

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.007

# 基于 MBN 的酸洗钢再结晶率和屈服强度表征研究

连承拯, 王平

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 微观组织结构与屈服强度是酸洗钢材料的重要质量检测指标, 工业上一般通过破坏性试验来确定。磁巴克豪森噪声检测技术能够反映铁磁性材料的电磁特性, 而微观组织结构(例如再结晶率、晶粒尺寸和位错密度等)决定了材料的电磁特性。利用磁巴克豪森技术对某钢厂的酸洗钢试样进行电磁无损检测, 通过改进巴克豪森检测系统, 并结合 BP 神经网络, 实现酸洗钢材料的再结晶率和屈服强度的表征。

**关键词:** 磁巴克豪森噪声; 微观组织结构; 再结晶; 屈服强度

**中图分类号:** TB303.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0036-04

## Characterization Reserch of Recrystallization Rate and Yield Strength of Pickling Steel Based on MBN

LIAN Chengzheng, WANG Ping

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Microstructure and yield strength, the important quality inspection indexes of pickling steel materials, are generally determined by destructive tests in industry. Magnetic Barkhausen noise detection technology can reflect the electromagnetic properties of ferromagnetic materials, while the microstructure (such as recrystallization rate, grain size and dislocation density, etc.) determines the electromagnetic properties of materials. This study carries out electromagnetic non-destructive testing of pickling steel samples in a steel plant by magnetic Barkhausen technology. By improving the Barkhausen detection system and combining with BP neural network, the recrystallization degree and yield strength of pickling steel materials are characterized.

**Keywords:** magnetic Barkhausen noise; microstructure; recrystallization; yield strength

### 0 引言

铁磁性材料在现代工业生产中的地位十分重要, 酸洗钢在汽车、家用电器和机械制造等行业应用广泛。为保证用户端的产品质量, 需要在钢板出厂时对屈服强度进行检测。钢板屈服强度与其生产工艺有关, 不同生产工艺会导致钢板微观组织结构不同, 并决定屈服强度的差异。

再结晶是一种通过退火过程形成无畸变新晶粒的现象, 消除冷变形或热加工引起的晶粒变形和位错堆积。在再结晶期间, 会重新形成新的各向同性的晶粒, 晶界的运动消除了原有的晶粒结构, 形成了相对更稳定的再结晶晶粒, 同时降低了金属材料的屈服强度和抗拉强度, 提高了材料断裂延伸率。通过再结晶率来描述再结晶晶粒所占比例, 即新生成的再结晶晶粒占原有晶粒的百分比<sup>[1]</sup>。

传统的酸洗钢微观组织结构和力学性能的检

测方法是破坏性试验, 不仅成本高, 而且耗时长。本研究利用磁巴克豪森噪声(magnetic barkhausen noise, MBN)技术对酸洗钢的再结晶率和屈服强度进行表征, 该技术是一种电磁无损检测手段, 可用于不同条件下的铁磁性材料微观结构和性能表征, 如疲劳、辐照、应力和热处理等<sup>[2-10]</sup>。

本研究基于巴克豪森检测原理, 改进了巴克豪森检测系统, 研究分析了酸洗钢再结晶率对巴克豪森效应的影响, 并建立了酸洗钢再结晶率和屈服强度的表征模型。

### 1 原理与检测系统

磁巴克豪森噪声原理简述如下<sup>[11-15]</sup>: 铁磁性材料在交变磁场的磁化过程中, 其畴壁会产生位移, 由于势垒(析出物、晶界和夹杂物等)的存在, 发生钉扎效应, 并导致磁畴的不连续运动。而磁畴的不连续运动, 即巴克豪森跳跃, 是被测材料产生脉冲信号的原因。这种现象是由磁畴的不可

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFC3005000); 江苏省重点研发计划项目(BE2021621)

**第一作者简介:** 连承拯(1999—), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 研究方向为无损检测, lianchengzheng@nuaa.edu.cn。

逆运动引起的,称为磁巴克豪森效应;利用放置于被测材料表面的采集线圈能够以电压脉冲形式采集这种噪声信号。

由于巴克豪森信号在 1~100 kHz 范围内均含有丰富的信息,根据香农采样定理,采样频率不能低于 200 kHz。现有巴克豪森检测设备大多是利用采集卡直接对放大滤波后的信号进行采集处理,但随着采样频率的提高势必会增加设备成本。除此之外,更大的问题在于如何快速处理如此庞大的数据。为此,本研究在原有设备的基础上,使用 LTC5507 功率检波芯片提取巴克豪森信号的包络线信号。LTC5507 芯片是一款低功耗、高精度并且带有温度补偿的包络检波器,其内部的肖特基二极管峰值检波器最高能够处理 1GHz 的信号。该电路设计简单,由外接电容 C2 调节输入频率范围,图 1 为检波电路设计图。

