

文章编号: 1001-4888(2024)03-0261-17

# 用于 DH590 钢塑性变形和残余奥氏体表征的 多维微磁参量综合评价指标\*

傅萍<sup>1</sup>, 王钰珏<sup>2</sup>, 何存富<sup>2</sup>, 刘秀成<sup>2</sup>, 张阳阳<sup>3</sup>, 王林<sup>1,3</sup>, 王贤贤<sup>1</sup>

(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 信息学部, 北京 100124;

3. 首都集团有限公司技术研究院 薄板研究所, 北京 100043)

**摘要:** 研究利用微磁方法对 DH590 钢塑性变形量和残余奥氏体含量进行定量表征。利用微磁检测仪获取不同塑性变形量 DH590 钢的微磁信号, 并提取微磁信号的磁参量。提出基于拟合优度、归一化灵敏度和相对误差的磁参量综合评价指标, 分析磁参量对 DH590 钢塑性变形及残余奥氏体含量的表征能力。通过对比研究, 利用双高斯函数拟合提取的磁巴克豪森噪声和增量磁导率信号双峰磁参量可同时表征塑性变形及残余奥氏体含量。本文研究方法可为不同双相钢的塑性变形量及残余奥氏体含量的定量表征提供参考。

**关键词:** 微磁检测; 塑性变形量; 残余奥氏体含量; 综合评价指标

**中图分类号:** TH89

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-23-232

## 0 引言

增强成形性双相(Dual-phase, DH)钢属于新一代先进高强钢, 兼具断后伸长率高、成形性能好等优点, 目前已成为轻量化汽车车身结构件制造的重要材料。DH 钢的组分包括铁素体、马氏体和残余奥氏体。由于冷轧、冲击及拉伸等产生的塑性变形会诱导相组织中部分残余奥氏体向马氏体转变, 因此会使得材料在相变强化和塑性增长机制作用下强度和塑性得到提升<sup>[1]</sup>。塑性变形量是影响 DH 钢微观组分和宏观力学性能的关键参数之一, 对 DH 钢中的塑性变形量进行检测, 可以间接反映其相变程度或残余奥氏体含量, 对于评估材料微观组分和宏观力学性能具有重要的指导意义。

DH 钢中的铁素体和马氏体是铁磁性组分, 残余奥氏体为非铁磁性组分。在发生塑性变形过程中, DH 钢中的部分残余奥氏体逐渐转变为马氏体, 铁磁性组分体积占比增大, 材料的磁特性会发生变化<sup>[2]</sup>。材料磁性检测具有无损、快速、非接触等优势, 通过测量 DH 钢的磁性变化规律, 可以在非破坏条件下间接地反映 DH 钢发生的塑性变形量和微观相变<sup>[3-4]</sup>。国内外学者利用不同的磁测技术对钢材塑性变形及相变过程进行了无损评估。例如, 何存富等<sup>[5]</sup>提出了一种基于调幅切向磁场测量的无损检测方法, 用于低碳钢的残余塑性应变定量评估, 研究发现, 霍尔元件输出电压随线性调幅激励电压变化可得到蝶形轨迹, 在蝶形轨迹的大部分区域内, 霍尔元件输出电压与低碳钢中静态拉伸塑性变形的平方根存在良好的线性关系。XIE 等<sup>[6]</sup>通过实验和模拟研究了脉冲涡流检测方法评价奥氏体不锈钢塑性变

\* 收稿日期: 2023-11-04; 修回日期: 2024-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(12122201, 62271015, 12302237)

通信作者: 王钰珏(1990-), 男, 博士, 讲师。研究方向为特种检测机器人、电磁无损检测、磁材料与微磁无损检测。Email: wangyujue@bjut.edu.cn

刘秀成(1984-), 男, 博士, 教授。主要从事力学性能微磁无损测量、结构健康监(检)测技术与仪器研究。Email: xiuchliu@bjut.edu.cn

形的可行性及塑性变形引起的电磁特性变化规律,结果表明,塑性变形小于5%时,脉冲涡流信号随塑性变形单调增加;此外,他们通过数值模拟研究了电磁材料性能对塑性变形的依赖关系,结果表明,随着塑性变形的增大,电磁材料的导电性降低,磁导率增加。STUPAKOV等<sup>[7]</sup>和何存富等<sup>[8]</sup>测量了不同塑性变形下低碳钢的磁滞回线,并提取了其矫顽力、剩余磁感应强度等特征磁参量,实验结果表明,矫顽力和剩余磁感应强度与塑性变形呈非线性关系,随着塑性变形的增加,矫顽力增大,剩余磁感应强度减小。以上研究表明,切向磁场、涡流和磁滞回线的特征参量可用于铁磁材料塑性变形的定量评估。

此外,相比磁导率、表面磁场强度而言,增量磁导率和磁巴克豪森噪声等微磁信号携带了更为丰富的材料微观信息,更适于塑性变形及相变程度的无损表征。李丽娟等<sup>[9]</sup>从数值模拟角度,将B-H(磁感应信号-切向磁场)曲线的特征量导入数值计算中,间接分析了塑性变形对增量磁导率信号曲线的影响规律;由于塑性变形影响铁磁性材料的剩磁和矫顽力,将塑性变化的变化等效为磁滞回线中剩磁和矫顽力的变化,并分别计算这些参数变化对增量磁导率信号曲线的影响,结果表明,材料剩磁和矫顽力会影响增量磁导率信号曲线的峰峰距、峰值和过零点等特征参数。王志等<sup>[10]</sup>通过实验观察到,在峰峰值为5V、频率为20Hz的正弦电压信号激励下,铁素体-马氏体双相钢中的磁巴克豪森噪声信号包络线呈现双峰特征,高、低磁场强度范围出现的峰分别代表硬磁相(马氏体)和软磁相(铁素体)<sup>[11-12]</sup>,随着两种组分体积占比的改变,磁巴克豪森噪声包络线双峰发生规律性变化。BATISTA等<sup>[13]</sup>利用磁巴克豪森噪声信号对碳钢中渗碳体含量进行了表征实验,研究结果表明,渗碳体的存在使得磁巴克豪森噪声包络曲线出现双峰现象,其中,代表渗碳体的磁巴克豪森噪声峰值出现在高磁场处,并随着渗碳体含量的增加而增加。以上文献表明,在适当的激励条件下,磁巴克豪森噪声可出现双峰现象,但均未对双峰特征值与微观组织变化的相关性进行定量分析。

虽然现有的研究表明磁测法具有对双相钢材料塑性变形、微观组织变化进行表征的能力,但上述文献大多只关注了单一方法或磁参量和钢材塑性变形的相关性,且磁参量对塑性变形的表征能力未进行系统对比。本文利用不同塑性变形的DH590钢试件进行微磁检测实验,重点分析不同磁参量对塑性变形量、残余奥氏体的定量表征能力;通过综合评价指标对磁参量进行筛选,得到适用于DH590钢塑性变形量、残余奥氏体定量表征的多维磁参量。

## 1 检测原理与实验系统

铁磁性材料放置于交变磁场中,其内部磁畴将发生复杂的动力学行为。材料的微观特征(如微观组织、微观缺陷等)影响着磁畴的运动,通过测量材料的磁特性可以间接反映其内部微观状态。DH钢发生塑性变形后,位错密度增加并诱发相变,这类微观状态的改变会影响各类磁特性信号。

