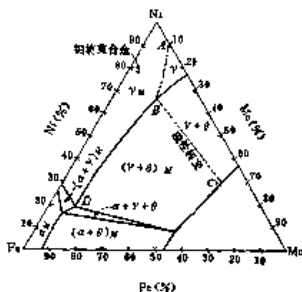


图 1-11 在低温的 Fe-Ni-Mo 系相图

(R. M. Bozorth, Ferromagnetism)

至于相对于纯合金居里点，电阻率以及饱和磁感值的影响则分别示于图1-12，图1-13及图1-14中。

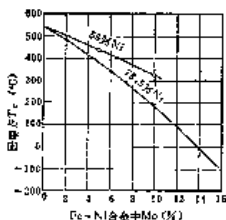


图 1-12 Mo 对于含有 55 或 78% Ni 的合金居里点的影响
(H. M. Dozorkh, Ferromagnetism)

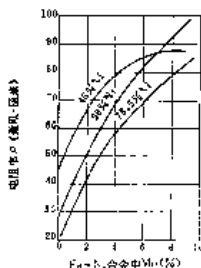


图 1-13 Mo 对于 Fe-Ni 合金中 Tc 的影响
(H. M. Dozorkh, Ferromagnetism)

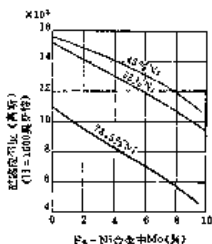


图 1-14 饱和磁感应强度与合金量的关系
(H. M. Dozorkh, Ferromagnetism)

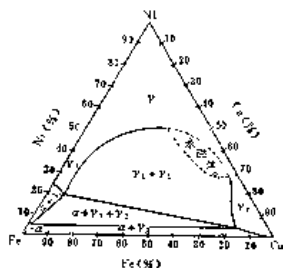


图 1-15 接近室温的 Fe-Ni-Co 合金相图
(Dozorkh, Ferromagnetism)

在室温时慢冷得到的铁镍铜系合金相图由图 1-15 表示。从图中可知由 35% 至 100% 的铁镍边和整个的铁镍边构成的面心立方 γ 区域是一个单相固溶体，重要的软磁材料就在此区域中。而位于相图中心部份的合金则由二相组成，一个是富铜的 γ_2 ，一个是富铁和富镍的 γ_1 。铜加入到铁镍合金中表现为降低了居里温度，而铜对电阻率的影响则几乎是线性的使它增加，但影响较小。

一个时期以来，在国外比较重视，具有较大用途的一种材料是铁镍钼铜四元系合金。该合金的部份相图及相关的磁性能曲线示于图 1-16，图 1-16 作为选择合适的合金成份及热处理工艺来说较有价值，可供参考。

铁镍系软磁合金的主要特点是：在弱和中磁场下具有极高的导磁率和很低的矫顽力，

较好的防锈性能,其中有些合金并具有矩形磁滞回线特征,有其特殊用途。如1.4性能钢,可做尺寸要求十分精确的薄带元件。这对较高频下应用是很重要的。这类合金广泛地应用在电讯工业、仪表、电子计算机和控制系统方面。在这些方面的应用比任何软磁合金都要重要、用量也最大。

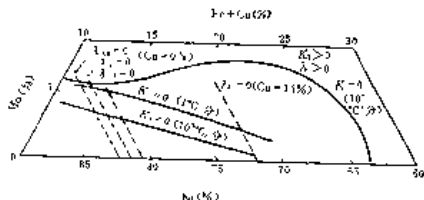


图 1--26 β -Cu-Ni-Mo-Cu 合金的 λ - θ , K' - G 线
(Cu: 65 & 61.5 wt%)

铁镍系软磁合金的缺点是成本较高,工艺因素的变化对其性能影响很大,产品的稳定性不够稳定。此外,这类材料的电阻率远比铁氧体低,除超薄带材(厚度5微米以下)外一般不宜在高频(兆周)下使用。本手册除特别注明包括超薄带外,一般的讨论皆指厚度在0.02毫米以上的材料。

