

巴克豪森信号与 300M 钢表层应力的响应特性

朱克兵, 王 泓

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 陕西西安 710072)

张 越

(成都飞机工业集团 无损检测中心, 四川成都 610092)

摘要:采用四点弯曲加载, 研究 300M 钢表层应力与巴克豪森信号值的关系, 并用磁滞伸缩模型对试验结果进行了分析。结果表明, 应力方向与磁化方向平行时, 巴克豪森信号值随拉应力的增大而增大, 随压应力的增大而减小。但同时也发现随着磁化方向与应力方向的偏离, 或是随着磁化强度的变化, 这种相关性会发生变化, 在特定条件下甚至出现相反变化趋势。

关键词:巴克豪森信号; 表层应力; 四点弯曲; 磁致伸缩; 磁畴壁

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)05-0252-04

Response Characteristic of Barkhausen Signal to 300M Steel Surface Stress

ZHU Ke-bing, WANG Hong

(School of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ZHANG Yue

(Nondestructive Test Centre, Chengdu Aircraft Industrial (group) Co. Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract: The correlation between 300M steel surface stress and Barkhausen signal has been studied by applying four points bending and analyzed with the magnetostrictive model. It has been shown that, when the direction of stress parallels magnetizing direction, Barkhausen signal increases with the increasing of tensile stress, decreases with the increasing of compressive stress. But at the same time, it has been found that the correlation changes when magnetizing direction deviates from the direction of stress, or magnetizing strength increases, even a contrary trend will advent in a special situation.

Keywords: Barkhausen signal; Subsurface stress; Four points bending; Magnetostriction; Magnetic domain walls

交变磁场对铁磁性材料进行磁化时, 靠近磁化区域的感应线圈能检测到类似噪音的脉冲信号, 称之为巴克豪森噪声 (Barkhausen Noise, 简称 BN)。其信号值 BN 值与磁化过程中磁畴壁运动所受到的阻力有关, 而磁畴壁的运动受材料表层的表面质量、应力状态和微观组织的影响, 因此可利用它检测材料的表面完整性。20 世纪 70 年代人们开始该方面的应用研究, 到 90 年代这种检测技术在国外开始应用到一些重要零件上, 例如飞机起落架内外筒、飞机

发动机的小齿轮和轴承以及涡轮机叶片等, 并制订了一些重要的技术标准^[1~3]。国内该技术的研究和应用尚处于起步阶段, 例如耿荣生、李强和祁欣等人利用巴克豪森法测量铁磁性材料的硬度、晶粒大小以及应力^[4~6]。

研究表明, 表层应力和 BN 值的相关性较好^[6,7], 随着拉应力的升高, BN 值逐渐升高; 随着压应力的升高, BN 值逐渐降低。笔者采用四点弯曲加载, 研究 BN 值与 300M 钢表层应力的关系, 不仅印证前面的结论, 同时还发现 BN 值和应力的反常变化现象, 进一步的研究表明, 磁化方向、磁化强度

收稿日期: 2005-10-20

对 BN 值与应力的关系影响较大。最后用磁致伸缩模型对试验结果进行了解释。

1 试验工作

1.1 试验设备

试验采用芬兰 Stresstech 公司生产的巴克豪森检测设备 $\mu\text{scan}500$, 以及与其配套使用的 3903 和 3904 探头。它的基本原理是采用交变磁场对铁磁性材料进行磁化, 利用一个感应线圈接收到磁化过程中所产生的巴克豪森信号。它的可调节参数有磁化频率、磁化参数 MAGN 和增益 GAIN。磁化频率决定测试深度, 可选范围为 2 Hz~1 kHz, 测量深度为 0.01~1.5 mm。MAGN 用于调节磁化电压(峰值电压), 范围为 0~20 V。 $\mu\text{scan}500$ 显示的测试结果为几个磁化循环的巴克豪森信号的均方根值。磁化频率选为 125 Hz, 测量范围是材料表面层的 0.02 mm 内。3903 探头的磁化极片间为 15 mm×21 mm 的平面, 而 3904 探头的磁化极片间为 10 mm×10 mm 的弧面。

1.2 试验材料及处理状态

试样材料为 300M 钢, 是一种屈服强度高达 1 500 MPa 的低合金超高强度钢, 现已成为世界上综合性能最好、应用最广泛的起落架用钢, 化学成分为碳 0.37%~0.40%, 锰 0.76%~0.91%, 硅 1.51%~1.69%, 硫 0.003%, 磷 0.007 5%~0.008 5%, 镍 1.80%~1.91%, 铬 0.85%, 钒 0.07%~0.085%, 钼 0.40%, 铜 0.07%。原材料经锻打、预备热处理(925℃正火, 690℃退火)后, 加工成尺寸为 15.6 mm×40 mm×250 mm 的试样, 再经最终热处理(870℃盐浴炉油淬, 300℃回火两次), 然后在流水下用 60 号砂轮对测试表面手工打磨掉 0.3 mm 的表面层, 最后在 100 号水砂纸上磨光, 以去除热处理产生的脱碳层, 同时避免产生磨削烧伤。