多功能微磁检测是在材料磁化过程中同步获取多种反映微观缺陷状态磁信号的技术手段。多功能微磁检测系统一般可检测切向磁场(Tangential Magnetic Field, TMF)、磁巴克豪森噪声(Magnetic Buckhausen Noise, MBN)、增量磁导率(Incremental Permeability, IP)和多频涡流(Multi-frequency Eddy Current, MFEC)等信号,从信号中提取的丰富磁参量具有表征材料塑性变形、相变程度等的潜力。检测系统由3个模块组成,分别是上位机、微磁检测仪和微磁探头。其中,微磁探头由磁轭、激励线圈、检测元件组成;检测元件包括霍尔元件和感应线圈;上位机控制信号的激励和采集。4类磁信号的采集过程如下:微磁探头放置于试件表面,低频激励线圈产生幅值为2V、频率为200Hz的正弦信号,试件被磁化,通过霍尔元件和感应线圈分别获得切向磁场和磁巴克豪森噪声。在此激励信号的基础上,叠加幅值为1V、频率为100kHz的正弦信号,通过霍尔元件和感应线圈可获得切向磁场和涡流信号,涡流信号的虚部随切向磁场的变化曲线,即为增量磁导率曲线。多频涡流的激励信号由高频激励线圈产生,包含4个频率的正弦信号,频率分别为10kHz、20kHz、50kHz和100kHz。通过感应线圈可获得多频涡流信号,信号采样率保持为2MHz。利用多功能微磁检测系统对图1(b)所示的DH590钢试样进行磁巴克豪森噪声、增量磁导率、切向磁场和多频涡流等4种信号检测。采用的多功能微磁检测系统由本文作者所在团队(北京工业大学)自主研发,实物如图1(a)所示,其工作原理详见文献[14-15]。

图1(b)所示的试样取自同一块厚度为0.75mm的DH590钢板,采用线切割工艺加工成如图2(b)



图1 (a)微磁检测仪;(b)不同塑性变形的 DH590 试样

Fig. 1 (a)micromagnetic instrument; (b) DH590 samples with different plastic deformation

所示的拉伸试样。采用型号为 Zwick/Z50 的电子式万能材料试验机,根据国标 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》对试样进行单轴拉伸,使材料进入其塑性阶段后进行卸载。通过调整试件卸载时的载荷值,获得具有不同残余塑性变形的试件,表 1 给出了不同编号试样对应的塑性变形量。

表 1 试样塑性变形量  
Tab.1 Plastic strains of specimen

试件编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
塑性变形 $\beta/\%$	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
试件编号	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	—
塑性变形 $\beta/\%$	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	—

在完成微磁检测实验后,对拉伸试样中心位置进行线切割取样,如图 2(b)所示,制成尺寸为 14mm×16mm×0.75mm 的待测金相样品。将待测金相样品按照金相制样标准进行打磨抛光,并用超声波清洗器清洗。通过 X 射线衍射分析技术测试金相样品的残余奥氏体含量,当钢中存在奥氏体、铁素体、马氏体等不同的相组织时,一束单色 X 射线照在上面,不同相组织分别在不同的衍射角产生衍射峰,通过不同的衍射峰积分强度可以反推出奥氏体等相组织的占比。本实验采用德国布鲁克 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪,检验依据是 YB/T 5338—2019《钢中奥氏体定量测定 X 射线衍射仪法》,靶材选择 Co 靶,管电压为 35kV,管电流为 40mA,扫描速度为 2(°)/min,步长为 0.02°,扫描角度为 45°~115°。不同塑性变形的 DH 钢试样 XRD 测试图谱如图 2(a)所示,其中,扫描角度为 51°、59°、89°和 110°的 X 射线对应的衍射峰代表奥氏体,角度为 52°、77°和 100°的 X 射线对应的衍射峰代表马氏体和铁素体。由图 2(a)可知,随着塑性变形的增加,代表奥氏体的衍射峰波峰下降。残余奥氏体含量的测试结果如图 2(c)所示,由图可见,未发生塑性变形时,金相试样测得的残余奥氏体含量为 2.6%;塑性变形为 18%时,金相试样测得的残余奥氏体含量为 1%。随着塑性变形的增加,金相试样测得的残余奥氏体含量逐渐减少。

## 2 实验结果

### 2.1 信号特征参量提取

采用图 1(a)所示系统对每块拉伸试样进行 5 次重复微磁检测实验,图 3 给出了不同拉伸试样中检测得到的 4 类磁信号。通过对比不同塑性变形量下的 4 类磁信号,可以直观看出,不同塑性变形试件采集得到的 4 种磁信号存在明显差异,且塑性变形的增加使得信号的某些特征呈现单调性变化趋势。从图 3 所示信号中提取共计 41 项磁参量(含义及符号见附表 1),用作塑性变形及残余奥氏体含量表征的候选参数。

从图 3(b)和图 3(c)可以看出,在发生塑性变形试样中测得的磁巴克豪森噪声和增量磁导率蝶形曲

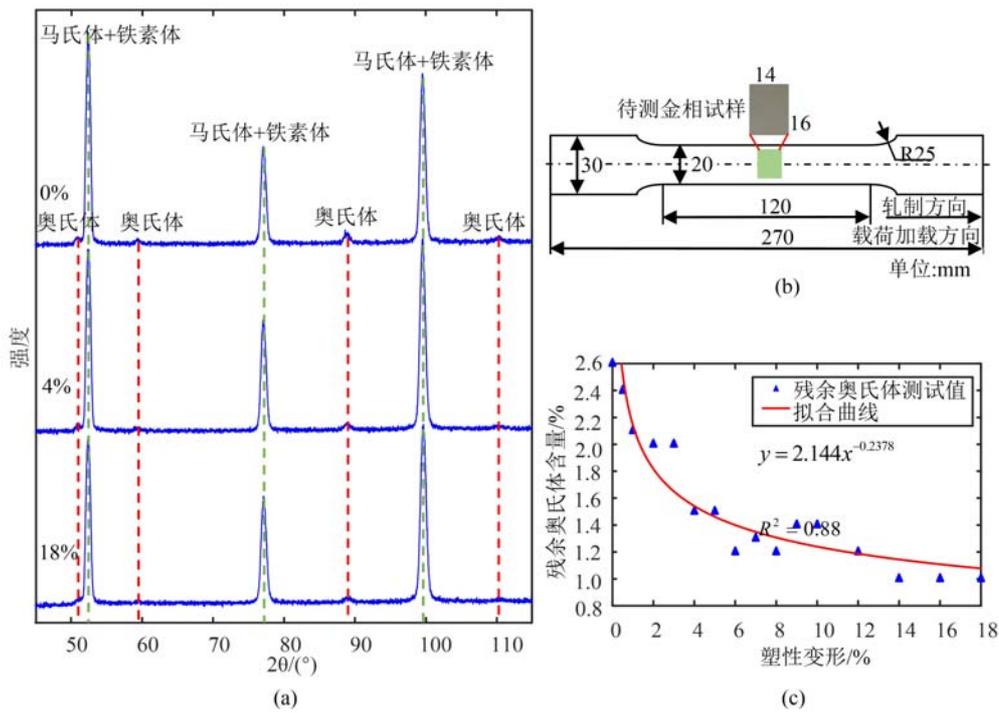


图 2 (a)XRD 测试图谱;(b)拉伸试样尺寸;(c)残余奥氏体含量随塑性变形的变化

Fig. 2 (a) XRD test pattern;(b) tensile specimen size;(c) changes in residual austenite content with plastic

