

高 B_r 纳米晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金的损耗行为*

张延忠 金慧娟 施 英

(上海钢铁研究所, 上海金属功能材料研究和开发重点实验室, 上海 200940)

(1999 年 6 月 10 日收到; 1999 年 7 月 16 日收到修改稿)

在 $f=10\text{--}20000\text{ Hz}$ 和 $B_m=0.1\text{--}1.0\text{ T}$ 范围内, 测量了高 B_r 纳米晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金的损耗. 把总损耗分离为磁滞损耗、经典涡流损耗和过剩损耗. 测量结果表明, 每周损耗随频率的变化表现出明显的非线性行为. 用 Bertotti 的损耗统计理论描述了这种非线性行为. 大致在两个频率范围内, 有两种不同的描述方式.

PACC: 7540G; 7560E

1 引 言

早在 1969 年, Robey^[1]就报道了在 50 Hz 下所测得的高级晶粒取向 3% SiFe 的总损耗 P 远大于经典涡流损耗 P_{cl} , 其中动态损耗约占 75%; 每周损耗 P/f 的频率关系在不高于 100 Hz 的范围内呈现明显非线性. Bertotti^[2,3]考察了多种晶态和非晶态软磁合金的低频损耗行为, 观察到明显的非线性行为, 提出了一个损耗的统计理论来解释这一行为. 本文在直至 20 kHz 的频率范围内, 考察了高 B_r 纳米晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金的损耗行为, 并用 Bertotti 理论计算了动态损耗, 并给出了较详细的测量和计算结果.

2 实 验

用单辊快淬法制成 1 cm 宽、30 μm 厚的 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金的原始非晶带, 卷成内外径分别为 2.0 和 2.6 cm 的环形样品. 样品经获得最佳磁性能的纳米晶化退火后, 再经纵向磁场退火, 获得下列主要直流磁性: $\mu_i=7600$, $H_c=0.32\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, $\mu_m=82\times 10^4$, $B_r=1.1\text{ T}$, 呈现高 B_r 的原始磁状态. 在 $f=10\text{--}20000\text{ Hz}$ 和 $B_m=0.1\text{--}1.0\text{ T}$ 的范围内, 用 SY8232 型 $B\text{-}H$ 分析仪测量总损耗, 从而得到 $P/f\text{-}f$ 曲线.

* 国家非晶微晶合金工程技术研究中心资助的课题.

3 结果及讨论

3.1 损耗的分离和 Bertotti 统计理论

通常将总损耗 P 按下列方程分离:

$$P = P_{\text{hyst}} + P_{\text{cl}} + P_{\text{exc}}, \quad (1)$$

其中 $P_{\text{hyst}} = P_{\text{h}}f$ 为磁滞损耗, P_{h} 为准静态磁滞损耗, 等于准静态磁滞回线面积, 或者由 $P/f-f$ 曲线外推到 $f=0$ 得出, P_{exc} 称为过剩损耗(也称为反常损耗), P_{cl} 为由下式计算的经典涡流损耗:

$$P_{\text{cl}} = (\pi dB_m)^2 \sigma f^2 / 6. \quad (2)$$

Bertotti^[2,3]的损耗统计理论认为,在磁化过程中,畴壁运动是高度不连续的,把畴壁结构动力学描述为十分复杂的时-空随机过程,它是由强相关的磁化变化的无规序列组成,每个磁化变化对应一个畴壁段的突然局域跳跃; P_{exc} 与磁化过程的强时-空相关性质有关,在唯象上相当于用所谓的统计独立的“磁物”(magnetic object)来描述这种联系,每个“磁物”对应一组强相互作用的近邻畴壁,损耗问题归结为 n 个统计独立的“磁物”主要物理性质的研究.单个“磁物”的动力学行为受作用于其上的过剩动态场 H_{exc} 控制. n 和 H_{exc} 与 P_{exc}/f 的关系由下列方程描述:

$$H_{\text{exc}} = (1/4B_m)(P_{\text{exc}}/f), \quad (3)$$

$$n = 16\sigma G_w SB_m^2 f / (P_{\text{exc}}/f), \quad (4)$$

其中 $G_w = 0.1356$, σ 和 S 分别为带材的电导率和横截面积.

