

文章编号:1001-4888(2021)01-0043-08

应力和组分占比对马氏体-铁素体 双相钢中磁巴克豪森噪声的影响^{*}

王志¹, 何存富¹, 刘秀成¹, 陈彬², 宋亚虎², 王博²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 中信重工机械股份有限公司 计量检测中心, 河南洛阳 471039)

摘要:磁巴克豪森噪声(MBN)技术在马氏体-铁素体双相钢的微观结构及应力无损评价与表征中具有巨大潜力。为探究拉应力和铁素体占比对磁巴克豪森噪声的影响规律及权重,在0~200MPa范围内实验测得了具有不同铁素体占比的双相钢MBN信号。重点分析了MBN蝶形曲线双峰峰值(分别代表马氏体和铁素体)在应力和铁素体占比两因素耦合条件下的变化趋势。结果表明:受多种竞争机制影响,铁素体对应的MBN信号峰值随应力和铁素体占比增加未呈现明显变化规律;铁素体占比增加过程中,马氏体对应的MBN信号峰值呈先快速后缓慢的两阶段增长趋势,且第二阶段的增长速率在高应力区间更快。应力和铁素体占比增加均会导致马氏体MBN信号峰值升高,当铁素体占比小于12%时,组分占比的影响权重更高;当铁素体占比大于12%时,两因素的影响权重相当。

关键词:磁巴克豪森噪声; 应力; 组分占比; 双相钢

中图分类号: TM936

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-20-016

0 引言

双相钢由于具有良好的强度与塑性配合,在汽车制造过程中应用广泛^[1,2]。屈服强度、延伸率和残余应力等指标是双相钢性能评价的重要内容,直接影响材料的成型加工特性。以马氏体-铁素体双相钢为例,材料的屈服强度和延伸率主要由马氏体、铁素体的组分占比决定,但也受残余应力分布的影响^[3-5]。

马氏体-铁素体双相钢制备过程中,热处理等工艺参数的波动会直接影响微观组分及残余应力^[6,7]。为对材料制造过程的性能进行监测,需要发展微观组分及残余应力的快速评价方法,以利于及时调整工艺,保障材料制造质量。

磁巴克豪森噪声(Magnetic Barkhausen Noise, MBN)信号诱发于磁畴及其畴壁的不连续运动,称为巴克豪森跳变^[8]。巴克豪森跳变行为受微观结构(如析出物、晶界、位错密度等)的钉扎作用及残余应力等因素影响^[9-11],因此,MBN信号对微观组织和应力变化非常敏感^[12,13]。例如,Kleber等^[14]与Vashista等^[15]的实验结果均表明:铁素体-马氏体双相钢中的MBN时域信号包络曲线呈现双峰现象,且双峰幅值与两种组分的体积占比相关。这一结论预示着MBN信号检测技术具有评价双相钢微观组分占比的潜力。多种碳钢材料的实验测试结果显示:从单向弹性压缩到拉伸的整个阶段,MBN信号幅

^{*} 收稿日期:2020-01-19; 修回日期:2020-03-06

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01012300)资助;国家自然科学基金(11527801,11872081)资助

通信作者:刘秀成(1984—),男,博士,教授。主要研究领域为力学性能的微磁无损检测方法、结构健康监测技术与仪器。Email: xiuchliu@bjut.edu.cn

值呈现先快速增长后缓慢下降的趋势。在一定应力范围内,MBN 信号幅值近似与应力呈良好线性关系,可以用于应力的定量表征^[16,17]。

目前,针对微观组分占比和应力的 MBN 信号实验表征技术研究,都没有将两个因素进行耦合测试与分析,无法评价两种因素对 MBN 信号特征参数的影响权重。本文针对该问题,制备了组分占比不同的马氏体-铁素体双相钢并开展了单向拉伸实验。实验测试了应力和组分占比分别对马氏体-铁素体双相钢中 MBN 信号特征参数的影响规律,并对比分析了两种因素对 MBN 信号特征参数的影响权重。

