

基于 MBN 法的应力检测参数优化及试验

程志远^{1,2}, 宋 凯¹, 董世运², 门 平², 李轶名¹, 肖力伟¹

(1.南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2.陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 搭建了基于磁巴克豪森噪声(MBN)原理的电磁检测平台,以 Q235 钢为试验对象开展了应力检测研究。在试验之前采用不同的波形、频率和电压进行测试,分析 MBN 信号峰值与频率、电压的关系,确定最优的激励参数。通过静载拉伸试验确定 MBN 信号与拉应力之间的关系,拟合 MBN 信号峰值与拉应力的关系曲线,分析信号峰值作为应力评价指标的可行性。结果表明:正弦波作为激励信号产生的 MBN 信号特征明显、信噪比高;MBN 信号峰值随拉应力的增大而先增大后减小;分析非线性拟合曲线可以对应力集中程度进行评估。

关键词: 巴克豪森噪声;激励参数;应力检测;非线性拟合

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2018)04-0013-06

Optimization and Experimental Study of Stress Detection Parameters Based on MBN Method

CHENG Zhiyuan^{1,2}, SONG Kai¹, DONG Shiyun², MEN Ping², LI Yiming¹, XIAO Liwei¹

(1.Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2.National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: In this paper, the electromagnetic detection platform based on magnetic Barkhausen noise (MBN) principle is built, and the stress detection is carried out with Q235 steel as the experimental object. Before and after the test, different waveforms, frequencies and voltages were used to test the relationship between the peak value of MBN signal and frequency and voltage, and determine the optimal excitation parameters. The relationship between the MBN signal and the tensile stress is determined by the static load tensile test. The relationship between the peak value of the MBN signals and the tensile stress is fitted and the feasibility of using the peak value of the signal as the stress evaluation index is analyzed. The results show that the MBN signal generated by the sine wave as the excitation signal has obvious characteristics and the SNR is high; the peak value of the MBN signal increases first and then decreases with increasing tensile stress; the nonlinear fitting curve can be used to evaluate the stress concentration.

Key words: Barkhausen noise; excitation parameter; stress detection; non-linear fitting

收稿日期: 2017-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51265041); 国家重点研发计划重点专项(2016YFB1100205); 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ140505); 国家公益性行业科研专项(201510066); 江西省教育厅基金(GJJ151545); 无损检测技术教育部重点实验室开放基金(EW201708252); 江西省研究生创新专项基金(YC2017-S338)项目资助

作者简介: 程志远(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁无损检测技术, 材料力学性能无损检测与评价

通信作者: 宋 凯(1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电磁无损检测新技术, 6536446@qq.com; 董世运(1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为表面工程、激光制造与再制造及其质量无损检测评价等, syd422@sohu.com

铁磁性材料在机械装置、电力运输设备、仪器仪表和建筑等行业都得到了广泛应用。铁磁性材料在使用过程中受力复杂, 容易产生局部应力集中而导致局部塑性变形, 长期使用会产生疲劳损伤, 影响材料的力学性能和使用寿命。目前, 检测材料残余应力的技术还有待突破。巴克豪森噪声法是一种新型的无损检测技术, 具有信号特征显著, 检测手段简单等特点。SRIDHARAN 等^[1]将研磨温度模型与 MBN 噪声分析法进行结合, 对轴承钢表面的热损伤程度进行预测, 研究表明通过将研磨区温升与 MBN 均方根相

关联,可以非常准确地检测研磨引起的热损伤,而不需要进行破坏性评估和验证。田贵云等将 MBN 信号分布的偏度作为微观结构表征和应力应变测定的新特征,分析了畴壁能量和钉扎边缘之间的距离对非线性偏斜现象的影响,证实了偏斜度对应力具有更好的灵敏度^[2-3];陈立功等^[4]创建了结合虚拟仪器技能的 MBN 残余应力检测系统,得出热处理后的板材 MBN 信号强度有降低趋势的结论。

