DOI: 10.3901/JME.2019.18.015

基于磁巴克豪森噪声的 S136 钢表面硬度 定量预测模型对比*

何存富 蔡燕超 刘秀成 吴 斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 表面硬度是铁磁性材料制造质量评价的重要指标, 其无损定量检测是该领域的研究热点。为将磁巴克豪森噪声技术用于 S136 表面硬度的无损定量检测, 利用实验室研制的磁巴克豪森噪声检测装置对 60 块具有不同表面硬度的 S136 试件进行重复性测试, 统计测得多项磁参量的变异系数, 结果表明检测装置具有良好的重复检测精度。为实现表面硬度的磁学定量表征, 分析磁巴克豪森噪声和切向磁场强度检测信号的 6 项特征磁参量与硬度的关系, 重点对比研究基于一元、多元线性回归和 BP 神经网络模型的表面硬度定量预测方法。研究结果显示: 采用 6 项磁参量作为输入的 BP 神经网络模型对表面硬度的预测精度最高, 对 300 个案例的平均预测误差仅为 2.14%, 最大误差约为 11.74%, 274 个案例的预测误差小于 5.00%。研究成果为实现钢板表面硬度的磁巴克豪森噪声无损定量检测提供了方法借鉴。

关键词: 巴克豪森噪声; 表面硬度; BP 神经网络; 定量预测

中图分类号: TH878

Comparative of Models for Quantitative Prediction of Surface Hardness in S136 Steel Based on Magnetic Barkhausen Noise

HE Cunfu CAI Yanchao LIU Xiucheng WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: The surface hardness is important index for the manufacturing quality evaluation of ferromagnetic materials and the non-destructively quantitative testing of surface hardness is one of the hot topics in the field. Magnetic Barkhausen noise (MBN) measurement technique is applied for quantitative evaluation of surface hardness in S136 steel. A self-developed device is used to conduct MBN measurements in sixty specimens of different surface hardness. The coefficient of variation of the repeated measured magnetic parameters is analyzed to show that the device has good repeated accuracy for MBN measurements. To achieve quantitative characterization of the surface hardness using magnetic parameters, the dependency of the surface hardness on six parameters extracted from the measured MBN and tangential magnetic field signals is individually analyzed. More importantly, comparative study is performed among the simple linear regression model, multiple linear regression model and BP neural network model to evaluate their accuracy in surface hardness prediction. The results show that the BP neural network model employing six magnetic parameters as inputs has highest accuracy in surface hardness prediction. A total of 300 cases are investigated and it is found that the average prediction error is only around 2.14% and the maximum error is about 11.74%, and the prediction errors out of 274 of 300 cases are less than 5.00%. A reference is provided for realizing the nondestructive quantitative detection of steel plate surface hardness based on magnetic Buckhausen noise method.

Key words: Barkhausen noise; surface hardness; BP neural network; quantitative prediction

0 前言

硬度是材料弹塑性、强度等力学性能的综合指

标。采用一定的载荷将规定的压头压入被测材料, 以材料表面局部塑性变形的大小评价材料的硬度是材料力学性能评价的重要手段^[1]。但压入硬度测试对被测材料具有一定的破坏性, 应用于零部件检测时只能以抽样测试结果代替整体硬度分布。发展快速、无损的硬度测试方法, 将有助于零部件表面硬

* 国家自然科学基金资助项目(11527801,11402008)。20181109 收到初稿, 20190519 收到修改稿

度分布的综合评价。

铁磁性材料的表面硬度主要由微观结构决定。诸多研究表明,磁巴克豪森磁性材料的表面硬度主要由微观结构决定。诸多研究表明,磁巴克豪森噪声信号(Magnetic Barkhausen noise, MBN)对材料微观结构变化敏感^[2-3]。因此,已有学者提出利用 MBN 信号特征参量对材料表面硬度进行无损表征。文献[4-5]表明,MBN 峰值以及方均根值随着硬度增加呈现减小趋势,MBN 蝶形曲线峰值对应的切向磁场强度与表面硬度呈现正相关关系。

