· 24 ·

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2205599

# 35MnB 合金淬硬层深度的超声无损测量\*

付 磊<sup>1,2</sup> 韩 军<sup>2,3</sup> 龙晋桓<sup>2</sup> 王愉锦<sup>1,2</sup>

(1.福州大学先进制造学院 泉州 362000;2.中国科学院福建物质结构研究所泉州装备制造研究中心 泉州 362000;3.中国科学院大学 北京 100000)

摘 要:针对过渡层较大的感应淬火零件用超声法测量淬硬层深度时,极限硬度点难以准确定位的问题,开展 35MnB 合金淬硬件的淬硬层深度超声测量实验。用小波多分辨率分析(MRA)研究信号在不同分解尺度下的时频特征,分析信号在各频带的能量分布,并探求提取背散射信号的趋势特征计算淬硬层深度的方法。结果表明,背散射信号中的高频振动成分明显,分布无规律且能量较低;趋势特征项随信号振动幅值包络缓慢变化,能量占比高达 96.73%,显著高于其他分解项,高尺度分解下的 MRA 过程实质上滤除了多数与淬硬层深度信息无关的杂波噪声项。基于趋势特征项的实测结果最大平均误差为 0.123 mm,最大重复误差为 6.24%,测量精度以及重复可靠性均显著高于常规超声测量模型,相比于金相法和显微硬度法具有更高效、无损等优势,在工程机械零件的实际测量中具有较好的应用前景。

# Ultrasonic nondestructive testing for the hardened layer depth of induction quenched 35MnB alloy

Fu Lei<sup>1,2</sup> Han Jun<sup>2,3</sup> Long Jinhuan<sup>2</sup> Wang Yujin<sup>1,2</sup>

 (1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362000, China; 2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000, China;
 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China)

**Abstract:** The hardened layer depth (HLD) of metal parts is one of the important factors to determine its wear resistance and fatigue strength. Ultrasonic backscatter method can realize nondestructive testing for HLD. However, for those induction hardened parts with large transition layer, it is difficult to accurately locate the limit hardness point, which leads to inaccurate testing results. In this work, HLD measurement experiments of induction quenched 35MnB alloy were carried out. The wavelet multi-resolution analysis (MRA) was employed to find the characteristics of the time-frequency domain of ultrasonic backscattering signals at different decomposition scales. The energy distribution in each frequency band was analyzed, and the trend characteristics of ultrasonic backscattering signals were extracted to locate the limit hardness point in transition layer of the induction quenched samples. The result shows that the original backscattering signals contain obvious rapidly-oscillating components with low energy and irregular distribution. The signal trend varies slowly with the amplitude of the oscillation with energy portion as high as 96.73%, which is significantly higher than other decomposition terms. The MRA process essentially filters out most of the clutter noise components irrelative to the depth information of the hardened layer. The actual measurement result shows that the maximum average error of this method is 0.123 mm, the maximum repeatability error is 6.24%, showing that the present method achieves high accuracy and repetitive reliability. Compared with metallography and microhardness, this method is more efficient and nondestructive, which shows a good practical application prospect.

Keywords: 35MnB alloy; hardened layer depth; ultrasonic testing; backscattering signal; multi-resonlution analysis; signal trend feature

收稿日期: 2022-06-18 Received Date: 2022-06-18

<sup>\*</sup>基金项目:中国科学院对外重点合作项目(121836KYSB20180062)、科技厅-福建省中科院 STS 计划配套项目(2021T3060)、泉州市科技计划项目(2021C063L)资助

### 0 引 言

35MnB 合金结构钢具有良好的淬透性以及热处理加 工性能,广泛用于工程机械履带底盘件中,如齿块、支重 轮轮体和履带链轨节等耐磨件<sup>[1]</sup>。表面感应淬火硬化处 理是提高履带底盘零件耐磨性以及疲劳强度的有效方 法,淬硬层深度是其中一项重要指标,合适的淬硬层深度 搭配适当的基部韧性能使零件发挥更好的综合性能<sup>[2]</sup>。 因此,合理控制淬硬层深度是 35MnB 合金感应淬火热处 理工艺的关键,而淬硬层深度的高效、高精度检测工作又 是其中的基础和前提。