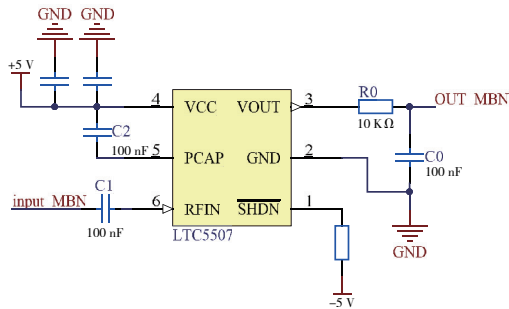


图 1 检波电路

利用 100 MHz 采样率的示波器采集检波前后的两路信号进行对比,如图 2 所示。由图 2 可以看出该检波电路可以将原始 MBN 信号的包络检出。

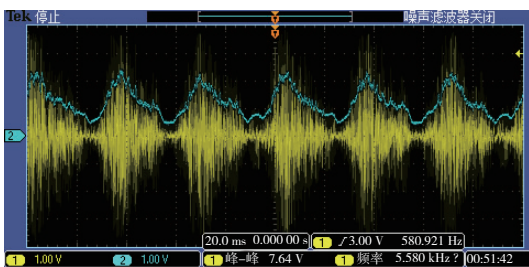


图 2 MBN 信号检波前后信号对比图

## 2 试样制备与数据获取

实验所用的酸洗钢试样来自国内某大型钢厂,总计 15 块试样。为获得试样准确的屈服强度值,在实验室环境下使用德国 ZWICK Z100 拉伸机进行拉伸实验,其拉伸试样加工尺寸如图 3

所示。

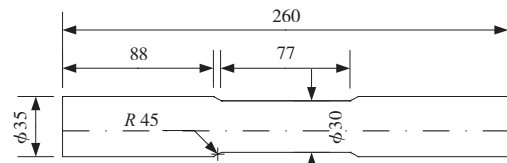


图 3 拉伸试样尺寸图

对其中 6 块酸洗钢使用扫描电子显微镜设备进行 EBSD 分析,获得再结晶率图,分析试样的再结晶所占分数。

为了消除残余应力对巴克豪森电磁信号的影响,所有试样放置于 500℃~600℃ 的退火炉中退火 4~5 h。在进行电磁无损检测时,使传感器磁化方向平行于钢板轧制方向<sup>[16-17]</sup>。对每块试样检测 60 s,获取巴克豪森包络信号,提取巴克豪森特征参数。

本研究对包络信号进行分析,提取的巴克豪森信号典型特征有方均根、平均值、峰峰值、峰间距、25%~75%峰峰值宽度、交点幅值和矫顽磁场,共 9 个特征<sup>[18-19]</sup>。

使用相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) 对不同特征的数据稳定性进行评价<sup>[20]</sup>,其计算公式如下所示。

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N$  为测量次数; $x_i$  为第  $i$  次测量的数值; $\bar{x}$  为  $N$  次测量的平均值。

通过计算特征参数的 RSD 对该特征的稳定性进行评价,保留 RSD 小于 5% 的特征,剔除稳定性较差的特征,最终剔除了 50% 和 75% 峰峰值宽度,保留其它 7 个特征。

## 3 实验研究与结果分析

### 3.1 巴克豪森效应与再结晶率的关系分析

巴克豪森特征与再结晶率的关系如图 4 所示。由图 4 可以看出巴克豪森部分特征与再结晶率存在单调关系。磁巴克豪森噪声强度与钉扎效应相关,再结晶率越高,晶粒的内部缺陷越少,对磁畴不可逆运动的阻碍降低,减弱了钉扎效应,则信号达到峰值时的矫顽磁场与峰峰值均会降低。

对 MBN 信号进行积分,得到不同再结晶率下

的磁滞回线,可用于描述材料磁滞效应的强弱,如图5所示。由图5可以看出随着再结晶率的增大,磁滞回线的矫顽磁场和剩余磁场强度均减小,被测试样的磁滞效应减弱,磁畴的不可逆运动阻碍降低。

