

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312242

考虑淬硬铁磁构件过渡特性的磁滞回线建模方法*

吴奇¹, 王钰珏², 吴斌², 刘秀成², 韩振华³

(1. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124; 2. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124;
3. 北京中唐电工程咨询有限公司 北京 100049)

摘要:有效硬化层深度和过渡层范围是影响表面淬硬机械零部件性能的关键因素,也是产品质量控制过程中的重要测试内容。利用不同组织的磁特性差异,可发展出淬硬层的磁检测方法。相比传统金相观察法,具有无损、快速的技术优势,有望直接面向零部件进行淬硬层测试分析。本文提出利用玻尔兹曼函数描述沿深度方向材料磁滞特性参数的渐变规律。通过对多层材料进行离散分层处理,考虑层间磁场耦合,建立多层结构材料的 $T(x)$ 磁滞回线模型。利用粒子群算法和提出的多层材料磁滞回线模型对逐层切割的含硬化层试样进行磁滞回线的反演计算,验证模型的准确性。提出的模型有望较为精确地描述多层材料的磁滞回线并可对硬化层深度和过渡层深度进行反演表征。

关键词: 磁滞回线; 硬化层; 过渡特性; 粒子群算法; $T(x)$ 模型

中图分类号: O441 TM936.3 TH701

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 460.40

A hysteresis loop modeling method considering the transition characteristics of hardened ferromagnetic components

Wu Qi¹, Wang Yujue², Wu Bin², Liu Xiucheng², Han Zhenhua³

(1. Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. Beijing Zhongtangdian Engineering Consulting Co., Ltd, Beijing 100049, China)

Abstract: The depth of the effective hardened layer and the extent of the transition layer are critical factors that influence the performance of surface-hardened mechanical components. They constitute significant parameters in the process of quality control for product evaluation. By exploiting the variances in magnetic properties among different structures, a magnetic detection technique can be developed for assessing hardened layers, offering non-destructive and rapid advantages over conventional metallographic observation methods. This method holds promising potential for direct testing and analysis of hardened layers in components. The Boltzmann function is proposed to describe the gradient law of hysteresis characteristic parameters of materials along the depth direction. By discretely layering multi-layered materials and considering the magnetic field coupling between layers, a $T(x)$ hysteresis loop model for multi-layer structural materials is formulated. The hysteresis loops of the hardened layer sample, obtained by cutting them layer by layer, are calculated by using the particle swarm optimization algorithm and the proposed multilayer hysteresis loop model. The accuracy of the model is validated to evaluate its capability in accurately describing the hysteresis loop of multilayer materials, as well as determining and characterizing both the depth of the hardened layer and transition layer.

Keywords: magnetic hysteresis loop model; hardened layer; transient behavior; particle swarm optimization; $T(x)$ model

0 前 言

对传动轴、齿轮等铁磁性机械零件进行表面淬火是提高零件表面硬度、耐磨性和疲劳强度^[1]的重要途径。表面淬火时,一般先利用快速加热方法(如电磁感应加热)使零件表层材料奥氏体化,再进行淬火使表层材料的微观组织转变为马氏体,而心部组织基本保持不变。由此,在零件表面形成厚度在微米至毫米区间的淬硬层,沿材料深度方向可划分为:有效硬化层、过渡层和心部组织。

机械零件表面淬火质量评价,需要借助于实验测试手段对淬硬层进行特性分析。目前常规的测试方法主要是利用破坏取样方式,从零件表面切割出小尺寸样品以制备成金相试样,在实验室进行金相和维氏硬度分析。上述测试方法只能对零件进行抽样测试,不能全面反映零件的淬硬质量。此外,对于造价高昂的精密零件或高端装备用的单品关键零件,不允许进行破坏性测试,因此亟需发展淬硬质量评价的无损检测方法。

铁磁性零部件表面淬硬层沿深度方向组织呈现过渡特性,不同组织的磁特性存在一定的差异,通过测试淬硬材料的磁特性(如磁滞回线),可以间接反映材料的微观组织类型、硬化层深度等信息。利用磁滞回线检测技术进行铁磁性材料微观组织和力学性能无损评估时,大多从实验出发,通过标定方法,建立不同金相组织力学性能与磁参量的关系^[2-4]。Raghunathan等^[5]则采用了玻尔兹曼函数描述双相材料的磁滞过渡特性,进一步利用玻尔兹曼函数描述应力引起的J-A模型参数变化规律,建立了考虑应力影响的双相材料磁滞模型。Kobayashi等^[6]采用同样测量方法,发现材料矫顽力随硬化层深度增加而增加,并且实验观察到微分磁导率曲线测量结果中存在双峰现象,他们采用洛伦兹函数拟合微分磁导率曲线,发现硬化层及心部材料的体积分数与双峰面积成正比。Kahrobaee等^[7]利用磁滞回线检测方法评估热处理后的H13工具钢的微观结构变化、硬度变化和磨损行为与奥氏体化和回火温度的关系。利用标准广义回归神经网络对训练数据集进行适当的训练,建立了传统方法提取的特征与磁滞回线参数之间的关系。实验结果表明,如果训练数据集有足够的样本,该方法可以无损地估计样本的硬度及硬化层深度,具有很高的精度。Mirzaee等^[8]对API X65钢试样进行了5种不同退火条件下的硬化层检测,利用统计建模方法和磁滞回线无损检测技术对试样的硬化层深度进行检测,提高了感应淬火钢件表面硬度和表面深度测量的准确性。Perevertov等^[9]利用磁滞回线对弹簧钢进行了检测实验研究,通过提取矫顽力、剩余

