

采用高Bs纳米晶合金组装的叠层磁块磁芯的软磁特性

Atsushi Yao¹, Masaki Inoue², Kouhei Tsukada¹, Keisuke Fujisaki¹

¹ 日本丰田工业大学

² 日立金属株式会社

摘要: 本文重点研究了在高磁通密度区域采用高Bs纳米晶合金组装的叠层磁块 (block) 磁芯的磁芯损耗。为了讨论高Bs块体磁芯的软磁特性, 还进行了与非晶 (SA1) 块体磁芯的比较。在高Bs块体磁芯中, 低磁芯损耗和高饱和磁通密度Bs在低频区域都得到满足。此外, 在由高Bs合金制成的叠层块体磁芯中, 作为磁通密度的函数的磁损增加率保持很小, 达到约1.6T, 这在传统的基于非晶合金的叠层块体磁芯中是无法实现的。由高Bs合金制成的块体磁芯在高频区域表现出与非晶合金磁芯相当的磁损。因此, 预期该叠层高Bs块体磁芯可以在高频区域中实现低磁芯损耗和高饱和磁通密度。

1 前言

市面上已经开发出软磁材料, 例如硅钢、铁基非晶合金、常规纳米晶合金 (Fe-Si-B-Cu-Nb、FT-3M) 和高Bs纳米晶合金, 通常被用于功率器件, 例如作为变压器、电感器和电机。为了实现高效益 (effectiveness)、高效率和小型化, 因此这些电子应用需要低磁芯损耗和更高的饱和磁通密度Bs。为了满足这一要求, 一些研究集中在高Bs的Fe-Cu-B基和Fe-Cu-Si-B基纳米晶合金上, 这些合金具有高Bs和低磁损 (相当于晶粒取向硅钢的一半)。在我们的研究中, 一种高Bs的铁基纳米晶合金在叠层磁块体磁芯中进行了测试。

最近, 许多研究已经解决了环形绕组磁芯和用高Bs纳米晶合金组装的跑道式磁芯的磁性³⁻¹¹。例如, M.Ohta和R. Hasegawa已经证明, 与非晶磁芯相比, 高Bs跑道式磁芯可以在高频 (大于约10kHz) 区域实现低磁芯损耗和高磁导率¹¹。下一步是检查带有气隙的叠层磁性磁芯与高Bs合金在高磁通密度区域的组装。

与单气隙磁芯相比, 在相同的总气隙长度条件下, 多气隙可以减小磁芯的涡流损耗¹²。叠层块体磁芯适合用作多气隙磁芯。通过分离叠层块体磁芯中的气隙, 可以减小每个位置的气隙长度, 然后可以抑制边缘磁通量。具有多气隙的叠层块体磁芯使得我们可以减少由于磁通量引起的涡流损耗。因此, 重要的是要理解在高磁通密度下与高Bs

纳米晶合金组装的叠层磁性块体磁芯的基本磁特性。

在我们的研究中, 呈现了基于高Bs合金带材的叠层磁块体磁芯。此外, 为了讨论高Bs块体磁芯的软磁特性, 还进行了与非晶块体磁芯的比较。我们使用谐振电路¹³来检查在高磁通密度区域中的正弦激励下块体磁芯的磁芯损耗特性。所提出的测量包括比商用测量更高频率的操作。块体磁芯的磁芯损耗也作为激励频率的函数来测量, 因为我们认为这种叠层高Bs块体磁芯在高频 (大约10kHz) 区表现出的低磁芯损耗与跑道式磁芯¹¹的磁芯损耗几乎一致。作者在一次会议上发表了一篇论文, 讨论了这项工作的部分实验结果。

2 块体磁芯及其测量系统

图1显示了由高Bs铁基纳米晶合金和非晶合金 (SA1) 组装的叠层磁性块体磁芯, 其分别由 $\text{Fe}_{90}\text{Cu}_1\text{Mo}_{0.2}\text{Si}_4\text{B}_{1.4}$ (按%) 和Fe-Si-B组成。表I显示了用于叠层磁芯的两种不同材料的规格。