影响铁碳合金磁性能的因素很多,合金的成份配比和存在于合金中的气体、夹杂含量(指微量的碳、磷、硫、铝等)对磁性有很大的影响。合金中的气体及夹杂物初始及最大导磁率降低,将测力增大。但对于某些合金来说,少量的氢含量对提高 μ 有利。饱和磁感应强度单值地决定于合金的成份,在45~50%镍含量处,出现最大值,随着镍含量的提高,饱和磁感应强度下降。合金中加入铜、铬、钨等元素均使饱和磁感应强度降低。热处理工艺对磁性能影响很大。

铁镍软磁合金的基本生产过程: 经过真空熔炼(或半真空熔炼)成锭后加热到 1150~1250℃进行锻造或所需要的板坯, 再经过热轧酸洗, 然后冷轧成所需要的成品带材, 以及锻造或所需要的棒材等。将冷轧的带材或锻成的棒材制成所需要的成品元件, 进行适当的热处理可得到需要的磁元件。

热处理后的磁性元件要保证不受冲击和振动。冲击和振动在实际应用中是难免的,并且情况各种各样很复杂,所以定量的回答冲击和振动的影响就很难。冲击和振动通常影响磁敏量如导磁率和矫顽力等。对非敏感元件影响不大,如饱和磁感应强度,居里温度等。重要的是把试样保护起来,放在非磁性的保护盒内,盒内充满防锈物质,并要注意充填物在低温下不能变硬,以免试样受外力;在高温要有一定的粘度,以免试样受振动时与保护盒摩擦。在 -60°C 到 $+100^{\circ}\text{C}$ 使用的铁芯常用航空润滑油或真空密封剂做充填物。经过这样处理后的铁芯能经受较强的冲击和振动。

铁镍软磁合金的铁芯制成各种形状：冲成圆环、卷成闭合的圆环、冲成“E”型和“一”型对接起来，卷切成“U”型对接起来等等。铁芯的制作形式必须与合金的磁特性相合起

来，对于某些合金，其使用时的磁化方向必须是钢带的规定方向。例如：1J51合金其易磁化方向与轧向一致，在弱带轧向方向磁化才能获得高方形比，所以把1J51合金冲成圆环使用是不适当的。

铁镍软磁合金的静态磁性能都是在闭合磁回路的状态下测得的，被测材料通常制成卷环或冲成圆环。但实际使用时如上述形状是多种多样的，有的就在开路状态下使用，如对接起来的各种形式，整个磁路中存在着空气隙或其它非磁介质间隙。在开路情况下，铁芯的实际导磁率比闭合回路的低。经过推算有如下公式：

$$\mu_s = \frac{\mu_r}{1 + \mu_r \frac{d}{l}}$$

式中 μ_s ——开路时实际导磁率；
 μ_r ——材料闭合回路时的导磁率；
 d ——气隙宽度；
 l ——铁芯磁路平均长度。

可以看出： d 越大， l 越短， μ_r 越大使 μ_s 的相对下降也就越大。当 $\mu_r \frac{d}{l} \gg 1$ 时：

$$\mu_s \approx \frac{l}{d}$$

即当气隙宽度足够大时， μ_s 近似为恒导磁率。

铁镍软磁合金的使用形状有时呈棒状。磁合金棒的导磁率也比闭合回路的低。经过推算有如下公式：

$$\mu_s = \frac{\mu_r}{1 + N_d X_c}$$

N_d 是软磁合金棒的退磁因子，它基本上取决于棒的形状，棒越粗短则 N_d 越大； X_c 为材料在闭合回路时的磁化率。当 $N_d X_c \gg 1$ 时：

$$\mu_s \approx \frac{4\pi}{N_d}$$

即当棒足够粗短时， μ_s 近似为恒导磁率。

本手册在编制时，各种牌号所取的厚度为0.35毫米，0.1毫米，0.05毫米及0.02毫米中的2—4种。各种牌号所选取的具体厚度在表1—1中列出；选取者用“△”，表中的(P)表示给出拟托数据。(T)表示给出温度影响数据和曲线。用“△”者给出相应频率的交流数据和曲线。0.35毫米带厚一律测60周/秒及400周/秒；0.1带厚一律测60周/秒，400周/秒，800周/秒及2千赫；0.02毫米带厚一律测400周/秒，800周/秒，2千赫及4千赫。