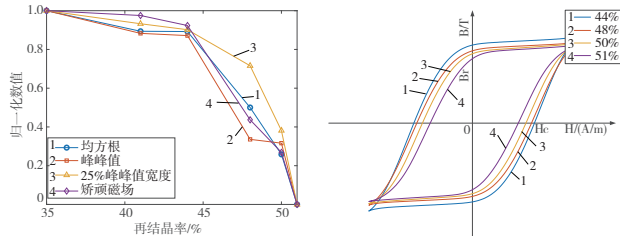


图4 巴克豪森特征与再结晶率的关系图

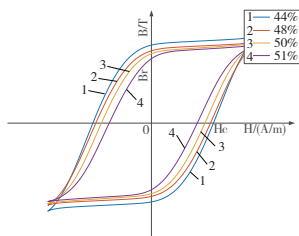


图5 不同再结晶率时的磁滞回线

### 3.2 表征模型与评价指标

由于巴克豪森特征与再结晶率之间的关系相对清晰,但其不具备明显的线性关系。本研究采用反向传播算法(back propagation, BP)神经网络方法,建立基于巴克豪森特征的再结晶率表征模型,并进一步建立基于巴克豪森特征的酸洗钢屈服强度表征模型。

BP神经网络是利用误差反向传播算法训练的多层前馈神经网络<sup>[21-22]</sup>。BP网络结构由多个网络层组成,每层都有一定数量的神经元。本研究采用双隐含层神经网络,对误差不断修正,提高表征模型的精度。

在训练模型之前,为了保证收敛速度和网络性能,需要对样本数据进行归一化处理。随机选取70%的样本数据作为训练集,而剩余的30%作为测试集。

为了评价模型的表征效果,本文采用方均根误差(root mean square error, RMSE)和合格率 $Q_5$ 、 $Q_{10}$ 对表征模型进行评价,其计算公式分别如式(2)~式(4)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

$$Q_5 = \frac{N_5}{N} \times 100\% \quad (3)$$

$$Q_{10} = \frac{N_{10}}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $N$ 为样本数量; $y_i$ 为样本真实值; $\hat{y}_i$ 为样本估计值; $N_5$ 和 $N_{10}$ 分别为误差在5%和10%以内的测试样本数量。

### 3.3 表征模型结果

再结晶率表征模型结果如图6所示,模型的方均根误差和合格率 $Q_5$ 、 $Q_{10}$ 分别为2.54、86.43%和98.52%。

一般来说,酸洗钢材料的再结晶率越大,其屈服强度越低<sup>[23]</sup>。以再结晶率作为巴克豪森特征参数表征屈服强度的桥梁,建立基于巴克豪森特征参数的屈服强度表征模型是可行的。屈服强度表征模型结果如图7所示,模型的方均根误差和合格率 $Q_5$ 、 $Q_{10}$ 分别为3.89 MPa、98.01%和100%。

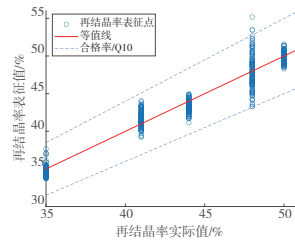


图6 再结晶率模型结果图

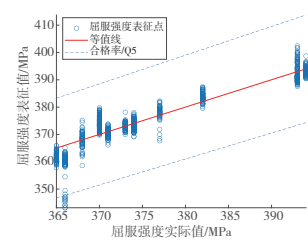


图7 屈服强度模型结果图

## 4 结语

1)为降低采样数据过大导致数据处理缓慢的问题,本研究改进了实验室原有巴克豪森检测系统,设计了巴克豪森噪声信号的检波电路,通过分析包络信号的方法减少采样数据量,提高了检测系统的数据处理与特征提取速度,实现了酸洗钢巴克豪森信号的连续采集与特征获取。

2)建立了基于巴克豪森特征参数的酸洗钢再结晶率与屈服强度的BP神经网络表征模型,在10%误差范围内,合格率分别达到98.52%和100%,实现了酸洗钢再结晶率和屈服强度的电磁无损表征,为酸洗钢再结晶率表征提供了一种可行的方法。

### 参考文献:

- [1] 包永千. 金属学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1986.
- [2] GHANEI S, SAHEB ALAM A, KASHEFI M, et al. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausen noise technique[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 607: 253-260.
- [3] SHENG H W, WANG P, TANG C L, et al. Microstructure and mechanical properties evaluation of automotive plate steel based on micromagnetic NDT technologies[J]. Measurement, 2022, 199: 111459.

