

电机铁心材料选择基础——非晶材料还是电磁钢板？

中岛晋 执笔

电机用的铁心材料

■主要的铁心材料及其特性

• 铁心材料分类

铁心材料又称为软磁材料、图 1 展示了主要的软磁材料。

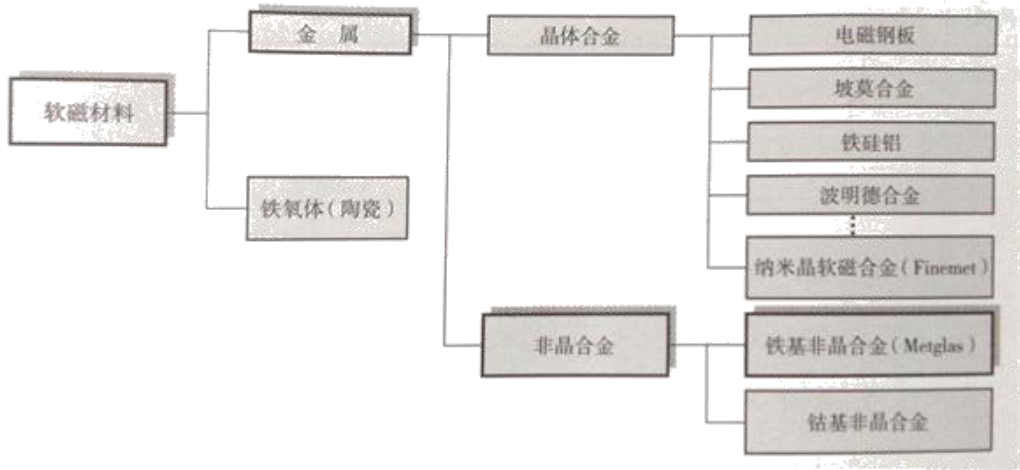


图 1：主要的软磁材料(铁心材料)

软磁材料可以大致分为两类：

- ①金属软磁材料
- ②以氧化铁为主原料的铁氧体软磁材料。

这些软磁材料的饱和磁通密度 B_s 和频率为 1kHz 时 $B_m=0.1T$ 的铁损 $W_{1/k}$ 的关系如图 2 所示。

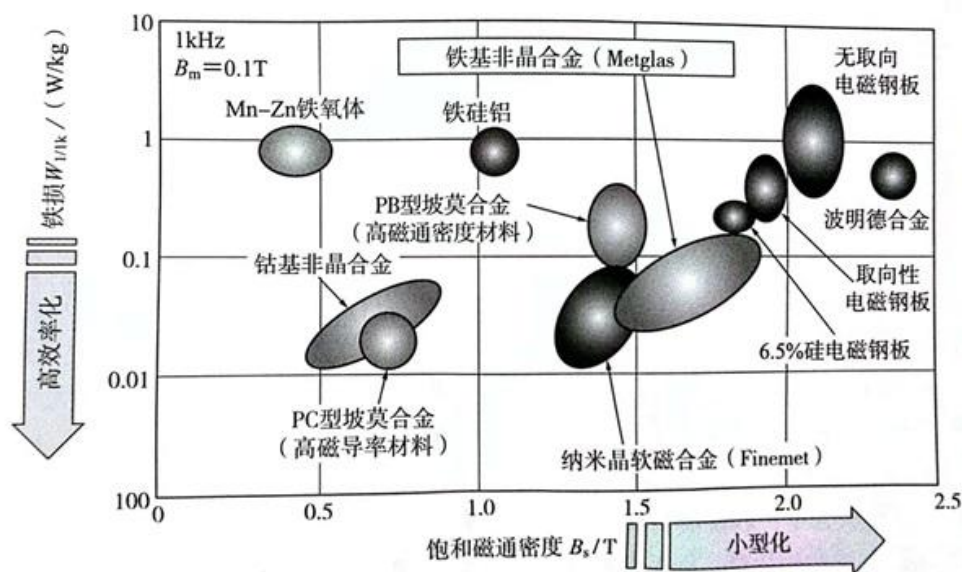


图 2：主要软磁材料的饱和磁通密度 B_s 和铁损 $W_{1/1k}$

• 饱和磁通密度和电机

铁心材料具有增加磁通密度的作用，每种物质都有饱和磁通密度，达到此量以上，磁通量就无法再通过铁心材料。另外，饱和磁通密度高意味着可以产生强磁力。磁力强度不仅取决于流经线圈的电流，也取决于所选定的材料。