1 实验试件制备

实验所用的原材料为莱钢股份集团生产的 45 号圆钢,化学成分如表 1 所示。利用金相显微镜进行组织观察,结果如图 1 所示,显微组织主要由纯铁素体组织(浅色区域,以符号 F 表示)与珠光体组织(深色区域,以符号 P 表示)组成。纯铁素体组织的体积占比 w_F 约为 40%,这里的 w_F 并未统计珠光体中的铁素体成分。

表 1 45 号圆钢化学成分列表

Tab. 1 Chemical composition of 45 carbon steel

成分	C	Si	Mn	P	S	Fe
质量分数/%	0.48	0.21	0.66	0.017	0.0079	余量

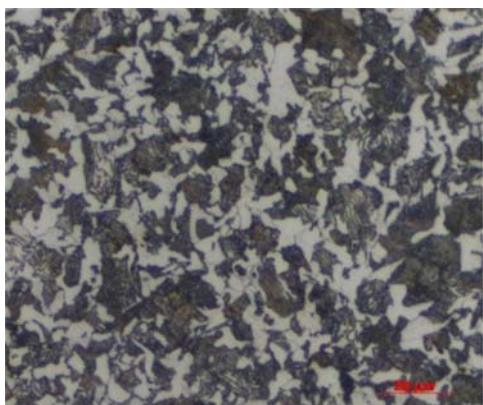


图 1 45 号圆钢的显微组织

Fig. 1 Microstructural of 45 carbon steel

用于热处理的试件长度为 200mm,直径为 12mm。将试件加热到铁碳合金相图共析线与同素异晶转变线之间的温度,经过一定的保温时间,材料内部的微观组织会由原本的 F+P 组织转变为铁素体与奥氏体的混合组织,奥氏体组织经淬火冷却转变为马氏体。淬火处理后,为消除材料内部残余应力,对试件进行回火处理,得到回火马氏体(以符号 M 表示)。

一般地,回火马氏体占比由淬火温度确定。本文采用的热处理工艺过程如表 2 所列。将试件加热到不同的温度并保温 30min 后进行水淬,将淬火后的试件在 170℃回火保温 40min,随后空冷。图 2 所示为不同编号试件材料的金相观察结果。

表 2 45 号圆钢调质 F+M 组织的热处理工艺

Tab. 2 Heat treatment process of 45 carbon steel for quenched and tempered F+M microstructural

工艺编号	淬火温度 /℃	保温时间/冷却方式	回火参数	铁素体含量/%
45-a	772			4
45-b	764		170℃	7
45-c	762	30min/水淬	180min	12
45-d	760		空冷	20
45-e	756			30

随着淬火温度的降低,铁素体占比 w_F 逐渐增加,从图 2(a)~(e)中统计得到的 w_F 铁素体占比分别为 4%、7%、12%、20%和 30%。铁素体(亮色区域)组织具有体心立方晶格结构,其溶碳能力很低,磁性很弱;而回火马氏体(暗色区域)具有体心四方晶格结构,内部弥散分布着极其细小的过渡碳化物薄片,并且晶格畸变明显,磁性较强^[18]。试件经热处理后,采用车削精加工去除表面氧化皮层,再加工成圆棒