3.2 宽频率范围内损耗的一般特征

作为例子,图 1 表示低频范围内对应 $B_m = 0.1, 0.8$ 和 1.0 T 的 $P/f-f$ 曲线,图 2 表示直至 20 kHz 频率范围内对应 $B_m = 0.2, 0.8$ 和 1.0 T 的 $P/f-f$ 曲线.对应其他 B_m 值的曲线与两图所示完全相似.可以看出,在低频范围内, P/f 呈现明显的非线性行为;非线性行为的区间宽度随 B_m 增大而展宽,约在 3—5 kHz 以上,呈现出准线性行为.不难理解,根据(1)式的分离, $P/f-f$ 的非线性行为来自 $P_{\text{exc}}/f-f$ 的非线性行为.

3.3 宽频率范围内 n 与 H_{exc} 的关系

作为例子,图 3 表示直至 20 kHz 频率范围内对应 $B_m = 0.2$ 和 0.6 T 的 n 随 H_{exc} 的变化;图 4 表示在不超过 500 Hz 频率范围内对应 $B_m = 0.1, 0.2$ 和 1.0 T 的 $n-H_{\text{exc}}$ 行为.对应其他 B_m 值的 $n-H_{\text{exc}}$ 行为与图 3、图 4 所示完全相似.可以看出,在低频范围内(相当于小 H_{exc} 值区间),可以近似认为 $n-H_{\text{exc}}$ 行为可用线性方程描述,

$$n = n_0 + H_{\text{exc}}/H_0, \quad (5)$$

其中 n_0 为 $f \rightarrow 0$ 时同时活动的“磁物”极限数, H_0 为特征场^[2].一些典型的晶态和非晶态软磁合金都表现出这种线性行为^[2].但是,对它们考察的频率范围大部分不超过 100 Hz.