笔者应用巴克豪森噪声法对 Q235 钢进行了应力检测,搭建了一套 MBN 信号检测平台,研制了基于 MBN 原理的检测装置,确定了 MBN 信号检测的最优参数,开展了 Q235 钢静载拉伸试验,分析了 MBN 信号峰值与拉应力的规律。

1 MBN 检测平台的设计

巴克豪森信号检测平台由激励部分、检测部分和信号处理部分组成,其结构如图 1 所示。激励部分由任意波形发生器和功率放大器共同构成。任意波形发生器产生激励交流电,功率放大器将低功率的激励信号放大,获得足够磁化强度的交变磁场。信号处理部分是由差分式前置放大器、带通滤波器和示波器组成的。差分式前置放大器对毫伏级的脉冲电压进行放大,带通滤波器滤除与激励信号同频率的感生电压,示波器作为信号采集装置对巴克豪森信号进行显示和采集。

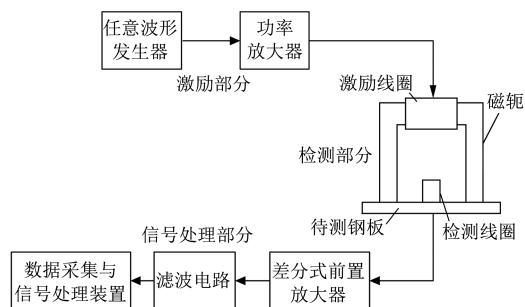


图 1 MBN 信号检测平台结构框图

巴克豪森检测探头由 U 型磁轭、激励线圈和检测线圈共同组成,如图 2 所示。将线径 0.71 mm 的

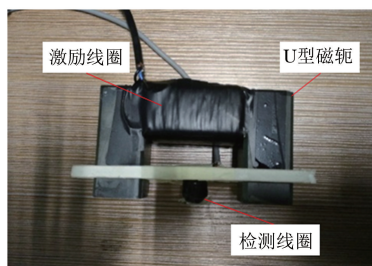


图 2 巴克豪森检测探头外观

漆包线绕在 U 型磁轭上作为激励线圈,并施加交变电流,感生交变磁场。经过验证,在 U 型磁轭上绕 600 匝漆包线最为合适,并且需要保证绕制的漆包线之间排列紧密且螺旋方向一致。U 型磁轭的材料是锰锌铁氧体,具有磁导率高、频带宽、磁滞回线窄而长以及矫顽力低等优点,能够束缚磁力线,保证磁化场强度。将线径 0.15 mm 的漆包线绕在磁环上作为检测线圈。经过验证,线圈匝数为 2 000 匝时,检测线圈对脉冲电压具有很高的灵敏度。

2 巴克豪森检测试验

2.1 试验材料及试验方案

试件材料为 Q235 钢,试件规格(长×宽×厚)为 220 mm×50 mm×3 mm,其几何尺寸如图 3 所示。该材料主要性能参数为:屈服点 235 MPa;抗拉强度 375~500 MPa;伸长率 26%。在拉伸过程中,应力集中最严重的区域处于试件的中间位置,此处所受的拉应力最大,因此在试件的几何中心预设一个测量点。此测量点距上下两侧的距离均为 20 mm,距左右两侧的距离均为 110 mm。为消除机械加工等因素对试件残余应力的影响,试验之前对试件进行去应力退火处理^[5-6]。

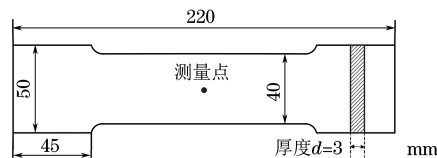


图 3 试件几何尺寸示意

试验所需设备为:① WDW-E100D 型电子程控试验机;② 巴克豪森信号检测平台(见图 4)。

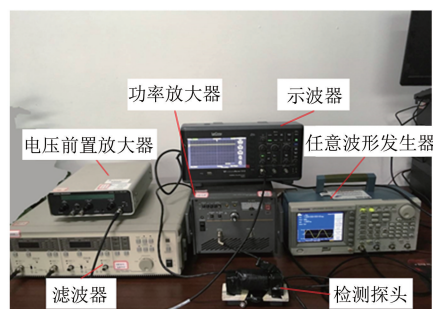


图 4 巴克豪森信号检测平台外观

试验步骤为:将拉伸应力设定为 3,6,9,12,15,18,21,24,27,28 kN 进行试验拉伸。当试件处于预定载荷时,采用不同波形的激励信号磁化试件,离线测量试件几何中心点的巴克豪森噪声信号。