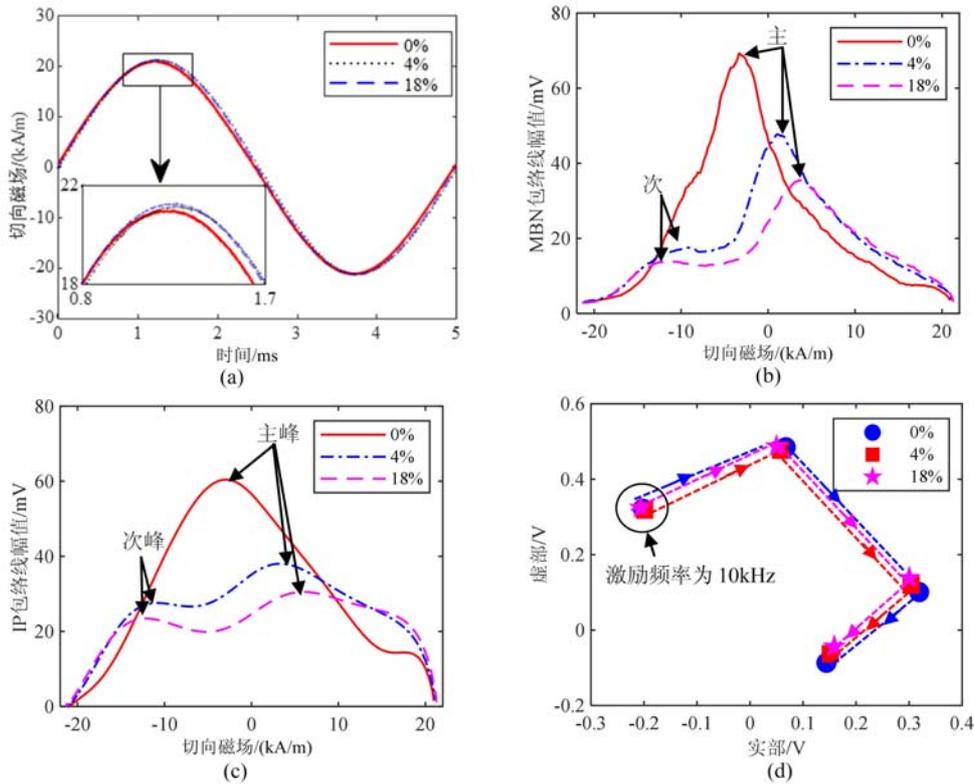


图 3 (a)切向磁场;(b)磁巴克豪森噪声包络线;(c)增量磁导包络线;(d)多频涡流随塑性变形的变化

Fig. 3 (a) tangential magnetic field; (b) magnetic Barkhausen noise envelope; (c) incremental magnetic conductivity envelope; (d) multi frequency eddy current variation with plastic deformation

线存在明显的双峰特征。图 4(a)给出了母材(未发生塑性变形)和塑性变形  $\beta=4\%$  的试样中测得的原始磁巴克豪森噪声时域信号。相比于未发生塑性变形试样测得的磁巴克豪森噪声,  $\beta=4\%$  的试样中测

得的磁巴克豪森噪声出现双峰现象。随着塑性变形增加,残余奥氏体逐渐转变为马氏体,马氏体相比铁素体的体积占比提升。这一内在机制使得磁巴克豪森噪声蝶形曲线的双峰特征随塑性变形增加,而出现规律性转换(图 4(b)),次峰与主峰的峰高比值(次峰峰高/主峰峰高)逐渐增大,说明代表马氏体的次峰在逐渐强化。随着塑性变形增加,增量磁导率蝶形曲线中的双峰特征也呈现和磁巴克豪森噪声蝶形曲线相似的变化规律。

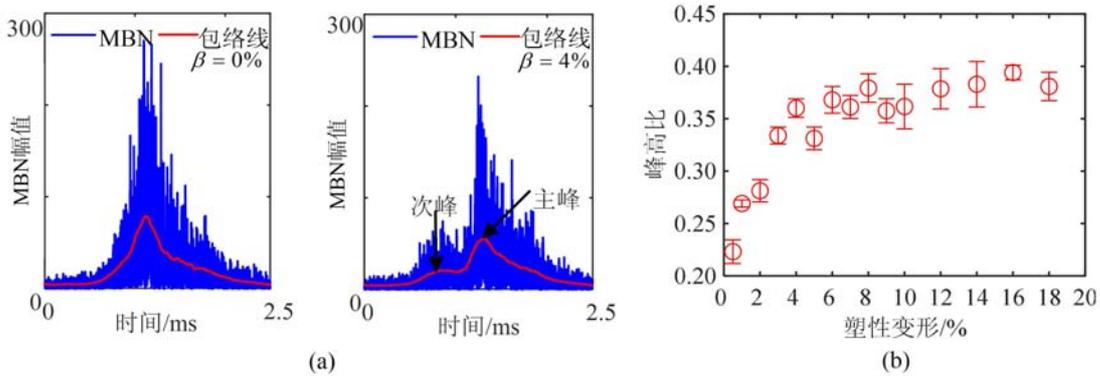


图 4 (a) 0%和 4%塑性变形下的磁巴克豪森噪声信号;(b)峰高比

Fig. 4 (a) magnetic Buckhausen noise signal of 0% and 4% plastic deformation; (b) ratio of peak height

附表 1 所列的传统磁参量只统计了图 3(b)和图 3(c)所示曲线的主峰信息,未计入次峰及双峰特征参数的对比项。利用双高斯函数对具有双峰特征的蝶形曲线进行拟合,函数表达式如下:

$$y = G_1 e^{-\frac{(x-Q_1)^2}{2c_1^2}} + G_2 e^{-\frac{(x-Q_2)^2}{2c_2^2}} \quad (1)$$

式中:  $G_1$ 、 $G_2$  分别为主峰和次峰的峰高;  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为主峰和次峰的位置;  $c_1$ 、 $c_2$  为常数项。

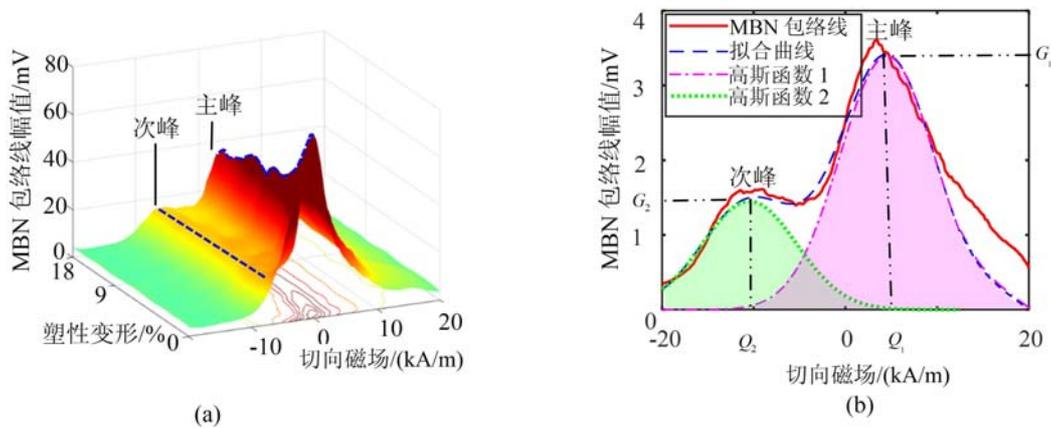


图 5 (a)不同塑性变形下的磁巴克豪森噪声包络线;(b)双峰磁参量提取示意图

Fig. 5 (a)magnetic Buckhausen noise envelope under different plastic deformations;