上述研究结论显示,单一 MBN 特征参量与硬度间并非存在良好的线性关系,主要原因是 MBN 受微观结构和残余应力等多因素影响^[6-7]。目前,尚没有合理的理论模型,直接描述 MBN 特征参量与表面硬度的内在关联。因此,采用单一 MBN 特征参量对表面硬度进行表征而发展出的无损检测方法的精度有限^[8]。

为提升表面硬度的磁巴克豪森噪声检测精度,本文在 S136 模具钢中开展大量标定试验测试,首先分析单个磁参量与材料表面硬度的关系,其次融合磁巴克豪森噪声检测中获取的多项磁参量,探究基于多元线性回归分析和神经网络技术的表面硬度定量预测新方法。

1 磁巴克豪森噪声检测装置

采用图 1 所示的实验装置检测钢板试件中的 MBN 信号。传感器采用了 U 型铁氧体磁芯,其顶端绕制有励磁线圈,以形成励磁磁路。磁芯横截面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,励磁线圈由直径 0.35 mm 的铜质漆包线绕制 5 层而成,总匝数为 200。

图 1 磁巴克豪森噪声检测装置示意图

进行 MBN 检测时,信号激励板卡输出频率 12 Hz 、峰峰值 8 V 的正弦波,经过 KEPCO BOP-400L 双极性电源进行功率放大后通入励磁线圈,以提供交变磁场对钢板试件进行磁化。传感器中的霍尔元

件(霍尼韦尔 SS39E,动态工作范围 $\pm 1\,000\text{ Gs}$,灵敏度为 1.4 mV/Gs)和感应线圈分别检测试件表面的切向磁场强度时变信号 $H(t)$ 和磁巴克豪森噪声信号 $\text{MBN}(t)$ 。霍尔元件相对试件表面的提离距离为 2 mm ,感应线圈紧贴试件表面。感应线圈的内、外径分别为 2 mm 、 6 mm ,高度为 9 mm ,匝数为 800。实验信号通过 NI-PXIe 多通道采集卡进行采集,由上位机中的 LabVIEW 软件进行控制,对信号 $H(t)$ 和 $\text{MBN}(t)$ 的采样率保持为 1 MHz 。

2 试件制备与试验测试

2.1 试件制备

从同一 S136 模具钢板中,沿同一方向共切割出 60 个尺寸为 $200\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的试件。首先,对所有试件进行淬火处理,其工艺为:加热 60 min ,升温至 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保温 60 min ;继续加热 30 min ,升温至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温 90 min ;继续加热 40 min ,升温至 $1\,030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保温 150 min ,随后经氮气冷却 25 min 。其次,将试件分成 12 批(每批 5 个试件)先后进行 210 min 的回火处理。通过控制回火温度(处于 $180\sim 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内),调整试件的表面硬度。

在完成对所有试件的磁巴克豪森噪声检测后,采用显微硬度计(HV30,载荷为 30 kg)测试试件表面维氏硬度值,结果如图 2 所示。可以看出,试件的表面硬度在 $250\sim 600\text{ HV}$ 范围内波动,同一批次 5 个试件的表面硬度较为接近但也存在轻微差异,这为后续预测模型的精度评价提供了充分的数据。

图 2 试件回火温度与表面硬度测试结果

2.2 磁巴克豪森噪声检测及信号分析

为检验装置对 MBN 信号的重复检测性能,对所有试件进行多次试验。对于单一试件而言,在同一位置分 3 天进行重复测试,每次测试时累计进行

5 次 MBN 检测。试件测试前均采用退磁器进行退磁处理,并用高斯计测量表面剩余磁场强度,以保证试件初始磁状态保持一致。所有试件测试完成后,共获得 $3 \times 5 \times 60 = 900$ 组 MBN 信号。

铁磁性材料的磁化过程具有明显的非线性磁滞特性,当其置于正弦励磁磁场时,试件表面的切向磁场强度时变信号 $H(t)$ 并非标准正弦信号而出现畸变。图 3a 给出了不同硬度试件中测得的时域信号 $H(t)$ 。为评价 $H(t)$ 的畸变程度,对图 3a 所示信号进行频谱分析(结果见图 3b)。硬度的改变导致基频幅值 A_1 和奇次谐波幅值 A_3 、 A_5 、 A_7 均产生变化。统计奇次谐波幅值和 $UHS = A_1 + A_3 + A_5 + A_7$,以及总谐波畸变率 $K^{[9]}$,表达式为

$$K = \sqrt{\frac{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2}{A_1^2}} \quad (1)$$