- [4] HWANG Y I, KIM Y I, SEO D C, et al. Experimental consideration of conditions for measuring residual stresses of rails using magnetic barkhausen noise method [J]. *Materials*, 2021, 14(18):5374.
- [5] DI J Y, HE C F, LEE Y C, et al. Evaluation of the stress gradient of the superficial layer in ferromagnetic components based on sub-band energy of magnetic Barkhausen noise [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 37(1):41-55.
- [6] HANG C, LIU W B, DOBMANN G, et al. Feature extraction and evaluation for quantitative prediction of hardness in bearing steel based on magnetic Barkhausen noise[J]. *NDT & E International*, 2023, 139:102937.
- [7] ZHANG Z Q, SHI P P, GOU X F. Analytical model of magnetic Barkhausen noise testing on surface-modified ferromagnetic plates with stress distributions[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2024, 604:172292.
- [8] ROSKOSZ M, FRYCZOWSKI K, SCHABOWICZ K. Evaluation of ferromagnetic steel hardness based on an analysis of the barkhausen noise number of events[J]. *Materials*, 2020, 13(9):2059.
- [9] 刘柄显, 丁思源, 郑海波. 基于巴克豪森效应预测烧伤齿轮显微组织的变化[J]. *无损检测*, 2019, 41(5):38-43.
- [10] FAGAN P, DUCHARNE B, DANIEL L, et al. Effect of stress on the magnetic Barkhausen noise energy cycles: a route for stress evaluation in ferromagnetic materials[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2022, 278:115650.
- [11] 许多, 朱琦, 张元军, 等. 轴承亚表面白蚀缺陷的检测研究综述[J]. *计量与测试技术*, 2023, 50(4):16-21.
- [12] SHI P P, ZHANG P C, HAO S, et al. Classification and evaluation for nearside/backside defect via magnetic flux leakage: a dual probe design with SVM and PSO intelligence algorithms [J]. *NDT & E International*, 2024, 144:103100.
- [13] LI H, SHI P P, LI X. Machine learning for nonlinear integro-differential equations with degenerate kernel scheme[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2024, 138:108242.
- [14] ROSKOSZ M, FRYCZOWSKI K, TUZ L, et al. Analysis of the possibility of plastic deformation characterisation in X2CrNi18-9 steel using measurements of electromagnetic parameters [J]. *Materials*, 2021, 14(11):2904.
- [15] 崔西明, 邱志鹏, 魏嘉, 等. 基于数据驱动的结构钢表面应力磁巴克豪森噪声表征方法[J]. *航空学报*, 2023, 44(8):427237.
- [16] 吴卿, 谭继东, 郑阳, 等. 磁晶各向异性材料磁巴克豪森噪声的非均匀分布特性研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(3):29-37.
- [17] 王丽婷, 何存富, 刘秀成. 典型材料磁各向异性的磁巴克豪森噪声评估方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(12):173-180.
- [18] LIU X C, ZHANG R H, WU B, et al. Quantitative prediction of surface hardness in 12CrMoV steel plate based on magnetic barkhausen noise and tangential magnetic field measurements [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018, 37(2):38.
- [19] HANG C, LIU W B, DOBMANN G, et al. Abnormal signals elimination in hardness evaluation using barkhausen noise and tangential magnetic field [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42(1):15.
- [20] WANG P, LI Y R, YAO E T, et al. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostriction EMAT and sound velocity[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 555:169375.
- [21] Glorot X, Bordes A, Bengio Y. Deep Sparse Rectifier Neural Networks [C]. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. Fort Lauderdale: PMLR, 2011: 315-323.
- [22] ALSHAMMARI F, PAN J Z. Moving dynamic principal component analysis for non-stationary multivariate time series [J]. *Computational Statistics*, 2021, 36(3):2247-2287.
- [23] 胡进朋, 万德成, 马少康, 等. 临界区退火时间对冷轧中锰钢组织和力学性能的影响[J]. *金属热处理*, 2023, 48(11):96-101.

---

收稿日期:2024-02-05