

第四代软磁材料—金属软磁粉芯

中国武汉·陈氏磁业科技有限公司 陈一平

内容提要:对软磁材料的发展作了简略的概述,着重简要介绍了第四代软磁材料—金属软磁粉芯的特性和实用意义,并对我国金属软磁粉芯项目的发展现状和水平作了简要的叙述,希望我国金属软磁粉芯项目在创新精神的指引下,得以正确、快速的发展,以满足我国各科技领域不断向前发展的要求。

关键词:软磁材料、金属软磁粉芯

一、软磁材料发展概述

人类社会的不断发展,科学技术的发展起了极大的推动作用,为了适应科学技术的发展,对各种材料也不断提出了各种更高的要求,而作为各种科技领域里极为广泛使用的软磁材料也是在不断的发展,一代一代新的性能更优异的各种软磁材料不断被研发出来。正是由于各种性能更优异的新材料的出现,它能更好的满足各项技术发展的特殊要求,从而推动了人类社会的不断发展和进步。

社会发展至今,各种科技领域和工业领域广泛使用的软磁材料有四大类:即第一代软磁材料的金属软磁;第二代软磁材料的铁氧体软磁;第三代的非晶微晶软磁材料;第四代软磁材料也是一种综合性能最好的新型软磁材料——金属软磁粉芯。

作为第一代软磁材料的金属软磁,工业上正式使用是在十九世纪中期,特别是电动机和发电机的发明(1865—1866),更是推进了金属软磁的大量使用。最初人们是以低碳钢和工业纯铁来使用,由于性能得不到满足,于是发明 Fe—Si 系软磁材料的硅钢。随着各种电子元器件的电感元件需要,进入二十世纪后,各国对金属软磁材料进行了大量的研究。于是又出现了铁—铝系、铁—钴系、铁—铬系、铁—镍系、铁镍钼系和铁钴钒系、铁硅铝系等众多的二元系和三元系的软磁合金。其中特别是铁—镍系的坡莫合金和钼坡莫合金,具有优异的磁性能,在世界各国获得较为广泛的发展和和使用。并于二十世纪中期,出现了极具高磁导率的超坡莫合金。至 20 世纪六七十年代,由于磁记录的发展需要,各国大量开展研发,于是出现了一批具有较高电阻率并耐磨的四元和五元的硬坡莫合金。如铁镍铌钼、铁镍铌钼钛、铁镍铌钼铝等等,具有非常优异的磁性能的软磁材料。至此,金属软磁材料的发展可以说达到了顶峰。

金属软磁材料的发展,从十九世纪中期到二十世纪中期的整整 100 年中,社会和科技进步都得到了飞跃的发展,这充分显示了科技进步的推动力!然而,就金属软磁而言,它虽然具有饱和磁感应强度高和具有高的静态导磁率等优点;但其电阻率低、损耗大,高频磁性能稳定性差,对应力敏感等都是其影响使用的致命弱点,以致使其在科学技术不断发展前进中不能得到满足。

软磁铁氧体是继金属软磁之后逐步发展起来的第二代软磁材料。铁氧体软磁一般是由某些铁磁性氧化物,并掺杂少量非铁磁性氧化物(如 ZnO),在一定条件下形成的固溶体(即复合氧化物),如锰锌铁氧体及镍锌铁氧体等。软磁铁氧体的最初研究出现在二十世纪初期,其使用至今已近百年历史。其最大的优点除具有较好的磁性能外,由于具有高的电阻率,故高频特性远比金属软磁为优,非常适合高频或超高频情况下使用。同时在软磁铁氧体的生产中,还可在一定范围内(如±25%)控制其磁能的一致性,这对使用也是非常有利的。软磁铁氧体的最大缺陷是其饱和磁感应强度相对于其他各类软磁材料是最低的,这在使用中也是最让人感到头痛的事了。其次是其居里温度较低,使用时温度稳定性差。