图3 不同硬度试件的切向磁场强度信号和频谱图

不同硬度试件中计算得到的 UHS 和 K 值不同,例如对于硬度为 278 HV、412 HV 和 585 HV 的试件,统计的 K 值分别为 0.346、0.329、0.252。后续研究中将 UHS 和 K 值作为硬度表征的候选磁参量。

利用 4 阶巴特沃斯数字滤波器对 MBN 检测线圈输出电压信号进行带通滤波(30~90 kHz)处理,得到图 4a 所示典型的 MBN 信号。对图 4a 的时域信号进行滑动平均(滑动步长为 400 个点,连续滑动 6 次)处理计算得到 MBN 包络,其随切向磁场强度

的变化轨迹为图 4b 的蝶形曲线。可以看出,蝶形曲线的形状受硬度影响,可以提取蝶形曲线峰值 $M_{\max}$ 、峰值对应的切向磁场强度 H_{cm} 、半峰宽 $DH50M$ 和剩磁峰值 M_R 用于硬度表征。

图4 不同硬度试件的磁巴克豪森噪声信号和蝶形曲线

为分析重复测试所得磁参量的分散性,选取某一试件中获得共 15 组 MBN 信号,进行磁参量提取,结果如图 5 所示。可以看出,3 天重复测试所得的磁参量 $M_{\max}$ 和 K 数值基本接近。统计所有 6 个磁参量重复测试结果的变异系数 C_v ,结果见表 1。

图5 磁参量 $M_{\max}$ 和 K 的重复测试结果

所有6个磁参量的变异系数均小于2.70%。这表明本文采用的试验装置可以重复、高精度的对试件进行MBN检测,获得的900组试验数据可以用于后续硬度的定量预测模型的建立。

表1 各磁参量的特性统计结果

磁参量	变异系数 C_v (%)	与硬度的拟合确定系数 R^2
蝶形曲线峰值 $M_{\max}$	2.70	0.849
切向磁场强度 H_{cm}	1.96	0.942
剩余峰值 M_R	2.25	0.638
半峰宽 $DH50M$	1.41	0.649
奇次谐波幅值和 UHS	2.08	0.936
磁参量 K	0.45	0.871

3 单一参量与表面硬度的关系

首先,采用简单的线性拟合方法,分析所有6个磁参量与表面硬度的关系(图6),并统计各磁参量与硬度间的线性拟合确定系数 R^2 ,列于表1。

可以看出:随表面硬度增加,磁参量 $M_{\max}$ 、 M_R 和 K 均呈下降趋势, H_{cm} 、 $DH50M$ 和 UHS 的变化规律相反。磁参量 H_{cm} 和 UHS 对应的 $R^2 > 0.90$,预示着这两个磁参量与硬度间存在良好的线性关系。

(a) 磁参量 $M_{\max}$ 和 H_{cm} 与表面硬度的关系

(b) 磁参量 M_R 和 $DH50M$ 与表面硬度的关系

(c) 磁参量 K 和 UHS 与表面硬度的关系

图6 6个磁参量与表面硬度的关系

选择 H_{cm} 分析结果,评价单一磁参量对表面硬度的定量表征能力。利用前两天的测试结果建立磁参量 H_{cm} 和硬度的线性回归方程

$$HV = 0.038H_{\text{cm}} + 180.400 \quad (2)$$

将第3天测得的共300组数据(案例)代入式(2),预测试件的表面硬度并计算预测误差。

误差分析结果如图7所示。经统计,对300个案例的平均预测误差约为5.67%,共有160个案例的硬度预测误差处于 $\pm 5.00\%$ 范围。60个案例的预测误差大于10.00%,主要来源于表面硬度250~350 HV范围内的试件。这可能是因为在这个硬度范围内的各个磁参量变化量较小,模型精度不够造成的。