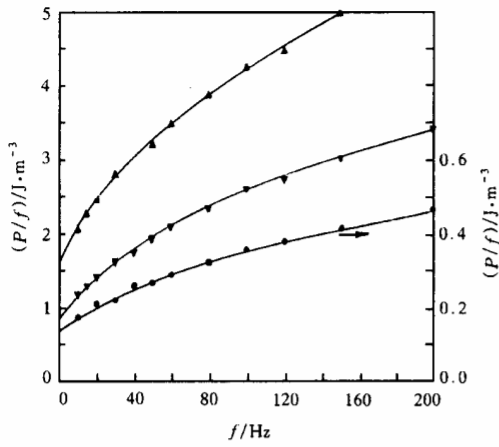


图 1 低频范围内 P/f 随 f 的变化 ●为 0.1 T, ▼为 0.8 T, ▲为 1.0 T

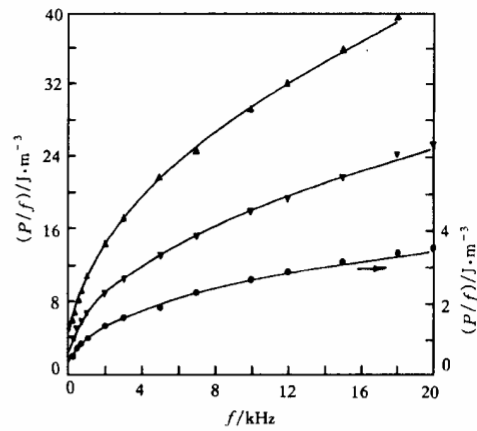


图 2 直至 20 kHz 频率范围内 P/f 随 f 的变化 ●为 0.2 T, ▼为 0.8 T, ▲为 1.0 T

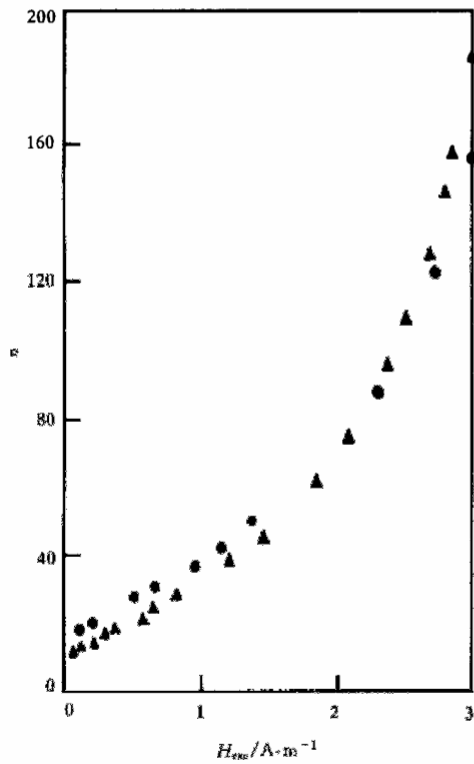


图 3 直至 20 kHz 频率范围内 n 随 H_m 的变化 ▲为 0.2 T, ●为 0.6 T

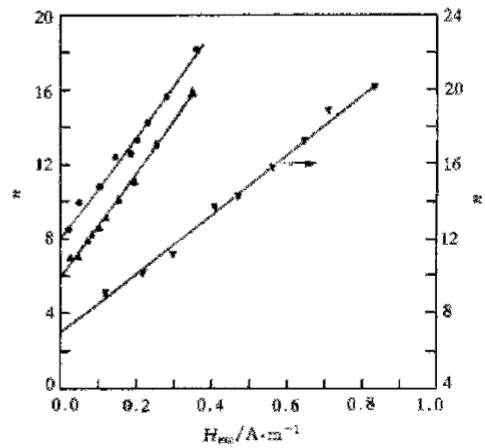


图 4 不超过 500 Hz 频率范围内 n 随 H_m 的变化 ▲为 0.1 T, ●为 0.2 T, ▼为 1.0 T

对高 B_r 纳米晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金, 约在直至 200—500 Hz 频率范围内, 很好地显示出这种线性行为; 这个区间随 B_m 值增大而变窄. 在超过上述低频范围的宽频率区间

内,随 H_{exc} 增大,亦即相当于随 f 增大, n 急剧增大,呈现明显的非线性行为,即

$$n = n_0 + (H_{\text{exc}}/H_0)^m. \quad (6)$$

拟合计算表明,在 $f \geq 3$ kHz 频率范围内, $n \gg n_0$, n 主要决定于(6)式等号右端第二项,可近似表示为

$$n = (H_{\text{exc}}/H_0)^m. \quad (7)$$

在 $f \leq 100$ Hz 频率范围内,(6)式所示行为在 50-50NiFe 合金中以及晶粒取向 3% SiFe 垂直轧向测量损耗时表现出来^[2].

3.4 宽频率范围内 P/f - f 非线性行为的描述

根据(1)式的分离可知, P/f 对 f 的非线性行为相当于 P_{exc}/f 对 f 的非线性行为.对于大约不超过 200—500 Hz 频率范围(视 B_m 值而定),由(3)—(5)式可得

$$P_{\text{exc}}/f = 2B_m[(n_0^2 H_0^2 + 16\sigma G_w S B_m H_0 f)^{1/2} - n_0 H_0]. \quad (8)$$

计算表明,在低频范围内, $n_0^2 H_0^2$ 与 $16\sigma G_w S B_m H_0 f$ 比起来不能略去,这与对 3% SiFe 合金所得结果不同^[2]. $(n_0^2 H_0^2 + 16\sigma G_w S B_m H_0 f)^{1/2}$ 与 $n_0 H_0$ 项有相同数量级,因此,(8)式比文献^[2]的(13)式复杂,应该用(8)式来描述高 B_r 纳米晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 合金的低频 P_{exc}/f - f 的非线性行为.对低频范围内 n - H_{exc} 关系的线性拟合后得到的参数 n_0 和 H_0 列于表 1.作为例子,图 5 实线表示利用表 1 的数据对 $B_m = 0.2, 0.4$ 和 1.0 T 按(8)式计算的 P_{exc}/f ,计算中取 $\sigma = 6.94 \times 10^5 (\Omega\text{m})^{-1}$ ^[4] 和 $S = 3 \times 10^{-7} \text{m}^2$.计算结果表明,对于 $B_m = 0.1$ 和 0.2 T,在直至 5 kHz 频率范围内,都可以用(8)式近似计算 P_{exc}/f ,少数较大的相对偏差绝对值也不超过 12%.对大于 0.2 T 的 B_m 值,在大约直至 0.7—1 kHz 的频率范围内,可用(8)式来表示 P_{exc}/f - f 的非线性行为.计算值与测量值间的少数较大的相对偏差绝对值也不超过 15%.

约在 1 kHz 以上的较宽频率范围内, n 与 H_{exc} 的关系可用(7)式近似表示.拟合计算得到的参数 m 和 H_0 值列于表 2. m 和 H_0 值都随 B_m 增大而增大.