拉伸试件,总长为 200mm,平行段长度为 120mm,直径为 10mm。

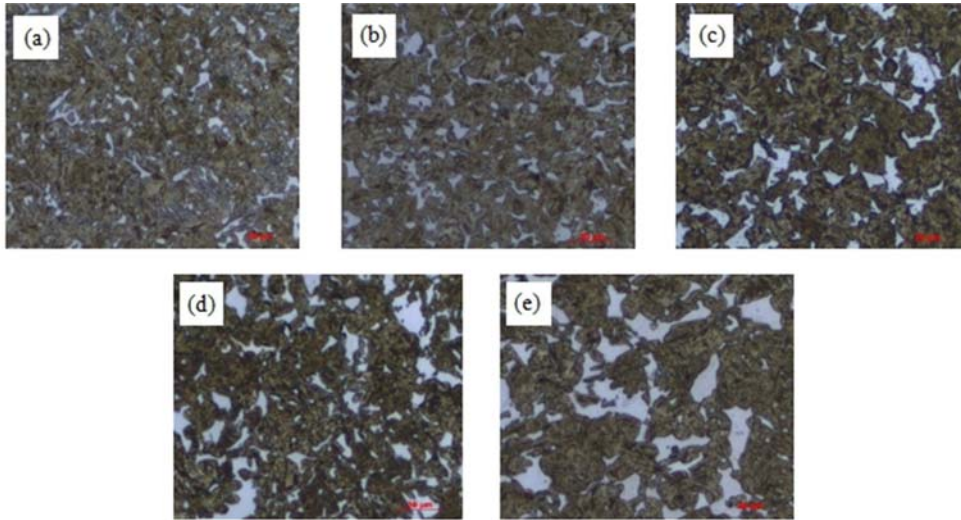


图 2 45 号钢在不同温度淬火得到的 F+M 显微组织

Fig. 2 F+M microstructural of 45 carbon steel under different quenched temperatures

2 实验测试

为测试单向拉伸状态下圆棒中的 MBN 信号,设计了图 3(a)所示的专用传感器,主要由 U 形磁轭、激励线圈、MBN 线圈和霍尔元件等组成。为了使磁轭与被测试件表面贴合,磁芯两末端面加工成内凹圆弧槽形状,圆弧半径为 5.1mm。磁芯内侧间距为 20mm,磁芯横截面为 14mm×14mm。激励线圈采用线径为 0.38mm 的漆包线绕制,匝数为 450 匝。MBN 线圈采用线径为 0.05mm 的漆包线绕制 400 匝而成,霍尔元件为美国 allegro 公司生产的 SS39E,用于测量切向磁场。MBN 线圈与霍尔元件均放置于磁芯内侧。

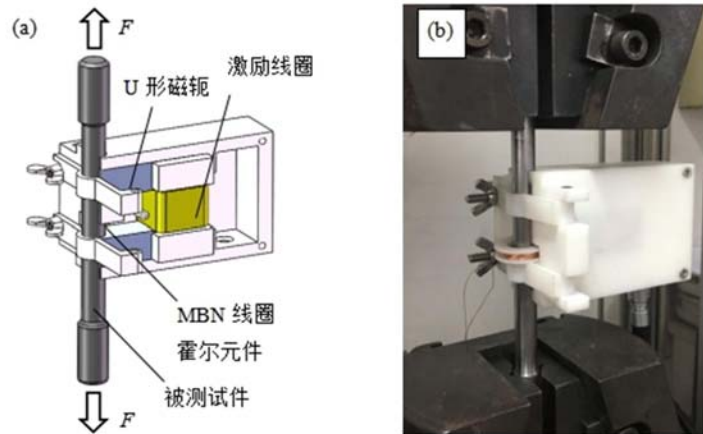


图 3 双相铁磁性材料拉伸实验

Fig. 3 Tensile test of dual-phase ferromagnetic materials

进行 MBN 信号检测时,利用 LabVIEW 软件发送指令控制激励板卡产生峰峰值为 $5V_{pp}$ 、频率为 20Hz 的正弦电压信号,经 KEPCO BOP-400L 型双极性电源进行功率放大后通入激励线圈,霍尔元件和 MBN 线圈的输出电压信号由数据采集板卡接收并存储于上位机中。对采集的 MBN 时域信号进行带通滤波处理,数字滤波器的类型为 4 阶巴特沃斯滤波器,带宽范围为 30kHz~70kHz。

图 3(b)示出了实际测试过程中传感器及拉伸试件的安装状态。先后对具有不同 M+F 组分占比的试件进行逐级拉伸,电子式万能试验机的横梁位移速率设置为 1mm/min,加载范围为 0~200MPa,步长为 20MPa。加载到设定载荷时,重复进行 5 次 MBN 信号检测。单个试件再重复进行 2 次拉伸及