目前,一般工业生产用金相法、显微硬度法随机抽取 零件进行淬硬层深度检测来确保感应淬火热处理工艺的 质量。然而,这种方法不仅损坏零件、耗费时间、而且成 本也很高。超声背散射法是新兴的无损测量淬硬层深度 的方法,超声波在均匀固体介质中以相同的方向传播,当 遇到其他物体、空气、液体或者不同材质的固体界面时, 声波会发生散射、衍射或折射等现象。35MnB 合金的微 观组织包含奥氏体、铁素体、珠光体等多种粗糙晶粒,经 过高频感应淬火后会在表层产生具有致密晶粒的马氏体 淬硬层[3]。高频的超声波可以无阻碍地穿过致密晶粒, 但是却难以穿过具有粗糙晶粒的基体材料,并因此在两 者交界处发生散射,形成超声背散射效应。通过激发超 声波脉冲,采集零件内部的超声背向散射信号,计算超声 波从进入零件表面到有效硬化层与基材分界面的时间, 结合零件的超声波声速,可简略地代替金相法和显微硬 度法实现淬硬层深度的无损测量。该领域的全球研究表 明,针对淬透性好,过渡层小的合金钢零件,德国弗劳恩 霍夫无损检测研究所(IZFP)和日本神钢集团已研发出 相应检测设备,并应用于实际生产<sup>[46]</sup>。在此基础上, Sinding 等<sup>[7]</sup>用高斯模糊平滑滤波和全变差的去噪方法 以更好地定位背散射信号中的变化。Honarvar 等<sup>[8]</sup>用维 纳滤波和自回归谱外延的信号处理方法以解决淬硬层深 度较小时,背散射信号难以识别的问题。然而,对于过渡 层较大的淬硬件,初始采集的超声背散射信号强度较弱, 振动包络幅值增长缓慢,容易淹没在仪器噪声、电噪声以 及杂波信号中,常规超声测量模型仅对背散射信号包络 峰值进行极限硬度点<sup>[9]</sup>的定位显然不够准确,测量精度 以及重复可靠性难以保证。

趋势特征分析<sup>[10-12]</sup> 是一种时间序列的分析方法,用 来研究时间序列在长期变动过程中存在的规律性。在淬 硬层深度的超声无损测量中,背散射信号中的趋势特征 反映淬硬件过渡层的基本信息,与淬硬层深度变化的相 关敏感性更高,且具有较强的稳定性,而细节成分属于噪 声信号。因此,引入小波变换多分辨率分析(multiresolution analysis, MRA)<sup>[13-17]</sup>,将背散射信号分解为不同尺度下的时间序列,探求其能量分布,对低频段的近似信号进行逐级细分,去除细节成分,提取信号的趋势特征项,并以此标定淬硬件过渡层中的极限硬度点,对淬硬层深度的测量结果进行修正,提高淬硬层深度的超声无损测量精度以及重复可靠性。

# 1 超声检测信号的趋势特征提取

#### 1.1 希尔伯特变换提取信号包络

采集信号包含很多快速振动的成分,振动幅值随信 号包络缓慢变化,利用希尔伯特变换<sup>[18]</sup>可提取信号包 络,以获取信号基本趋势。

信号 f(x) 的希尔伯特变换定义为:

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x)}{t - x} dx$$
(1)

使用卷积\*符号可表示为:

$$x(t) = \frac{1}{\pi t} * f(t) \tag{2}$$

利用卷积定理求得信号的频率响应:

$$X(w) = F(w)H(w)$$
(3)

其中,

$$H(w) = \begin{cases} -j, w > 0\\ 0, w = 0\\ +j, w < 0 \end{cases}$$
(4)

令原信号作为实部,经希尔伯特变化后的信号作为 虚部,构造解析信号:

$$Y(t) = f(t) + jx(t)$$
(5)

解析信号实部和虚部可由极坐标表示为:

$$Y(t) = A(t) \exp(j\varphi(t))$$
(6)

其中, A(t) 即为所求信号 f(x) 的包络。

#### 1.2 Savitzky-Golay 滤波器平滑去噪

Saviztky-Golay 滤波器是一种数字滤波器,基于时域 数据中移动窗口内的最小二乘多项式拟合,倾向于保留 峰高和峰宽等数据特征,高阶拟合多项式(*n*=4)允许在 不损失数据特征的情况下进行高水平的平滑。在提取采 集信号包络后进行 Saviztky-Golay 平滑滤波,能够在不改 变信号趋势和峰值特征的情况下提高数据的精度。

