
软磁材料有关问题的讨论

中国武汉 陈氏磁业科技有限公司 陈一平

Chenyp1937@qq.com

13808692877

内 容 提 要: 文章就软磁材料的分类等问题提出了讨论,以求统一认识,正确选用。

关 键 词: 软磁材料 金属软磁 铁氧体软磁 非晶微晶软磁 金属软磁粉芯

一. 引言

软磁材料由于具有磁电转换的特殊功能,是一种具有广泛实用意义的功能材料。从十九世纪开始在工业领域使用至今,已经有两百余年的历史了。其间,人们为了获得具有良好性能的各种软磁材料去满足各实用领域的需求,进行了大量的研发工作并取得了一系列重要的成果。一代一代具有良好性能的新型软磁材料被研发出来了,而具有良好性能的新型软磁材料的应用,又极大的推动了整个人类社会的发展和进步。近两百年来,软磁材料发展了,人类社会也随之进步了。软磁材料的发展取得了突破,人类社会也随之突飞猛进。可以说整个软磁材料的发展史,几乎成了近代人类社会进步的缩影,令人欢欣,令人鼓舞!

然而,对于软磁材料来说,人们在某些问题上,还是存在一些不同的,甚至是模糊的认识。因此我们有必要提出来讨论,以求得统一认识,便于正确选用。

二. 问题讨论

1. 软磁材料的分类问题

软磁材料随着使用的需要,先后出现了不同的种类、系列和品种,为了方便区分和使用进行一些分类是必要的。但随发展阶段的局限性,或是分类的区分点之不同,出现了一些不同的分类:如金属软磁材料和非金属软磁材料;也有分类为金属软磁材料、铁氧体软磁材料和非金属软磁材料(橡胶磁、塑磁等);还有分类为金属软磁(包括金属及合金软磁材料、非晶微晶软磁材料及金属软磁粉芯)、铁氧体软磁和其他软磁(如橡胶磁、塑磁、磁流体及其他等)。以上分类是否恰当、正确,到底如何分类是值得我们来讨论的。

首先我们从软磁材料发展的时间顺序上来看,最先出现的是金属软磁材料。金属软磁材料的发展大致可以分为两个阶段:其一是十九世纪中期,特别是电动机和发电机的发明(1865-1866),极大的推动了金属软磁材料的发展,于是出现了以硅钢为代表的Fe-Si系软磁合金材料。直至二十世纪的四、五十年代还先后出现了铁铝系、铁铬系、铁镍系、铁钴系等二元合金软磁材料,这也即是金属软磁的“二元时代”。其间在后期虽然出现了铁硅铝、铁钴钒、铁镍钼等三元系的软磁材料,但也只能说是金属软磁多元时代的萌芽。到二十世纪中期至二十世纪八十年代,社会发展已正式进入“电子时代”。为满足社会发展的需要,各国对使用极为广泛的金属软磁材料进行了大量的研究。除了对硅钢和坡莫合金(铁镍系的1J34-1J52等)的研究和大规模产业化生产,还出现了高导磁的钼坡莫、超坡莫、硬坡莫合金的三元系、四元系、五元系的金属软磁材料,即所谓的“多元合金阶段”。至此,金属软磁材料的发展可以说已达其顶峰。金属软磁材料之所以称之为金属软磁,是从它的性状特征上来讲的,也就是说它必须具有金属的特征。所谓金属者它必须是:(1)固体的结晶态物质;(2)具有金属的光泽;(3)具有一定的机械强度。显然,上述分类中的非晶微晶软磁和金属软磁粉芯是不能属于

金属软磁材料一类的了。

上个世纪中期，为了某些个别或特殊的用途，出现过将金属软磁的粉末掺入橡胶压制成型或塑料中成型的所谓橡胶磁、塑磁，有把金属软磁粉末悬浮于某种流动载体中的所谓“磁流体”等，其使用极为个别特殊，现是否还有用也未知，这都不能作为一类或其他一类软磁材料来加以考虑。