MBN 信号检测过程,由此单个应力状态下共获得 10 次重复检测数据。

3 实验结果讨论与分析

3.1 组分占比对 MBN 信号的影响

当不施加应力($\sigma=0\text{MPa}$)时,从原材料和 $w_F=30\%$ 试件中测得的 MBN 信号波形及切向磁场强度 H 信号如图 4 所示。原材料的组织主要为铁素体与珠光体,由于这两种组织的矫顽力等磁特性非常相近,各自诱发的 MBN 信号在时域上难以分离而呈现为图 4(a)所示的单峰波形。对于 $w_F=30\%$ 的试件,其内部的铁素体的矫顽力明显低于马氏体,两种组分中诱发的 MBN 信号峰值出现在不同的切向磁场强度位置。在交变磁场励磁下,分布于铁素体组分中的磁畴先发生翻转,而马氏体组分中的磁畴后发生翻转。由此,形成了图 4(b)所示的时域分离的双峰,其中第一个峰对应低矫顽力的铁素体,而第二个峰对应高矫顽力的马氏体。

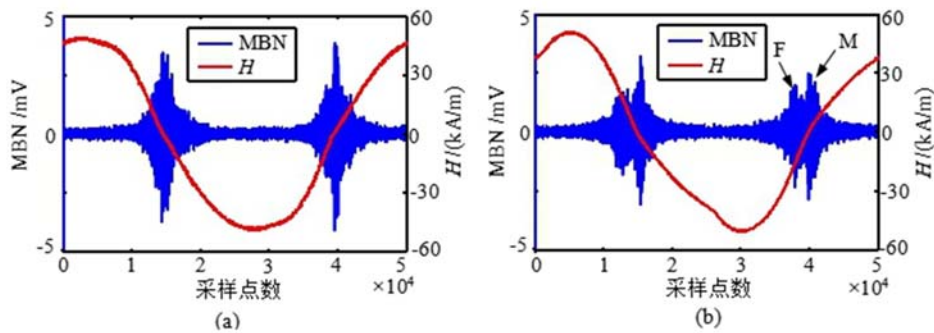


图 4 被测试件的 MBN 信号波形

Fig. 4 MBN signal waveforms of testing samples

以切向磁场强度测量波形为横坐标,MBN 波形包络线为纵坐标,可绘制得到图 5 所示的 MBN 蝶形曲线。由图 5 可以看出,对于不同组分占比的马氏体-铁素体双相钢,MBN 蝶形曲线均呈现明显的双峰现象,且双峰峰值随组分占比变化而波动。