在过去的百年中，人们对软磁铁氧体等材料，进行了详尽的研究。并在此基础上生产了各系列的铁氧体软磁材料，至今仍在各种科技领域大量使用。

第三代软磁材料的非晶微晶软磁材料，是在二十世纪七十年代开始在工业上大量生产并使用。它的生产是利用金属软磁在冶炼过程中加入某些玻璃化元素，如 B、P、Si 等，并通过快淬技术（快速急冷）获得的固溶体合金（过去也叫金属玻璃）或超微晶的软磁材料。其主要优点是保留了金属软磁高的饱和磁感应强度和高的导磁率等优点，而电阻率又比金属软磁高损耗要小很多。在工频的情况下，且功率不是很大的输变电系统及各种电子元器件中，获得了较为广泛的应用。但由于其损耗还是较大，因而限制了其使用。

二、 第四代软磁材料——金属软磁粉芯

什么是金属软磁粉芯呢？我们从其名称上就不难回答这一问题。我们说金属软磁粉芯是将金属或者合金的软磁材料制成的粉末，通过特殊的工艺生产出来的各种磁芯材料，通称为金属软磁粉芯。从这种意义上来说，所有的各种金属或合金的软磁材料，均能用于生产各种系列不同金属软磁粉芯。但是从性价比的优劣来看，目前各科技领域和工业领域广为使用，并在进行大批量生产的主要有：铁粉芯（iron cores）、铁硅铝磁粉芯（sendust cores）、高通量磁粉芯（high flux cores）和钼坡莫磁粉芯（MPP cores）等四大系列。近年来，由于一体成型的发展和新能源发展需要，一种具有高饱和磁通密度材料 Fe—Si 系（Si6.5%）磁粉芯也发展的很快，使用量开始大增；另有 Fe—Si 系的非晶微晶磁粉芯已开始进入实用阶段，而金属软磁粉芯只是各系列的总称。

作为一代软磁材料来说，其划分的标准是什么呢？从以上四代软磁材料的发展过程，我们不难看出有如下几点：1、具有普遍的适用性。也就是说它能广泛的适用于各种科技领域和工业领域，而不是仅能适用于某些个别或特殊的场合；2、随着发展的需要逐渐形成各种不同系列、品种、规格的产品，以满足科技发展的各项需要；3、其次是工艺上既具有别于其他一代软磁材料生产工艺的独特性，又具有同一代软磁材料相近的生产工艺的近似性。当上个世纪七十年代非晶微晶软磁材料出现的时候，人们把它称作第三代软磁材料，而今当金属软磁粉正越来越广泛用于各工业领域之时，我们把它称作第四代新型软磁材料也是理所当然的了。

从各代软磁材料发展的历史我们不难看出，人们都是在围绕如何降低损耗这一核心问题而进行工作的，特别是在生产工艺的改变上。各种软磁材料的损耗主要由磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗三个部分构成。而实际工作中，由于剩余损耗相对于前二者来说是个极小值而往往可以忽略不计。以前在武汉浩源磁材科技有限公司时，我们曾在北京钢铁研究总院测过美磁和浩源公司 CS270125 的磁芯损耗情况，现将部分结果摘录如下：

项目 样品	Freg (kHz)	Bm (mT)	Phv (kw/m ³)	Pev (kw/m ³)	Phv+Pev (kw/m ³)
美磁	20	100	12.568	26.293	38.861
	50	100	31.42	164.33	195.75
	100	100	62.841	657.31	720.151
浩源	20	100	25.16	23.552	48.712
	50	100	62.899	147.2	210.199
	100	100	125.8	588.79	714.59

由上述测试结果可以看出：

在磁化场一定的情况下（100mT），在工作频率由 20kHz 增至 100kHz 时

- (1)、磁滞损耗（Phv）：美磁由 12.568 kw/m³ 增至 62.841 kw/m³，增加了约 5 倍；
浩源由 25.16 kw/m³ 增至 125.8 kw/m³，增加了约 5 倍；
- (2)、涡流损耗（Pev）：美磁由 26.293 kw/m³ 增至 657.31 kw/m³，增加了约 25 倍；
浩源由 23.552 kw/m³ 增至 588.79 kw/m³，增加了约 25 倍；
- (3)、总损耗（Phv+ Pev）：美磁由 38.861 kw/m³ 增至 720.151 kw/m³，增加了约 18.53 倍；
浩源由 48.712 kw/m³ 增至 714.59 kw/m³，增加了约 14.67 倍；
- (4)、涡流损耗占总损耗变化：美磁由 67.7% 变大为 91.27%；
浩源由 48.35% 变大为 82.4%；