铁氧体软磁（详见李荫远、李国栋《铁氧体物理学》）是以某些铁磁性氧化物为主体，并掺杂有某些少量非铁磁氧化物，在一定条件下烧结形成的氧化物固溶体（即复合氧化物）。铁氧体软磁的研究始于二十世纪初年，其性状和生产工艺都是显然有别于金属软磁。所以，它很容易和金属软磁相区别而另作一类。由于其在使用时损耗较金属软磁大为降低的这一极为优良特性和良好的频率稳定性，在社会逐步向高频时代发展的情况下，这使它能更广泛的适用于各种科技领域，因而至今仍具有广阔的使用前景。铁氧体软磁为满足各种不同的用途有各种不同的系列和品种及形状规格，如高频的、高B值的、高导的；各种大小环形的、E形的、条形的和罐形的等等。对于铁氧体软磁单独作为一类软磁材料来分类，大家的意见是比较统一的。

非晶微晶软磁材料是利用某些金属软磁（现较多为Fe-Si系合金）在冶炼过程中加入某一两种“玻璃化”元素（Si、B、P）等，并通过“快淬技术”（快速急冷）使之来不及结晶而成为非晶态（过去也有叫金属玻璃）的固溶态物质或是部分微晶化的物态，从而具有某些特殊的良好性能（如电阻率增加，损耗下降）的软磁材料。其最大优点是生产工艺较金属软磁和铁氧体软磁来说是极大的简单化，而磁性能也比较好。Fe-Si系的非晶微晶软磁材料由于较金属软磁的损耗低，Bs值又较铁氧体软磁高，在频率不是很高且功率不是很大的情况下具有很好的适用性。但它既不是金属也不是氧化物，而是磁性合金固熔体或是部分微晶化固溶体。所以它是属于另一类的软磁材料。按发展顺序，人们把它称作第三代软磁材料。它的出现和大量使用是在铁氧体软磁之后，由此铁氧体软磁理所当然的成为第二代软磁材料，而金属软磁也就是第一代软磁材料了。

金属软磁粉芯的出现和使用都比第三代的非晶微晶软磁材料要晚。它是用金属或合金软磁材料制成的粉末，通过特殊的工艺生产的一种具有优良综合性能的新一代软磁材料，广泛适用于各种科技领域和工业领域。为适应需要，已研发并生产了各种不同系列的品种和规格。它是既不能属于金属软磁，也不属于铁氧体软磁，更不属于非晶微晶软磁材料的新一类软磁材料。

综上所述各类软磁材料的发展和使用情况，作为一类软磁材料来说，必须符合下列几点，这里我且把它当作划分各类软磁材料的标准。对与不对，仅供参考。

（1）作为一类软磁材料来说，它必须具有普遍的适用性。也就是说它能广泛适用于各种科技领域和工业领域，而不是仅仅适用于某些个别或特殊的场合；（2）随着发展的需要，逐渐形成各种不同的系列和品种规格的产品，以不断满足科技发展的各项需要；（3）在生产工艺上，既具有别于其它一类软磁材料的独特性，又具有同类各系列产品生产工艺的近似性。根据上述标准和各类软磁材料的性状特征及发展先后，我们就很容易很明确划分各类软磁材料了。即第一代的金属软磁材料；第二代的铁氧体软磁材料；第三代的非晶微晶软磁材料和第四代软磁材料的金属软磁粉芯。

2. 是否还会有新一类的第五代软磁材料？

对于这个问题，我个人认为可以肯定的回答：没有。我们知道，世界上的一切物质皆具有磁性。按磁性来分类，我们可以把世界上所有物质分为五大类：抗

磁性物质、顺磁性物质、反磁性物质、亚铁磁性物质和铁磁性物质。其中，铁磁性物质和亚铁磁性物质的磁性最强。所以一切磁性材料，不管是永磁材料还是软磁材料来说，其组成都是以铁磁性物质和亚铁磁性物质为主体组成的。