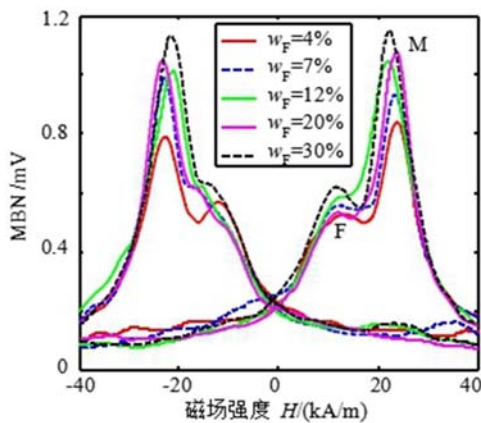


图 5 不同组分占比的双相钢 MBN 蝶形曲线

Fig. 5 MBN butterfly curves of dual-phase steel with different phase proportion

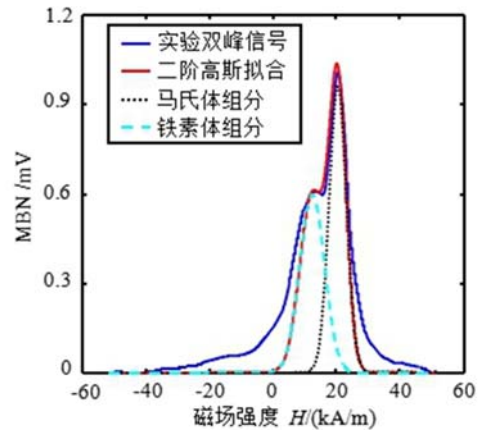


图 6 MBN 蝶形包络线的函数拟合结果

Fig. 6 Function fitting result of MBN butterfly envelope

为定量分析双峰峰值随组分占比的变化规律,采用二阶高斯函数对图 5 所示的单侧 MBN 蝶形曲线进行拟合,以提取出双峰峰值。图 6 为针对 $w_F=30\%$ 试件中 MBN 蝶形曲线的拟合结果。由图 6 可以看出,虽然拟合曲线与实验测试曲线在双峰区域外存在一定误差,但在双峰峰值处拟合程度较高,因此拟合曲线可以对双峰峰值进行准确的估计。

图7给出了利用上述方法提取得到的铁素体、马氏体对应峰值随组分占比的变化规律。随着弱磁性铁素体含量的增加,图5中M和F峰值位置朝低磁场范围漂移,预示着材料等效矫顽力下降。在相同强度的外加励磁场作用下,各组分内部发生翻转的磁畴数量增加,MBN信号的峰值总体呈现上升趋势。图7中马氏体对应的峰值随 w_F 增大呈现先快速后缓慢的增长规律。

铁素体占比增加,相应地其内部碳原子数目减少,对畴壁翻转的钉扎效应减弱,导致MBN信号峰值下降。因此,存在两种竞争机制影响铁素体内部的磁畴翻转数量,导致图7中铁素体对应峰值随 w_F 增大的变化规律并不单调,且变化程度明显低于马氏体的结果。

3.2 应力对 MBN 信号的影响

依照上述 MBN 蝶形曲线中双峰峰值的提取方法,从不同拉伸状态试件的 MBN 测试信号中分析得到了应力对双峰峰值的影响规律,结果如图8与图9所示。

由于存在多种竞争机制(晶体各向异性、应力致各向异性和碳含量等)影响铁素体内部磁畴跳变行为,导致在不同的试件中马氏体对应峰值随应力的变化程度很小,且峰值与应力的关系因测试试件而不同。本文重点讨论应力对马氏体对应峰值的影响规律。如图9所示,在不同试件中的测试结果均表明:在0~200MPa应力变化范围内,马氏体峰值随拉应力增加呈升高趋势,这与文献[19]报道的结果相符合,其内在机理是拉应力减缓了微观结构对畴壁的钉扎效应程度,使得畴壁位移变得容易,矫顽力下降,MBN信号增强。

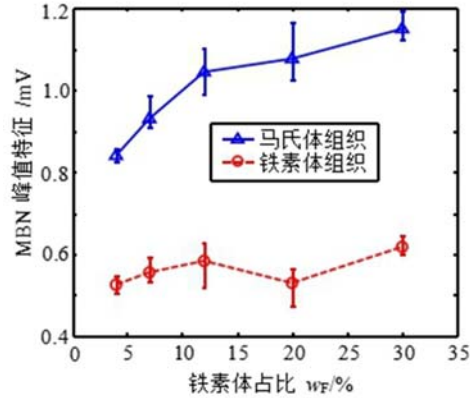


图7 两微观组织 MBN 信号峰值随铁素体占比的变化规律

Fig. 7 The change rule of MBN signal peak of two microstructure with ferrite proportion

