

金属软磁粉芯的损耗和交直流叠加

Loss and AC-DC Additivity of Metal Soft Magnetic Powder Cores

陈一平

陈氏磁业科技有限公司

内容提要：文章对金属软磁粉芯的损耗和交直流叠加等问题进行了较详细的描述和讨论，以使大家对金属软磁粉芯损耗低、直流偏场稳定性好这两项优良性能有全面的了解和认识，以利于生产和设计使用。

关键词：磁损，交直流叠加，直流偏场

中图分类号：TM27

文献标识码：A

文章编号：1606-7517(2015)02-3-133

1 引言

人们在软磁材料的设计应用中，其损耗和交直流叠加是我们需要考虑的重要问题。这也就是说损耗的大小和直流偏场的稳定性如何，是表征一种软磁材料性能优劣的重要特性。比如说金属软磁虽然具有高的磁感应强度 B_s 值等优良特性，但是由于其电阻率低损耗大，所以在很多使用场合逐渐被性能优异、特别是损耗很低的第二代软磁材料的软磁铁氧体所取代。但是由于软磁铁氧体有一个致命的缺陷就是其饱和磁感应强度低、易饱和且直流偏场的稳定性较差而影响其使用。第三代的非晶微晶软磁虽然其损耗较大而远不及铁氧体软磁，但由于其具有较高的饱和磁感应强度、直流偏流稳定性较好、且生产工艺较为简单。所以在使用频率不是很高的情况下，不仅可以取代金属软磁，且在不少地方也取代了铁氧体软磁。

第四代软磁材料的金属软磁粉芯，它不仅保留了金属软磁具有较高的饱和磁感应强度 B_s 的优点，同时它也保留了铁氧体软磁具有低的损耗之优良特性。所以，我们说它是一种最具优良特性、综合性能良好的最新一代的软磁材料。低的损耗、高的饱和磁感应强度和良好的直流偏场稳定性及性能的可控性等都是它的最主要优良特性。但是我们对其损耗低和直流偏场稳定性好这两个问题的认识，还并不十分清楚。如：各种损耗的产生和减少措施、在交直流场共同存在的情况下其磁化影响、随着直流值的增加测出电感值为什么越来越小、影响直流叠加稳定性的因数是

什么？金属软磁粉芯为什么具有损耗低和直流偏场稳定性好等优点？这些都是值得我们去深入认识和了解的。

2 金属软磁粉芯的损耗

软磁材料的发展所围绕的一个最核心的问题是什么呢？就是如何降低其损耗。从金属软磁发展的全过程来说是这样的；铁氧体软磁等一代代新的软磁材料的出现也是为了降低损耗这一核心问题而作出的努力；直至最新一代软磁材料金属软磁粉芯的出现，更是抓住了降低损耗这一核心问题的核心，即如何降低涡流损耗的问题。为什么说这是个核心的核心呢？我们讨论了下面的问题，就会自然明白了。

我们说软磁材料的损耗是指它在交变场的磁化过程中，它所吸收并以发热的形式耗散所消耗的能量，这种损耗包括磁性材料的磁损和介电损耗。这其中磁损是磁性材料在交变场作用下的主要损耗。所以我们在讨论金属软磁粉芯的损耗时，我们所要考虑的主要也是磁损。我们还知道磁损主要包括的有：磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗。下面我们将分别来进行叙述和讨论。

首先我们讨论磁滞损耗的问题，当然我们这里只能进行极为简单的讨论。什么是磁滞损耗呢？我们说磁滞损耗的产生主要来自于磁性材料中存在的各种杂质缺陷、以及各种磁各向异性等的非均匀性，这些都会使磁性材料在交变场的磁化过程中，使畴壁的移动和畴壁的旋转受到一定