磁感应强度和微分磁导率峰值位置等磁特征参量得到了材料宏观磁学特性与弹簧钢表面脱碳层深度间的关系。

从理论层面,Jiles等^[10-11]通过结合Weiss铁磁理论对微磁学畴壁运动机理研究推导出描述不可逆微分磁化和可逆微分磁化过程提出Jiles-Atherton磁滞模型(简称为J-A模型)。在此基础上,Gaunkar等^[12]从能量角度出发引入应力、频率等的影响,拓展了J-A模型。另一个常用的磁滞理论模型是2006年Takács^[13]基于现有的磁滞理论提出反正切双曲线和线性函数的组合的 $T(x)$ 磁滞模型,其中这两项函数分别对应铁磁性材料磁化过程中的可逆和不可逆分量,在宏观尺度上描述了饱和磁化和磁滞现象。 $T(x)$ 模型由于模型参数较少、拟合效果较好而常用于材料的磁滞回线建模。Kumar等^[14]基于物理或现象学将磁滞模型分为两类:剩磁性和磁滞性模型,这些模型进一步结合了磁场、应力、温度和塑性变形对铁磁材料的行为进行了描述。文中对包括J-A模型和 $T(x)$ 数学模型在内的模型进行了综述。模型参数寻优的方法多样,赵志刚等^[15]针对目前单一智能算法存在的寻优能力差计算时间长等问题,提出了一种人工鱼群算法与优化惯性权重线性递减粒子群优化算法相结合的混合算法。

关于多层磁滞模型的建立,需要考虑众多因素,如退磁因子、层间耦合、材料几何尺寸、材料组合顺序等因素对磁特性参量的影响,对此国外学者进行了一些有益的探索和尝试。Jiles等^[16]指出材料在磁化的过程中除了受到外加磁场的作用外,还要受到内部退磁场的作用。Stupakov等^[17]实验研究了被测试件尺寸对磁滞回线的影响,指出试件的横截面积对磁滞回线测量影响较大。Gorkunov等^[18-19]发现当软磁性和硬磁性材料以不同顺序进行组合时,多层材料的矫顽力和剩余磁感应强度值不同,证明了材料的组合顺序会影响材料磁特性。并进一步建立了多层板结构的矫顽力估算公式,依据各单层板的矫顽力测量结果,可以估算出不同厚度、不同组合情况下多层板结构的矫顽力。刘秀成等^[20]在此研究基础上,为将磁滞回线检测法应用于杆状试件硬化层深度的定量检测,建立了基于点状磁荷假设的多层结构磁滞模型,预测出3层结构微分磁导率曲线的双峰特性,用于分析层间材料组合和层厚对多层结构磁滞回线的影响。

国内外学者针对硬化层的磁滞回线建模方法已进行了初步的探讨,得到了一些有益的成果和结论,但目前的磁滞回线模型未能考虑材料沿深度方向的磁过渡特性。在探究材料沿深度方向的磁过渡特性的理论模型方面,本文对Gorkunov的理论模型进行了拓展,并利用含表面硬化的试件进行逐层线切割和磁滞回线检测实验来验证模型的准确性。

1 多层结构磁滞回线理论模型

1.1 理论模型

淬硬层从表面沿深度方向存在微观组织的过渡特性,导致材料的磁特性沿深度方向也呈现过渡特征。为描述材料的磁特性,本文选择模型参数较少、拟合效果较好的 $T(x)$ 模型^[13]。 $T(x)$ 模型是由 Takács 提出的基于反正切函数 $\tanh(x)$ 建立的数学模型。 $T(x)$ 模型描述的是磁感应强 B 和外加磁场强 $H_{int,j}$ 的关系。依据磁场的变化方向,分为上行程($H_{int,j}$ 递增)、下行程($H_{int,j}$ 递减)进行分别建模,上、下行程分别以“+”、“-”符号进行区分。具体表达式为:

$$B_- = B_0 \tanh[C_0(H_{int,j} + a_0)] + A_0 H_{int,j} - b_0 \quad (1)$$

$$B_+ = B_0 \tanh[C_0(H_{int,j} - a_0)] + A_0 H_{int,j} + b_0 \quad (2)$$

式中: a_0 为与矫顽力相关的参量(见图3); A_0 为与可逆磁化程度相关的参量; B_0 为饱和磁感应强度; C_0 为矫顽力点磁滞回线与 H_{ext} 轴的角度; b_0 为上下磁滞回线闭合常数。

1.2 基于点状磁荷的多层磁滞模型

在 Gorkunov 的理论模型中,如图1所示,将各单层材料简化为其几何中心的点状磁荷,结合层间耦合磁场和退磁场计算模型,建立多层材料的动态磁滞模型。当材料置于外加交变磁场 H_{ext} ,考虑层间耦合磁场和退磁场的影响,第 j 层材料内部磁场强度 $H_{int,j}$ 受相邻两层板的磁化 $H_{int,j+1}$ 和 $H_{int,j-1}$ 强度影响。

$$H_{int,j} = H_{ext} - NM_j - f(M_{j-1}, M_{j+1}) \quad (3)$$

式中: N 为退磁因子; M 为磁化强度; H_{int} 为材料内部磁场强度。

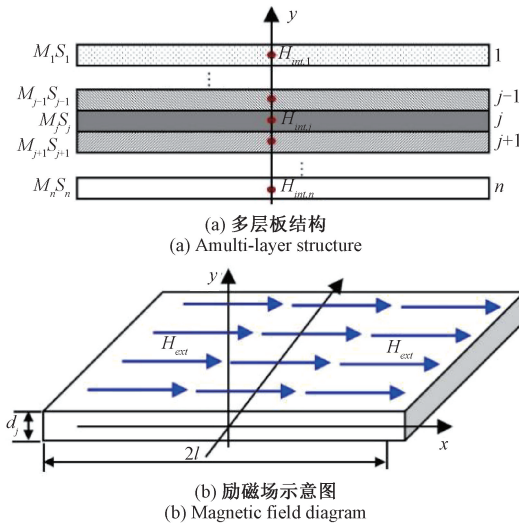


图1 多层材料复合板几何模型

Fig. 1 Geometry of a multilayer material composite panel

1.3 淬硬层的磁过渡特性描述方法

利用前述点状磁滞模型建立淬硬层的磁滞回线模型,它的主要难点是如何对每层薄板材料的磁滞参数进行赋值,以符合淬硬层从表面沿深度方向的磁特性过渡规律。本文提出利用玻尔兹曼函数来描述 $T(x)$ 参量沿深度^[13]的变化规律:

$$y_1 = \frac{B_1 - B_2}{1 + e^{\frac{(1-x+x_0)}{T}}} + B_2 \quad (4)$$

如图2所示,改变玻尔兹曼函数的参数 x_0 和 T 的赋值。 T 用于控制玻尔兹曼函数过渡区最大斜率。 B_1 、 B_2 为参量过渡区间的起止值,式中 B_1 为自变量趋于无穷小时函数的取值, B_2 为自变量趋于无穷大时函数的取值; x_0 为过渡区间的中点, T 代表 x_0 处的曲线斜率。