那么，在电机中已经达到磁饱和(达到最大磁通密度)的情况下，电流进一步增大会怎样呢？不会产生更大的磁力，原因在于线圈的阻抗(电感)急剧降低，电流开始快速地流动。换句话说，电机转矩并没有增加，而电流徒劳地流动，最后转化为热。

此外， B_s 是材料本身固有的特性，不依赖于频率。

• 铁损频率和饱和磁通密度

如前所述，铁损主要包括磁滞损耗和涡流损耗，且因材料而异。

因为这两种损耗都带有频率特性，频率发生变化则图 2 中各材料的位置关系也会大不相同。图 5 显示的高频率为 1kHz 时的情况。

• 什么样的电机铁心材料比较好？

如果没有铁损的发热影响，在铁心中使用 B_s 大的软磁材料，可以获得铁心最大的磁通密度 B_m 。此外，铁心的体积与 B_m 的平方成反比，从小型化的角度来看， B_s 大的材料也具备优势。

另一方面，从提高效率的角度来看，首选铁损小的软磁材料铁心。因此，需要位于图 2 右下方区域的高 B_s 且低铁损的优质软磁材料。但是，正如图 2 所示，高 B_s 和低铁损之间要折中，可以同时满足两者的理想软磁材料并不存在。

从图 2 中还可以看到，频率 1kHz 时，高 B_s 方面,波明德合金有优势；低铁损方面，则纳米晶软磁合金和 PC 型坡莫合金(高磁导率材料)比较有优势。

■主要的电机铁心材料

表 1：主要的电机铁心材料的尺寸和特性。

钢材种类		铁基非晶合金	无取向电磁钢板		6.5% Si-Fe 铁心	PB 型坡莫合金	波明德合金
		Metglas 2605SA1	15HX1000	35H300	10JNEX900	PB-1	PR
标称板厚/mm		0.025	0.15	0.35	0.10	0.10	0.10
占积率 LF/%		84（最小值）	90（最小值）	95（最小值）	90（最小值）	90（最小值）	90（最小值）
电阻率/（ $\mu\Omega\cdot m$ ）		1.3	0.63	0.52	0.82	0.52	0.47
密度 $\times 10^3\text{kg/m}^3$		7.18	7.60	7.65	7.49	8.25	8.28
抗拉强度/（ N/mm^2 ）		2000	510	530	650	640	728
维氏硬度		900	200	187	395	130	200
铁损 / （W/kg）	$W'_{10/50}$	0.23（典型值）*	0.80（典型值）	1.11（典型值）	0.5（典型值）	0.18（典型值）	0.6（典型值）
	$W'_{10/400}$	3.1（典型值）*	10.0（最大值）	18.2（典型值）	5.7（典型值）	2.7（典型值）	6.2（典型值）
	$W'_{10/1k}$	9.8（典型值）*	33（典型值）	78（典型值）	18.7（典型值）	10（典型值）	20（典型值）
磁通密度/T	B_{50}	1.52（典型值）*	1.60（最小值）	1.64（最小值）	1.52（典型值）	1.16（典型值）	1.42（典型值）
	B_s	1.56	2.03	2.03	1.8	1.51	2.37
直流相对磁导率（1.0T）		4700（典型值）*	8800（典型值）	7200（典型值）	19000（典型值）	57800（典型值）	25000（典型值）
磁致伸缩系数 $\times 10^{-6}$		27**	8**	8**	0.1***	27**	70**
居里温度/℃		399	750	750	700	400	960

* 未热处理材料特性；** 饱和磁致伸缩系数；*** 1.0T、400Hz 的磁致伸缩系数。

* 未热处理材料特性；** 饱和磁致伸缩系数；***1.0T、400Hz 的磁致伸缩系数。

• 无取向电磁钢板

A.最常使用的铁心材料

电机铁心材料用得最多的是无取向电磁钢板，其在铁元素中添加质量分数为 1%~3%的硅元素，表面施加绝缘涂层。

特征：①超过 2T 的饱和磁通密度；②比较好的磁特性；③加工容易；④价格低。是最广泛使用的电机铁心材料。

B.厚度为 0.15~0.5mm

如前所述，铁心材料采用薄板叠层，但对于通常使用的无取向电磁钢板，0.35mm 和 0.50mm 是标准厚度。最近，为了低铁损化，板厚 0.15mm 的产品（15HX1000）也已投入实际使用。