的阻滞而成为不可逆，也就是说要消耗能量而造成损耗，这也就是我们所说的磁滞损耗。这其中所含杂质造成的缺陷是较容易理解的，这也是我们在粉的处理时要通氢以还原除去杂质之目的。而磁各向异性是比较复杂多样的，我们这里所要考虑的主要的是磁晶各向异性 K 和磁滞伸缩各向异性（也有称为磁弹性各向异性）。为了降低磁滞损耗，我们可通过氢保护处理，尽量使磁性材料的磁晶各向异性常数 $K = 0$ ，以及使其磁致伸缩系数 $\alpha = 0$ 。所以在金属软磁粉芯的生产过程中，粉的氢保护处理是非常重要的，其重要目的就是为了清除杂质、调整织构以保证其最大的短程有序状态。国外曾经有人提出：在保存最大限度的短程序情况下，保留少许长程序是必要的，这对提高磁性能是有利的。本人对此观点是持否定态度的：因为长程序存在的本身即意味着磁各向性的存在，即不利于 $K = 0$ 和 $\alpha = 0$ ，即不利于磁滞损耗的降低，从而有碍于磁性的提高。

当然我这里仅仅是一种理论的分析，并没有进行实验的验证。并且长程序和短程序之间的互相转变是一个可逆的过程，在这种织构的转变过程中，总会有一微小比例的“共存区”，为了保持良好的综合性能在大部分由长程序向短程序转变的过程中，有点长程序的存在也是完全可能的，但这并不意味着非得保留一点长程序不可。这一观点在 2004 年第四届世界优秀论文评选时，本人在有关论文中作了表述并得以认同。

关于涡流损耗的降低，这是金属软磁粉芯生产的最主要工艺特点。所以下面我们再来谈什么是涡流损耗，其产生及如何降低涡流损耗的问题。当磁体在外场的作用下，由于磁感应而被磁化时，磁体本身的固有磁场在外场的作用下会发生微小的偏移，于是即产生了感应电流，这种感应电流由于只能在磁体内部流动，即称之为涡流。而由于磁体自身的阻抗，于是涡流在流动过程中就受到了阻滞，而所产生的涡流为克服这种阻滞而流动时，是要以发热的形式耗散能量的，这也即是产生了涡流损耗。磁体的阻抗愈低则涡流愈大，也即是涡流损耗更大。为此，增大磁体的电阻率，就会使涡流减少也即是降低了涡流损耗。在交变场情况下，随着频率的增加这种涡流损耗也迅速增加，从而使其在总损耗中的比例增加。我们曾测过 CS270125 的样品，当频率达 100kHz 时，其总损耗大为增加，而此时涡流损耗已占总损耗的 90% 以上，这说明随着频率的增加，使总损耗也大为增加的原因主要是来自涡流损耗的增

加。所以相对来说金属软磁粉芯为什么既具有良好的磁性能而又具有低的损耗呢？这就是由于它经过了绝缘包覆工艺，在压制之前使细小的磁体粉末经过绝缘包覆而使其互相之间隔绝起来，压制的磁体电阻率提高了，所以其涡流损耗大大降低。正是由于抓住了这一核心的核心，使金属软磁粉芯阻抗增加降低了涡流损耗，从而具有损耗低这一优良特性。

最后我们再来谈剩余损耗的问题。所谓剩余损耗是由各种磁性材料本身所具有的各种磁后效也或者说磁粘滞性，由此种种原因使其在磁化过程中产生了弛豫（即不稳定）现象所消耗之能量而产生的损耗，即是剩余损耗。这种损耗相对于磁滞损耗和涡流损耗来说，在一般情况下是一个可以忽略不计的极小值。因此，我们可以把测得的总损耗看作是磁滞损耗和涡流损耗二者之和。也或者在有条件的情况下，我们可以分别测出磁滞损耗和涡流损耗，也可把二者之和当作其总的损耗。而在需要考虑剩余损耗的情况下，我们也可先测出去其总损耗，并分别在测出其磁滞损耗和涡流损耗，然后将总损耗减去磁滞损耗和涡流损耗即为剩余损耗的实际值了。