(b) schematic diagram of double peak magnetic parameter extraction

不同塑性变形下的磁巴克豪森噪声包络线如图 5(a)所示,相比铁素体而言,马氏体为硬磁相,其对应的峰值位置出现在更高强度的切向磁场处<sup>[16]</sup>,因此,图 5(b)中标记的主峰和次峰分别对应铁素体和马氏体。双峰磁参量提取示意图如图 5(b)所示,峰高及位置的数值由双高斯函数拟合确定。分别统计 MBN 信号和 IP 信号蝶形曲线的双峰间距、峰高差,共 4 项磁参量,其含义及符号见附表 1,从 4 类磁信号中提取传统磁参量和双峰磁参量共 45 项。

### 2.2 磁参量重复测试性能分析

交变磁场作用下的磁畴磁化行为可视为平稳随机过程,加之实验测试中也会引起随机误差,这导致磁参量重复测量数据不可避免地存在一定的分散性。为选择重复测试性能较好的磁参量用于表征 DH 钢塑性变形或残余奥氏体含量,利用变异系数  $C_v = \frac{\sigma}{\mu}$  (式中  $\sigma$  为标准差,  $\mu$  为平均值)对 45 项磁参量重

复测试数据的分散性进行评价。图 6(a)给出了所有拉伸试样中 45 项磁参量对应的变异系数值统计结果。图 6(b)为各磁参量变异系数平均值统计结果,选择变异系数平均值  $\bar{C}_v = 5\%$  为阈值,当磁参量的  $\bar{C}_v$  低于阈值时,认为其重复测试性能较好,可用作 DH 钢塑性变形或残余奥氏体表证的候选参数。由图 6(b)可知,共有 36 项磁参量的变异系数小于 5%,可作为候选参数。其中,4 项双峰磁参量的变异系数均小于 5%,可认为双峰磁参量的重复性能良好。

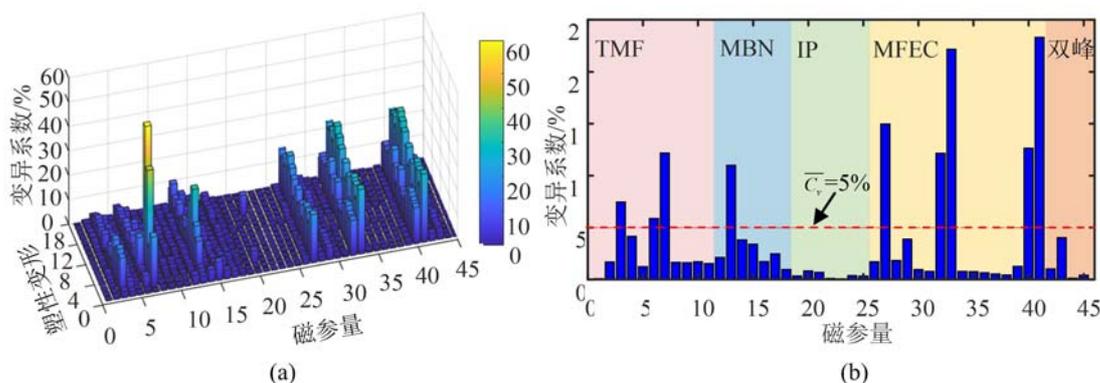


图 6 (a)不同塑性变形下各磁参量的变异系数;(b)各磁参量的变异系数平均值

Fig. 6 (a)the coefficient of variation of various magnetic parameters under different plastic deformations;

(b) average coefficient of variation of various magnetic parameters

### 3 讨论与分析

#### 3.1 磁参量对塑性变形的表征能力分析

通过变异系数对 45 项磁参量进行筛选后,分析剩余 36 项磁参量对塑性变形的表征能力。在铁磁性材料的塑性变形和残余奥氏体含量的无损评估中,磁参量不仅应与塑性变形和残余奥氏体含量具有强相关性,还应具有高灵敏度、高分辨和低误差的特点。因此,为寻找表征塑性变形和残余奥氏体含量的最佳磁参量,需综合评价 36 项来自 4 类磁信号的磁参量。

首先,为分析磁参量与塑性变形和残余奥氏体含量的变化趋势以及得到定量预测模型,采用线性和非线性函数进行拟合。利用一次函数( $y = ax + b$ )、二次函数( $y = ax^2 + bx + c$ )和幂函数( $y = ax^b$ )对变化趋势进行拟合,采用拟合优度  $R^2$  作为评价拟合函数的指标。36 项磁参量 3 类拟合函数的拟合优度如图 7 所示。拟合优度越接近于 1,则说明拟合优度越好。设  $y$  为检测数据, $n$  为检测数据点数,其均值为  $\bar{y}$ ,拟合值为  $\hat{y}$ ,拟合优度表达式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

以拟合优度 0.9 为基准,筛选出任意两类拟合函数拟合优度均大于 0.9 的磁参量,认为该磁参量与塑性变形具有强相关性。因此,共筛选出 11 项磁参量,分别是 T12、T14、T15、T16、T18、T20、T24、T42、T43、T44 和 T45。由图 7 可知,非线性函数的拟合优度均大于线性函数的拟合优度,表明磁参量与塑性变形的变化趋势呈非线性关系。此外,该 11 项磁参量均来自磁巴克豪森噪声和增量磁导率信号,表明磁巴克豪森噪声和增量磁导率信号比切向磁场、多频涡流信号更适于 DH590 塑性变形的表征。同时,4 项双峰磁参量的任意两类拟合函数的拟合优度均大于 0.9,表明 4 项双峰磁参量均与塑性变形具有强相关性。

筛选出与塑性变形具有强相关性的 11 项磁参量后,进一步评价该 11 项磁参量对塑性变形的敏感程度,采用归一化灵敏度  $\chi$  作为评价指标。灵敏度是指在一定塑性变形(残余奥氏体含量)区间内,磁参量的实际值相对于塑性变形下某一个磁参量的变化。而不同的磁参量的量纲和量纲单位不同,为了消除磁参量之间的量纲影响,对灵敏度进行归一化处理,得到归一化灵敏度。若某个磁参量在一定塑性变