无取向电磁钢板的全世界年产量超越了一千万吨，作为电机用铁心材料具有压倒性的市

场份额。

- **6.5%硅元素无取向电磁钢板**

- A.磁致伸缩为零，劣化程度小

在铁中添加质量分数为 6.5%硅元素的无取向电磁钢板(记为 6.5% Si-Fe)，其表面为绝缘涂层。

它的磁致伸缩系数几乎为零，以铁损为代表的磁特性得到了大幅改善，加工中的磁特性劣化程度较小。

- B.不能压延加工

6.5% Si-Fe 与通常的无取向电磁钢板不同，它不能进行压延加工。因此，无取向电磁钢板通常是使用化学气相沉积法(CVD)使硅元素扩散至 6.5%来制造的。

供应商目前全球只有一家(JFE 钢铁)，其年供应量以千吨计。此外，在质量相当的情况下，6.5% Si — Fe 的价格通常是无取向电磁钢板的 10 倍左右，价格较高。

- **PB 型坡莫合金**

- 铁损小但磁致伸缩恶化导致易劣化

一般使用的 PB 型坡莫合金是质量分数为 40%~50%的镍和铁的合金，板厚为 0.05~2.0mm，最大宽度可达 400mm。与无取向电磁钢板相比，它的铁损更小，容易加工。

PB 型坡莫合金由于使用了价格较高的镍，因此在质量相当的情况下其价格通常是无取向电磁钢板的几十倍，价格更高。

- **波明德合金**

- A.具有最大的饱和磁通密度

一般使用的波明德合金是质量分数为 49%的钴、质量分数为 2%的钒和铁的合金，板厚为 0.05~2.0mm,最大宽度可达 200mm.

- B.加工难，价格高

不仅加工困难，而且由于饱和磁致伸缩系数极大(达到 70×10^{-6})，加工应力将导致其磁特性大大劣化。

为了改善磁特性劣化的状况，加工后有必要在其表面涂上氧化铝或氧化镁粉末作为绝缘层，并在氢气环境中进行 850℃ 热处理(退火)。

波明德合金由于含有钴和钒这样的高价金属，其价格通常是无取向电磁钢板的数百倍，极为昂贵。

• 铁基非晶合金

A. 铁损极小且不需要绝缘处理

作为非晶体，其磁滞损耗较小，体积薄又使得其电阻率较大，涡流损耗较小，从而铁损也较小。目前，具备这种特征的铁心材料已开始投入使用。

铁基非晶合金是用单轧辊液体急冷法连续铸造出来的。

以具有代表性的铁基非晶合金 Metglas 2605SA1(以下称为 SA1)为例，将铁、硅、硼的合金液体从内部已干冷后的金属轧辊上喷出，可实现速率为 10^6°C/s 以上的急速凝固，超过了结晶核的生长速度，最终可以得到图 20 所示的铁基非晶合金薄带。其标准铸造尺寸为 142. 2mm、170. 2mm、213. 4mm。

在这个铸造过程中，合金表面会自然形成一层厚度为 10nm 左右的绝缘膜，因此在一般的电机和变压器中不需要进行绝缘处理。

B. 热处理会变脆

在急速凝固的影响下，合金中存在着极大的内部应力。另外，饱和磁致伸缩系数达到 27×10^{-6} ，在铁心材料中已经比较大了，在内部应力的影响下磁特性会大大劣化。

为改善劣化的磁特性，通常在氮气环境 350℃ 下进行热处理。

但是，进行热处理的话，铁基非晶合金会变脆，难以在电机中保持必要的机械强度。

C. 饱和磁通密度低

如果不进行热处理，铁基非晶合金的铁损与其他的铁心材料相比较小，这是它作为电机铁心材料的最大优势。然而它的饱和磁通密度 B_s 、只有无取向电磁钢板的 3/4，这是它的缺