另一方面，一切磁性材料它都具有高的饱和磁感应强度 B_s 值。永磁材料由于具有高的 B_s 值，因此具有高的磁能积才具有实用意义；而软磁材料由于具有高的 B_s 值，因而具有高的磁导率而广泛应用于各个领域。在当代科学技术已相当发达的今天，对于一切物质的基础研究可以说是十分清楚了。不管是单体的金属还是金属间化合物的合金，也或是金属的氧化物，还是合金化的固溶体或是粉末态的物质，能够作为软磁材料来使用的，可以说是新的已经没有了。另一方面，从软磁材料发展至今的两百余年的历史来看，每一类软磁材料从发展到大量研制使用直至发展到顶峰，都有大几十年到百余年的历史。从第一代软磁材料的金属软磁材料到第四代软磁材料金属软磁粉芯，每代之间都有半个世纪以上的重叠期，没有哪一代新的软磁材料是突然冒出来的。而作为最新一代软磁材料的第四代软磁材料，金属软磁粉芯从二十世纪四十年代左右至今，也可以说已达顶峰，也已经经历了七十多年了。要是还有新一代的软磁材料话，那应该早已出现了的。当然，我这是指的新一类的软磁材料而言的。至于各类软磁材料中，是否还有新的系列品种出现，我的回答也是肯定的，应该说还是有的。比如说目前对非晶微晶类软磁，仅仅是对高 B_s 值的铁硅系材料研发较多，当然这从当前的实用意义来讲是对的。我在上个世纪七十年代也研制过软磁的 $Fe-Cr-P-C$ 系的非晶“钢毛”，由于不易锈蚀，可用于钢厂废水处理。但是，这些材料导磁率都不高，我觉得各种高导磁率的软磁材料是非常具有实用意义的。只可惜损耗有点大！是否能把超坡莫、硬坡莫的金属软磁材料做成非晶微晶材料，甚至进而研制出具有高导磁率的非晶磁粉芯或非晶复合磁粉芯呢？我想应该是有可能的。那么这种具有高导磁率和低损耗的复合型的金属软磁粉芯，将会具有极重要的实用意义。这些高导磁的金属软磁材料，特别是一些导磁率极高，损耗较低的硬坡莫类的材料，如果直接用于生产高性能的金属软磁粉芯，也将会是非常具有实用意义的，这些都可作为我们研发对象。总之，我们还有很多的工作可以做。另一方面，各种软磁材料的应用研究可以说是无止尽的，更是具有非常广泛发展前景的。

3. 关于金属软磁粉芯的称呼命名问题

金属软磁粉芯最初出现的时候，由于其生产工艺某些地方（如压制成型、烧结处理）与铁氧体相近，也有把它和铁氧体一样称之为“铁淦氧”的，后来逐渐称之为“磁芯”、“磁粉芯”，现在国外一般还是通称为“磁粉芯”。但我总觉得这种称呼比较模糊，不够确切容易混淆。因为“磁粉芯”顾名思义即是磁性粉末做成的磁芯，按此定义，硬磁和软磁的铁氧体材料，稀土永磁的钕铁硼等不是都可以称为“磁粉芯”了。也有人进一步称之为“软磁粉芯”，那么铁氧体软磁不也可以称为软磁粉芯吗？美国阿罗德公司称之为“金属磁粉芯”，这虽然把它和铁氧体相区别开了，但作为软磁材料来说，其最大的缺陷是没有突出它的软磁特性。作为硬磁材料的铝镍钴压制的磁块，不也同样可以称为“金属磁粉芯”吗？在我国大部分都还是按照外国的称为“磁粉芯”，我最初也是如此来称呼的。我曾和某大学的教授请教过这一问题，他说不要管它，外国人都是这么称呼的不会错。也有随国外称为“金属磁粉芯”的，还有随便称为“铁芯”、“铁粉芯”的，总之是比较混乱。但我仔细想想，我认为“金属软磁粉芯”的称呼是比较好的。既确切又不易与其他类软磁材料相混淆，真可谓一目了然，有什么不好呢？其实，我这也并不是什么新东西，我只不过把别人的两个合在一起罢了，我也还是向“洋

人”学来的，只不过觉得这样的称呼合理些。这里我建议大家都统一称为“金属软磁粉芯”不知好也不好。这里我要感谢钢铁研究总院的同志们对我的支持与鼓励，在我 2004 年开始提出来的时候，他们立即表示认同和支持。不过我的唯一的目的只是希望大家都统一起来，不要你这样称呼，我非要那样称呼搞得很混乱，有什么好处呢？如果还有什么更好、更恰当的，那当然就按更好的来统一也是可以的。顺便说一下，“金属软磁粉芯”只是第四代软磁材料总的称呼，具体各系列还是直接称呼的比较好。如铁粉芯、铁硅系磁粉芯、铁硅铝磁粉芯……等。这些都比较统一，就不必再讨论了。