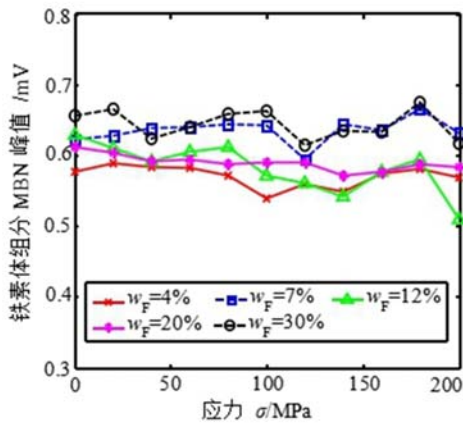


图8 铁素体组分 MBN 信号峰值随应力的变化

Fig. 8 MBN signal peaks of ferrite phase change with applied tensile stress

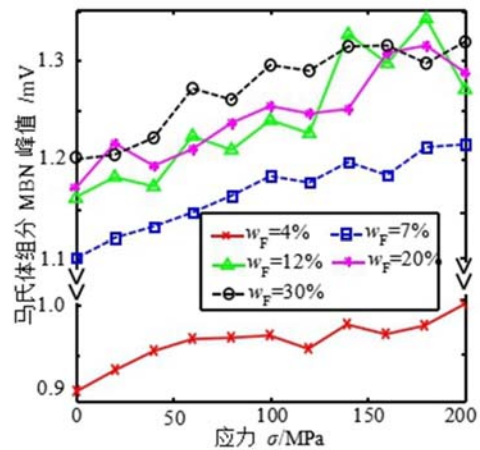


图9 马氏体组分 MBN 信号峰值随应力的变化

Fig. 9 MBN signal peaks of martensite phase change with applied tensile stress

3.3 应力和组分对 MBN 信号的影响权重

综合图7和图9所示结果,可以总结出马氏体对应 MBN 信号峰值的增强存在两种影响机制:铁素体含量和拉应力。

MBN 信号峰值随单一参量(占比 w_F 或应力 σ)的变化规律均不是线性的,增长速率与 w_F 或应力 σ 的取值范围有关。因此,本文主要通过分阶段统计 w_F 或应力 σ 增量引起的 MBN 信号峰值变化率,进行影响权重分析。

首先,固定应力大小,提取不同组分占比(w_F)增量时马氏体相 MBN 信号峰值的增长率(β),统计结果如图 10 所示。在不同应力条件下, w_F 从 4% 增加到 7% 时,MBN 信号峰值的增长率 β 超过 20%,当 w_F 继续从 7% 逐步增加至 30% 过程中,MBN 信号峰值的增长率 β 明显减缓。但在高应力区间, w_F 变化引起的 MBN 信号峰值的增长率 β 明显大于低应力区间(零应力状态除外)。统计所有应力条件下 w_F 从 4% 增加到 30% 时,马氏体峰值的平均增长率约为 38.28%。

