

# 巴克好森效应及其应用

穆向荣

(北京钢铁学院)

铁磁材料的巴克好森效应,按照测量方法可分为磁巴克好森效应和声巴克好森效应。效应的信号特征依赖于材料的微组织结构和应力状态,此效应可用于材料的研究和无损检测。与其他分析方法相比,该方法有一系列优点,是一个颇有发展前途的方法,已引起人们的关注。

## 一、巴克好森效应的研究进展

### 1. 磁巴克好森效应

1919年,巴克好森(H. Barkhausen)<sup>[1]</sup>发现铁磁物质磁化时,在磁滞回线最陡的区域其磁化是阶梯式的,是不可逆跳跃过程(如图1)。

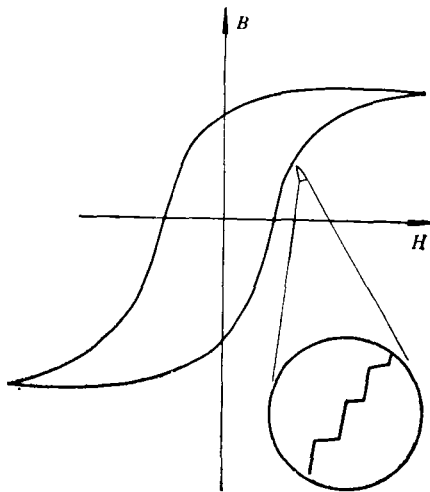


图1 磁滞回线上的巴克好森跳跃

这种不连续的磁化来源于磁畴和磁畴壁的不连续运动,它在探测线圈中所引起的噪声信号称为巴克好森噪声(Barkhausen noise),简称BN。

巴克好森效应的早期研究<sup>[2,3]</sup>,多是围绕物

理过程,目的在于阐明磁畴运动,测量方法也比较简单。六十年代以后,由于电子测量技术的迅速发展,许多研究工作者对巴克好森效应进行了更深入的理论研究,同时也开拓了众多应用领域。例如1963年,P. Mazzetti等人<sup>[4]</sup>研究了不同材料的BN噪声强度谱,并探索了一种新实验方法。1969年,R. L. Pasley<sup>[5]</sup>研究了运用BN技术测量应力分布的无损检测方法。1971年,M. Ojala等人<sup>[6]</sup>应用BN技术研制出一种测量晶粒度的仪器。1973年,J. C. McClure等人<sup>[7]</sup>研究了材料疲劳断裂过程中BN信号特征以及与声发射信号的对应关系。1978年,O. Sundström等人<sup>[8]</sup>探讨了巴克好森效应用于微组织结构参数、晶粒度、铁损、应力等的无损检测。1982年,BN测量技术又有新的进展,G. V. Kings<sup>[9]</sup>研究了应力作用下的晶粒取向硅钢在各磁化区域发射的噪声谱。实验中用了两种方法:一是BN噪声输出的强度谱,即所谓时间域分析(time domain analysis),二是以幅度域技术(amplitude domain techniques)为基础,测量脉冲幅度分布和产生率。由于脉冲输出类似高斯分布,故可用统计方法的幅度标准偏差来定量研究不同磁化区域内的应力效应。

近年来,有些研究者<sup>[10,11]</sup>将巴克好森效应的研究与克尔磁畴观察技术和透射电镜的微结构分析(位错、脱溶物、晶界、应力)结合起来,对材料性能进行研究,都取得较好的结果。

### 2. 声巴克好森效应

铁磁材料的磁畴不可逆运动产生巴克好森跳跃的同时,由于磁致伸缩作用,导致材料内部激起的应力波,称为磁力声发射(magneto-

chnical acoustic emission),简称磁声发射(MAE)。它的频率在超声波范围。因为磁声发射也来源于磁畴的巴克好森跳跃,所以也称为声巴克好森效应。

磁声发射是六十年代在镍的磁化过程中发现的,后来发现纯铁多晶体在弹性拉伸过程中由于力学效应也产生声发射<sup>[2]</sup>。最近我们对钢和坡莫合金的磁声发射作了较系统的研究<sup>[3,4]</sup>,探讨了材料化学成分、热处理工艺、应力、应变等对 MAE 特征的影响,并作了与磁弹性内耗的对应关系的研究。