表 1 低频范围的 n_0 和 H_0 值

B_m/T	n_0	$H_0/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
0.1	5	0.04082
0.2	8	0.042105
0.4	10	0.02111
0.6	16	0.0637
0.8	13	0.05394
1.0	7	0.0673

表 2 较宽、较高频率范围内的 m 和 H_0 值

B_m/T	m	$H_0/\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
0.1	1.9362	0.2495
0.2	2.4635	0.4289
0.4	2.7344	0.4740
0.6	2.9719	0.5634
0.8	3.0952	0.5575
1.0	3.2045	0.7098

由(3),(4)和(7)式得

$$P_{\text{exc}}/f = (4B_m)^{m+2/m+1} (\sigma G_w S)^{1/m+1} H_0^{m/m+1} f^{1/m+1}. \quad (9)$$

作为例子,图 6 实线表示利用表 2 的参数值按(9)式对 $B_m = 0.1, 0.4$ 和 0.6 T 计算的结果.可以看出,对小的 B_m 值,在 1—20 kHz 频率范围内,(9)式能很好地描述 P_{exc}/f 的非线性行为.当 $B_m > 0.2$ T 时,随 B_m 值增大,在 1—3 kHz 范围内,计算值与测量值有较大

的偏差,而在 $f > 3$ kHz 频率范围内,少数较大的相对偏差绝对值不超过 11%. 这说明在相当宽的中频范围内,可用(9)式来表示 P_{exc}/f 的非线性行为.

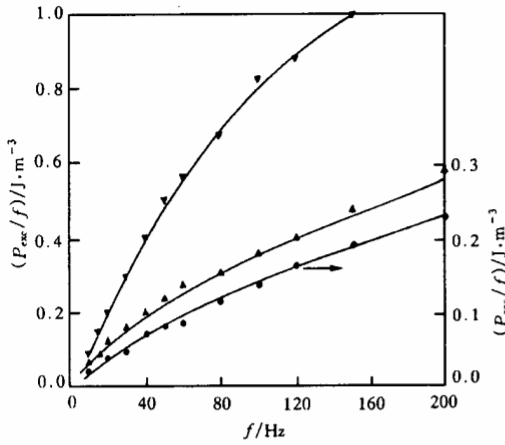


图 5 低频范围内 P_{exc}/f 随 f 的变化 ——为计算结果,●为 0.2 T,▲为 0.4 T,▼为 0.6 T

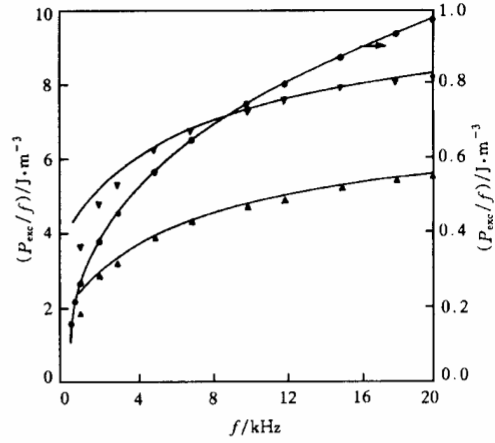


图 6 $f=1-20$ kHz 频率范围内 P_{exc}/f 随 f 的变化 ——为计算结果,●为 0.1 T,▲为 0.4 T,▼为 0.6 T

4 结 论

1)每周损耗随频率变化呈现明显的非线性,而且主要表现在 1 kHz 以下的低频范围内.

2)在低频范围内,损耗统计理论中的“磁物”数和过剩场之间呈线性关系;在较宽的中频范围内,两者间的关系是非线性的,可近似表示为 $n = (H_{exc}/H_0)^m$,这样大致在两个频率范围内,可用两种截然不同的表达式来描述每周损耗的非线性行为.

- [1] A. Robey, *J. Sci. Techn.*, **36**(1969), 3.
- [2] G. Bertotti, *IEEE Trans. Magn.*, **24**(1988), 621.
- [3] G. Bertotti, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 5293.
- [4] M. Knobel, M. L. Sanchez, C. Gomez-Polo *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **79**(1996), 1646.

BEHAVIOR OF CORE LOSS IN NANOCRYSTALLINE $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ALLOY WITH HIGH B_r *

ZHANG YAN-ZHONG JIN HUI-JUAN SHI YING

(*Shanghai Iron and Steel Research Institute and Shanghai Key Laboratory
for Research and Development of Metallic Functional Materials, Shanghai 200940*)

(Received 10 June 1999; revised manuscript received 16 July 1999)

ABSTRACT

In the ranges of $f = 10\text{--}20000$ Hz and $B_m = 0.1\text{--}1.0$ T, the core loss has been measured for nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ alloy with high B_r . The total power loss was decomposed into the sum of the classical eddy current loss, the hysteresis loss and the excess loss. The results show that the change of the total loss per cycle with frequency clearly shows a nonlinear behavior, which has been described in terms of Bertotti's statistical theory of loss. The frequency range examined can nearly be divided into two intervals, in which there exist two different describing ways.

PACC: 7540G; 7560E

* Project supported by the National Amorphous and Nanocrystalline Alloy Engineering Research Center.