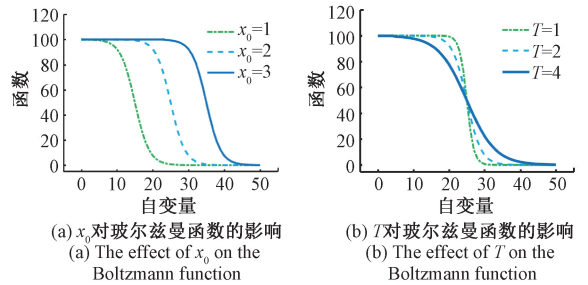


图2 不同常系数对玻尔兹曼函数的影响

Fig. 2 Effect of anomalies on Boltzmann function

1.4 硬化层材料的磁滞回线模拟

这里以2层模型为例,介绍材料磁滞回线的建模过程。

第1层的磁感应强度用 $T(x)$ 磁滞模型可表示为:

$$B_+^1 = \mu(M_1 + H_{int,1}) \quad (5)$$

$$B_+^1 = B_1 \tanh[C_1(H_{int,j} - a_1)] + A_1 H_{int,j} + b_1$$

第2层的磁感应强度磁滞模型可表示为:

$$B_+^2 = \mu(M_2 + H_{int,2}) \quad (6)$$

$$B_+^2 = B_2 \tanh[C_2(H_{int,j} - a_2)] + A_2 H_{int,j} + b_2$$

双层材料可以分别用物理公式及 $T(x)$ 磁滞模型表示。在双层模型中,通过物理之间的关系及公式可以得知,如果双层模型磁感应强度 B 已知,单层试件磁感应强度 B 已知,就可以通过公式求解另一个单层试件磁感应强度:

$$B_{sum} = \frac{\mu[(M_1 + H_{int,1})S_1 + (M_2 + H_{int,2})S_2]}{S_1 + S_2} \quad (7)$$

表1给出了 $T(x)$ 磁滞模型的示例参数。 x_m 为外加磁场强度。心部组织结构和硬化层的矫顽力 H_c 分别 400 A/m 和 1 600 A/m。通过式(7)可以得到双层材料的 $T(x)$ 模拟图(如图3所示),而通过对含硬化层的试件

进行磁滞回线测量,得到图3中实线所示的磁滞回线,两者相差较大。因此,猜测心部组织及硬化层之间存在中间过渡层,其磁滞回线应介于心部组织和硬化层磁滞回线之间。为了探究 $T(x)$ 模型的4个参数沿深度方向的过渡层趋势,接下来通过对单面淬火的45号钢进行逐层线切割实验,利用粒子群算法逐层反演磁滞回线表征参数,最后将模拟结果与实验结果进行对比来印证模型的准确性。

表1 多层结构 $T(x)$ 磁滞模型参数

Table 1 Parameters of $T(x)$ hysteresis model of multilayer structure

参数	$a_0/(A \cdot m^{-1})$	A_0	B_0/T	C_0	$x_m/(A \cdot m^{-1})$
心部组织	450	6×10^{-5}	1.75	6×10^{-4}	1.06×10^4
硬化层	1 600	3×10^{-5}	1.25	4×10^{-4}	1.06×10^4

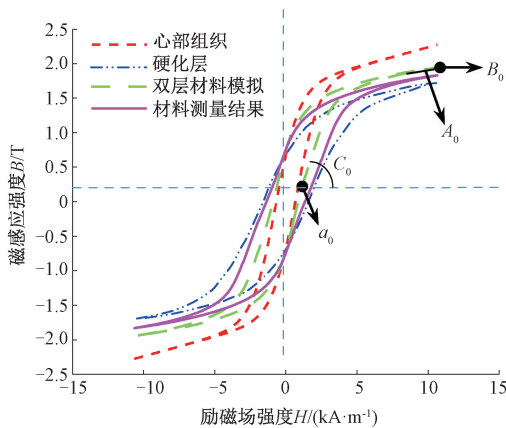


图3 模拟双层板磁滞回线

Fig. 3 Hysteresis loop diagram of simulated double-layer plate

2 实验测试装置

2.1 实验装置

磁滞回线检测系统主要包括励磁部分、信号检测部分和信号采集部分。其中励磁部分主要由上位机产生正弦信号,经BOP功率放大器放大后进入激励线圈,沿U型磁轭对试件励磁,利用1欧姆的采样电阻测量激励磁场信号,利用磁感应线圈接收试件的磁滞回线信号。图5为传感器的装配图及实物图,U型磁轭极靴尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,励磁线圈线径 0.35 mm ,匝数为150匝,磁感应线圈检测磁滞回线信号,直接绕制在3D打印的线圈骨架上,磁感应线圈由线径为 0.35 mm 漆包线绕制而成,绕制匝数为120匝。

图4所示为磁滞回线检测系统实物图,其中包含压

力传感器装置,其可实时显示每次加载力的示数,通过压力传感器保证每次测试磁轭对被测试件加载力的恒定,以排除振动对本实验的干扰。每次保持施加 48 N 的力,压力传感器的量程为 50 N 。

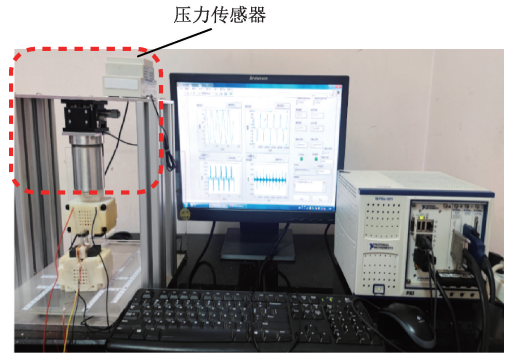


图4 磁滞回线检测系统

Fig. 4 Hysteresis loop detection system

2.2 励磁参数

为确定激励频率和激励幅值,分别利用不同的激励参数对含硬化层的45号钢试件进行检测实验。如图5所示的是激励频率为 1 Hz 不同激励幅值条件下得到的磁滞回线,进而计算得出其对应的微分磁导率曲线。结果显示激励幅值在 1.5 V 时可观测到微分磁导率的双峰现象但次峰并不明显,随着激励幅值的增加次峰逐渐突出。在 3 V 的激励幅值情况下可观测到微分磁导率的双峰,但考虑到磁滞回线在磁场强度为 $6000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 时还未达到磁饱和强度,因此激励幅值选在 5 V 。