K. Ono 和 M. Shibata 在深入研究的基础上,提出了一个磁声发射模型<sup>[5,6]</sup>。他们认为,MAE 脉冲信号是由于两个磁畴在突然运动后磁致伸缩应变与运动前的不同而引起的,其大小和方向是用扩大的磁畴体积  $\Delta V$  和内非弹性应变张量  $\Delta \epsilon^*$  来描述。若忽略  $\Delta \epsilon^*$  的方向性,由声发射理论推得,共振探头测得的电压峰值为

$$V_p = C \Delta \epsilon^* \Delta V / \tau,$$

式中  $C$  为常数,  $\tau$  是产生  $\Delta \epsilon^*$  所需的时间。由上式知,MAE 的峰值正比于  $\Delta \epsilon^*$  和  $\Delta V$ ,反比于  $\tau$ ,即畴壁运动产生的磁致伸缩应变越大,运动越迅速,则  $V_p$  越大。假定材料中主要存在  $90^\circ$  和  $180^\circ$  两种典型畴壁。当  $90^\circ$  畴壁作不可逆运动时,沿易磁化方向的饱和磁致伸缩系数由  $\lambda_s$  值变为零,因而产生磁致伸缩应变 ( $\Delta \epsilon^* \approx 0$ ),故激发 MAE。当  $180^\circ$  畴壁运动时,扩大和缩小的畴其磁化方向成  $180^\circ$ ,它们的磁致伸缩系数相同,所以不会引起磁应变 ( $\Delta \epsilon^* = 0$ ),当然也就不会产生 MAE。另外,由于磁致伸缩的各向异性,磁畴的不可逆局部转动,也会产生有限磁应变,从而激发 MAE。现在一般认为,MAE 主要来自  $90^\circ$  畴壁的不可逆运动,而 BN 则主要来源于  $180^\circ$  畴壁的不可逆运动。

## 二、测量方法

描述巴克好森信号特征的参量主要有脉冲

数  $N$ 、脉冲发生率  $dN/dt$ 、振幅  $M$ 、频率  $f$ 、能量  $P$  以及方均根值 RMS。

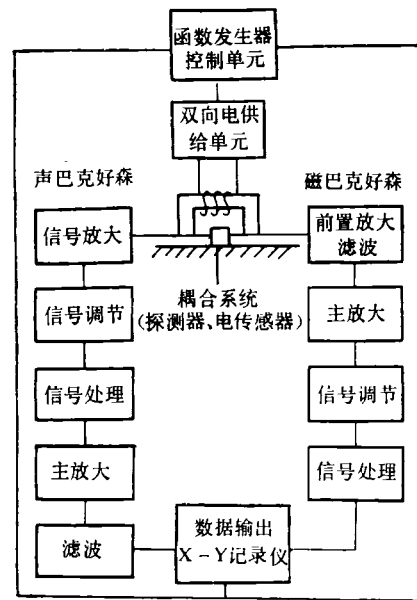


图 2

图 2 是同时测量 BN 和 MAE 的系统。通过 U 形铁芯上的磁化线圈,可以提供足够功率的线性磁化场,其频率为  $0.01-1\text{Hz}$ 。磁化样品产生的 BN 信号由探测线圈接收。在此条件下,信号频率为  $0.5-100\text{kHz}$ 。BN 可分辨的表面厚度  $\leq 1\text{mm}$ 。电压脉冲信号经放大器放大  $100\text{dB}$ ,可进行不同参量的分析。

声发射 MAE 信号通过样品上的传感器转换为电信号。在该磁化条件下信号频率为  $0.1-1\text{MHz}$ ,分辨的体积为  $\leq 1\text{cm}^3$ ,穿透厚度  $\leq 10\text{mm}$  (与磁场频率有关),信号总共放大  $120\text{dB}$ ,以 RMS 方均根值输出。BN 和 MAE 均可在示波器上显示,可研究信号随  $H$  或其他量的变化。我们用类似的测量系统,研究了铁素体-马氏体双相钢和晶粒取向硅钢在磁化、受力、应变状态下 BN 和 MAE 的变化特征,取得较好结果。

图 3 所示的系统<sup>[9]</sup>可用于 BN 信号的分析,测量其功率谱和振幅谱。该系统包含三部分:信号转换系统、数据处理系统和扫描显示系统。转换部分的任务是在样品内激发线性磁化场,

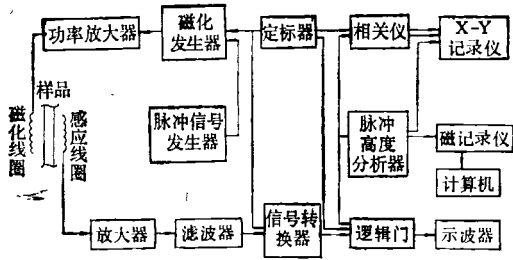


图3 测量和分析BN信号的方框图

将磁化不连续而产生的BN电信号无干扰地传送给数据处理系统。组成转换系统的电路有定标器、磁化发生器、信号探测器以及滤波器、放大器等。该部分耦合装置设计时要考虑其可靠性、耐久性、稳定性和抗干扰性。数据处理系统包括累加、信号转换、数字逻辑等单元。在扫描显示部分有脉冲高度分析器和带有记录和显示功能的相关函数分析仪。扫描信号可通过计算机去控制冶金过程，实现在线自动测量控制。