试件拉伸过程中,加载速度设定为 0.1 mm·min⁻¹。

2.2 优化参数试验结果与分析

选用不同的激励波形、电压以及频率的信号进行测试,分析巴克豪森信号的峰值,确定最佳的激励波形、电压和频率。

采用正弦波、三角波和方波激励信号分别测试。当激励电压为1 V时,激励频率由5 Hz增至50 Hz,分析频率与信号峰值之间的关系;当激励频率为35 Hz时,激励电压由0.5 V增至7.5 V,分析电压与信号峰值之间的关系。试验后,得到的结果如图5~10所示。

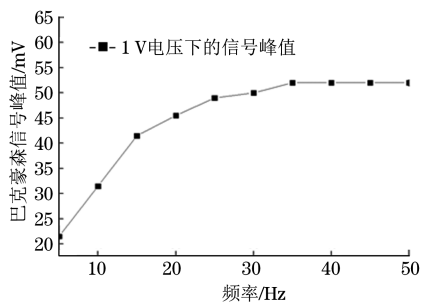


图5 正弦波频率与信号峰值的关系

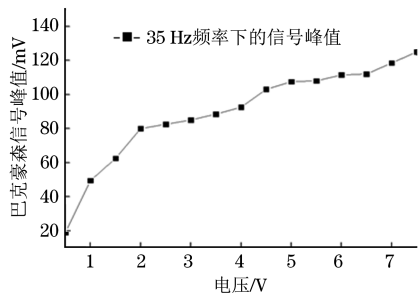


图6 正弦波电压与信号峰值的关系

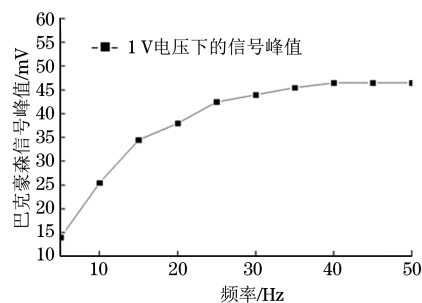


图7 三角波频率与信号峰值的关系

由图5可知,当激励电压为1 V时,巴克豪森信号峰值随正弦波激励频率的增大而增大,并且变化梯度减小,当频率达到35 Hz时,信号峰值不再随频率的增大而增大。由图6可知,随着电压的增大,巴克豪森信号峰值也在增大,在2~7.5 V之间,信号峰值的增幅较为稳定,在5.5 V以后,随着电压的增大,信噪比减小,不利于巴克豪森信号的观察。