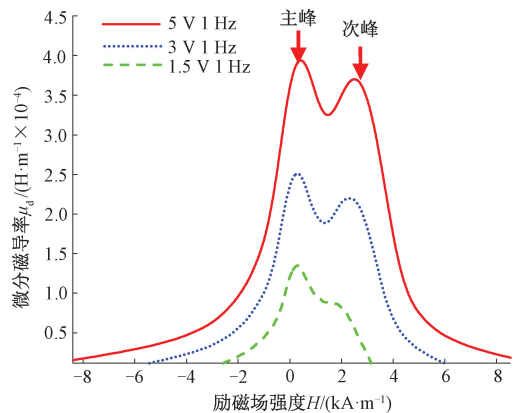


图5 不同激励幅值下微分磁导率

Fig. 5 Differential permeability diagram with different excitation amplitudes

图6展示的是激励幅值在 5 V 不同激励频率条件下得到的磁滞回线,进而计算得出其对应的微分磁导率曲线。结果显示激励频率在 10 Hz 时观测不到微分磁导率的

双峰现象,随着激励频率的降低次峰逐渐突出。因此磁滞回线的最佳激励幅值应选为 1 Hz。

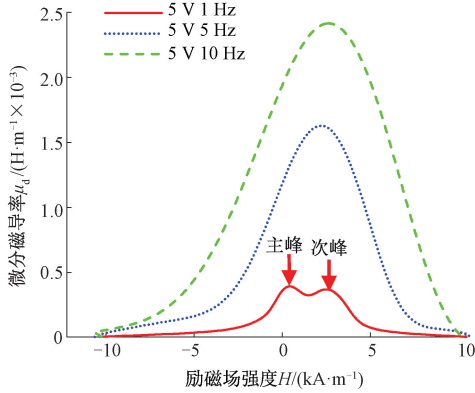


图 6 不同激励频率下微分磁导率

Fig. 6 Differential permeability diagram at different excitation frequencies

2.3 检测系统稳定性

对实验检测系统进行重复性实验,对同一试件重复检测 5 次。图 7 为在 5 V, 1 Hz 激励条件下, 2.66 mm 和 3.90 mm 硬化层试件的重复检测结果图。通过计算它们的矫顽力 H_c , 磁饱和点 B_s 及剩磁点 B_r 的标准差,发现其均小于 0.8%,因此证明实验检测系统稳定。

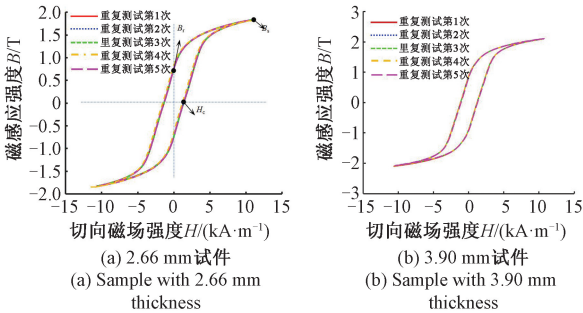


图 7 系统稳定性重复检测

Fig. 7 Repeated detection of system stability

2.4 试件制备

实验所用试件材料为 45 号钢,通过激光淬硬工艺进行处理。如图 8 所示,试件的尺寸为 200 mm×100 mm×30 mm,切割上表面含硬化层试件进行显微硬度检测。为了确定试件的硬化层深度,通过应用维氏显微硬度计测试硬度值。通过检测距离硬化层板材表面不同深度处的硬度值。根据国标 GB/T 5617—2005、GB/T 1172—1999 相关规定与实验材料实际尺寸,对硬化层板材件横截面打硬化梯度点,得到试件硬化层为 1.4 mm,过渡层为 1.4 mm,因此线切割厚度大于 2.8 mm,就会得到含心

部组织,过渡层及硬化层的多层材料试件。通过线切割得到试件尺寸为 75 mm×15 mm×4.66 mm,切割方案记录如图 9 和表 2 所示。线切割方案主要为在有效硬化层部分依次线切割薄片,由于无法线切割无法掌控微米级精度。因此是通过采取先线切割很薄的薄片(0.2~0.5 mm 之间)后测量试件尺寸,并在切割后记录试件尺寸及测量试件的磁滞回线,直至剩余部分完全为心部组织。建模过程如图 10 所示。

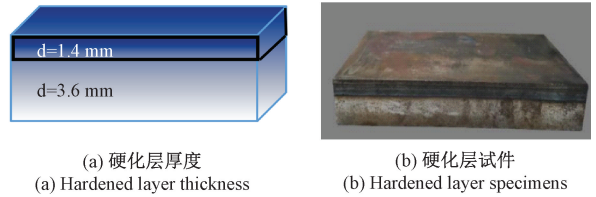


图 8 多层试件及硬度沿深度方向的变化曲线
Fig. 8 Variation curves of multilayer specimens and hardness along the depth direction