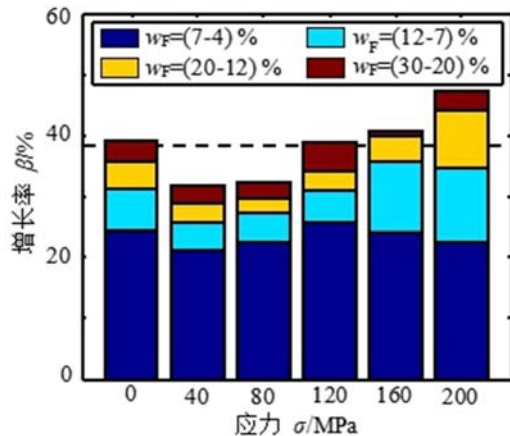


图 10 组分占比对马氏体 MBN 信号峰值的影响

Fig. 10 Effect of phase proportion on martensite MBN signal peak

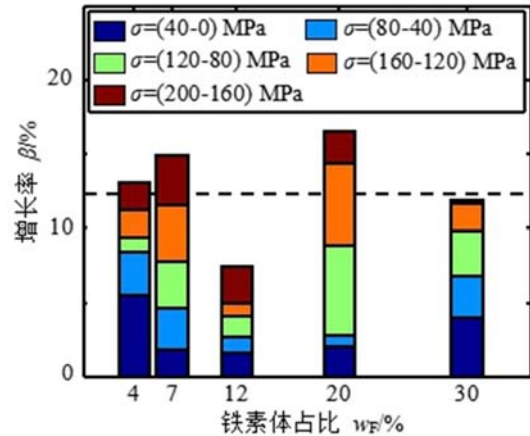


图 11 应力对马氏体 MBN 信号峰值的影响

Fig. 11 Effect of applied tensile stress on martensite MBN signal peak

图 11 给出了固定组分占比 w_F , 应力 σ 增量(固定为 40MPa)对马氏体峰值增长率(β)的统计结果。当应力从 0MPa 增加到 200MPa 时,不同试件中的 MBN 信号峰值增长率存在一定波动,所有试件的平均增长率 β 约为 12.77%。在 $w_F=7\%$ 的试件中,应力增量引起的 MBN 信号峰值增长率相对稳定,也即应力与 MBN 信号峰值存在良好的线性关系。在剩余 4 个试件中,MBN 信号峰值的增长率 β 对应力增量的灵敏度并不稳定,而是与试件所处的应力水平有关。

由于应力和铁素体含量的量纲不同,难以进行直接的权重比对,这里只针对本文结果给出定性评价:在铁素体含量小于 12% 前,相比应力, w_F 对 MBN 信号峰值的影响权重更高;当铁素体含量大于 12% 后, w_F 和 σ 对 MBN 信号峰值的影响权重相当。

4 结论

本文针对不同拉应力状态下的马氏体-铁素体双相钢进行了 MBN 信号检测实验,分析讨论了铁素体占比和应力对 MBN 蝶形曲线双峰的影响规律,得到以下结论:

(1) 在测试的拉应力(0~200MPa)范围内,随铁素体占比增加,代表马氏体组分的 MBN 信号峰值呈先快速后缓慢的两阶段增长趋势,且第二阶段的增长速率与应力大小有关,在高应力区间的增长速率更快。

(2) 铁素体占比和拉应力对马氏体 MBN 信号峰值的影响方向一致, w_F 和 σ 增加均导致 MBN 信号峰值升高。在铁素体含量小于 12% 前, w_F 对 MBN 信号峰值的影响权重更高;当铁素体含量大于 12% 后, w_F 和 σ 对 MBN 信号峰值的影响权重相当。

参考文献:

- [1] He Z, Song R, Dai Q. Strengthen mechanism of 1000MPa ultra-high strength cold-rolled dual phase steel which used in automobile[J]. Procedia Engineering, 2012, 27:863-870.
- [2] Ghanei S, Kashefi M, Mazinani M. Comparative study of eddy current and Barkhausen noise nondestructive testing methods in microstructural examination of ferrite-martensite dual-phase steel[J]. Journal of Magnetism and