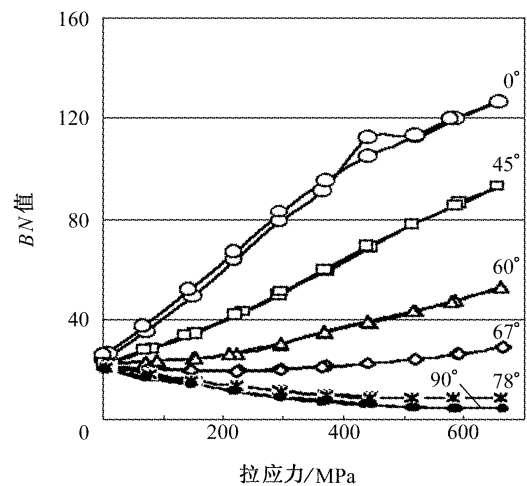
1.3 巴克豪森测试

在日本京都的岛津公司生产的 EHF-EA10 低周疲劳试验机上对试样进行四点弯曲加载, 使试样上下两个表面分别产生拉应力和压应力, 将巴克豪森检测设备的探头固定在试样表面上, 测出此时的 BN 值。按每次 500 kg 逐渐增加载荷, 重复测量 BN 值; 到最大载荷后, 逐渐减小载荷重复测量。最大载荷不能使材料的表层应力超过其弹性极限的 2/3, 以保证试样发生的是弹性变形, 另一方面要确

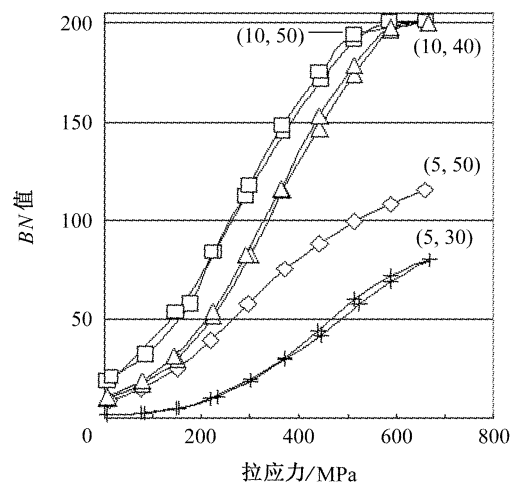
保试验机的工作状态最佳。考虑到探头、磁化方向和测试参数对测试结果都有一定影响, 分别对两个探头在不同的磁化方向和参数下进行了多次测试。

2 结果和讨论

由载荷计算出试样表面应力的大小, 作出应力与 BN 值的关系曲线。图 1a 和 b 所示的分别是用 3903 和 3904 探头在 1 号试样上测得的拉应力与 BN 值的关系曲线, 图 1a 中数字为磁化方向与应力方向所成的角度, 图 1b 中的数字为 (GAIN, MAGN) 值。图 2a 和 b 所示的分别是用 3903 和 3904 探头在 1 号试样上测得的压应力与 BN 值的关系曲线。



(a) 3903 探头 (GAIN=5, MAGN=50)

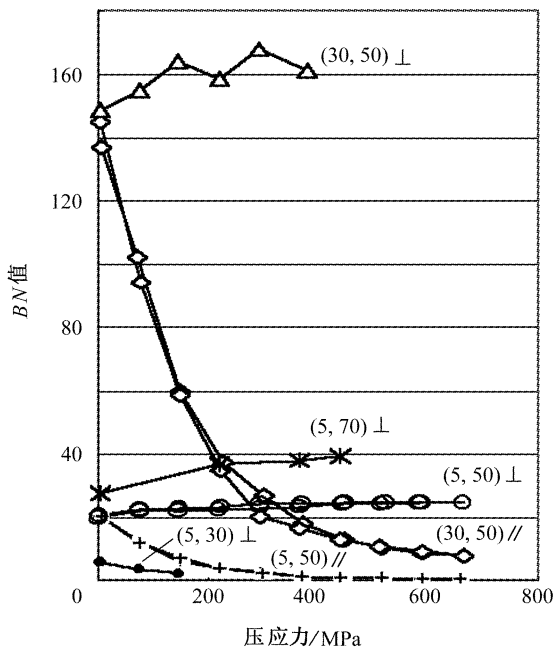


(b) 3904 探头 (磁化方向与应力方向平行)