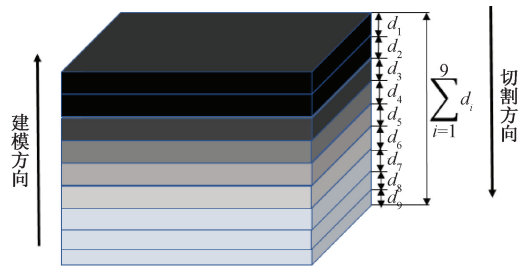


图 9 多层试件切割方式

Fig. 9 Cutting method of multi-layer specimen

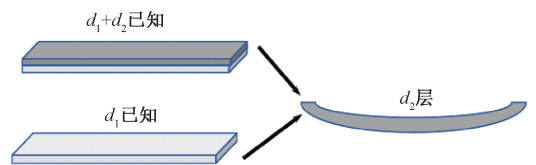


图 10 建模过程

Fig. 10 Modeling process

表2 9层结构切割厚度
Table 2 Cutting thickness of nine-layer structure

指标	切割厚度/mm	切割剩余厚度/mm	硬化层/mm:心部组织/mm	主峰值点/(H·m ⁻¹)	次峰值点/(H·m ⁻¹)
$\sum_{i=1}^9 d_i$	0	4.66	2.86:1.80	3.96×10^{-4}	3.78×10^{-4}
$\sum_{i=1}^8 d_i$	0.44	4.22	2.42:1.80	4.47×10^{-4}	4.20×10^{-4}
$\sum_{i=1}^7 d_i$	0.32	3.90	2.10:1.80	4.61×10^{-4}	4.15×10^{-4}
$\sum_{i=1}^6 d_i$	0.40	3.50	1.70:1.80	4.99×10^{-4}	4.09×10^{-4}
$\sum_{i=1}^5 d_i$	0.38	3.12	1.32:1.80	5.47×10^{-4}	3.95×10^{-4}
$\sum_{i=1}^4 d_i$	0.16	2.96	1.16:1.80	5.77×10^{-4}	3.85×10^{-4}
$\sum_{i=1}^3 d_i$	0.30	2.66	0.86:1.80	6.52×10^{-4}	3.77×10^{-4}
$\sum_{i=1}^2 d_i$	0.44	2.22	0.42:1.80	7.67×10^{-4}	3.60×10^{-4}
d_1	0.42	1.80	0:1.80	8.50×10^{-4}	0

3 结果与讨论

3.1 实验结果

为了验证硬化层试样磁滞回线模型的准确性,硬化层试件不等厚度的磁滞回线和微分磁导率曲线如图11、12所示。利用图5所示装置对试样进行重复5次测试,对磁滞回线求取平均值,结果如图12所示。对磁滞回线进行微分得到在不同硬化层厚度中的微分磁导率曲线,如图13所示。可以看出不同厚度硬化层的磁滞回线存在过渡变化的趋势,当厚度逐渐增加时(即层数的增

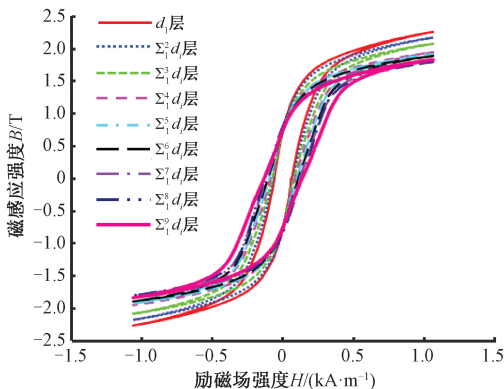


图11 不同切层叠加的磁滞回线

Fig. 11 Hysteresis loops superimposed on different slices

加),磁滞回线的形状逐渐“横向变宽”,畸变的程度也逐渐明显;微分磁导率曲线逐渐出现双峰结构,且主峰值逐渐减小,次峰值逐渐增大。分析其内部原因是由于硬化层及过渡层的占比逐渐增大,心部组织的占比逐渐减小,硬化层中硬磁相的马氏体材料占比增加,而心部组织中软磁相铁素体占比减小。

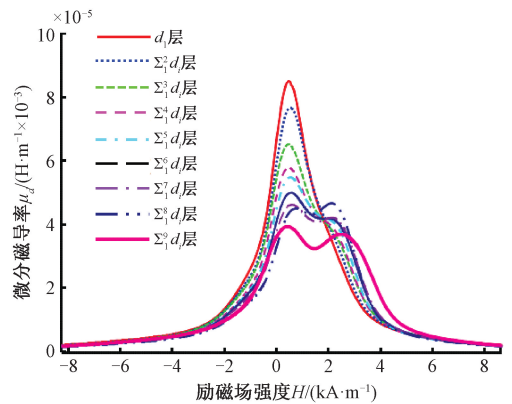


图12 不同切层叠加的微分磁导率

Fig. 12 Differential permeability of different slice layers

3.2 基于粒子群算法的多层结构反演

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是一种通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法^[21],过程如图13所示。本文在进

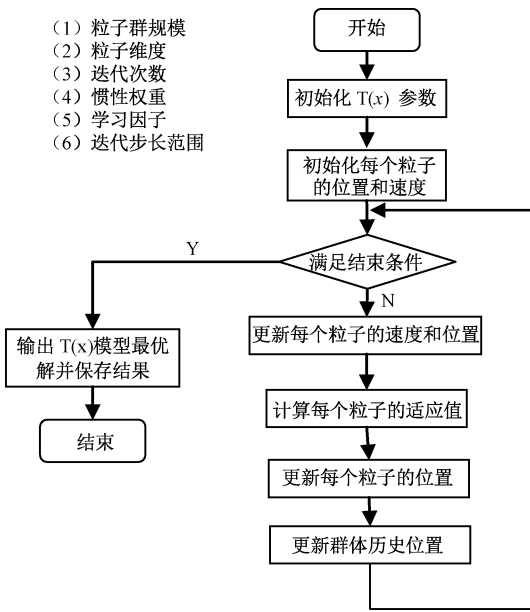


图 13 T(x)模型的粒子群算法流程

Fig. 13 Flow chart of particle swarm optimization for T(x) model

行 $T(x)$ 模型参数识别时采用粒子群算法来进行 5 个未知参数的求解,通过设置边界为硬化层的 $T(x)$ 参数作为上限,设置边界为心部组织的 $T(x)$ 参数作为下限。这里以 d_1+d_2 层的双层结构为例。 d_1 层(心部组织)及 d_1+d_2 层结构(含过渡层和心部组织)的磁滞回线可直接实验测得,而 d_2 层切割后发生翘曲难以准确测量其磁滞回线,因此通过反演的方法计算。

利用实验系统测量得到 d_1 层和 d_1+d_2 层的磁滞回线,并利用本文提出的模型和粒子群算法反演得到 d_2 层磁滞回线和微分磁导率如图 14、15 所示,因为 d_1 层厚度为 1.80 mm,而过渡层 d_2 厚度为 0.42 mm, d_1+d_2 层厚度为 2.22 mm。从图 15 可以看到 d_1+d_2 层的微分磁导率有畸变但次峰并不明显。而从反演的 d_2 层微分磁导率来看次峰非常明显。因此推断 d_1+d_2 层含有过渡层(硬磁相),但占比不高。而过渡层 d_2 层既有心部组织(软磁相)的占比,同时也有硬磁相的占比,且硬磁相的占比增大,因此微分磁导率的次峰值逐渐明显。同理,图 16、17 为 d_4 层结构磁滞回线和微分磁导率的反演结果。图 18、19 为 d_3 层结构磁滞回线和微分磁导率的反演结果。由图 21 可知,迭代 40 次时,模型结果已收敛,达到最佳适应度。