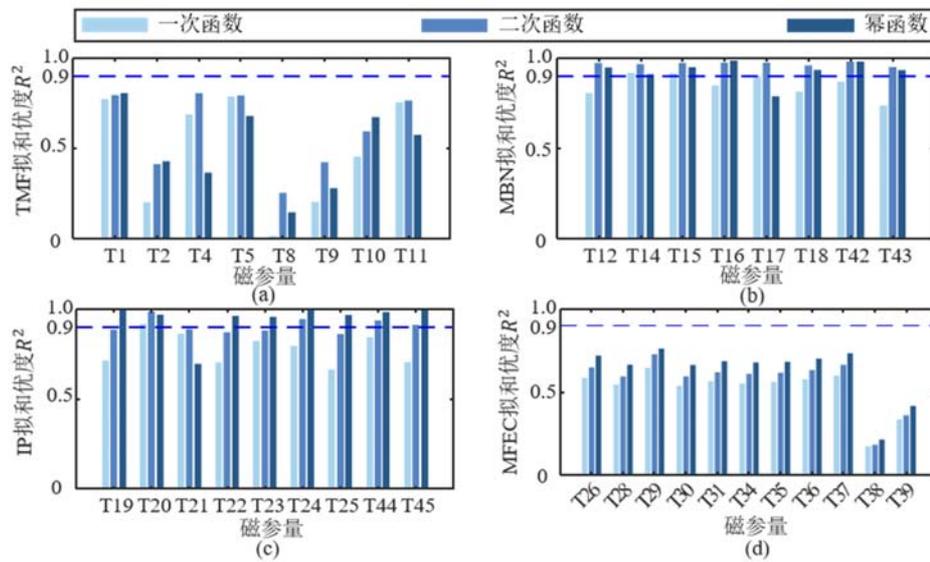


图 7 (a)切向磁场磁参量;(b)磁巴克豪森噪声磁参量;(c)增量磁导率磁参量;  
(d)多频涡流磁参量与塑性变形的拟合优度统计结果

Fig. 7 (a) tangential magnetic field magnetic parameters; (b) magnetic Barkhausen noise magnetic parameters; (c) incremental permeability magnetic parameters; (d) multifrequency eddy current magnetic parameters and statistical results of goodness of fit for plastic deformation

形内,归一化灵敏度越大,则说明该磁参量对塑性变形越敏感。为评估磁参量在整个塑性变形区间内的敏感性,统计 11 项磁参量在塑性变形 0.5%~18% 内的灵敏度,灵敏度计算公式如下:

$$\chi_i = \frac{|\varphi_2 - \varphi_1|}{\varphi_{\min}} \quad (3)$$

式中:  $\varphi_2$  为 18% 塑性变形下的磁参量幅值;  $\varphi_1$  为 0.5% 塑性变形下的磁参量幅值;  $\varphi_{\min}$  为  $\varphi_2$  和  $\varphi_1$  磁参量幅值最小值。

对灵敏度进行归一化处理,  $\chi_{\min}$  为计算得到的灵敏度最小值,  $\chi_{\max}$  为计算得到的灵敏度最大值,计算公式如下:

$$\chi = \frac{(\chi_i - \chi_{\min})}{(\chi_{\max} - \chi_{\min})} \quad (4)$$

11 项磁参量的归一化灵敏度统计结果如图 8(a) 所示,由图可知,在 3 类拟合函数中,相比于非线性函数(二次函数和幂函数),线性函数(一次函数)的归一化灵敏度最高。在 11 项磁参量中,磁参量 T20 的归一化灵敏度最高。

此外,预测模型的精度也是评价磁参量表征能力的重要指标之一。一般来说,预测模型的相对误差越小,则说明预测模型的准确性越高。因此,可通过计算每项磁参量的平均相对误差  $\bar{\delta}$  以评价模型的准确性。设预测值与真实值之间的绝对误差为  $\Delta$ , 真实值为  $L$ ,  $N$  为检测的次数。在本文中,  $N$  为 75 (共设置 15 组塑性变形量, 每组重复检测 5 次)。每项磁参量的平均相对误差  $\bar{\delta}$  的计算公式如下:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta}{L} \times 100\% \right|}{N} \quad (5)$$

11 项磁参量的平均相对误差如图 8(b) 所示,由图可知,在 3 类拟合函数中,二次函数的平均相对误差最大,其次是一次函数,最后是幂函数。其中,幂函数得到的预测模型中,双峰磁参量 T45 平均相对误差最小。

由模型的拟合优度  $R^2$ 、归一化灵敏度  $\chi$  和平均相对误差  $\bar{\delta}$  统计结果可知,非线性函数(二次函数和幂函数)的拟合优度均大于线性函数(一次函数)的拟合优度,表明磁参量与塑性变形的变化趋势呈非线性关系。二次函数的平均相对误差最大,因此认为幂函数是描述磁参量与塑性变形关系的最佳拟合

函数。

由本节分析可知,根据不同的评估标准,得到的最佳磁参量也不同。因此,需综合考虑 11 项磁参量表征塑性变形模型的拟合优度  $R^2$ 、归一化灵敏度  $\chi$  和平均相对误差  $\bar{\delta}$ 。

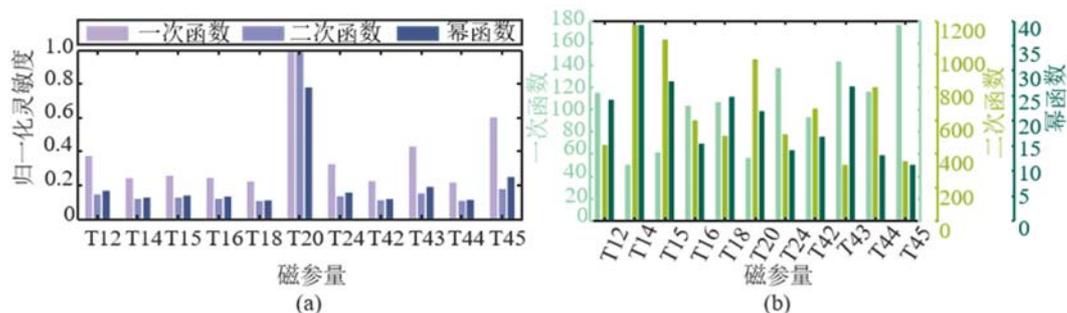


图 8 (a)表征塑性变形模型的归一化灵敏度统计结果;(b)表征塑性变形模型的平均相对误差统计结果

Fig. 8 (a)normalized sensitivity statistical results characterizing plastic deformation models;

(b) statistical results of average relative error characterizing plastic deformation models

为了得到表征能力最佳的磁参量,考虑拟合优度  $R^2$ 、归一化灵敏度  $\chi$  和平均相对误差  $\bar{\delta}$  指标的影响。其中,拟合优度  $R^2$ 、归一化灵敏度  $\chi$  越大,平均相对误差越小,则磁参量表征能力越强。综合指标  $\psi$  的计算公式如下:

$$\psi = \left| \frac{R^2 \cdot \chi}{\bar{\delta}} \right| \quad (6)$$

利用式(6)计算得到综合指标  $\psi$ ,综合指标  $\psi$  统计结果如图 9 所示。11 项磁参量的评价指标统计结果见附表 2。由图 9 可知,3 类拟合函数中,幂函数拟合磁参量与塑性变形得到的模型综合指标最高,其次是一次函数,最后是二次函数。在幂函数得到的模型中,磁参量 T20 的综合指标最高,因此,磁参量 T20 选作表征塑性变形的最佳磁参量。

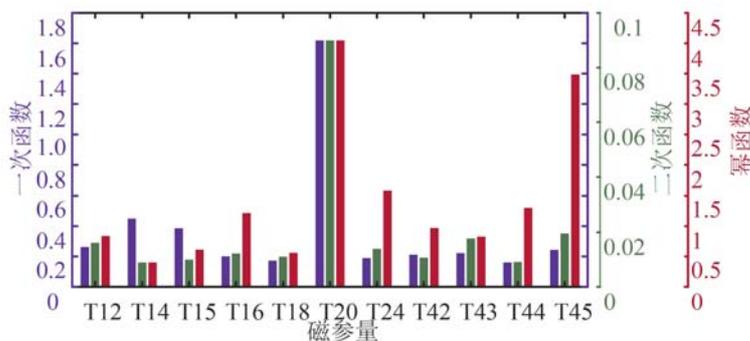


图 9 表征塑性变形模型的综合指标统计结果

Fig. 9 Statistical results of comprehensive indicators characterizing plastic deformation models