通过单辊熔融纺丝技术制备高Bs纳米晶合金带, 然后在500°C下退火以开发高Bs铁基纳米晶合金。在我们的研究中, 高Bs带材的宽度约为19.5mm。在在线退火工艺中, 将升温速率设定为高于100°C/s以获得纳米晶相。将高Bs纳米晶合金带材被叠层并用丙烯酸树脂浸渍, 以制成块体磁芯。在切割和蚀刻切割表面之后, 制备与高Bs

纳米晶合金组装的叠层块体磁芯。这里，在浸渍之后要切割所需尺寸的叠层块体磁芯，因为高Bs带材是脆且易碎的。我们制造了两种尺寸的叠层磁芯。第一（第二）个磁芯的宽度、长度和厚度分别为约 18.6（19.2）、63.4（84.6）和 35.0（35.0）mm。堆叠系数和四个磁芯的总重量约为 88%，约为 1287 克。在我们的研究中使用的高 Bs 纳米晶材料带材表现出 1.74T^{11} 的高饱和磁通密度。

通过使用上述相同的叠层、切割和蚀刻方法，制备了用非晶态合金组装的叠层磁性块体磁芯。两种不同材料的块体磁芯是相同的设计。在用非晶态合金组装的块体磁芯中，堆叠系数和四个芯的总重量分别为约 93%和约 1300g。

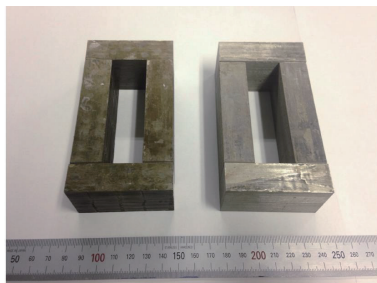


图 1 叠层块体磁芯，由高 Bs 铁基纳米晶合金（左）和非晶合金（右 SA1）组装而成。

表 I. 用于叠层磁芯的不同材料规格

	High Bs alloy	Amorphous alloy
Reference	-	SA1 ¹⁵
Density [kg/m ³]	7420	7180
Composition	Fe-Cu-Mo-Si-B	Fe-Si-B
Thickness [μm]	24	25
Relative permeability (at 10 kHz)	about 2000	3000
Saturation magnetic flux density [T]	1.74	1.56
Resistivity [μΩ·m]	around 0.8 ³	1.3

在我们的测量中，我们执行两种叠层块体磁芯损耗测试。第一次磁芯损耗测试通过使用 DC 磁滞（BH）环路跟踪器（SK110，Metron 公司）来测量 DC 磁滞环路。第二个测试是基于 AC 磁滞环路来测量磁芯损耗；通过使用谐振电路来测量磁芯损耗，谐振电路具有与电感并联的低损耗电容，如图 2 所示。这里，我们使用并联谐振电路来获得通过电感的大电流。通过调整每个测量点的电容值来调整谐振频率。通过使用谐振电路的测量具有两个优点。这种电路的第一个优点是功率放大，第二个优点是调整设置以在谐振频率下执行测量来实现高精度测量。交流磁滞环路测量中的输入电压由函数发生器（FGX-295，

Texio）和两个线性放大器（HSA 4014,NF）提供。请注意，BH 环路跟踪器可以测量直流磁滞环路，这对应于磁滞损耗。另请注意，通过使用谐振电路，我们可以测量与传统涡流和额外损耗相对应的磁滞和涡流损耗。在我们的实验中，使用了固定线圈¹³。