3.3 磁特征参量沿深度方向的变化

根据国标 GB/T 5617—2005、GB/T 1172—1999 测得淬硬试件沿深度方向的维氏硬度变化如图 8(c) 所示。可以看出从心部组织到硬化层,其硬度呈现出过渡特性,利用玻尔兹曼函数进行拟合,拟合优度大于 0.9,表明其

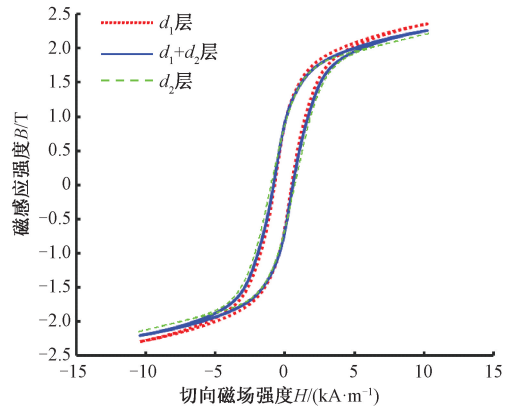


图 14 d_2 层结构磁滞回线反演结构

Fig. 14 The hysteresis loop inversion structure of the d_2 layer structure

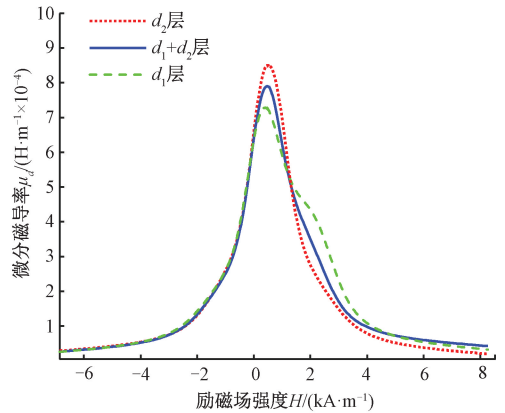


图 15 d_2 层结构微分磁导率反演

Fig. 15 Inversion of differential permeability of d_2 layer structure

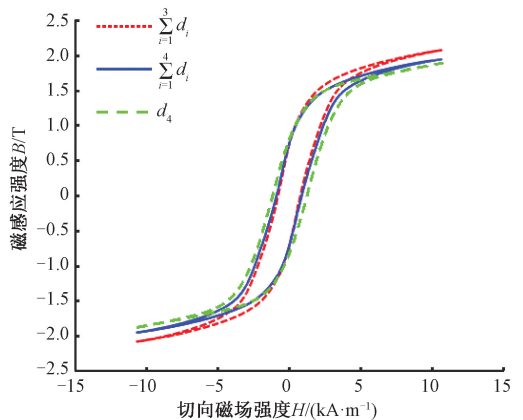


图 16 结构磁滞回线反演结构

Fig. 16 Structural hysteresis loop inversion structure

硬度的变化规律可用玻尔兹曼函数进行描述。通过粒子群算法得到的各层 $T(x)$ 模型参量沿深度方向的变化规

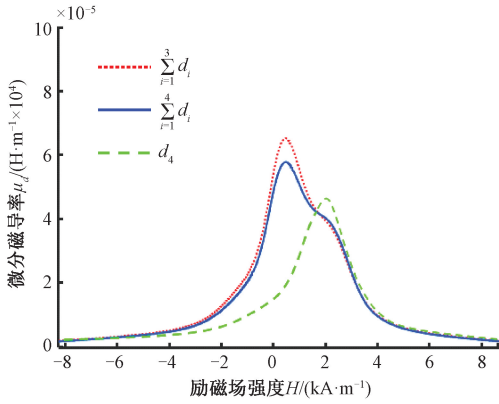


图 17 d_4 层结构微分磁导率反演

Fig. 17 Differential permeability inversion of d_4 -layer structure

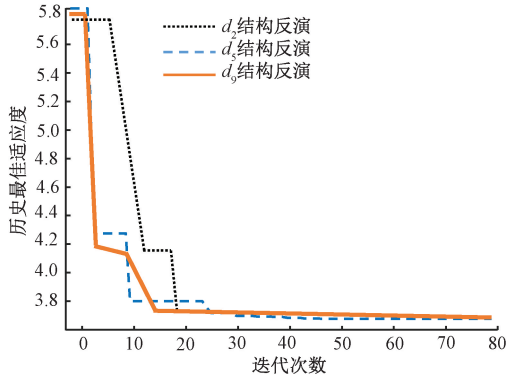


图 20 粒子群算法收敛过程

Fig. 20 Convergence process of particle swarm optimization

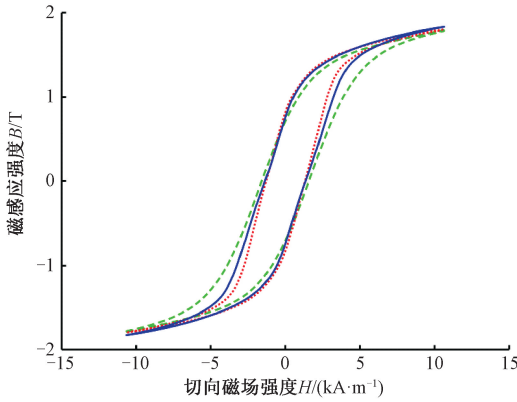


图 18 d_8 层结构磁滞回线反演结构

Fig. 18 The hysteresis loop inversion structure of the d_8 layer structure

可逆磁化程度相关的参量 A_0 沿深度方向的变化规律也可用玻尔兹曼函数拟合(拟合优度大于 0.9),但与硬度沿深度方向的依赖关系呈负相关。

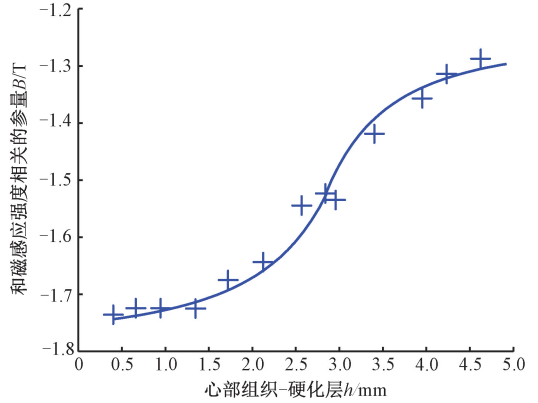


图 21 与磁化强度相关磁参量 B_0 与硬化层深度的关系

Fig. 21 Relationship between the magnetic parameter B_0 and the depth of the hardened layer in relation to the magnetization intensity