假设窗口内的数据为:

$$(i), i = 1, 2, \cdots, m$$
 (7)

现构造一个 n 阶的多项式( $n \leq m$ )来拟合这组数据:

$$f_{\theta}(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \theta_2 x^2 + \dots + \theta_n x^n$$

$$\pm \Phi - \theta_0 - \theta_1 - \dots - \theta - \hbar \delta \mathfrak{H}_0$$

$$(8)$$

拟合数据点与原数据点的残差平方和为:

$$E = \sum_{i=1}^{m} (f_{\theta}(i) - x(i))^{2}$$
(9)

Saviztky-Golay 滤波器就是要找到一组  $\theta(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ ,使得残差平方和 E 最小。可利用 E 对  $\theta_i$  求偏导数所得方程组应为 0,通过解方程组得到  $\theta_i$ ,进而求出该 拟合多项式。窗口内的拟合多项式用来求取该窗口内的中心点估计值,通过不断移动窗口重复操作,可求出序列 信号各点的拟合值。

#### 1.3 小波分辨率分析

在淬硬层深度测量的超声检测信号中,背散射信号 受到杂波噪声的干扰,频带分布往往较广<sup>[19]</sup>。背散射信 号包络可以看作为趋势特征项与高频噪声项的相互叠 加,而对于过渡层的基本信息,趋势项往往是关心的主要 特征<sup>[20]</sup>。小波多分辨率分析利用小波变换,将信号分解 为不同尺度下的时间序列,对信号低频段的近似信号进 行逐级细分,随着分解尺度的不断增加,低频段的频率分 辨率越来越高,信号趋势也就越明显。通过比较信号在 不同尺度下的能量分布,最大化保留信号能量,对分解信 号进行重构以获取趋势特征。

图1所示为信号的小波多分辨率分析的分解示意 图。给定信号 x(t),定义尺度函数和小波函数共同构造 信号的小波多分辨率分解,其中尺度函数定义为:

$$\emptyset_{J,K}(t) = 2^{-J/2} \emptyset\left(\frac{t-2^{j}k}{2^{j}}\right)$$
(10)

式中: $j=1,2,\cdots,J$ ; $K=0,1,\cdots,2^{j}-1_{\circ}$ 

小波函数定义为:

$$\varphi_{j,K}(t) = 2^{-j/2} \varphi\left(\frac{t - 2^{j}k}{2^{j}}\right)$$
(11)

式中: $j=1,2,\cdots,J$ ; $K=0,1,\cdots,2^{j}-1_{\circ}$ 

其中*j*决定了小波的幅度和狭窄程度,*K*决定了小波 沿*t*方向上的位置。尺度函数和小波函数均为实值函数 且满足如下条件:



图 1 小波多分辨率分解示意图

Fig. 1 Schematics of wavelet multi-resolution analysis

小波函数在尺度 1-J 上表征信号的细节系数(高频成分)如下:

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi_{j,k}(t) dt, j = 1, 2, \cdots, J$$
(13)

信号的趋势特征项在可利用尺度函数在分解的最高 尺度 J 上求出:

$$s_{J,k} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \, \emptyset_{J,k}(t) \, \mathrm{d}t, j = 1, 2, \cdots, J$$
(14)

这样一来, x(t) 就可以利用信号的趋势特征 s<sub>J</sub> 和细节系数 d<sub>i</sub> 来表示:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{\kappa} s_{J,\kappa} \emptyset_{J,\kappa}(t) + \sum_{\kappa} d_{J,\kappa} \varphi_{J,\kappa}(t) + \\ \sum_{\kappa} d_{J-1,\kappa} \varphi_{J-1,\kappa}(t) + \dots + \sum_{\kappa} d_{1,\kappa} \varphi_{1,\kappa}(t) \\ & \text{ID} \ x(t) \ \text{TRightarrow} 3. \end{aligned}$$
(15)

$$x(t) = S_j + D_j + D_{j-1} + \dots + D_1$$
(16)