4. 为什么说“金属软磁粉芯”在四大类软磁材料中，是一种综合性能最好的新型软磁材料？

从各类软磁材料发展的过程来看，它是一个不断更新、不断优化的发展过程。这不仅在同一类软磁材料是如此，新的性能更好的系列、品种不断出现。就整个软磁材料来说，也是新的具有更优异性能的一代一代新型软磁材料不断被研发和广泛使用。比如就金属软磁材料来说，从工业纯铁、低碳钢的应用，到二元合金时代直至多元时代都是在不断发展进步的。但是作为一代软磁材料来说，它们也有一些共同的、难于克服的缺陷。对于金属软磁损耗大、频率稳定性差、对应力的敏感而导致磁性能的剧降等都是其致命的缺陷。人们虽然想方设法在工艺上进行改进（比如说轧成极薄的超薄带后，进行涂层卷芯以降低损耗）来克服这些缺陷，但效果上也是有限的。因此，人们不得不进行研究以寻求新一代具有更优良特性，能满足科技发展需要的新材料。铁氧体软磁就是在这种情况下诞生的，具有低的损耗和良好频率稳定性的优点。特别是科技发展逐步迈向高频化发展时代，很多情况下它比金属软磁要更具实用性，从而将金属软磁大量取而代之。非晶微晶软磁相对于铁氧体软磁而言，并不具备全面的优势。但高的饱和值和生产工艺简便是其最大的优点。这在某些铁氧体不能取代金属软磁的地方，它就有较好的适用性。

作为第四代软磁材料的金属软磁粉芯，它是在人们总结前三代软磁材料发展的基础上发展起来的。它既保留了金属软磁和铁氧体软磁二者的一些优良特性，同时又最大限度的克服了两者的缺陷。为什么它能达到这样的效果呢？我们说这是通过其特殊的生产工艺来实现的。因为它是以金属软磁材料的粉末来作为主要原材料，同时在生产工艺上又抓住了降低涡流损耗这个核心的核心，这我在有关文章中已作描述，这里就不再重复了。因此，在生产工艺上除采用了与铁氧体某些相近的工艺，还有一些关键独特之处。正是由于抓住了这个核心的核心，从而使得金属软磁粉芯材料具有较其它类软磁材料更多的优点，更有的是其独具的特有之长，因之更是具有良好而广阔的实用前景。在设计工作中，凡是能用金属软磁粉芯取代其它各类软磁材料的地方，可以尽量大胆选用，这将会对改进产品的性能和质量的提高都会起到良好的作用。对于金属软磁粉芯，我们总结起来有六大优良特性，在此可以做一些比较：

(1) 具有高的磁感应强度，这保留了金属软磁的优点而远比铁氧体软磁为优；

(2) 具有高的有效导磁率，这比金属软磁和非晶微晶为优；

(3) 损耗低，频率稳定性好。这是由其工艺特征所保证的，也是远优于金属软磁和非晶微晶的；

(4) 磁性能稳定性好。除上第三点频率稳定性好外，其温度稳定性、时间稳定性和环境适应性（对应力不敏感）等都比其它类好；

(5) 由于其 B_s 值高、损耗低，其直流偏场稳定性好，这也是其优于其它类软磁材料的一具有重要适用意义的优点；

(6) 性能的“可控性”这是一个非常具有实用意义的独特优点。也就是说通过控制和改变生产工艺可以获得能满足各种特殊场合使用的具有某种独特性能的金属软磁粉芯材料，从而最大限度的满足了各种特殊场合的特殊要求。这对于改进产品性能和提高产品质量是极为关键极为重要的。特别是对于国防军工领域，更是极为重要。我们利用这一特性，创造了金属软磁粉芯的性能一致性达 $\pm 0.125\%$ 批量发货的世界纪录，这对于某产品实现具有极高精度和灵敏度起了极为重要的作用。