图 1 1 号试样拉应力与 BN 值的关系曲线

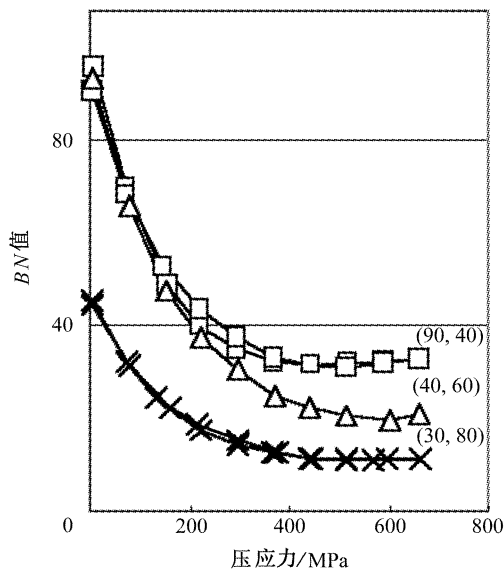
2.1 BN 值和表层应力关系的基本规律

由图 1 不难看出, 磁化方向与应力方向平行时,



(a) 3903 探头

//——磁化方向与应力方向平行
 ⊥——磁化方向与应力方向垂直



(b) 3904 探头(磁化方向与应力方向平行)

图 2 1 号试样压应力与 BN 值的关系曲线

随着拉应力的升高, BN 值逐渐增加; 而由图 2 不难看出, 随着压应力的升高, BN 值逐渐减小。总之, 磁化方向与应力方向平行时, 表层应力和 BN 值的相关性较好。

2.2 BN 值和表层应力关系的反常规律

由试验结果不仅可以得到前面所述的 BN 值和表层应力关系的基本规律, 同时还得出一些 BN 值

和表层应力关系的反常规律。由图 1a 可知, 随着拉应力方向和磁化方向夹角的增大, 关系曲线的坡度减小; 当夹角超过某值时, 出现 BN 值随应力逐渐下降的趋势。而由图 2a 不难看出, 磁化方向与应力方向垂直时, 磁化电压较低时, 如 MAGN=30 时, BN 值有下降的趋势, 磁化电压较高时, 如 MAGN=50 或 70 时, BN 值先逐渐升高, 后趋于饱和。

2.3 磁滞伸缩模型的解释

B. Karpuschewski 在文献[8]中对介绍的磁致伸缩模型研究得出, 对初始应力为零且消磁过的单晶体施加应力, 外加拉应力时与磁化方向平行的区域增大, 而与磁化方向垂直的区域减小直到完全消失。相反, 外加压应力作用时, 引起的效应相反, 与磁化方向垂直的区域增大。该模型的理论基础是铁磁性材料的机械应力诱导磁弹效应, 即宏观应力的存在引起弹性能密度的增加, 铁磁体就会发生形变以减小内在的能量集中, 从而引起磁畴结构发生变化, 最终影响磁畴壁的运动。

BN 值反映的是交变磁化过程中在材料表层引起的感应电动势, 而感应电动势的大小取决于感应磁场的变化率。因此, 磁畴壁运动越剧烈, 感应电动势越大, BN 值越高。相反当磁畴壁运动受到阻碍时, 移动的磁畴壁数量减少, 磁畴壁运动的剧烈程度降低, BN 值就会降低。

磁化方向与应力方向平行时, 在拉应力情况下, 磁矩方向与应力方向相同的磁畴体积增大, 在交变磁化过程中, 磁畴壁移动较容易, 产生的 BN 值较大。随着拉应力的增大, 应力和外加磁场的叠加作用增强, 磁畴壁移动更剧烈, 产生的 BN 值增大。压应力作用时, 随着压应力的增大, 平行于磁化方向的磁畴数量减少, 磁畴壁运动的剧烈程度降低, 产生的 BN 值减小。这与 BN 值和表层应力关系的基本规律是相符的。

拉应力作用时, 当磁化方向与应力方向有一定的夹角时, 拉应力可分解成垂直和平行于磁化方向的两个分量, 前者阻碍磁畴壁的运动, 后者促进 BN 值的增加。随着磁化方向与应力方向的偏移, 垂直于磁化方向的分量逐渐增大, 平行于磁化方向的分量逐渐减小, 从而 BN 值上升的幅度逐渐减小, 并在一定条件下出现 BN 值随拉应力增加而降低。