图7 单一参量的预测结果

4 融合多参量的硬度定量预测模型

为进一步提升表面硬度的测量精度,尝试利用多元线性回归和BP神经网络两种技术建立表面硬度的MBN定量预测模型。在建模过程中,仍然采用前两天测得的600组数据用于模型训练,第3天测得的300组数据(案例)用于模型预测误差分析。

4.1 多元线性回归预测模型

基于逐步回归方法^[10-11], 利用 F 检验从 6 个磁参量中筛选出对硬度影响显著的特征参量。按照每个待选变量的重要程度(以显著水平表示), 将变量逐次引入回归方程, 输入参量的显著水平分析结果见表 2。进入模型的参量显著水平设置为小于 0.1, 经过 5 次逐步回归分析, 结果表明: 只有参数 $M_{\max}$ 、 H_{cm} 、 M_R 、 UHS 和 K 的显著水平小于 0.1, 可作为多元线性回归模型的输入。

表 2 输入参数的显著水平分析结果

变量	磁参量	显著水平	变量	磁参量	显著水平
x_1	蝶形曲线峰值 $M_{\max}$	6.330×10^{-26}	x_4	半峰宽 $DH50M$	0.939
x_2	切向磁场强度 H_{cm}	9.450×10^{-36}	x_5	奇次谐波幅值和 UHS	1.280×10^{-41}
x_3	剩余峰值 M_R	1.290×10^{-4}	x_6	谐波畸变率 K	5.450×10^{-8}

最终回归分析得到的五元线性回归方程为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_5x_5 + b_6x_6 \quad (3)$$

式中, $b_0 = -39.376$; $b_1 = -0.975$; $b_2 = 0.024$; $b_3 = 0.507$; $b_5 = 0.032$; $b_6 = 642.233$ 。该方程的线性拟合确定系数为 $R^2 = 0.978$, 大于表 2 所列所有单因素分析结果。这预示着相比式(2)、(3)用于硬度测量时的精度更高。

图 8a 给出了训练数据和回归分析得到的模型,

(a) 多元线性回归模型训练结果

(b) 多元线性模型预测结果

图 8 多元线性回归模型训练结果和预测结果

以及将校验数据输入模型预测得到的表面硬度值。预测的误差分析结果见图 8b, 300 个校验案例中有 214 个案例的预测误差小于 5.00%, 只有 16 个案例的预测误差大于 10.00%。

4.2 BP 神经网络预测模型

输入参数的选取直接影响 BP 神经网络模型的性能。利用平均影响值(Mean impact value, MIV)方法确定输入神经元对输出神经元的影响权重, 以对输入参数进行筛选。

针对本文研究的 6 项磁参量, 在进行 BP 神经网络模型训练前, 计算各磁参量的 MIV 值, 结果如图 9 所示。首先采用影响权重值最高的参量作为模型输入, 训练得到预测模型; 其次, 依序将其他参量逐一加入模型的输入节点, 同样建立模型并对模型精度进行评价^[12-13]。

图 9 6 个磁参量的 MIV 值

具有不同数量输入参量训练得到的模型评价结果见表 3。对比可以发现, 当所有 6 项磁参量均作为 BP 模型输入时, 真实硬度值与预测硬度值之间的方均根误差最小, 600 组数据中有 592 组数据的预测误差小于 5.00%。因此, 选择将 6 个参量作为 BP 神经网络模型输入, 训练得到的结果如图 10a 所示。将第 3 天测得的多项磁参量输入训练得到的 BP 神经网络模型, 对表面硬度的预测误差分析结果见图 10b。300 个案例中有 274 个案例的预测误差处于 $\pm 5.00\%$ 以内, 仅有 3 个案例的预测误差大于 10.00%。

表 3 不同参数个数的 BP 神经网络训练结果

参数个数	方均根误差	训练误差<5%的点数
6	5.04	592
5	5.73	582
4	6.00	582
3	8.30	555
2	13.25	477
1	36.31	273

图 10 BP 神经网络模型训练结果和预测结果

5 三种模型的预测精度对比

对以上三种模型的表面硬度预测精度进行对比分析。从表 4 所列统计结果可以看出, 利用单一参量进行硬度预测的一元线性回归方程拟合确定系数最低($R^2=0.942$), 多元线性回归方程和 BP 神经网络模型的线性拟合确定系数分别为 $R^2=0.978$ 和 $R^2=0.993$ 。