其中, S<sub>J</sub> 就是所求信号的趋势特征项,小波多分辨 率分析通过对信号的低频段进行不断细化,直到达到满 意的趋势特征项效果。

#### 2 实验方法

#### 2.1 试样

实验采用福建励精集团理化室提供的 5 个 35MnB 合金结构钢履带链片切割试样,编号 1~5#,化学成分符 合相关国家标准,图 2 所示为试样实物外观。其中,试样 5#未进行表面硬化处理,试样 1~4#经高频感应淬火热处 理后,用显微硬度法对试样中心区域的淬硬层深度进行 测量,分别为 1.60、3.60、5.60、7.60 mm,图 3 所示为理 化检测所示的试样表层与基部微观组织金相图。为消除 表面粗糙度对超声检测的影响,对所有试样表面进行了 研磨、抛光处理。



图 2 35MnB 合金履带链片切割试样外观 Fig. 2 Physical appearance of 35MnB alloy samples



图 3 试样表层与基部组织金相图 Fig. 3 Metallographic diagram of 35MnB alloy samples

图 4 所示为试样的组织以及硬度分布,其中,最外层 为硬度值最大(HV1)的马氏体区,有效硬化层为硬度值 大于极限硬度点(0.8×HV1)的区域,未受到热处理影响 的区域为试样基部,过渡层为马氏体区和基部的过渡区。





#### 2.2 水浸式超声横波检测系统

声波散射理论表明声波波长与介质晶粒尺寸相当



时,散射最强。超声波长 $\lambda$ 与声速v和声波频率f之间的 关系满足式(17):

 $\lambda = v/f \tag{17}$ 

同时声波频率的增加会导致散射衰减的急剧增加。 同一固体介质内,超声横波声速约为纵波声速的1/2,因 此横波波长约为纵波波长的1/2。考虑低频超声无法满 足波长与淬硬件基部奥氏体晶粒尺寸相当的条件,而高 频超声由于衰减较大会导致背散射信号微弱难以识别。 因此,综合考虑样品内超声波长和衰减,实验采用15 MHz 高频探头横波模式进行淬硬件的背散射信号采集。

水浸式超声横波检测系统主要包括电源、发射单元、 运动控制、信号处理和探头等,图 5(a)和(b)所示分别为 系统框图和实物图。采用 Multi2000 超声脉冲发射/接收 电路与 Olympus-V311-SU 型 15 MHz 水浸式聚焦探头组 成超声信号发射/接收单元。运动控制包括运动控制器、 伺服电机、驱动器和运动轴,使用正运动公司 ZMC206 运 动控制卡驱使伺服电机控制四轴精密丝杆模组电动滑 台,精确控制水声距和检测位置,使声束焦斑位于有效硬 化层内。横波激发的斜入射角度会对测量结果造成一定 影响,为使采集到的背散射信号能量最大化,斜入射角度 应略大于试样的第一临界角。



(b) **实物图** (b) Physical appearance





系统参数设置如表 1 所示,采用上述系统分别对试 样 1~4#进行超声数据采集,图 6 所示为采用脉冲发射法 采集超声信号时,超声波在淬硬件过渡层发生的超声背 散射效应。

#### 表1 系统参数

 Table 1
 System parameter

探头频率	晶片直径	聚焦深度/水	-6 dB 带宽	模式
15 MHz	12.7 mm	39.27 mm	53.47%	横波/15°
中心频率	重复频率	电压	增益	采样频率
15.19 MHz	2 kHz	100 V	78 dB	100 MHz

初始采集的超声检测信号中包含仪器噪声和电噪

声,在时间上表现为非相干信号,利用实时信号平均可以 减弱仪器噪声和电噪声对背散射信号的干扰。

若信号的 M 次独立检测结果为:

$$x_i(t), i = 1, 2, \cdots, M$$
 (18)

第 M 次检测结果的离散采样为:

$$x_m[n], n = 0, 1, \cdots, N - 1$$
 (19)

则对应于 m 次检测结果的第 n 个离散采样值的算数平均值为:

$$y_m[n] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i[n], n = 0, 1, \cdots, N - 1$$
(20)

本次实验取 *M*=32, 对所有检测信号进行实时信号 平均后再进行采集, 图 7 所示为采集的典型超声 A 波信





图 6 超声背散射效应 Fig. 6 Schematics of ultrasonic backscattering



图 7 试样的超声 A 波信号 Fig. 7 Ultrasonic A-wave of 35MnB alloy sample

#### 2.3 声速测量

声速测量前对试样 5#表面进行去氧化处理,利用水 平仪校正探头台架底板水平,放置水槽和工件后进行零 位校准。初始化仪器,为使声能更强,选用 5 MHz 聚焦探 头进行声速测量,与台架固定后,设定检测系统相应参数 并利用标准样块校准仪器。