对于如何评价各种材料的优劣，我在其它文章里也曾经说过：必须是要科学的评价。所谓科学评价，一是要实事求是，是优点就是优点，是缺点就是缺点；二是要综合比较，也就是说作为一种优良的材料，综合起来说就其优点比它好的少，就其缺点比它差的多。对于上述各类软磁材料比较，无疑金属软磁粉芯是其中最好的一类。

大家都是知道的，在上世纪八十年代，国内外对各种电子产品都提出了高可靠性、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。为了实现“高精度”、“高灵敏度”，对软磁材料的要求是：具有高的有效导磁率、高的磁性能稳定性和高的一致性。要实现大容量和小型化，则对软磁材料要求具有高的 B_s 值、高的有效导磁率和低的损耗。这些要求对于金属软磁粉芯而言，都是优于其它软磁材料的。所以，我们说金属软磁粉芯是一种综合性能最好的、最具实用意义的一种新型软磁材料。有人问我：你能否具体列出它能适合做些什么器件？我说我不能。这要从具体实际出发。当几种材料都可以用时，你可以从性价比来考虑。当性能要求高时，尽量选好的、贵一点也是可以的。我们只能说它是广泛最具有实用性的一种具有优良特性的新型软磁材料。具体如何选用请详见《金属软磁粉芯及其应用设计》修改版。

三、随意杂谈

我国软磁材料发展和应用，我感觉总是落在别人后面，总是在跟着别人跑，总要落后先进国家好几十年。虽然这种差别随着时代的推进在逐步的缩小，虽然改革开放给我国软磁材料的发展带来了无限的生机，但是这种差距还是依然存在。这与我国经济的高速发展，已经成为世界第二经济大国的国情是不相符的，与我国已经成为世界上具有重要影响的大国之国际地位也是极不相符的。上述讨论我们已了解到软磁材料的发展和应用，对于社会发展和进步的重要推动作用。迅速改变我国软磁材料发展和应用的落后现状，已经成为落在我们肩上的重大责任，我们大家应该去努力去承担起这一历史重任。最近我看过一本小道消息的册子，其中有一条关于当前各国都在积极准备“电子战”的报道，说是一旦打起来，将会使整个人类社会倒退 100 年！这是多么令人恐怖啊！这其中软磁材料将会扮演一个极为重要的“角色”。它虽然没有核战争那么残酷，可是它将会给人类造成的危害是绝不会亚于核战争的！面对如此现实，我们没有别的选择，只有以其人之道还治于其人之身。所以努力研发，改变我国软磁材料的发展和应用之落后现状，是摆在我们面前的一个极为重要而又十分迫切的任务，故我认为我们从事软磁材料生产和应用研发的广大科技工作者们，都应当有一种紧迫感和责任感。我们大家都要通过自己的努力去承担起改变我国软磁材料落后现状的重任，去努力创新，努力做出我们的实际贡献。

通过上面的讨论，金属软磁粉芯是一种最具良好综合性能，具有广泛实用意义的最新一代软磁材料，它的发展和應用研究我认为应当作为当前我们抓好软磁材料的一项最重要的任务。从上个世纪六十年代末至今，我经历和参与了我国金属软磁粉项目四十余年发展的全过程，可以说我们还是一直跟在别人后面在跑。到本世纪我国才开始在各科技领域和工业领域大量使用这类具有良好性能的新型软磁材料时，我国的生产可以说还是一片空白！仅仅是铁粉芯系列才具有有一点规模，所以开始很多人都把其他的金属软磁粉芯也叫做铁粉芯，至今还有不少人还是这么习惯去称呼。于是国外产品，特别是韩国产品很快占领了我国的整个市场！近年来，我国企业虽已初具规模，但产品性能差，缺乏竞争力，我国市场被国外产品垄断的局面仍是难以改变，我国的企业仍是在十分困难的处境中挣扎！