通过使用对准标记，组装四个叠层的块体磁芯，然后夹在两个夹具中。磁芯之间的气隙距离估计为约 5μm。

在我们的测量中，磁通密度 B 和叠层磁芯的磁芯损耗 W 可以用下列公式表示：

$$B = \frac{1}{N_2 S \delta} \int V dt, \quad (1)$$

$$W = \frac{f_0}{\phi} \int H dB. \quad (2)$$

这里 Φ 是磁片的密度， $H=N_1 I/L$ 是磁场强度， N_2 (=5) 是 B 线圈的匝数，V 是 B 线圈电压，S（约等于 650mm²）是磁芯的横截面积。这里 I 是输入电流， N_1 是励磁线圈的匝数，L（约等于 295mm）是平均磁路长度。通过谐振电路和 DC 磁滞测量分别在 AC 磁滞环路测量中将 N_1 设置为 32 或 108。在我们使用谐振电路的测量中，使用了高性能模数（A/D）转换器（PXI-5122，National Instruments）。然后，分别通过电流探针（SS-260，Iwatsu）和电压探针（701921，Yokogawa）来测量电流和电压。

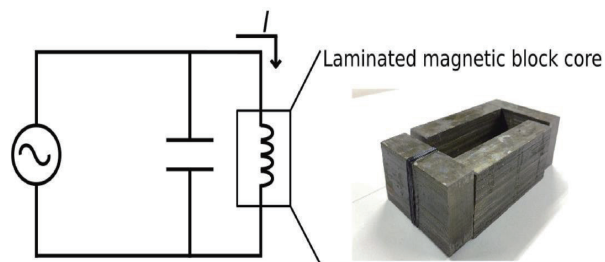


图 2 使用谐振电路在正弦激励下的叠层块体磁芯损耗测量系统的示意图

3 结果与讨论

图 3 所示为相对于基于 DC 磁滞环路的磁通密度的叠层磁芯损耗特性，其仅具有磁滞损耗。在实验中，高 Bs 和非晶块体磁芯的最大磁通密度分别为 1.7T 和 1.5T。高 Bs 块体磁芯在 1T 时的磁滞损耗为 5mJ/kg，这与非晶合

金制成的磁滞损耗一样大。在高Bs块体磁芯中，与非晶块体磁芯的情况相比，在低频区域中低磁芯耗和高饱和磁通密度Bs是相匹配的。

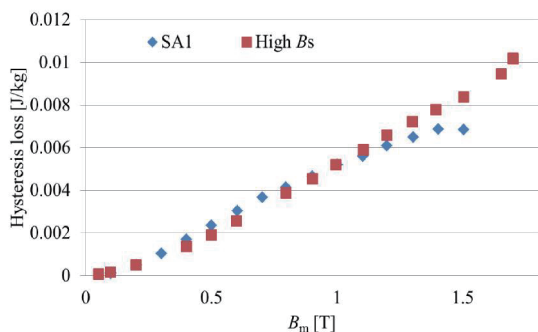


图3 使用了BH回路示踪剂（测量直流磁滞回路），相对于磁通密度的叠层磁芯损耗特性。

图4所示为通过使用谐振电路，在50、200、400和600Hz的激励频率的正弦激励下相对于磁通密度的叠层磁芯损耗特性。测量结果包括比商用操作更高频率的操作。对于每种情况，叠层磁芯损耗具有相同的趋势。在该实验装置中，在50、200、400和600Hz下，由高Bs纳米晶合金组装的叠层块体磁芯表现出高于1.6T的高磁通密度。由于线性放大器的限制，磁通密度被限制在1.6T左右。在相同条件下，用非晶态合金组装的叠层块体磁芯的磁通密度小于1.5T。