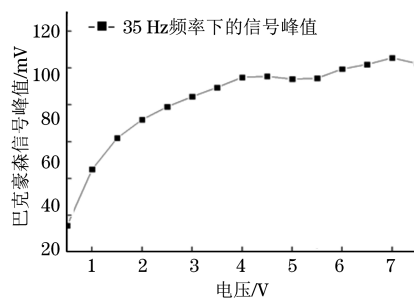


图8 三角波电压与信号峰值的关系

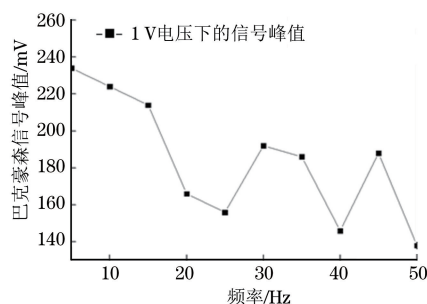


图9 方波频率与信号峰值的关系

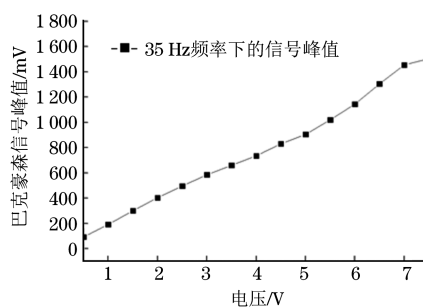


图10 方波电压与信号峰值的关系

由图7可知,当激励电压为1 V时,随着三角波频率的增大,巴克豪森信号峰值也在增大,并且增大的趋势在减弱。当频率达到35 Hz时,信号峰值不再随频率的增大而增大。由图8可知,随着电压的增大,巴克豪森信号峰值也在增大,并且在4 V以后,信号峰值的增幅降低,信噪比减小。在数值方面,三角波产生的信号峰值比正弦波产生信号的峰值要小;在信号特征方面,三角波产生的信号的信噪比比正弦波产生信号的信噪比更小。

由图9可知,当激励电压为1 V时,随着方波频率的增大,巴克豪森信号峰值减小,但是在25~30 Hz,40~45 Hz之间出现了反向增大。由图10可知,随着电压的增大,巴克豪森信号峰值的变化呈递增趋势。在信号特征方面,方波产生的巴克豪森噪声信号不完整,且30 Hz以后信噪比更小,但是180°的磁畴翻转特别剧烈,产生的脉冲电压强,中间的巴克豪森信号突兀,不利于巴克豪森信号的观察。

交变电流产生的交变磁场会对材料内部的磁畴翻转产生影响,磁化过程如图 11 所示。当磁化场 H 逐渐增加时,磁化强度 M 随之增长,开始时 M 增长得比较迟缓,然后经过一段急剧上升的过程,又进入迟缓变化的阶段,最终达到磁饱和,磁化曲线如 ab 所示;当外磁场减小至 0 时,试件会保留一定的磁性,磁化曲线如 bc 所示; M 减小至 0 的过程中,材料内部发生磁畴壁位移(可逆磁化)和小跳跃的磁畴转动(不可逆磁化),产生的巴克豪森信号微弱,当 M 反向增大至磁饱和时,磁畴转动的跳跃剧烈,巴克豪森噪声信号显著,如 cd 所示; H 减小至 0 的过程中,材料保留剩磁,如 de 所示。

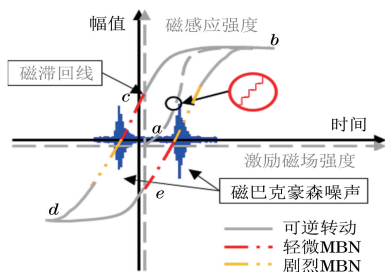


图 11 巴克豪森噪声与磁滞回线

通过比较正弦波、三角波和方波,发现正弦波与三角波产生的巴克豪森信号的特征类似,但正弦波产生的巴克豪森信号的峰值略大于三角波产生的巴克豪森信号的峰值。在信号特征上,方波产生的巴克豪森信号不完整,这种现象与方波的波形有关。正弦波和三角波信号都存在由 0 过渡到峰值的过程,激励电压是有变化区间的,产生的外磁场对材料的作用是一个完整的磁滞回线的过程。这一过程中伴随着磁畴的可逆转动, 90° 磁畴不可逆翻转以及 180° 磁畴不可逆翻转。而对于方波,外磁场强度是恒定值,在磁场强度饱和的情况下,检测线圈感生的电脉冲大部分来源于 180° 的磁畴翻转,所以感生的电脉冲很强,当磁化场随着激励信号改变方向时,试件进入退磁阶段,外磁场强度迅速减弱,感生的电脉冲的电压降低,直到磁场完全退去,外磁场转换为反向饱和磁场。