3 关于交直流叠加

在众多的使用情况下，不仅有交流场的存在，而且还有直流场存在，于是便产生了交直流同时存在的叠加磁化问题。而交流场和直流场这是两个不同的相量，它们之间总是存在着一定的相位差，当它们同时作用于某一磁体时，其磁化场的总强度一般是会增加的，但这并不是简单的等于二者之和。这是因为由于它们之间存在相位差的原因，当交直流场对同一磁体磁化时，互相之间便产生了阻滞的作用。对于交流磁化来说，随着直流场的增加，交流磁化会被逐渐减弱，只是由于磁体的某些性能上的差异，这种减弱的速度也是快慢不同的。当直流磁化场增加时，测出的电感慢慢减小，但是这种减小的速度比较慢，我们就可说其直流偏场稳定性好。反之下降的比较快，则说它的直流偏场稳定性是比较差的。这也说明我们在测试时，为什么会随着直流电流的增加测出的电感值反而会下降的原因。因为目前世界上还没有一种能定量测量交直流叠加共同磁化结果的仪器，我们目前测量是分开的，即测出在直流场逐步增加情况下，交流磁化的变化（即电感值的变化）。也就是说虽然测量时交直流场是同时作用在一个磁体

	DC (A)	0	4	8	12	16	20	剩余值%
CS270026	1L	22.56	21.94	21.06	19.83	18.34	16.84	74.65
	2L	22.52	21.97	21.08	19.85	18.51	17.11	75.93
	DC (A)	0	4	8	12	16	20	剩余值%
CS270075	1L	66.50	57.20	45.22	34.49	26.50	20.58	30.95
	2L	66.29	57.11	45.29	34.59	26.54	20.67	31.18
	DC (A)	0	4	8	12	16	20	剩余值%
CS270090	1L	79.88	66.17	50.66	36.62	26.73	20.45	25.10
	2L	73.28	66.27	49.85	35.84	26.14	19.58	26.72
	DC (A)	0	4	8	12	16	20	剩余值%
CS270125	1L	106.59	82.09	54.49	35.28	23.92	17.24	16.17
	2L	102.12	79.24	53.97	35.36	24.34	17.37	17.01

上，但进入测量电感时，是把直流隔离掉了的，也就是测出的是随直流场（电流）变大时，交流磁化就慢慢减小（即测出的电感值下降）。当直流增加时电感下降，但较缓慢（其变化较小）说明其直流偏场稳定性较好。

前面我们说过：由于磁体的某些性能的不同使磁体的直流稳定性好坏有所差异。那么究竟软磁材料哪些特性对其直流偏场的稳定性有影响呢。对这个问题我们没有进行很多的研究，只是从测量的结果得出了两点结论：

(1) 当磁体的饱和磁感应强度较高时，其直流偏场稳定性较好。比如我们测过 μ_e 值同为75的T106—52、和CS270075、CH270075、CM270075等试样。按 B_s 由大到小分别排列为T106—52、CH270075、CS270075、CM270075，其直流偏场稳定性最好的也是T106—52，其次

为CH270075，再次为CS270075，而CM270075的 B_s 最低，直流偏场稳定性最差。在设计运用中，我们在有直流偏场时，要尽量选用 B_s 值高的磁芯。并在磁芯生产时同性能档压制时密度要尽可能高、绝缘包覆好。

(2) 另一影响因素就是磁体自身的损耗，损耗愈大其直流偏场稳定性愈差，测出电感值下降最后剩余值最小。这由我们测试相同材质、相同规格的不同导磁率（即不同损耗）之CS270样品可见，结果如下：

由上述结果可以看出同一系列的产品规格相同， μ_e 值由26、75、90、125变大的时候，其损耗也是增加的，随直流偏场的增加电感值下降也逐渐加快（即剩余值%愈小），其直流偏场偏稳定性愈差。