表 4 3 种模型的预测结果统计

方法	拟合系数	平均误差(%)	最大误差(%)
单一变量法	0.942	5.672	15.142
多元线性回归	0.978	3.705	14.344
BP 神经网络	0.993	2.138	11.743

相比一元和多元线性回归模型, BP 神经网络模型对硬度的预测精度最高, 其中平均误差约为 2.14%, 最大误差约为 11.74%。

6 结论

(1) 随 S136 钢表面硬度增加, 从磁巴克豪森噪

声检测信号中提取的特征参量 $M_{\max}$ 、 M_R 和 K 总体呈下降趋势, 而特征参数 H_{cm} 、 $DH50M$ 和 UHS 呈上升趋势。其中 H_{cm} 和 UHS 与表面硬度间存在良好线性关系。

(2) 三类模型对硬度的定量预测精度从高到低排序, 依次为: BP 神经网络模型, 多元线性回归模型和一元线性回归模型。

(3) BP 神经网络和多元线性回归模型对硬度的定量预测精度与模型输入参数有关, 分别采用 MIV 和 F 检验, 可以选取最佳的输入参数。

参 考 文 献

- [1] 赵洪刚, 高金贵, 孟祥文, 等. 一种提高布氏硬度测量精度的方法[J]. 北华大学学报, 2010, 11(3): 274-276. ZHAO Honggang, GAO Jingui, MENG Xiangwen, et al. One method of improving the accuracy of Brinell hardness measurement[J]. Journal of Beihua University, 2010, 11(3): 274-276.
- [2] RABUNG M, ALTPETER I, BOLLER C, et al. Non-destructive evaluation of the micro residual stresses of IIIrd order by using micro magnetic methods[J]. NDT & E International, 2014, 63(4): 7-10.
- [3] ZHANG S, SHI X, UDPA L, et al. Micromagnetic measurement for characterization of ferromagnetic materials' microstructural properties[J]. Aip Advances, 2018, 8(5): 056614.
- [4] FRANCO FA, GONZÁLEZ M F R, CAMPOS M F D, et al. Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(1): 93-103.
- [5] LUO X, WANG Y, WANG L, et al. Non-destructive hardness measurement of hot-stamped high strength steel sheets based on magnetic Barkhausen noise [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 1768-1773.
- [6] MOORTHY V, SHAW B A, EVANS J T. Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis[J]. NDT&E International, 2003, 36(1): 43-49.
- [7] SANTA-AHO S, VIPPOLA M, SORSA A. Utilization of Barkhausen noise magnetizing sweeps for case-depth detection from hardened steel[J]. NDT&E International, 2012, 52: 95-102.
- [8] PÉREZ-BENÍTEZ J A, ESPINA-HERNÁNDEZ J H, MARTÍNEZ-ORTIZ P. Unwrapping the influence of multiple parameters on the magnetic Barkhausen noise signal using self-organizing maps[J]. NDT&E

- International, 2013, 54: 166-170.
- [9] 吴斌, 苏楠, 刘秀成, 等. 基于谐波分析的磁弹拉力测量改进方法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 54-60. WU Bin, SU Nan, LIU Xiucheng, et al. Improved method for elastomagnetic effect based tension measurement using harmonic analysis techniques[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 54-60.
- [10] SORSA A, LEIVISKÄ K, SANTA-AHO S, et al. A data-based modelling scheme for estimating residual stress from Barkhausen noise measurements[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(5): 278-283.
- [11] SORSA A, LEIVISKÄ K. Comparison of feature selection methods applied to Barkhausen noise data set[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 14699-14704.
- [12] 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.
- [13] WANG P, ZHU L, ZHU Q, et al. An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory[J]. NDT & E International, 2013, 55(3): 9-14.
-
- 作者简介: 何存富, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为无损检测新技术。
E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn
- 蔡燕超, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为微磁无损检测技术。
E-mail: chaoyanc@sina.com
- 刘秀成(通信作者), 男, 1984 年出生, 教授。主要研究方向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。
E-mail: xiuchliu@bjut.edu.cn