点。

D.加工困难

板厚为 0.025mm，维氏硬度为 900，从而加工困难，这是其缺点。作为电机铁心材料时，如何对其进行加工成了一个重要的课题。

目前有一家日本公司(日立金属)，一家美国公司(Metglas.Inc)，以及几家中国公司在通过连续铸造生产宽度超过 100mm 的这种铁基非晶合金。它的全球年产量为十几万吨，其中 90% 以上作为商用频率(50Hz 和 60Hz)变压器的铁心材料使用。

它的单位质量价格通常是无取向电磁钢板的几倍。

选择电机铁心材料

■ 高效率电机的铁心材料

• “尽量降低损耗”是基本方针

电机损耗主要有绕组线的铜损、铁心材料的铁损、轴承和风扇的机械损耗，以及电机的漏磁通在定子基座产生的杂散负载损耗。

• 优先应对铁损——非晶材料好吗？

这些损耗当中，成为电机高效率化最大瓶颈的是铁损。电机与变压器一样，高效率化依赖于铁心材料的低铁损化。

从价格较为合适而又低铁损的观点来看，铁基非晶合金是最有竞争力的。它作为商用频率下使用的节能配电变压器的铁心材料，从 20 世纪 90 年代开始就投入实际使用，目前正在普及中。

近年来，将它作为电机铁心材料的高效率电机开始获得关注。

• 比较铁基非晶材料和无取向电磁钢板

铁基非晶合金 SA1 和无取向电磁钢板 35H300 的起始磁化曲线的比较，如图 3 所示。

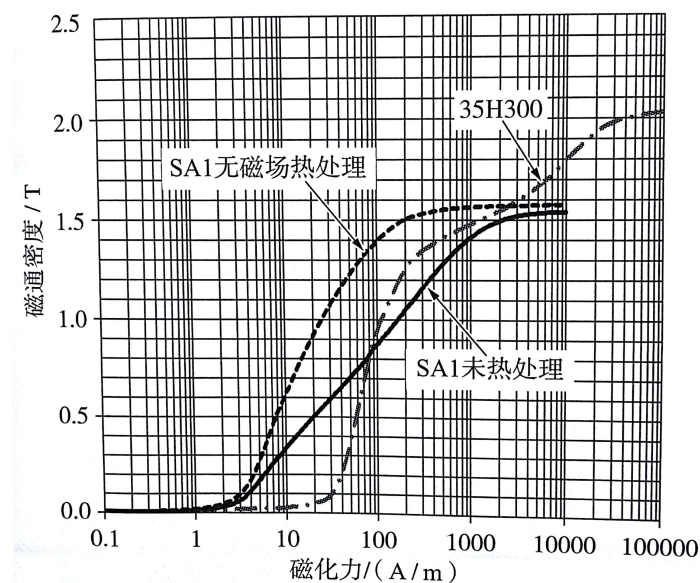


图 3：铁基非晶合金 SA1 和无取向电磁钢板 35H300 的起始磁化曲线比较

对于 SA1，为了缓和铸造时施加于合金上的应力，通过氮气环境中的无磁场热处理，可以获得磁特性的改善。然而，由于热处理下 SA1 会脆化，因此用于电机时，大多不进行热处理。超过 $B_m=0.8T$ 时，SA1 的磁化磁场强度变得比 35H300 要大(磁导率则变小)。

• 困难的铁心加工现实

如何对铁心进行加工，是将铁基非晶合金用于电机铁心时的课题。

(1)开料铁心

以通常的无取向电磁钢板为电机铁心材料时，开料铁心是最适用。铁基非晶合金的板厚为 0.025mm,较薄；其维氏硬度为 900 左右，从而导致开料金属模具的寿命较短。另外，通常使用的铆接工艺也是一大难题。