压应力作用且磁化方向与应力方向垂直时, 随着压应力的增大, 平行于磁化方向的磁畴增多, 但同时压应力对磁畴壁运动的阻碍增大, 外加磁场和应

力的叠加作用使得 BN 值的变化与磁化电压有关,因此出现磁化电压较低时, BN 值有下降的趋势,磁化电压较高时, BN 值先逐渐升高,后趋于饱和。

3 结论

对 300M 钢表面施加宏观应力研究 BN 值与表层应力的关系,结果表明:

(1) BN 值与表面宏观应力的相关性很明确。

(2) 磁化方向与应力方向平行时, BN 值随拉应力的增大而增大,随压应力的增大而减小。

(3) BN 值与应力的变化关系是非线性的。

(4) 随着拉应力方向和磁化方向的夹角的增大,关系曲线的坡度减小;当夹角超过某值时,出现 BN 值随应力逐渐下降的趋势。

(5) 磁化方向与压应力方向垂直时,磁化电压较低时, BN 值有下降的趋势,磁化电压较高时, BN 值先升高,后趋于饱和。

参考文献:

[1] Harry Halls, Eng I, AMRAeS, et al. Using the Barkhausen effect for the inspection of high strength steel aircraft components [A]. First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic

(上接第 244 页)

如果要找出深度在厘米级以下的缺陷,工作频度要在 100 Hz 以下,普通的涡流技术在该频率下,灵敏度很低,而 SQUID 可以工作到 10 Hz 以下,直到直流。此外,可用傅里叶分析等方法,将 SQUID 测出的空间场分布反演成结构缺陷产生的电流分布,从而可知缺陷的深度、形状和大小等信息。

4 结论

超导量子干涉器是迄今为止探测微弱磁场最灵敏的设备,它可检测 $<10^{-10}$ T 的磁场、 10^{-9} A 的电流或几百个玻尔磁子的永久磁矩,这种高检测灵敏度使得它可能成为一种极具潜力的检测方法。但该方法目前仍存在一些尚未解决的问题,如稳定性、抗干扰能力和外界噪声的影响等,这也是在今后的研究和应用中需要解决和克服的。

参考文献:

[1] Wu MK, Ashburn JR, Torng CJ, et al. Superconductivity at 93K in a new mixed phase Y-Ba-Cu-O com-

Testing[C]. Hanover, Germany:1998.

- [2] Norbert Quemerais. Grinding burns detection on aircraft engines pinions faces and bearings[A]. First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing[C]. Hanover, Germany:1998.
- [3] Augustyniak B, Chmielewski M, Kielczynski KW, et al. Residual stress evaluation in abb power plant turbine blades [A]. First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing [C]. Hanover, Germany:1998.
- [4] 耿荣生. 利用巴克豪森发射测量金属镍的硬度和晶粒大小[J]. 无损检测,1993,15(9):244-247.
- [5] 李 强. 利用巴克豪森噪声无损测量铁磁材料硬度试验研究[J]. 北方交通大学学报,2000,24(1):80-82.
- [6] 祁 欣. 利用近饱和磁化产生的巴克豪森效应测量铁磁件二轴应力[J]. 计量学报,1999,19(1):11-16.
- [7] Shaw BA, Hyde TR, Evans JT, et al. Detection of grinding damage in hardened gear steels using Barkhausen noise analysis [A]. First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing[C]. Hanover, Germany:1998.
- [8] Karpuschewski B. Introduction to micromagnetic techniques [A]. First International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing [C]. Hanover, Germany:1998.
- [9] Pound R. Superconducting quantum interference devices[J]. Phys Rev Lett,1987,58(9):908-910.
- [2] 章立源,张金龙,崔广霖. 超导物理学[M]. 北京:电子工业出版社,1995.
- [3] Koelle D, Kleiner R, Ludwig F, et al. High-transition-temperature superconducting quantum interference devices[J]. Reviews of Modern Physics,1999,71(3):631-678.
- [4] Morgan LNC, Carr C, Cochran A, et al. Electromagnetic nondestructive evaluation with simple HTS SQUIDs: measurements and modelling [J]. IEEE Trans Appl Supercond,1995,5(2):3127-3131.
- [5] Clarke J, Goubau WM, Ketchen MB. Tunnel junction dc SQUID: fabrication, operation and performance [J]. J Low Temp Phys,1976,25(1-2):99-144.
- [6] Peterson RL, Hamilton CA. Analysis of threshold curves for superconducting interferometers[J]. J Appl Phys,1979,50(12):8135-8142.
- [7] Drung D. DC SQUID systems overview[J]. Supercond Sci Technol,1991,4:377-385.