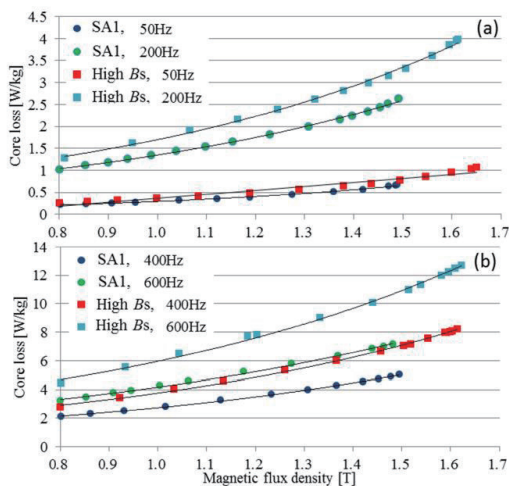


图4 通过使用谐振电路测量作为高Bs和非晶(SA1)磁芯中磁通密度的函数的磁芯损耗特性，如图2所示：
(a) 50和200Hz，(b) 400和600Hz。

磁芯损耗随着磁通密度和频率的增加而增加。高Bs块体磁芯在 $f=600\text{Hz}$ 和 $B=1.62\text{T}$ 时表现出约 12.7W/kg 的磁芯损耗，在 $f=400\text{Hz}$ 和 $B=1.61\text{T}$ 时为 8.2W/kg ，在 $f=200\text{Hz}$ 和 $B=1.61\text{T}$ 时为 4.0W/kg ，并且在 $f=50\text{Hz}$ 和 $B=1.65\text{T}$ 时为 1.1W/kg 。结果发现，与50Hz至600Hz频率的非晶磁芯相比，高Bs块体磁芯显示出稍大的磁损。例如，高Bs合金的重量约为1T和200Hz的非晶合金的重量的1.25倍。

然而，在由高Bs合金制成的叠层块体磁芯中，作为磁通密度的函数的磁损增加率保持很小，高达1.6T左右。尽管非晶块体磁芯的磁芯损耗在B低值时变小，但损耗迅速增加到1.5T以上。因此，用高Bs纳米晶合金组装的叠层磁块体磁芯适用于1.5-1.6T的磁通密度。

图5所示为通过使用谐振电路作为激励频率($50\text{Hz} < f < 10\text{kHz}$)的函数的实验获得的磁芯损耗特性。它是在磁通密度为0.1T时进行测试。高Bs和非晶磁芯的磁芯损耗之间的差异随着激励频率的增加而略微增加，然后减小。由高Bs合金制成的块体磁芯在10kHz下具有与非晶合金芯相当的磁损。

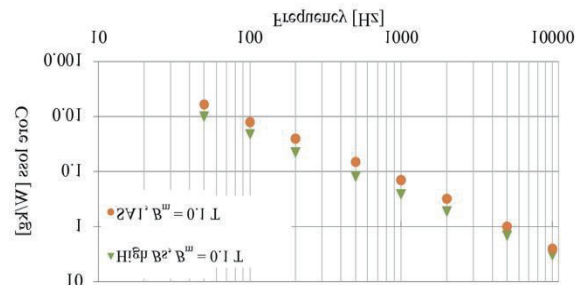


图5 通过使用0.1T谐振电路实验获得的磁芯损耗特性作为激励频率的函数

具有切口的高Bs卷绕磁芯在10kHz和0.1T下表现出约 2W/kg 的磁芯损耗。在相同条件下，叠层的高Bs块体磁芯的磁芯损耗具有约 3W/kg 。在没有切割的情况下，高Bs跑道式磁芯的磁芯损耗在400Hz和1T.11时约为 1.5W/kg 。在相同条件下，叠层高Bs块体磁芯的磁芯损耗约为 3.9W/kg ，相当于大约是跑道式磁芯的2.6倍。注意，磁芯之间的切口（气隙）引起的边缘通量，会导致磁芯的

涡流损耗局部增加。

因此，这项工作首次检查了叠层磁块体磁芯在高磁通密度区域中与高Bs合金的组装。这两种不同磁性材料（高Bs合金和非晶合金）的磁损远小于传统的非取向硅钢。在叠层高Bs块体磁芯中，作为磁通密度函数的磁芯损耗的增加率保持很小，达到1.6T左右，这在基于非晶和常规纳米晶材料的传统叠层块体磁芯中是无法实现的（FT-3M）。叠层高Bs块体磁芯在10kHz下具有与非晶合金芯相当的磁损。因此，我们认为这种叠层的高Bs块体磁芯可以实现非常低的磁芯损耗和高饱和磁通密度以及在高频（大于约10kHz）区域中的高Bs跑道式磁芯¹¹的磁芯密度。