结合对三种波形的分析,可选择的波形有正弦波和三角波,最适宜的激励频率和电压分别为 35 Hz 和 4 V,如图 12、13 所示。

2.3 静载拉伸试验结果及分析

将检测线圈的中心置于试件的几何中心,并用绝缘胶带将试件与检测探头固定,防止磁化过程中产生的振动影响巴克豪森信号的稳定性,检测的数据如表 1、2 所示。

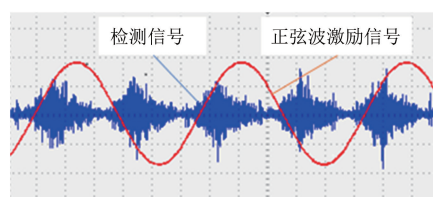


图 12 正弦波的激励与检测信号

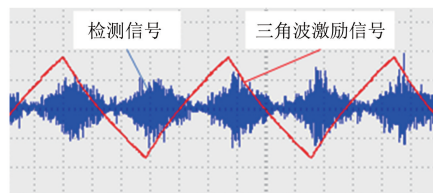


图 13 三角波的激励与检测信号

表 1 正弦波激励下的巴克豪森信号峰值

拉应力/kN	峰值/V	拉应力/kN	峰值/V
0	2.60	18	2.25
3	2.70	21	2.15
6	3.15	24	2.00
9	4.50	27	2.04
12	6.25	28	2.24
15	3.95	—	—

表 2 三角波激励下的巴克豪森信号峰值

拉应力/kN	峰值/V	拉应力/kN	峰值/V
0	1.95	18	2.00
3	2.30	21	1.95
6	2.70	24	1.90
9	2.35	27	1.98
12	3.40	28	2.03
15	2.60	—	—

对比分析正弦波激励和三角波激励产生的巴克豪森信号峰值与应力的关系曲线,如图 14、15 所示。

试件所受的拉应力小于屈服点时,巴克豪森信号峰值随拉应力的增大而增大,并且越靠近屈服点,峰值变化越剧烈;当试件所受的拉应力大于屈服点时,巴克豪森信号峰值先急剧下降,然后趋于稳定。正弦波激励产生的信号峰值大于三角波激励信号产生的信号峰值,在屈服点处尤为明显,此处正弦波产生的巴克豪森信号的峰值近乎于三角波产生的巴克豪森信号峰值的 2 倍。

为了研究巴克豪森信号峰值与应力集中之间的关系,对 MBN 信号峰值曲线分阶段进行 Gauss Amp 函数和 Log Normal 函数的非线性拟合。Log Normal 函数回归是一种广义的线性回归方法,具有 $A_2 + (A_1 - A_2) / [1 + (x/x_0)^p]$ 的特征方程,其中 A_1, A_2, x_0, p 为待求系数。可得出正弦波和三角波激