采用脉冲回波法对试样 5#进行超声数据采集,图 8 所示为试样 5#中心位置的初始超声 A 波信号,图中可清 楚地识别表面回波、一次底面波和二次底面波。系统采 样频率设置为 100 MHz,可得到一、二次底面波之间声程  $t_o$ 试样 5#的厚度为 13.50 mm,探头斜入射角度  $\alpha_1$  为 15°,后续超声背散射信号采集实验中保持探头斜入射角 度不变,可抵消试样表面折射对横波声速测量造成的影 响,该点横波声速可由式(21)计算得到。

$$v = 2 \cdot \frac{h}{t} \tag{21}$$

对试样 5#中心 1×1 mm 范围内进行超声 C 扫,计算 得到试样的平均横波声速为:

 $V_s = 3 245.70 \text{ m/s}$ 

用相同的方法对试样 1~4#分别进行多次测量, 声速 并无明显差异。



## 3 结果与分析

#### 3.1 背散射信号的趋势特征

基于试样背散射信号的特点,选用 coif3 小波对试样 4#平滑后的超声检测信号包络进行 5 层分解。图 9(a) 和(b)分别为信号分解后的各尺度分量以及能量分布, 其中最后一项为信号的趋势特征项,如图 9(c)所示。从 图中可看出,随着分解尺度的上升,信号高频分量被陆续 分离,趋势特征逐渐明显。由各层能量分布可知,趋势特 征项占 96.73%,原信号能量得到了最大化保留。









# 图 9 小波多尺度分析结果 Fig. 9 Results of MRA

图 10 所示为采集信号的处理流程框图,分为预处 理,趋势提取和阈值判定 3 个部分。采集信号首先通过 通频带为探头发射脉冲-6 dB 带宽的巴特沃斯带通滤波 器,以保留主频带信号能量,消除低频干扰和部分高频噪 声。设置闸门截取滤波后信号的表面回波和背散射波后 (图 6 外侧闸门),将结果取绝对值。图 11(a)所示为试 样 4#采集信号的预处理结果,其包络如图 11(b)所示,由 于采样频率较大,信号振动变化较快,信号包络仍然包含 大量高频噪声。



Saviztky-Golay 滤波器平滑去噪后的信号如图 11(c) 所示,绝大部分高频噪声被滤除,信号趋势以及峰值特征 得到保留。图 11(d)为经小波多分辨率分析后的信号趋 势特征项,图中可明显看出背散射信号振动幅值随时间 缓慢变化的包络趋势。

#### 3.2 极限硬度点的标定及测量结果

分别对试样 1~4#中心区域多个点的超声采集信号 提取趋势特征,并以此对试样过渡层中的极限硬度点进





行标定。选取信号趋势特征项表面回波幅值快速增强前的最后一个极小值点作为表面回波起始位置,并以该点幅值作为闸门阈值对极限硬度点做假设标记,计算淬硬深度,如图 12 所示。各试样淬硬层深度的多次测量结果取平均值,图 13 显示了超声法多次测量结果与有效硬化层真实值(显微硬度法)的对比。





由图 13 可知,超声法的测量结果比有效硬化层真实 值略大。这主要是受 35MnB 合金淬硬件过渡层的影响, 过渡层的硬度随深度快速减小,而硬度法测量的极限硬 度值为马氏体区硬度的 0.8 倍,因此极限硬度点位置靠 近表层。而由于过渡层微观组织结构渐变,有效硬化层 并无明显分界面,超声波无法准确标定其位置,因此实际 应用中不同材料测出的结果可能略有差异,需根据材料 和相关要求对超声法测量结果进行标定修正。本次实验 中,标定偏差为超声法测量结果与硬度法测量结果之差, 计算 4 个试样标定偏差的平均值  $\delta$ =1.04 mm,以此作为 超声法极限硬度点的标定结果。将所有测量结果减去  $\delta$ 作为最终的超声法测量结果,如表 2 所示。



平均误差定义为多次测量误差的平均值,重复误差 σ 定义为在相同条件下多次重复测量所得结果的偏差, 计算方法如式(22)所示:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{n - 1}{\bar{x}}}$$
(22)