由上述数据分析我们可以得出以下结论：在相同情况下，磁芯涡流损耗随着工作频率增加的速度远比磁滞损耗要快。所以，磁芯总损耗的增加主要来自于涡流损耗，这也导致涡流损耗在磁芯总损耗中的比例增加。因此我们想要减小金属软磁粉芯的损耗，主要应当从如何降低涡流损耗来入手，这也是金属软磁粉芯的主要生产工艺技术之核心。所以，如果说第一代软磁材料是以降低磁滞损耗和涡流损耗双管齐下的工艺方法的话，金属软磁粉芯的工艺特点则是以降低涡流损耗为核心了。也正是由于抓住了这个主要的核心，其效果之显著，产品性能之优良，也就理所当然了。下面所述金属软磁粉芯的一些优良特性，这也就充分说明了。

三、金属软磁粉芯的一般特性和实用意义

在谈金属软磁粉芯的实用意义之前，我们有必要再把金属软磁粉芯的一些优良特性重复如下：

1、具有高的饱和磁感应强度，其中铁硅系磁粉芯和铁粉芯高达 1.5T，高通量可达 1.3T，连最低的 MPP 类磁芯也在 0.8T 左右。而目前工业上大量使用的铁氧体软磁，最高仅 0.4T 左右。在这一点上，它保留了金属软磁的优点，而远比铁氧体软磁为优。在设计中，对于实现大容量和小型化是具有适用意义的。

2、具有高的有效导磁率，这也是具有重要实用意义的。其中最简单价廉、物美的铁粉芯 T-26 材质，在 10kHz 下， μ_e 为 75 左右。而 MPP 类最高 μ_e 可达 500 左右。我们曾将 0.01mm 厚硬坡莫合金的 FeNiNbMoAl 合金超薄带分条，经电泳涂层卷芯处理后，其 μ_0 达 16 万左右；而 μ_m 高达 80 万以上。可是我们在 10kHz、1V 下测试 μ_e 仅 60 左右，且使用时还得视如宝贝，非得小心翼翼才行，否则性能损失下降就很厉害。而金属软磁粉芯则摔摔碰碰就无所谓了。

3、磁性能稳定性好，这是它优于其他类软磁材料的又一大优良特性。不管是频率特性、温度稳定性、还是时间稳定性上都是比较良好的。 μ_e125 的各类金属软磁粉芯，在 100kHz 以下使用时，其磁性稳定性非常好。而 μ_e90 的适于 100—150kHz 使用， μ_e75 在 150—250kHz 下使用， μ_e60 在 300—500kHz 下使用为好，500kHz 以上则使用 μ_e26 以下各类合金软磁粉芯为宜。各类合金系列软磁粉芯的温度系数在 500PPM 以下。在某些高要求下，可通过添加温度补偿合金，可使温度系数 < 100PPM。而经过特殊老化处理及一定时间自然时效处理的金属软磁粉

芯，更是具有极良好的时间稳定性，一般情况下，可保证 μ_e 值长期几近不变。

4、损耗低，这也是它的一大优点。这种优良特性是与其特殊的生产工艺作保证的。而低损耗这是在各种使用情况下都是非常需要的，这也是其具有重要实用意义的又一大优点。

5、直流偏场稳定性好，这也是其优于其他类软磁材料的一重大优点。这种优点是由于它具有高的 B_s 值和低的损耗所致。我们研究中发现，随着使用频率的提高，损耗对 DC Bias 的影响有更为明显的作用。在实际应用中，这种交直流场同时存在的情况是非常普遍的。因此，人们也把这一特性作为衡量各种产品优劣的重要特性。

6、金属软磁粉芯还有一个最重要的特性，这也是其他各类软磁材料都不具备的特性，那就是其性能的可控性。也就是说，通过控制和改变生产工艺技术条件，可以获得能满足各种特殊使用场合，具有特殊性能的金属软磁粉芯材料，从而最大限度的满足了特殊场合的特殊要求。这一特性是具有极为重要使用意义的，这对于改进各种电子产品的性能和提高产品的质量，是具有极为重要实用意义的。这一特性的应用，在高科技领域和国防军工领域更显得尤为重要。