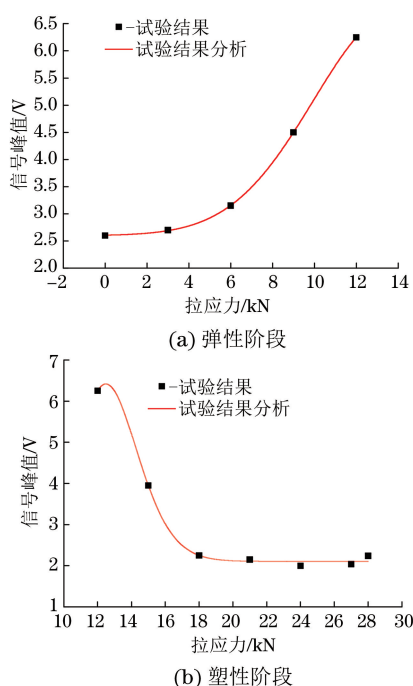


图 14 正弦波激励下的 MBN 信号峰值拟合曲线

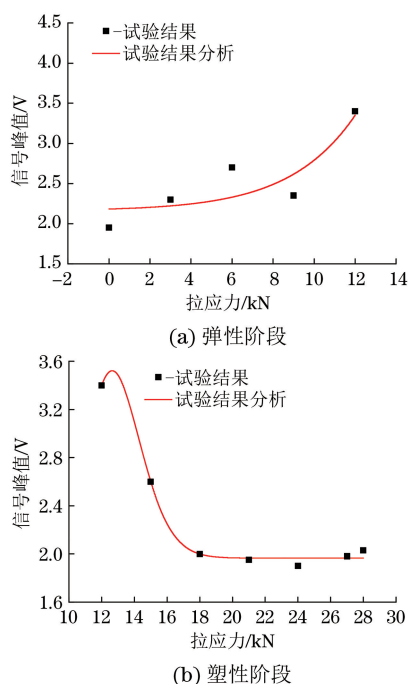


图 15 三角波激励下的 MBN 信号峰值拟合曲线

励下的 MBN 信号峰值拟合曲线(塑性阶段)的相关度为 0.995 39 和 0.990 3, 近乎无差异。Gauss Amp 函数具有 $y_0 + A * \exp\{-0.5[(x-x_c)/\omega]^2\}$ 的特征方程, 其中 A_1, A_2 和 p 为待求系数。正弦波激励下的 MBN 信号峰值拟合曲线(弹性阶段)的 $y_0 = 2.598\ 34, x_c = 13.903\ 1, \omega = 3.953\ 57, A = 4.100\ 44$, 可见相关度 Adjusted R-square(相关系数 R^2) 为 0.999 93, 而三角波激励下的 MBN 信号峰值

拟合曲线(弹性阶段)的相关度 Adjusted R-square(相关系数 R^2) 为 0.10303, 表明正弦波激励下的 MBN 信号峰值(弹性阶段)与拉应力的相关性极好, 因此可以选用正弦波作为激励信号, 利用 MBN 信号峰值遵循的 Gauss Amp 曲线和 Log Normal 曲线对应力集中进行定量分析。

当铁磁性材料受拉应力作用时, 存在由形变而引起的磁弹性能和外应力作用而产生的磁应力能^[7-8]。对于磁致伸缩系数为正的 Q235 钢, 材料内部的自发磁化方向趋向平行于拉应力的方向^[9-12]。从磁畴与位错理论来说, 在弹性变形阶段, 随着拉应力的增大, 试件应力集中的区域产生局部微小的变形, 位错在一定程度上进行增殖, 并阻碍磁畴的翻转, 噪声的峰值有所增大; 当载荷接近屈服点时, 材料中少量的间隙原子(如碳、氮等)因为畸变发生的应力场与位错产生弹性交互作用, 使它们倾向于分散到位错线四周, 构成偏聚气团, 从而锁定位错。此时位错对磁畴翻转的阻碍作用最为强烈, 产生的噪声信号峰值最大; 当外应力继续增大, 以位错、位错缠结以及位错胞形式出现的钉扎点成幂次数地迅速增加。强烈的钉扎作用使磁畴的有序化运动停止, 导致噪声的峰值不再增加, 反而略小于未拉伸时产生的噪声的峰值, 直至试件断裂。

3 结论

(1) MBN 信号峰值与激励信号的波形、频率和电压都有关系。对数据进行比较可以发现, 正弦波对信号峰值的影响要优于三角波, 因此可以选用正弦波作为激励波形; 激励信号的电压与信号峰值呈正相关关系, 参考信噪比和峰宽比, 优先选用 4 V 电压; 在 0~50 Hz 之间, 信号峰值随激励信号频率的增加而增加, 最后趋于平缓, 参考峰宽比, 优先选用 35 Hz。因此, 选用电压 4 V, 频率 35 Hz 的正弦波作为激励信号, 具有信号特征明显, 信噪比高等优势。