目前，就金属软磁粉芯项目的发展而言，可以说是已经都达到了顶峰，没有什么大的额外的新变革了。近两年，我集中进行了些研发工作。现在除铁粉芯外，用量最大的就是铁硅铝磁粉芯。现在我们的铁硅铝产品在性能上已超过韩国 CSC 产品，而且绝对不比美磁差。不但如此，我们还做出了世界各国产品目录都没有的 $\mu e160$ 的高导磁铁硅铝磁粉芯，已可以投入批量生产使用。近年作为光伏材料用得较多的铁-硅系磁粉芯，虽然开展的较晚但结果还是比较理想的。我们用价格较低的水雾化粉做的铁硅系磁粉芯与国内做铁硅系最好的铂科公司用气雾化粉做的磁芯相比，除在损耗上要高 5% 左右外，其他综合性能一点也不差。而作为使用频率并不高的光伏领域是完全可以用的。当然我们将继续研究，在产品性能上超过目前世界上最好的韩国 CSC 产品是完全可以能的。并且我们已经研发出了 $\mu e125$ 的高导磁率铁硅系磁粉芯，我们将进一步研发稳定性和生产工艺，以便能尽早投入实用。在高磁通量的 NiFe50 坡莫磁粉芯系列和 MPP 钼坡莫磁粉芯系列，我们早已瞄准世界王牌美磁产品，通过近年研发已有相当的基础，根据客户的需求，我们也将尽快突破它。在生产工艺方面，我们创造了金属软磁粉芯生产的最关键点的配料绝缘新工艺。不仅在原材料配比和选材方面选择了较合理的方案，同时在工艺设备上进行了创新。我们创造的干湿混合法绝缘的新工艺对提高产品性能上起到了良好的效果。我们根据多年实践，自己设计制造的 100kg 绝缘机。这是我们在批量生产中，多年来一直未解决的最关键的设备。我在钢研总院看见的这种设备，动则几万元一台，一次只能几公斤或最多十几公斤，又贵又不适用，效率低，价格昂贵。而我们的设备，经过实践使用，不仅价格便宜，而且效率高，效果好。在压制设备方面。过去曾设计改制过一台 40T 的全自动压机，每分钟成型 30 只，这大吨位，这么高的成型速度，当时在世界上也是少见的。在模具设计上也进行了许多改进取得了良好的效果。近年为了试验需要，我还将一台旧的普通的 100T 液压机，通过设计改制成为一台全自动的浮动式双向压制成型机。它不仅在价格上比现在一般采用的全自动液压机要拾七、八万元一台要便宜许多，由于不需程序控制，几个动作可同时进行效率肯定会更高。目前还未完成试验但主要问题都已解决，个别问题也有了解决的方案，我坚信是完全可以成功的。在处理工序，我发明了一种箱式管式两用的保护气氛处理炉。最近经实践使用，效果也是很好的，这对于一些小的企业非得去花二十多万元去买一台连续炉才能实现批量生产，也可是解决了一个大难题。涂装工序，是一个老大难工序。关键的是要解决自动喷漆的生产线。如果进口一台设备，要花几十至上百万元，这对一般企业来说都是望尘莫及的，对此问题解决，我也设计了一解决方案，如果资金等条件允许，我也会和有关单位一起来共同努力去解决它。这样，我们各项产品的质量都上去了，都达到了世界先进水平。批量生产的工艺和设备

等问题都解决了，那么实现赶超世界先进水平，改变我国目前主要依赖进口的落后现状不就是可以实现了吗。让我们大家一起共同努力，用我们的实际行动去完成我们所肩负的责任。这里我要再次大声疾呼：各位生产企业的老总们，只要你们把产品质量搞上去了，不要怕产品没人要。我也要请求各位客户企业的领导和设计人员尽量选用国内产品，不要把价格压得太低，大家都要吃饭嘛。要支持国内企业的发展，让我们共同努力去改变我国的落后面貌。最后我也要再次向各位领导请求给予中小企业一些脚踏实地的支持。我退休至今已过二十年了，二十年来我没有得到过一分钱的支持，我一直在困难和负债中挣扎，最近因为资金我又已失业三个月了，三个月对我们老年人来说是多么宝贵的时光啊！有位小朋友曾在网上发表文章说：陈老先生你这么大了，你还能干什么？该休息了。可是面对我国当前落后状况，我能休息吗？不管怎样，我还是要去奋斗的。

2013.2.15.完稿