由于铁镍软磁合金的磁性总有一个波动范围，所以手册中给出的参考曲线及其有效数据不可能代表所有的该牌号该厚度的试样，参考曲线所代表的是该牌号该厚度的中等水平，即处于该牌号该厚度给出的“磁性能范围”的中间。手册提供的某种牌号某厚度的“磁性能范围”是指在编制手册时所测的该牌号该厚度的涂层试样的磁性分散情况。涂层试样的静态磁性能基本上满足YB—129—70部标准，这可从手册中提供的静态参数中看出。工业生产中常用的几种铁镍合金性能及合金元素成份见附录六。

表 1-1

牌 号	厚 度 (毫 米)			
	0.25	0.4	0.65	0.85
1J40	△	△ (P)	△ (P) (T)	
1J54	△	△ (P)	△ (P)	
1J51			△ (P) (T)	△ (P)
1J54			△ (P) (T)	△ (P)
1J55			△ (P)	△ (P)
1J79	△	△	△ (T)	△
1J77			△ (T)	
1J85	△	△	△	△
1J85	△	△	△ (T)	

二、铁镍系软磁合金的基本特性

铁镍系软磁合金种类较多,由于特性不同,用途也不一样,大体可以分以下五类:

1) 1J50类合金:具有较低电阻率和较高的饱和磁感应强度。主要用在中等磁场下使用的各种变压器、继电器和阻流圈等。这类合金含Ni量为36~50%,合金的主要牌号有:1J46, 1J50, 1J54等。国外牌号如苏联:36H, 45H, 50H。美国:Hi-pernik。德国:Hi-perm50。

2) 1J51类合金:其特点为具有矩形磁滞回线。含Ni为34~50%。这类合金具有晶体结构或密排结构。主要用在中小功率的磁放大器以及计算机中的元件等。合金的主要牌号有:1J51, 1J52, 1J54等。国外牌号如苏联:50Hn, 34HKMII等。美国:Delamax, 德国:Permalnorm5000Z。

3) 1J65类合金:亦是具有矩形磁滞回线的铁镍合金。含Ni65%左右。主要牌号有:1J65, 1J67等。国外牌号如苏联:65Hn。美国:65-Permalloy, Dynamax。

4) 1J79类合金:具有高电阻率和较低饱和磁感应强度的铁镍合金。主要用在弱磁场下使用的高灵敏度性和小功率功率变器、小功率磁放大器、继电器、阻流圈、磁头音头和磁屏等。这类合金含Ni为74~80%。主要牌号有:1J79, 1J80, 1J83, 1J76等。国外牌号如苏联:78H, 79HIM, 76HXII, 80HXC。美国:4-79-Permalloy, Hy-Mu80, Mumetal。德国:Ultraperm10。

5) 1J85类合金:具有最高的初始电阻率及低矫顽力的铁镍合金。这类合金牌号有:1J85, 1J86, 1J77等。国外牌号如苏联:79HMA。美国:Supermalloy。日本:6-81Mo-Permalloy。

下面分别介绍这几类合金的牌号、特性、用途、热处理及交流磁性参数和曲线。

1. 1J50类合金

1J50类合金包括1J46, 1J50, 1J54等三个牌号。

在铁镍软磁合金中,这类合金具有较低的静态电阻率和较大的矫顽力。

1J46和1J50合金的电阻率较小,但饱和磁感应强度较高(达15000高斯),适用于作中小功率电力变压器、微电机、继电器、扼流圈、电磁离合器的铁芯、屏蔽罩、话筒铁芯