- Magnetic Materials, 2014, 356:103–110.
- [3] 何存富, 窦文巧, 刘秀成, 等. 调幅切向磁场对低碳钢残余塑性应变的检测灵敏度矩阵分析方法[J]. 实验力学, 2019, 34(4):547–553 (HE Cunfu, DOU Wenqiao, LIU Xiucheng, et al. Sensitivity matrix analysis for residual plastic strain evaluation method using amplitude modulation tangential magnetic field in low carbon steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4):547–553 (in Chinese))
- [4] Chakraborti P C, Mitra M K. Microstructure and tensile properties of high strength duplex ferrite-martensite (DFM) steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 466(1):123–133.
- [5] 金鹏, 李喜德. 残余应力分析方法比较: X射线衍射法与应力释放法[J]. 实验力学, 2017, 32(5):645–651 (JIN Peng, LI Xide. Comparison of residual stress analysis methods: X-ray diffraction method vs stress release method [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):645–651 (in Chinese))
- [6] 陈庆. 淬火温度对马氏体/铁素体双相钢组织性能的影响[J]. 冶金分析, 2018, 38(10): 67–71 (CHEN Qing. Effects of quenching temperature on the microstructure and properties of martensite/ferrite dual phase steel[J]. Metallurgical Analysis, 2018, 38(10):67–71 (in Chinese))
- [7] Dulucheanu C, Bancescu N, Severin T. The influence of quenching temperature on the mechanical properties of a dual-phase steel with 0.094% C and 0.53% Mn[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 808(4):28–33.
- [8] 程志远, 宋凯, 门平, 等. 磁巴克豪森噪声重构磁滞参数的硬度测定方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10):117–125 (CHENG Zhiyuan, SONG Kai, MEN Ping, et al. Hardness determination method based on reconstructed magnetic hysteresis parameters with magnetic Barkhausen noise[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10):117–125 (in Chinese))
- [9] McCurrie R A, Willmore L E. Barkhausen discontinuities, nucleation, and pinning of domain walls in etched microparticles of SmCo5[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(5):3560–3564.
- [10] He M, Matsumoto T, Uchimoto T, et al. Caution to apply magnetic barkhausen noise method to nondestructive evaluation of plastic deformation in some ferromagnetic materials[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1):248–259.
- [11] He M, Matsumoto T, Takeda S, et al. Nondestructive evaluation of plastic damage in a RAFM steel considering the influence of loading history[J]. Journal of Nuclear Materials, 2019, 523:248–259.
- [12] Vourna P, Ktena A, Tsakiridis P E, et al. A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels[J]. NDT&E International, 2015, 71:33–42.
- [13] Ktena A, Hristoforou E, Gerhardt G J L, et al. Barkhausen noise as a microstructure characterization tool[J]. Physica B Condensed Matter, 2014, 435(1):109–112.
- [14] Kleber X, Hug-Amalric A, Merlin J. Evaluation of the proportion of phases and mechanical strength of two-phase steels using Barkhausen noise measurements: application to commercial dual-phase steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science), 2008, 39(6):1308–1318.
- [15] Vashista M, Moorthy V. On the shape of the magnetic Barkhausen noise profile for better revelation of the effect of microstructures on the magnetisation process in ferritic steels [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 393:584–592.
- [16] Yelbay H I, Cam I, Gür C H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by magnetic Barkhausen noise technique[J]. NDT&E International, 2010, 43(1):29–33.
- [17] Sorsa A, Leivisk K, Santa-Aho S, et al. Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement [J]. NDT&E International, 2012, 46:100–106.
- [18] Flower H M, Lindley T C. Electron backscattering diffraction study of acicular ferrite, bainite, and martensite steel microstructures[J]. Metal Science Journal, 2000, 16(1):26–40.
- [19] Blachnio J. The effect of changing loads affecting the martensite steel on its structure and the Barkhausen noise level[J]. NDT&E International, 2008, 41(4):273–279.

Effect of applied stress and phase proportion on the magnetic Barkhausen noise in martensite-ferrite steel

WANG Zhi¹, HE Cunfu¹, LIU Xiucheng¹, CHEN Bin², SONG Yahu², WANG Bo²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Measuring and Testing Center, CITIC HMC Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

Abstract: Magnetic Barkhausen noise (MBN) technique has great potential in non-destructive evaluation of microstructure and stress in martensite-ferrite steel. To investigate the influence and weight of applied tensile stress and ferrite proportion on MBN, experiments are performed in dual-phase steel with different ferrite proportion under tension in the range of 0~200MPa. The change trends of double peaks (representing martensite and ferrite respectively) of MBN butterfly curve under the coupling condition of stress and ferrite proportion are specially analyzed. The results show that the MBN peak corresponding to ferrite hardly changes obviously with the increase of stress and ferrite proportion due to the complex competition mechanism. The MBN peak corresponding to martensite increases rapidly at first and then increases slowly as the ferrite proportion increases. In addition, the growth rate of the second stage is faster in the high stress range. Stress and ferrite proportion will lead to the increase of MBN peak value. In general, the phase proportion is the dominant influence factor when the ferrite proportion is less than 12%, and the influence weight of stress and ferrite proportion is in the same order when the ferrite proportion exceeds 12%.

Keywords: magnetic Barkhausen noise; stress; phase proportion; dual-phase steel