磁参量 T20 与塑性变形变化趋势的幂函数拟合结果如图 10(a)所示,将每块拉伸试样重复 5 次检测的磁参量结果求取均值,利用幂函数拟合 15 块拉伸试样磁参量均值与塑性变形的变化趋势。每块试件重复检测 5 次,共有 15 块拉伸试样,因此,得到 75 组(5×15)数据。利用 75 组数据作为校验数据代入模型中,得到塑性变形的预测值,预测结果如图 10(b)所示,塑性变形的预测值均在 95%置信区内,平均相对误差为 18.221%。

### 3.2 磁参量对残余奥氏体含量的表征能力分析

分析剩余 36 项磁参量随残余奥氏体含量的变化趋势,统计 36 项磁参量 3 类拟合函数的拟合优度  $R^2$ ,结果如图 11 所示。筛选出任意 2 类拟合函数拟合优度均大于 0.9 的磁参量,共有 5 项磁参量,分别是 T12、T18、T24、T43 和 T44。该 5 项磁参量均来自磁巴克豪森噪声和增量磁导率信号,表明磁巴克豪森噪声和增量磁导率信号比切向磁场、多频涡流信号更适于 DH590 残余奥氏体含量的表征。此外,

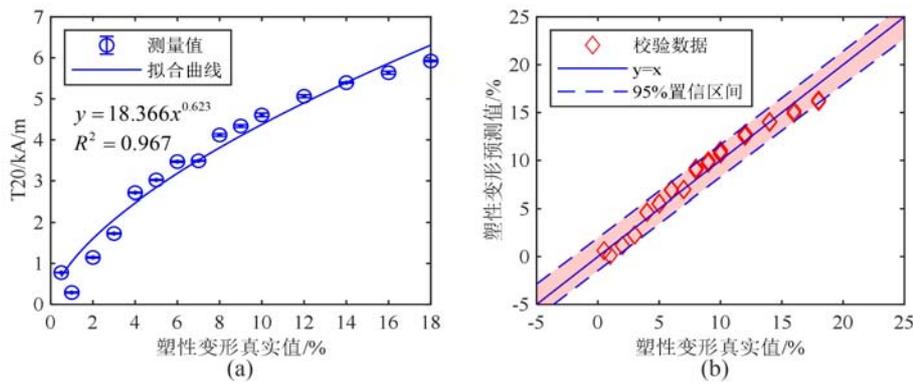


图 10 (a) 磁参量 T20 与塑性变形的拟合曲线; (b) 磁参量 T20 与预测塑性变形结果  
 Fig. 10 (a) the fitting curve between magnetic parameter T20 and plastic deformation;  
 (b) magnetic parameter T20 and predicted plastic deformation results

双峰磁参量 T43 和 T44 的任意 2 类拟合函数的拟合优度均大于 0.9, 表明该 2 项双峰磁参量均与残余奥氏体含量具有强相关性。

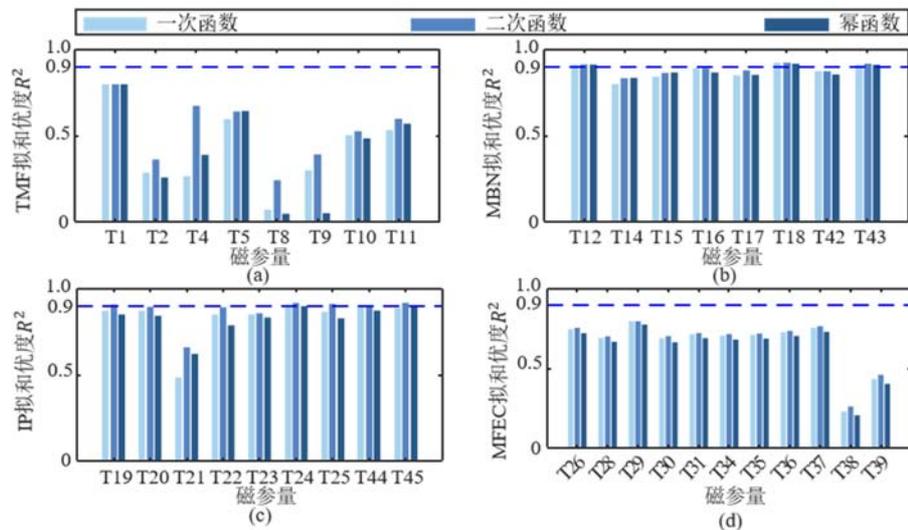


图 11 (a) 切向磁场磁参量; (b) 磁巴克豪森噪声磁参量; (c) 增量磁导率磁参量;  
 (d) 多频涡流磁参量与残余奥氏体含量的拟合优度统计结果

Fig. 11 (a) tangential magnetic field magnetic parameters; (b) magnetic Barkhausen noise magnetic parameters; (c) incremental permeability magnetic parameters; (d) multifrequency eddy current magnetic parameters and statistical results of goodness of fit for residual austenite content

计算 5 项磁参量(T12、T18、24、T43 和 T44)的归一化灵敏度和平均相对误差, 统计结果如图 12 所示。由图 12(a)可知, 在 3 类拟合函数中, 相比于非线性函数(二次函数和幂函数), 线性函数(一次函数)的归一化灵敏度最高, 其次是幂函数, 最后是二次函数。其中, 一次函数拟合磁参量与残余奥氏体含量关系的模型中, 5 项磁参量归一化灵敏度均大于 0.9。

由图 12(b)可知, 3 类拟合函数的平均相对误差在同一水平, 平均相对误差均为 6%~9%。因此, 在平均相对误差相近的情况下, 优先选择归一化灵敏度高的拟合模型, 即认为一次函数是描述磁参量与残余奥氏体含量关系的最佳拟合函数。

为筛选出表征残余奥氏体含量的最佳磁参量, 利用式(6)计算得到综合指标, 综合指标统计结果如图 13 所示。5 项磁参量的评价指标统计结果见附表 3。由图 13 可知, 3 类拟合函数中, 一次函数拟合磁参量与残余奥氏体含量得到的模型综合指标最高, 其次是幂函数, 最后是二次函数。在一次函数得到的模型中, 磁参量 T18 的综合指标最高, 因此, 磁参量 T18 可选作表征残余奥氏体含量的最佳磁参量。

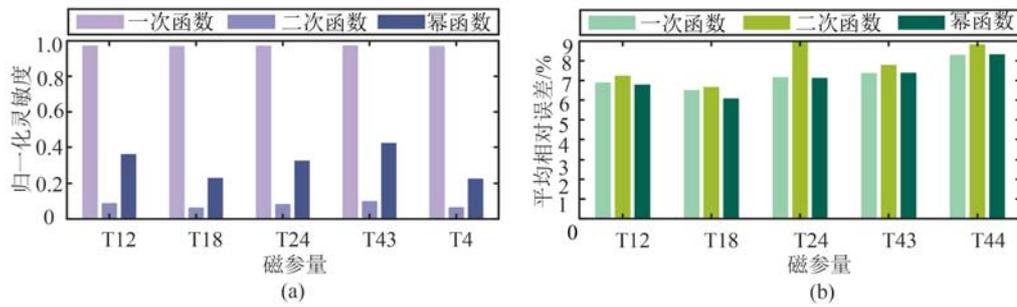


图 12 (a)表征残余奥氏体含量模型的归一化灵敏度统计结果;(b)表征残余奥氏体含量模型的平均相对误差统计结果

Fig. 12 (a)normalized sensitivity statistical results characterizing residual austenite content models;