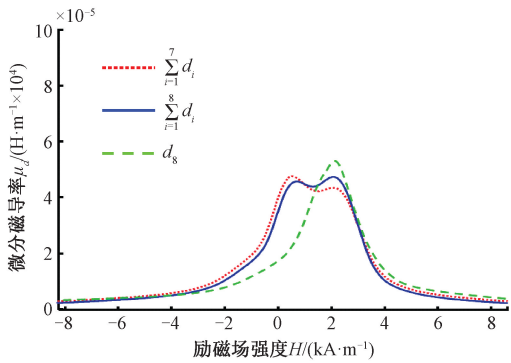


图 19 d_8 层结构微分磁导率反演

Fig. 19 Differential permeability inversion of d_8 -layer structure

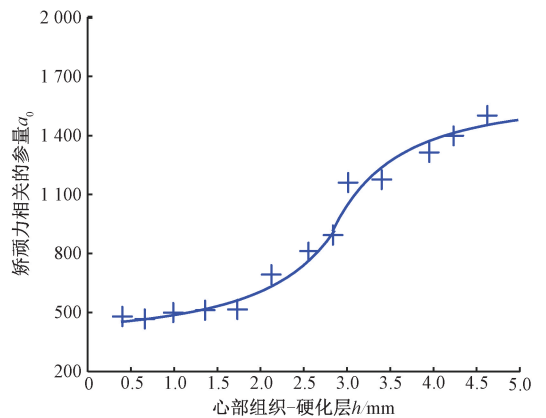


图 22 矫顽力 a_0 与硬化层深度的关系

Fig. 22 Relationship between coercivity a_0 and hardening layer depth

律如图 21~24 所示。可以看出和磁感应强度相关的参量 B_0 , 矫顽力 a_0 对深度的依赖关系符合玻尔兹曼过渡曲线(拟合优度大于 0.9), 且与硬度沿深度方向的依赖关系呈正相关。矫顽力点磁滞回线与 H_{ext} 轴的角度 C_0 、与

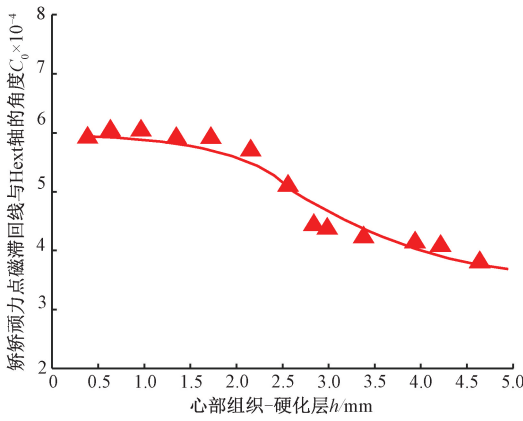


图 23 饱和磁感应强度角度 C_0 与硬化层试件厚度的关系
Fig. 23 The relationship between the angle of saturation magnetic induction intensity C_0 and the thickness of the hardened layer specimen

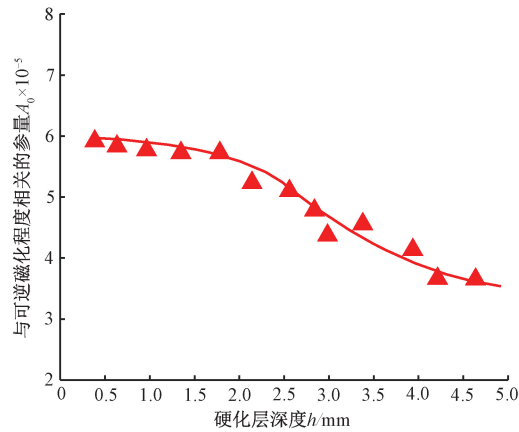


图 24 可逆磁化强度 A_0 与硬化层深度的关系
Fig. 24 Relationship between reversible magnetization A_0 and hardened layer depth

图 3 利用心部材料和硬化层材料磁滞回线模拟的双层材料磁滞回线结果与实验结果差距较大。通过线切割 8 次得到 9 层结构,再通过 $T(x)$ 模型和粒子群算法反演得到 $d_2 \sim d_9$ 层的磁滞回线。考虑层与层之间的耦合关系,模拟得到了如图 25 所示的 9 层材料模拟磁滞回线图。可以看到在考虑多层结构后,所得到的磁滞回线图与实验结果误差相较于双层材料模拟结果明显减小。因此证明心部组织和硬化层之间存在过渡层的假设正确,且过渡层的磁特征参量亦具有过渡特性。

4 结 论

本文提出了材料沿深度方向磁特性过渡规律的数学描述方法,研究了层间磁场耦合的建模以及将过渡特性

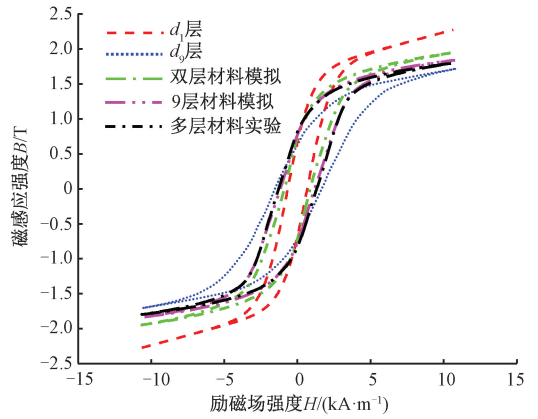


图 25 模拟多层板磁滞回线

Fig. 25 Simulating the hysteresis loop of a multilayer board

引入多层材料磁滞模型的方法。并通过实验验证了模型的准确性,得到的主要结论包括:

1) 提出了利用玻尔兹曼函数描述沿深度方向材料磁滞特性参数的渐变规律。通过对多层材料进行离散分层处理,考虑层间磁场耦合,建立了多层结构材料的 $T(x)$ 磁滞回线模型。