因此，它仅限于小型特殊用途铁心，而不应用于电机。

(2)开缝切断铁心

开缝切断铁心可以说是现阶段工业上使用的唯一的铁基非晶合金电机铁心。然而，由于加工形状上的限制，目前仅限用于轴向间隙型电机。

(3)蚀刻铁心

蚀刻铁心具有尺寸精度高的特点，但也有加工工时长的问题，现阶段仅用于小型有特殊

用途的铁心，而不应用于电机。

(4)线切割铁心

线切割铁心有加工工时长的问题，因此不适合量产，可以用在比较简易的制作上，目前普遍用于太阳能车、EV 卡丁车，或者研究试制。

其他方式，喷水铁心还在探讨中，处于研究阶段，目前还无法投入实际应用。

• 评估铁心加工

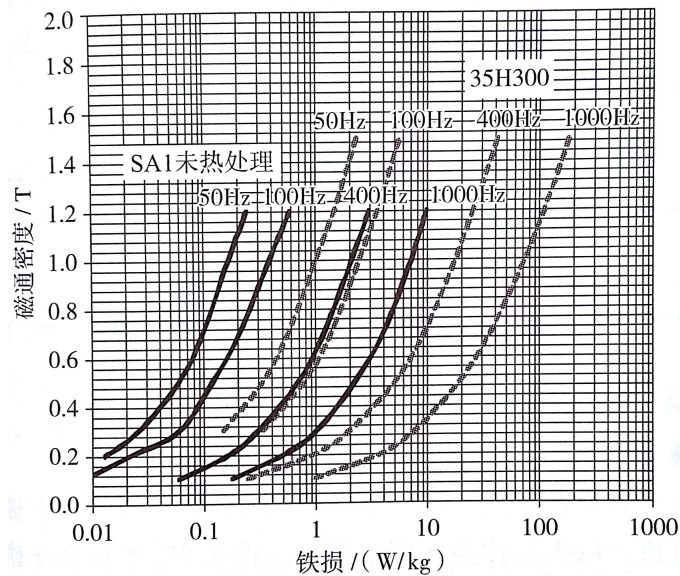


图 4：铁基非晶合金 SA1 和无取向电磁钢板 35H300 铁心的铁损比较

图 4 为未经热处理的 SA1 与 35H300 开缝切断铁心的铁损比较。在 400Hz、 $B_m=1.0T$ 的情况下，SA1 铁心的铁损为 2W/kg,35H300 铁心的铁损为 20W/kg。前者是后者的 1/10。基于此，它对提高电机的效率极为有效，如在电池驱动的电机中，有延长电池寿命的效果。

另外，驱动频率越高，二者的铁损差值越大，这一情况也适用于高转速电机。

■面向小型电机的铁心材料

• “高速旋转和高磁通密度”是基本方针

当电机的输出功率 P_m 为定值时，有三种手段可以将电机小型化：

- ①提高转速 n ；②增大有效磁通密度 B ；③增大电流 i 。

若采用增大电流 i 的方法，电机因铜损(与 i 的平方成正比)增大而发热，会导致效率低

下。因此，就其余两种方法进行考察。

• **提高转速实现小型化**

强烈希望小型化轻量化的 EV 和 HEV 电机使用这种方法。

使用这种方法，高转速或者高频率运转时，必须控制铁心材料损耗导致的温升。也就是说，要有效利用低铁损的铁心材料。举个例子，以无取向电磁钢板 35H300 材料铁心，400Hz 驱动的电机作为对照，铁基非晶材料 SA1 铁心，1000Hz 驱动的电机将转速提高到前者的 2.5 倍可实现小型化。

• **增大磁通密度实现小型化**

这种方法利用了 $r \cdot l$ 与有效磁通密度成反比，随着有效磁通密度的增加而减小的特性。鉴于此，要有效利用高饱和磁通密度的铁心材料。举个例子，以非取向电磁钢板 35H300 材料铁心作为对照，使用波明德合金 PR 材料铁心，在驱动频率不变的情况下增加有效磁通密度 B ，可以实现小型化。

铁心材料的有效磁通密度上限受饱和磁通密度 B_s 的制约，实际的有效磁通密度 B_m 必须设置为比 B_s 更小，不会达到铁心饱和磁通密度。

.....

结束语

为了理解电机的铁心材料，指明铁心材料的选择要点，讲清铁心材料的现状概要，笔者讲解了必要的铁心材料的特性、铁心材料在电机应用方面的基础知识。

笔者供职于世界最大的铁基非晶合金制造商，直接接触文中提到的材料。笔者也给出了许多该合金在电机应用方面的相关描述。对于铁基非晶合金，笔者想要消除目前为止人们对它的误解，比如，它是非常高价的材料，而且购入比较困难，等等。笔者希望普及铁基非晶合金用于电机铁心这一趋势，推进占全球消费电力约 1/2 的电机的高效率化。