其中, x<sub>i</sub> 为每次测量结果, n 为重复测量次数, x 为多 次测量的平均值。

表 2 列出了超声法测量所得结果的平均误差以及重复误差,从表中可见,试样 1~4#中超声法测量结果的最大误差为 0.24 mm,最大平均误差为 0.123 mm,其中重复误差随着淬硬层深度的减小而增大,本次实验的最大值为 6.24%,误差均在实际检测中的可接受范围内。

为了对比验证本方法在 35MnB 淬硬层深度测量的 有效性,将其与常规超声测量模型进行性能的对比分析, 即取背散射信号包络峰值作为有效硬化层的极限硬度 点,如图 14 所示,据此对试样 1~4#所有超声检测信号计 算淬硬层深度,得到常规超声测量模型的最大误差为 1.70 mm,最大平均误差为 0.89 mm,重复误差为 14.65%。可见,相比于常规超声测量模型,本方法的测 量精度以及重复可靠性均得到显著提升。



- 图 14 常规超声法测量试样 1~4#(a~d)的淬硬层深度 Fig. 14 Traditional ultrasonic measurement of HLD of samples 1~4#(a~d)
- 4 结 论

通过超声实验和信号分析表明,淬硬件背散射信

表 2 试样 1~4#淬硬层深度测量结果

 Table 2
 Results of HLD measurement of samples 1~4#

( mm										
吴差 重复误差/%	平均误差	8	7	6	5	4	3	2	1	位置
0 6 24	0.089 6.24	1.71	1.86	1.72	1.70	1.57	1.62	1.53	1.62	试样 1#
0.24		0.11	0.24	0.12	0.10	0.03	0.02	0.07	0.02	误差/δ
0 100 2 22	3.77	3.65	3.79	3.60	3.54	3.49	3.80	3.62	试样 2#	
0 5.22	0.100	0.17	0.05	0.19	0.00	0.06	0.11	0.20	0.02	误差/δ
2 2 95	0.122 2	5.61	5.73	5.53	5.64	5.36	5.41	5.84	5.66	试样 3#
0.125 2.85	0. 125	0.01	0.13	0.07	0.04	0.24	0.19	0.24	0.06	误差/δ
1 1 4 4	0.004	7.74	7.67	7.79	7.61	7.52	7.52	7.67	7.49	试样 4#
4 1.44	0.094	0.14	0.07	0 19	0.01	0.08	0.08	0.07	0.11	误差/δ

号的趋势特征最能反映其振动幅值随淬硬层深度的变化 关系,且能量分布占比最大。针对常规超声测量模型误 差较大,稳定性较低的问题,引入希尔伯特变换、Saviztky-Golay 平滑滤波以及小波多分辨率分析等方法滤除背散 射信号中的杂波噪声成分,提取与淬硬层深度信息最为 相关的趋势特征项。基于背散射信号的趋势特征项,标 定有效硬化层的极限硬度点,建立了 35MnB 合金履带链 片淬硬层深度的超声无损测量模型。该模型的精度以及 重复可靠性显著高于常规超声测量模型,相比于金相法、 硬度法具有更高效、无损等优势,极具深入研究、应用和 推广的价值。

#### 参考文献

- 董瀚, 廉心桐, 胡春东,等. 钢的高性能化理论与技术进展 [J]. 金属学报, 2020, 56: 558-582.
   DONG H, LIAN X T, HU CH D, et al. High performance steel: The scenario of theory and technology [J]. Acta Metall Sin, 2020, 56: 558-582.
- [2] 张根元,奚小青,张维颖,等. 感应淬火工艺参数优 化和组织硬度分布预测 [J]. 材料热处理学报, 2013,44:174-179.
  ZHANG GY, XI X Q, ZHANG WY. Optimization of induction quenching process parameters and prediction of

microstructure and hardness distribution for S45C steel shaft [J]. Transitions of Material and Heat Treatment, 2013, 44: 174-179.

[3] 王存宇,常颖,杨洁,等. 热变形和淬火配分处理的 复合作用对低碳合金钢马氏体相变机制的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(8): 913-919.
WANG C Y, CHANG Y, YANG J, et al. The combined effect of hot deformation plus quenching and partitioning treatment on martensite transformation of low carbon

treatment on martensite transformation of low carbon alloyed steel [J]. Acta Metall Sin, 2015, 51 (8): 913-919.