目前声发射技术已相当发展，有定型的声发射测量系统，如国产的4010声发射仪，美国的5000系列声发射仪，它们都能满足MAE测量的需要。

### 三、应用

近年来巴克好森效应(BN, MAE)在材料研究和测量技术方面获得广泛的应用，下面主要介绍在无损检测方面的应用。

#### 1. 微结构(microstructure)和晶粒度的测量

钢和其他铁磁材料的多晶体结构中的空隙、杂质、脱溶物、位错等缺陷以及晶粒度的大小，都对磁畴壁运动有制约作用，因而影响巴克好森信号的分布。通过测量BN信号，可分析材料的微组织结构和晶粒度分布。这些分析通常是用光学方法，它是有损检测，且不能用于在线测量，所得结果仅部分是客观的。而建立在BN基础上的磁学方法与光学方法相比，具有下述优点：测量速度快，一次测量约需5—15s；结果是客观的；可对大物体进行快速检测；许多情况下测量结果可迅速反馈给生产过程；

是无损的检测；分析费用便宜。

然而该方法也存在一些不足之处：如检测范围仅限于表面层(<1mm)；样品厚度对结果有影响，为此需将不同厚度的样品所测结果进行校准；BN往往依赖多个微参量，一个因素的变化可能被其他因素所掩盖。

图4是对晶粒尺寸不同的钢，BN信号脉冲数 $N$ 随脉冲高度的分布<sup>[8]</sup>。这是对整个磁滞回线测得的结果。脉冲数 $N$ 用多道分析仪测量。图中标 $M$ 是平均脉冲高度，定义为

$$2 \int_0^M N(m) dm = \int_0^\infty N(m) dm,$$

即 $M$ 将画斜线面积分为相等的两部分。由图4可见， $M$ 值随晶粒度增大而向增大的方向移动。这样晶粒度与BN信号分布就建立了一定对应关系。平均脉冲高度 $M$ 与晶粒间关系可用下式表示：

$$M = K(1 - e^{-D/D_0}),$$

式中 $D$ 是晶粒尺寸， $D_0, K$ 是常数。当 $D \ll D_0$ 时， $M$ 与 $D$ 成线性关系。倘若将结果加以校准，那么由BN可直接表示出晶粒分布。用光学方法(金相、图象分析)测量的是晶粒面积，属于二维分布，而BN信号与晶粒体积相联系，所测结果正比于晶粒体积，给出的是三维分布，因此所获得的信息更为丰富。通过测量晶粒度，可用BN技术去在线自动控制与晶粒有关的物理过程，如热处理、冶金过程等。

另外，用BN技术还可以测量铁磁材料的其他一些微结构参量，如晶粒取向硅钢的各向异性参数，珠光体团的大小和层间距离，马氏体

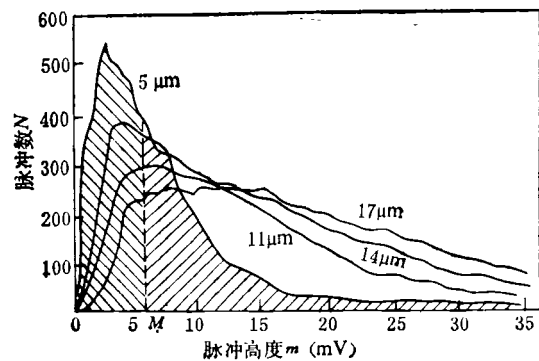


图4

的硬度以及非铁磁性奥氏体钢中铁素体的含量。

## 2. 应力的测量

众所周知的应力测量方法(应变仪、X射线衍射、超声、光学以及穆斯堡尔谱)应用于常规检验都是不方便的。因此,有必要研制一种快速、简便、无损的方法,而巴克好森效应分析法则是值得推荐的。