2) 利用粒子群算法和提出的多层材料磁滞回线模型对逐层切割的含硬化层试样进行磁滞回线的反演计算,计算结果与实验吻合较好,验证了模型的准确性。

3) 通过对比多层材料 $T(x)$ 磁滞回线模型参量与硬度沿深度变化的规律,发现它们均可用玻尔兹曼过渡函数拟合,验证了含硬化层材料的磁参量沿深度呈现渐变规律。

该模型可用于较为精确地描述多层材料的磁滞回线。另外,根据此模型亦可用于对硬化层深度和过渡层深度进行反演表征。

参考文献

[1] 范珍珍. 热处理对汽车用 DP590 双相钢组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(12): 210-212.
FAN ZH ZH. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of DP590 duplex steel for automobile[J]. Thermal Processing Technology, 2016, 45(12): 210-212.

[2] WANG X X, CAI Y CH, LIU X CH, et al. Quantitative prediction of surface hardness in Cr12MoV steel and S136 steel with two magnetic barkhausen noise feature extraction methods[J]. Sensors, 2024, 24(7): 2051.

[3] DONG H J, LIU X CH, SONG Y H, et al. Quantitative evaluation of residual stress and surface hardness in deep drawn parts based on magnetic Barkhausen noise

- technology[J]. *Measurement*, 2021, 168:108473.
- [4] HANG CH, 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.
- [5] RAGHUNATHAN A, MELIKHOV Y, SNYDER J E, et al. Modeling of two-phase magnetic materials based on Jiles-Atherton theory of hysteresis [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, 324 (1) : 20-22.
- [6] KOBAYASHI S, TAKAHASHI H, KAMADA Y. Evaluation of case depth in induction-hardened steels: Magnetic hysteresis measurements and hardness-depth profiling by differential permeability analysis[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 343: 112-118.
- [7] KAHROBAEE S, NOROUZI S, AHADI A. Non-destructive characterization of microstructure and mechanical properties of heat treated H13 tool steel using magnetic hysteresis loop methodology [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2019, 30(5) : 303-315.
- [8] MIRZAEI A, KAHROBAEE S. Non-destructive determination of microstructural/mechanical properties and thickness variations in API X65 steel using magnetic hysteresis loop and artificial neural networks [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2020, 35 (2) : 190-206.
- [9] PEREVERTOV O, STUPAKOV O, TOMÁŠ I, et al. Detection of spring steel surface decarburization by magnetic hysteresis measurements [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(6) :490-494.
- [10] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, 61(1/2) : 48-60.
- [11] JILES D C, WINNIE K. An integrated model of magnetic hysteresis, the magnetomechanical effect, and the Barkhausen effect[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(2) : 800211.
- [12] GAUNKAR N G P, NLEBEDIM I C, GAUNKAR G V P, et al. Examining the correlation between micro-structure and Barkhausen noise activity for ferromagnetic materials[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(11) :1-4.
- [13] TAKÁCS J. Mathematics of hysteretic phenomena: The $T(x)$ model for the description of hysteresis[M]. 2003.
- [14] KUMAR A, AROCKIARAJAN A. Evolution of nonlinear magneto-elastic constitutive laws in ferromagnetic materials: A comprehensive review [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 546:168821.
- [15] 赵志刚, 马习纹, 姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(1) :26-34.
- ZHAO ZH G, MA X W, JI J AN. Parameter identification and verification of J-A dynamic hysteresis model based on AFSA and PSO hybrid algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41 (1) : 26-34.
- [16] JILES D C, KIARIE W. An integrated model of magnetic hysteresis, the magnetomechanical effect, and the Barkhausen effect[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2021, 57(2) :800211.
- [17] STUPAKOV O, KIKUCHI H, LIU T, et al. Applicability of local magnetic measurements[J]. *Measurement*, 2009, 42(5) :706-710.
- [18] GORKUNOV E S. Magnetic methods for estimating elastic and plastic strains in steels of different classes[C] 17th World Conference on Non-Destructive Testing, Shanghai, 2008:1836-1843.
- [19] GORKUNOV E S, SUBACHEV Y V, POVOLOTSKAYA A M, et al. On the magnetic diagnosability of the stress state of a two-layer ferromagnet consisting of components with different signs of magnetostriction[C] 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, 2014:1260-1266.
- [20] 刘秀成, 张瑞环, 吴斌, 等. 基于多层结构磁滞模型的硬化层深度磁学表征与检测方法[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(20) :7-12.
- LIU X CH, ZHANG R H, WU B, et al. Magnetic characterization and detection method of hardened layer depth based on hysteresis model of multilayer structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(20) :7-12.
- [21] GAD A G. Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022, 29 (5) : 2531-2561.

作者简介



吴奇,2019年于安徽建筑大学获得学士学位,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为信号处理。

E-mail: 710112649@qq.com

Wu Qi received his B.Sc. degree from Anhui Jianzhu University in 2019. He is currently a master student at Beijing University of Technology. His main research direction is signal processing.



王钰珏(通信作者),2011年于北方工业大学获得学士学位,2015年于北京工业大学获得硕士学位,2022年于英国卡迪夫大学获得哲学博士学位,现为北京工业大学信息科学技术学院讲师。主要研究方向为特种检测机器人、电磁无损检测、微磁无损检测。

E-mail: wangyujue@bjut.edu.cn

Wang Yujue (Corresponding author) received his B.Sc. degree from North China University of Technology in 2011,

M.Sc. degree from Beijing University of Technology in 2015, and Ph.D. degree from Cardiff University in 2022. He is currently a lecturer in the School of Information Science and Technology at Beijing University of Technology. His main research directions are special testing robots, electromagnetic non-destructive testing, and micromagnetic non-destructive testing.



韩振华,2008年于河北工业大学获得硕士学位,现为北京中唐电工程咨询有限公司高级工程师。主要研究方向为无损检测与监理咨询。

E-mail: hanzhenhua2008@163.com

Han Zhenhua received his M.Sc. degree from Hebei University of Technology in 2008. He is currently a senior engineer at Beijing Zhongtangdian Engineering Consulting Co., Ltd. His main research interests include non-destructive testing, and micromagnetic non-destructive testing, supervision and consulting.