(2) 巴克豪森信号峰值随拉应力的增加, 先增大后减小, 并在屈服点附近达到最大值。在弹性阶段, 未发生明显的变形, 此时可以参照 Gauss Amp 函数的非线性拟合曲线进行评估; 在塑性阶段, 试件开始发生塑性变形, 且变形程度逐渐增加, 此时可以参照 Log Normal 函数的非线性拟合曲线进行评估。弹性阶段和塑性阶段非线性拟合曲线的相关度为 0.999 93 和 0.995 39, 拟合精度较高, 达到误差指标的要求, 上述研究表明巴克豪森信号峰值与拉应

力有良好的相关性。

参考文献:

- [1] SRIDHARAN U, BEDEKAR V, KOLARITS F M. A functional approach to integrating grinding temperature modeling and Barkhausen noise analysis for prediction of surface integrity in bearing steels[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1):333-336.
- [2] DING S, TIAN G Y, DOBMANN G, et al. Analysis of domain wall dynamics based on skewness of magnetic Barkhausen noise for applied stress determination[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2017, 421:225-229.
- [3] SORSA A, LEIVISKÄ 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(1):100-106.
- [4] 尹何迟, 陈立功, 张光业, 等. 磁巴克豪森残余应力测量技术在热处理工艺评估中的应用[J]. 热处理, 2008, 23(2):17-20.
- [5] 任吉林, 陈曦, 罗声彩, 等. 高周疲劳损伤的磁记忆二维检测研究[J]. 航空学报, 2012, 33(6):1147-1155.
- [6] MIESOWICZ K, STASZEWSKI W J, KORBIEL T. Analysis of Barkhausen noise using wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83:109-116.
- [7] 林家春, 张凌浩, 石照耀. 锥齿轮齿面磨削烧伤自动检测装置设计[J]. 仪器仪表学报, 2017(5):1176-1183.
- [8] 王东升. 基于铁磁材料力-磁效应的磁记忆方法检测机理的基础性研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2006.
- [9] 庞娜, 程德福, 王言章, 等. 时间差型磁通门敏感单元巴克豪森噪声处理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11):2594-2601.
- [10] 殷莎, 肖昌汉, 周国华. 某型船钢拉应力与磁场关系试验[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(3):104-107.
- [11] KAHROBAEE S, HEJAZI T H. A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2017, 433:131-140.
- [12] 朱晓雪, 业成, 章彬斌. 基于巴克豪森技术的压力管道表面应力检测[J]. 中国特种设备安全, 2015(10):45-48.

“复合材料无损检测技术新进展”专题征稿启事

复合材料广泛应用于航空、航天、汽车等领域,复合材料的无损检测技术也得到了快速的发展。《无损检测》期刊拟于2018年第8期组织“复合材料无损检测技术新进展”专题。专题主要报道我国复合材料无损检测技术的新进展,包括超声、射线、剪切热斑成像、声发射等,以反映我国复合材料无损检测技术在检测方法与技术研究、仪器设备研制与生产、标准制定与人员培训等方面的成绩与特色,并对其发展趋势进行展望。

现特向行业内相关专家、学者及工程检测人员征稿,征稿内容包括但不限于以下内容,欢迎大家踊跃投稿!

征稿内容

- (1) 复合材料无损检测技术的检测方法与技术研究现状;
- (2) 复合材料无损检测技术的发展趋势与发展瓶颈;
- (3) 复合材料无损检测技术的工程应用;

- (4) 复合材料检测仪器与设备的研制与应用;
- (5) 相关标准、规范的制定及人员培训进展;
- (6) 其他相关内容。

征稿要求

论文要求:综述性文章要求能总结上述领域的研究现状、评价研究进展、提出前瞻性的发展方向;研究性文章要求能反映上述领域的最新研究成果;应用性文章要求能注重技术手段、方法新颖、内容清晰,具有实际推广价值。

论文格式 请参考我刊已刊出文章或“征稿简则”。

提交方式 请登录“材料与测试网”www.mat-test.com,选择“在线投审稿”“《无损检测》”“作者投稿”入口。另请在投稿时于文题处注明“专题”字样,以便快速处理该专题稿件。

截稿日期 2018年5月30日。

《无损检测》编辑部

2017年12月