用 BN 技术测量应力是基于 BN 对应力的依赖关系。如图 5 所示,钢的 BN 信号强度在

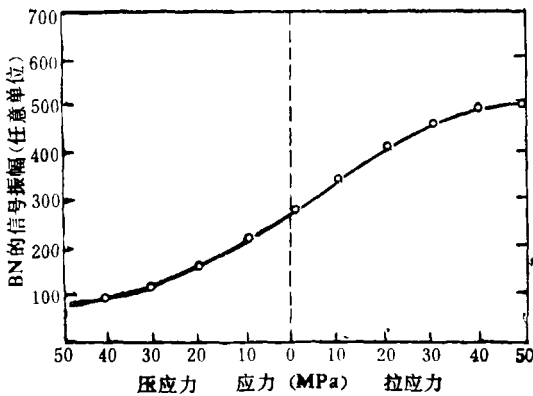


图 5 应力对 BN 的影响 (AISI 4340 钢)

很大范围内随应力线性增加。一般认为,对具有正磁致伸缩系数的材料(如钢)由于磁畴磁矩位于拉力方向时,磁弹性能最低,因此拉应力将使磁畴趋于力的方向排列。这样应力方向上的  $180^\circ$  畴增大而  $90^\circ$  畴缩小,所以磁化时  $180^\circ$  畴壁不可逆位移产生的 BN 信号强。相反,在压应力作用下,为了使磁弹性能降低,与应力方向成  $90^\circ$  的畴扩大,而成  $180^\circ$  的畴减小,从而导致磁化时 BN 信号的减弱。上述分析仅考虑了应力对磁畴体积的影响,实际上应力和应变产生的位错,会影响磁畴壁的运动,因而许多情况下 BN 信号随应力的变化比较复杂。图 6 为应力对退火镍的 BN 信号的影响。镍的磁致伸缩系数为负,然而 BN 并不随应力而单调降低,约在屈服应力的一半时, BN 达到最大值。这可解释为:小应力下阻碍畴壁运动的障碍点数目随应力而增多,导致脉冲数增加。当应力进一步增大时,所感应的固结点变得很牢固,畴壁不

物理

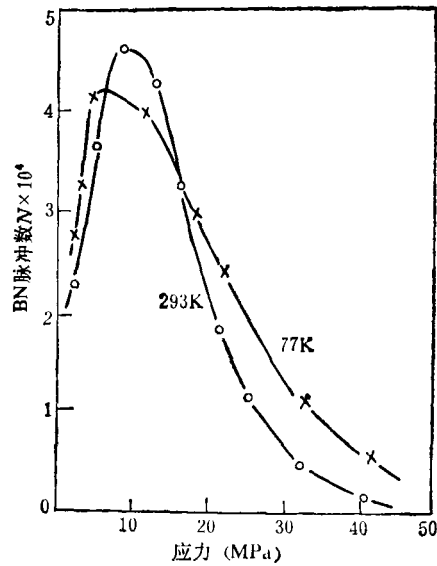


图 6

易跳跃,在磁场驱动下只能产生少数大脉冲。

声巴克好森效应的 MAE 信号也随应力而变化。与 BN 不同的是,一般铁、钢材料在拉应力和压应力作用下 MAE 都是降低的,并且实验表明,在不同频带范围内,应力对 MAE 的影响也是不同的。图 7<sup>[46]</sup>表示五种材料在 175 kHz 和 500 kHz 两个频率下的信号有效值的比率  $R = \bar{v}_r(175\text{kHz})/\bar{v}_r(500\text{kHz})$  随应力的变化。显然  $R$  是应力的函数,铁和 1020 钢(低碳

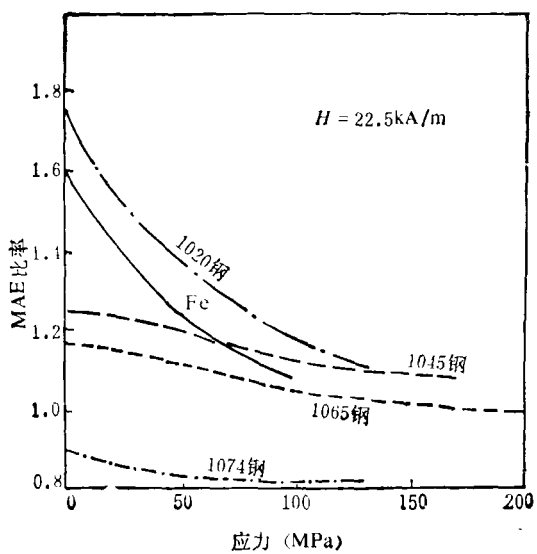


图 7

钢)随应力增大而减小,1074 钢(高碳钢)其 R 值随应力变化不明显。用两个共振频率不同的换能器测出信号输出,求得 R,再以 R 为依据测应力,便能消除换能器耦合的不稳定因素,从而提高测量的准确度。