 [4] 孙小东,王云广,端木培兰,等. 感应淬火硬化层深度 超声波检测方法的适用性 [J]. 轴承, 2016, 8: 39-41.
 SUN X D, WANG Y G, DUANMU P L, et al.
 Applicability of ultrasonic testing method for induction

第36卷

quenching hardened layer depth [J]. Bearing, 2016, 8: 39-41.

- [5] SALCHAK Y A, SEDNEV D A, KROENING M, et al. Method of case hardening depth testing by using multifunctional ultrasonic testing instrument [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015, 81(1): 012080.
- [6] ZHANG D, YAO L, ZHAO H. Signal processing of ultrasonic testing of hardened layer depth based on wavelet transform theory [C]. Proceedings of the International Conference on Video and Image Processing, 2017: 39-43.
- [7] SINDING K M, DRAPACA C S, TITTMANN B R, et al. Digital signal processing methods for ultrasonic echoes [J].
   IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(8): 1-6.
- [8] HONARVAR F, ZEIGHAMI M. Application of signal processing techniques to case depth measurements by ultrasonic method [C]. Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008: 25-28.
- [9] UMBERTO P. Case microstructure in induction surface hardening of steels: An overview [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 2620-2637.
- [10] 王展,杜思远,贺文治,等.基于全相位快速傅里叶 变换的主轴不平衡特征提取及实验[J]. 仪器仪表学 报,2020,41(4):138-146.
  WANG ZH, DU S Y, HE W ZH, et al. Unbalanced feature extraction and experiment of spindle based on the
  - all phase fast Fourier transform method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 138-146.
- [11] WU Z H, HUANG N E, LONG S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series [J]. Proceedings of National Academy of Science, 2007, 104(38): 14889-14896.
- [12] 施杰,伍星,刘韬.基于 MPDE-EEMD 及自适应共振 解调的轴承故障特征提取方法[J].电子测量与仪器 学报,2020,34(9):47-54.

SHI J, WU X, LIU T. Method of bearing fault feature extraction based on MPDE-EEMD and adaptive resonance demodulation technique [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34(9): 47-54.

- [13] MUSZKATS J P, SEMINARA S, TROPAREVSKY M. Application of Wavelet Multiresolution Analysis [M]. Switzerland: Springer, 2021.
- [14] 周知进, 文泽军, 卜英勇. 小波降噪在超声回波信号 处理中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2):237-241.

ZHOU ZH J, WEN Z J, BU Y Y. Application study of wavelet analysis on ultrasonic echo wave noise reduction [J].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 237-241.

[15] 詹凯,黄微维,梁瑶. 一种基于时域加窗的超声回波 信号数字解调算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(19):63-68.
ZHANG K, HUANG W W, LIANG Y. Digital demodulation algorithm of ultrasonic echo signal based on time domain windowing [J]. Electronic Measurement

[16] NEDELIJKOVIC D, KOKOTOVIC B, JAKOVLJEVIC Z. Comparative analysis of discrete wavelet transform and singular spectrum analysis in signal trend identification[C]. IN-TECH2019, 2019.

Technology, 2020, 43(19):63-68.

- [17] 刘嘉同,金永,张浩亚,等.基于多层界面脱粘的超 声检测方法研究[J]. 国外电子测量技术,2020, 39(9):58-62.
  LIU J T, JIN Y, ZHANG H Y, et al. Multilayer interface debonding study based on ultrasonic detection method[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(9):58-62.
- [18] 韦娟,顾兴权,宁方立.希尔伯特时频谱特征提取方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49:50-54.

WEI J, GU X Q, NING F L. Hilbert time-frequency spectrum feature extraction method [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49: 50-54.

- [19] SCHNEIDER D, HOFMANN R, SCHWARZ T, et al. Evaluating surface hardened steels by laser-acoustics [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206:2079-2081.
- [20] KROENING M, SEDNEV D, SALCHAK Y. Heavyloaded components quality assurance by means of nondestructive testing [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1040: 937-953.

作者简介



**韩军**(通信作者),博士、研究员,主要 研究方向为在线检测与自动化装置、智能检 测算法等。

E-mail: hanjun@ fjirsm. ac. cn

Han Jun (Corresponding author),

Ph. D, professor. His main research interests include online detection, automation device and intelligent detection algorithm.



**付磊**,福州大学硕士研究生,主要研究 方向为超声无损检测技术。

E-mail:208527016@ fzu. edu. cn

Fu Lei, M. Sc. candidate at Fuzhou University now. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing

technology.