(b) statistical results of average relative error characterizing residual austenite content models

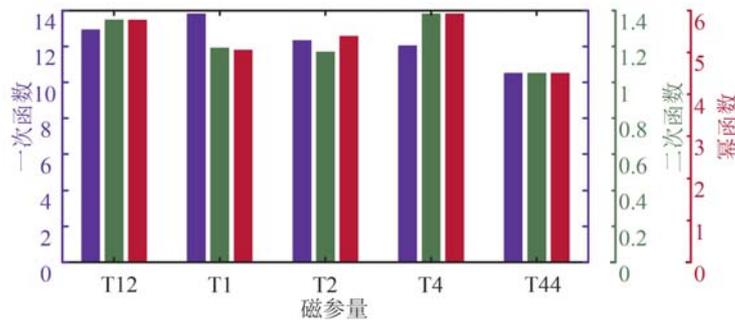


图 13 表征残余奥氏体含量模型的综合指标统计结果

Fig. 13 Statistical results of comprehensive indicators characterizing residual austenite content models

磁参量 T18 与残余奥氏体含量的拟合结果如图 14 所示,将每块试件重复 5 次检测的磁参量结果求取均值,利用一次函数拟合 15 块试件磁参量均值与残余奥氏体含量的变化趋势,拟合结果如图 14 (a)所示。每块试件重复检测 5 次,共有 15 块试件,因此,得到 75 组(5×15)数据。利用 75 组数据作为校验数据代入模型中,得到残余奥氏体含量的预测值,预测结果如图 14(b)所示,残余奥氏体含量的预测值均在 95%置信区间内,平均相对误差为 6.523%。

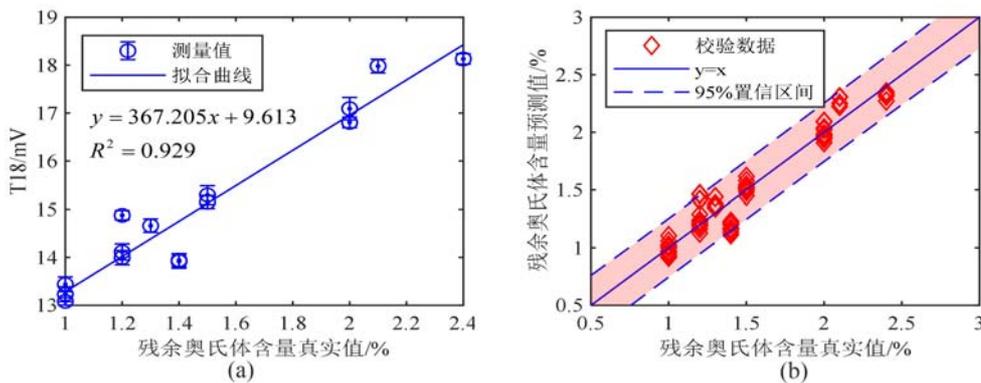


图 14 (a)磁参量 T18 与残余奥氏体含量的拟合曲线;(b)磁参量 T18 与预测残余奥氏体含量结果

Fig. 14 (a) the fitting curve between magnetic parameter T18 and residual austenite content;

(b) magnetic parameter T18 and predicted residual austenite content results

### 3.3 磁参量对残余奥氏体含量及塑性变形的综合表征能力分析

由 3.1 节和 3.2 节分析可知,幂函数是描述磁参量与塑性变形关系的最佳拟合函数,一次函数是描述磁参量与残余奥氏体含量关系的最佳拟合函数。在表征塑性变形的磁参量中,共筛选出 11 项强相关的磁参量,分别是 T12、T14、T15、T16、T18、T20、T24、T42、T43、T44 和 T45。在表征残余奥氏体含量的磁参量中,共筛选出 5 项强相关的磁参量,分别是 T12、T18、T24、T43 和 T44。综上分析,可认为该 5

项磁参量(T12、T18、T24、T43 和 T44)具备同时表征残余奥氏体含量和塑性变形的能力。该 5 项磁参量表征塑性变形和残余奥氏体含量的拟合曲线如图 15 所示。其中,磁参量 T12、T18、T24 和 T43 的幅值随塑性变形的增大而减小,随残余奥氏体含量的增大而增大;而磁参量 T44 则相反,磁参量 T44 的幅值随塑性变形的增大而增大,随残余奥氏体含量的增大而减小。