MAE 和 BN 技术目前已用于检测焊接和热处理时的残余应力,爆炸时的瞬间应力,以及监测构件使用过程中应力的变化,以判断微裂纹和宏观裂纹的扩展,从而对构件的安全运行作出预测。在军事上作为无损检测方法之一,已用于炮壳、枪筒、炮车的检测。在美国加里福尼亚州所作的铁轨应力试验也取得较好结果<sup>[16]</sup>。

### 3. 铁损的测量

用于变压器、电动机、发电机等设备的磁性材料的铁损,是决定这些设备性能的最重要参量之一。因此铁损的测量至关重要。通常测铁损是用 Epstein 法,采用该法时事先要准备足够的样品,并且样品只能制成片状,费时、费力。而 BN 法却简便易行。

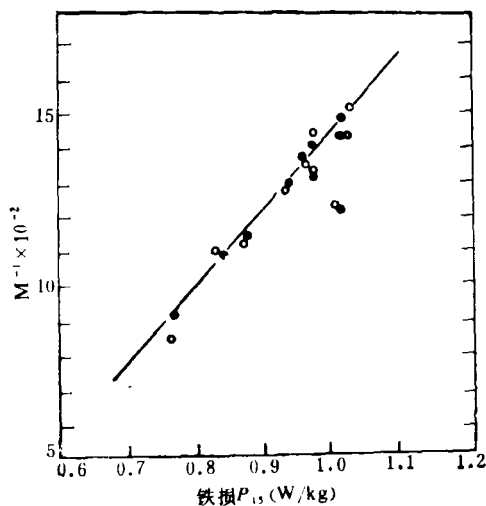


图8 变压器钢板(0.3mm)的BN脉冲平均高度与铁损  $P_{15}$  的变化曲线

一些研究者<sup>[17-19]</sup>从实验和理论上探讨了铁磁材料的铁损与布洛赫畴壁的运动和巴克好森

效应间的内在联系,为BN法测铁损提供了理论和实验依据。图8为晶粒取向硅钢的BN脉冲平均高度M的倒数与铁损的关系。根据我们对几种晶粒取向硅钢(Q-10, Z-10, M-6)的研究,发现铁损与BN的对应关系随应力、塑性变形量以及磁化频率而变化。同时,我们还探讨了测量低频(< 50Hz)铁损的可能性。

综上所述,可以看到巴克好森效应分析技术用于铁磁材料的微结构研究和无损检测,是很有发展前途的。

### 参 考 文 献

- [1] H. Barkhausen, *Z., Phys.* **20**(1919), 401.
- [2] R. M. Bozorth and H. Primakoff, *Phys. Rev.*, **35** (1930), 738.
- [3] R. S. Tabbie, I. C. Skibmor and W. D. Corner, *Proc. Roy. Soc. London A*, **63** (1950), 739.
- [4] P. Mazzetti and G. Montalenti, *J. Appl. Phys.*, **34**(11) (1963), 157.
- [5] R. L. Pasley, *Mat. Eval.*, **28**(1970), 157.
- [6] M. Ojala and S. Säynäjäkangas, *J. Phys E*, **5** (1972), 669.
- [7] J. C. McClure, S. Bhattacharya and K. Schröder, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-10** (1974), 913.
- [8] O. Sundström and K. Törrönen, *Mat. Eval.*, **37** (1979), 51.
- [9] G. V. Kings, *J. Magn. Magn. Mat.*, **26**(1982), 258.
- [10] J. C. McClure and K. Schröder, *CRC Critical Rev. in Solid State Sci.*, **6**(1976), 45.
- [11] P. Deimel, D. Kuppler and K. Herz, *J. Magn. Magn. Mat.*, **36**(1983), 277.
- [12] F. P. Higgins and S. H. Carpenter, *Acta Met.*, **26** (1978), 133.
- [13] 穆向荣、张秀林, 北京钢铁学院学报, No. 2(1985), 80.
- [14] 穆向荣、张秀林, 金属材料研究, No. 5(1985), 7.
- [15] K. Ono and M. Shinata, *Mat. Eval.*, **38**(1980), 55.
- [16] M. Shibata and K. Ono, *NDT International*, **10** (1981), 227.
- [17] P. Allia and F. Vinai, *J. Appl. Phys.*, **48**(1977), 4649.
- [18] P. Mazzetti, *IEEE Tran. Magn.*, **MAG-14** (1978), 758.
- [19] F. Fiorillo, P. Mazzetti, G. Montalenti and G. P. Soardo, *J. Magn. Magn. Mat.*, **19**(1980), 371.