金属软磁粉芯由于具有上述一些重要的优良特性，所以我们说它是一种最具良好综合性能的一种新型软磁材料，是前三代软磁材料中任何一种都是不可比拟的一种优良材料，具有极为重要的实用意义。

我们曾说过：上个世纪八十年代，国内外对各种电子产品提出了高可靠性、稳定性和微型化的要求。具体说也就是提出了高精度、高灵敏度、大容量和小型化的发展方向。高精度和高灵敏度对软磁材料提出了要具有高的有效导磁率，高的磁稳定性和高的磁性能的一致性的要求。而对实现大容量和小型化的目标，则要求软磁材料的饱和磁感应强度高，有效导磁率高，并且损耗要求尽可能小。由上述金属软磁粉芯的各项特性，以上要求对金属软磁粉芯来说都是优于其他各类材料的，是最具有重要的实用意义的。我们利用金属软磁粉芯材料的这些优良特性，对于产品性能的改善，质量的提高，也都是具有非常重要的意义的，所有这一切可以总结为一点：那就是推进了人类社会的不断向前发展。

这里我特别要提到的就是金属软磁粉芯的第六大特性，即性能可控性问题，这是任何其他一类软磁材料都不具备的一个重要特性。上面我们提到过利用这一特性，我们可以获得具有各种特殊性能的金属软磁粉芯材料，从而可以最大限度的满足各种特殊场合的特殊要求，变不可能为可能，这其中的实用意义是多么重要啊！所有这一切都说明了人类的伟大。所以我们说，金属软磁粉芯的成功发明和应用在人类科技发展史上，是一项极为重要的科技成果。

四、 努力创新，为我国金属软磁粉芯项目正确、快速发展作出新的贡献

我国金属软磁粉芯项目的发展，从上个世纪六十年代至今，已整整经历半个世纪了。近年来我国项目的发展，形势还是令人鼓舞的。不仅铁粉芯产品在数量和质量上已基本满足国内市场需求，并有产品供出口。铁硅铝系列已有近二十家生产企业，其中中磁浩源和陈氏磁业产品已达美磁产品水平。铁硅系列磁粉芯在东磁、铂科、科达等都进行了批量生产供货，其中我已经测试过铂科的产品，质量很好，高通量磁粉芯以七星飞行为好。但是总的来说，与国际先进水平还存在一定差距，有的系列产品如 Mpp 类还没有一家产品能与国外竞争。总之，要使我国金属软磁粉芯项目能得到更好的发展，我们必须要以世界先进水平为目标，努力把产品质量搞上去。目前我国该项目产品的生产企业已不少，并具有了一定的生产能力，可是市场占有率极低。究其原因主要是产品质量差，缺乏市场竞争

力。于是互挖墙脚，互相杀价，打价格战。而不是去努力创新研发，敢为人先把产品质量搞上去。对于各系列金属软磁粉芯的技术研发，目前已趋成熟，可以说已没有什么新东西了。只要我们抓住问题的核心，赶超世界先进水平是完全可以做到的，也是一定能够做到的。

武汉陈氏磁业科技有限公司的目标是：努力赶超世界先进水平。我们要以世界“王牌”美磁的产品标准为目标，达到一个，投产一个，不达目标决不投产。本公司各系列、各性能档、大小规格产品的研发都有一定的基础，不少处国内领先地位。目前除铁硅铝系列产品已达美磁水平外，对铁硅系列也进行了研发，并已达较好水平；其余钼坡莫磁粉芯系列和高通量磁粉系列的研发，也都在过去的基础上有了较大的提高。

我们将以创新精神为指导努力研发，一个一个的去攻克。我们始终坚信：别人能做到的，我们也一定能做到。我们将力争在最短的时间内，各系列产品质量全面达到并超过美磁水平，实现赶超世界先进水平的宏伟目标。我们要发扬浩源公司的创新精神：“团结奋进，齐心协力，努力创新，振兴浩源”。只要我们共同努力，我们的目标就能够达到，也一定能实现的。我们要继承浩源公司产品“高质，价廉”的宗旨，但我们的价廉是对性价比而言的，我们决不去打价格战。我们要以客户利益为己任，公司全体员工以“真诚、热心服务客户为本”。我们热切希望大家与我们一起共同努力，为我国金属软磁粉芯项目的正确、快速发展，努力作出新的贡献。

2012年4月8日