4 结论

我们首次检测了在高磁通密度区域组装有高Bs合金的叠层磁块体磁芯。此外，比较了高Bs纳米晶和非晶材料的叠层磁块体磁芯损耗。本研究的结论如下：

(1) 在高Bs块体磁芯中，当测量DC磁滞环路时，低磁芯损耗和高饱和磁通密度Bs相匹配。高Bs块体磁芯的磁芯损耗与低频区域的非晶磁芯一样大。

(2) 在由高Bs合金制成的叠层磁芯中，作为磁通密度函数的磁损增加率保持很小，约为1.6T，这在传统的非晶合金叠层磁芯中是无法实现的。因此，用高Bs纳米晶合金组装的叠层磁块体磁芯适用于磁通密度为1.5至1.6T的情况。

(3) 由高Bs合金制成的块体磁芯在高频区域表现出与非晶合金芯相当的磁损。因此，预期该叠层高Bs块体磁芯可以在高频（大于约10kHz）区域中实现低磁芯损耗和高饱和磁通密度。

未来的工作讨论如下。

在我们的高Bs块体磁芯中，退火工艺只有一次。当没有切口和气隙的高Bs磁芯进行二次退火时，磁芯损耗是Bs值高于1.5T的金属芯中最低的之一。因此，为了减少磁芯损耗，由高Bs合金制成的块体磁芯将被二次退火。将考虑高Bs纳米晶片的退火工艺以减少工艺步骤。将检查构建系数16的评估和每个工艺步骤的磁芯损耗，以了解由制造工艺等因素引起的磁损。

参考文献

[1] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, Materials Transactions, JIM

31, 307 (1990).

[2] M. Ohta and Y. Yoshizawa, Materials Transactions 48, 2378 (2007).

[3] M. Ohta and Y. Yoshizawa, Japanese Journal of Applied Physics 46, L477 (2007).

[4] M. Ohta and Y. Yoshizawa, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320, e750 (2008).

[5] A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta, and A. Inoue, Journal of Applied Physics 105, 7A308 (2009).

[6] M. Ohta and Y. Yoshizawa, Applied Physics Express 2, 023005 (2009).

[7] M. Ohta and Y. Yoshizawa, Journal of Physics D: Applied Physics 44, 064004 (2011).

[8] A. Makino, T. Kubota, K. Yubuta, A. Inoue, A. Urata, H. Matsumoto, and S. Yoshida, Journal of Applied Physics 109, 07A302 (2011).

[9] Z. Zhang, P. Sharma, and A. Makino, Journal of Applied Physics 112, 103902 (2012).

[10] K. Takenaka, A. D. Setyawan, P. Sharma, N. Nishiyama, and A. Makino, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 401, 479 (2016).

[11] M. Ohta and R. Hasegawa, IEEE Transactions on Magnetics 53, 1 (2017).

[12] Y. Kawase, T. Yamaguchi, K. Miyoshi, M. Murashita, Y. Shindo, N. Yoshikawa, and T. Yoshitake, in 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM) (2016), pp. 2840 - 2844.

[13] S. Odawara, N. Denis, S. Yamamoto, K. Sawatari, K. Fujisaki, Y. Shindo, N. Yoshikawa, and T. Konishi, IEEE Transactions on Magnetics 51, 1 (2015).

[14] A. Yao, K. Tsukada, I. Masaki, and K. Fujisaki, IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG) CD-09, 572 (2017).

[15] Amorphous alloy ribbon catalog No. HJ-B10-B (in Japanese) (Hitachi Metals, Ltd.) <http://www.hitachi-metals.co.jp/products/infr/en/pdf/hj-b10-b.pdf>.

[16] A. Yao, K. Tsukada, S. Odawara, K. Fujisaki, Y. Shindo, N. Yoshikawa, and T. Yoshitake, AIP Advances 7, 056618 (2017).