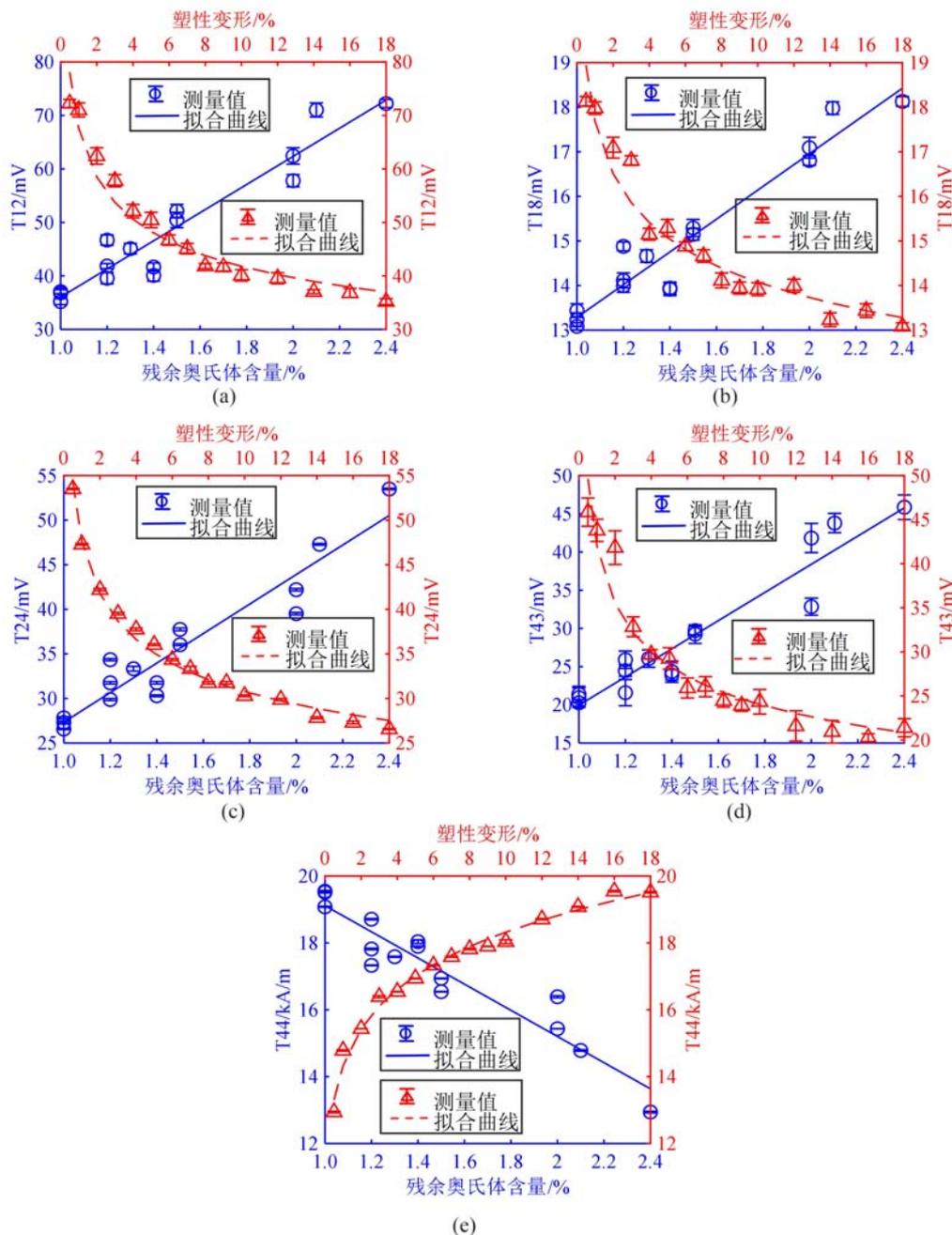


图 15 与塑性变形及残余奥氏体含量的拟合曲线:(a)磁参量 T12 ;(b)磁参量 T18;  
(c)磁参量 T24;(d)磁参量 T43;(e)磁参量 T44

Fig. 15 Fitting curve of plastic deformation and residual austenite content: (a)magnetic parameter T12;  
(b)magnetic parameter T18; (c)magnetic parameter T24; (d)magnetic parameter T43; (e)magnetic parameter T44

DH 钢作为 TRIP 钢(Transformation Induced Plasticity Steel)的一种,在塑性变形作用下残余奥氏体向马氏体转变。DH 钢的相组织由残余奥氏体、马氏体和铁素体组成,其中,残余奥氏体为无磁性相组织,马氏体和铁素体为磁性相组织,残余奥氏体的体积分数为 5%,马氏体的体积分数为 25%~30%,铁素体的体积分数为 65%~70%。DH 钢中磁信号幅值的变化不仅受相组织转变的影响,而且还

受到相组织位错密度变化的影响。相组织转变和位错密度变化共同影响了磁信号的幅值。研究表明<sup>[17-18]</sup>, TRIP 钢在 12.5% 的全局应变下, 铁素体和马氏体的局部应变分别为 10%~50% 和 2%~5%, 铁素体相贡献占主导。另外, 在拉伸实验过程中, 塑性变形使得双相钢中位错的形成增强, 位错的增加会导致磁信号幅值降低<sup>[19]</sup>, 因此, 认为 DH 钢在塑性变形中, 残余奥氏体向马氏体转变使得磁参量幅值上升, 但位错密度增加使得磁参量幅值下降, 这两种机制相互竞争。由于在 DH 钢中, 残余奥氏体占比较少, 在两种机制竞争中, 以位错密度的影响为主。因此, 磁参量 T12、T18、T24 和 T43 随塑性变形的增加而减小。此外, 有学者测量了 TRIP 效应钢中铁素体和马氏体的矫顽力, 结果表明, 随着塑性变形的增加, 马氏体中矫顽力几乎不变, 铁素体中矫顽力持续增大<sup>[20]</sup>。同时, 马氏体的体积分数增加, 铁素体的体积分数不变, 最后使得矫顽力增大。在本文中, 磁参量 T44 的幅值与矫顽力相关, 随着塑性变形的增加, DH 钢矫顽力增大, 磁参量 T44 的幅值减小。在塑性变形中, DH 钢中的残余奥氏体逐渐分解, 转变为马氏体, 残余奥氏体含量随着塑性变形的增加而减小。磁参量 T12、T18、T24、T43 和 T44 变化趋势与之相反, 具体表现为磁参量 T12、T18、T24 和 T43 的幅值随残余奥氏体含量的增大而增大, 磁参量 T44 的幅值随残余奥氏体含量的增大而减小。

该 5 项磁参量(T12、T18、T24、T43 和 T44)均来自磁巴克豪森噪声信号和增量磁导率信号, 因此, 可认为磁巴克豪森噪声信号和增量磁导率信号相比于切向磁场和多频涡流信号, 更适于 DH590 塑性变形和残余奥氏体含量的表征。此外, 除了 3 项传统磁参量外, 2 项双峰磁参量展现出优异的表征能力。由于 DH590 双相钢的特点, 在塑性变形过程中, 相组织的转换使得微磁信号出现双峰现象。通过提取双峰磁参量发现, 双峰特征值也可表征 DH590 塑性变形和残余奥氏体含量。

## 4 结论

本文开展了 DH590 钢塑性变形的微磁表征实验, 提取了 4 类磁信号的多种磁参量, 通过幂函数和一次函数, 分析了磁参量与塑性变形及残余奥氏体含量之间的关系, 主要结论如下:

(1) 多功能微磁检测仪可同步检测切向磁场强度、磁巴克豪森噪声、增量磁导率和多频涡流信号, 4 类微磁信号中共有 36 项磁参量变异系数小于 5%。

(2) 通过综合指标筛选出用于表征塑性变形量和残余奥氏体含量的最佳磁参量, 表征塑性变形量最佳的磁参量是 T20( $\mu_{\max}$  对应的切向磁场强度  $H$ ), 模型的平均相对误差为 18.221%; 表征残余奥氏体含量最佳的磁参量是 T18(单一磁化周期 MBN 包络线均值), 模型的平均相对误差为 6.523%。

(3) 在 DH590 相变过程中, 微磁信号出现双峰现象。利用双高斯函数提取磁巴克豪森噪声信号和增量磁导率信号双峰磁参量, 发现了可同时表征塑性变形及残余奥氏体含量的新磁参量, 即双峰磁参量 T43 及 T44。

本文提出的综合指标可以作为微磁表征性能比较的标准, 也可以作为从大量与塑性变形和奥氏体含量表征有关的微磁信号中优选电磁参数的有效工具。在未来, 本文提出的新表征参数和选择方法有望用于不同双相钢的塑性变形和残余奥氏体含量表征中。

### 参考文献:

- [1] 朱国森, 韩赞, 蒋光锐, 等. 汽车车身用新型冷轧薄板研发进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9):1585-1594 (ZHU Guosen, HAN Yun, JIANG Guangrui, et al. Research and development progress of new cold rolled sheet steels of car body[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(9):1585-1594 (in Chinese))
- [2] 王楠, 罗岚, 刘勇, 等. 金属构件残余应力测量技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10):2508-2517 (WANG Nan, LUO Lan, LIU Yong, et al. Research progress on stress measurement technology for metal components[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10):2508-2517 (in Chinese))
- [3] 张传栋, 何存富, 刘秀成, 等. 基于 BP 神经网络的钢轴表面硬度磁巴克豪森噪声定量检测技术[J]. 实验力学, 2020, 35(1):1-8 (ZHANG Chuandong, HE Cunfu, LIU Xiucheng, et al. Magnetic Barkhausen noise technology for surface hardness evaluation in steel shaft based on BP neural network[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1):1-8 (in Chinese))

- [4] 张猛,刘秀成,王建国,等.列车车轮钢表面硬度的微磁定量检测方法[J].实验力学,2023,38(4):425-434 (ZHANG Meng, LIU Xiucheng, WANG Jianguo, et al. Micromagnetic and quantitative evaluation method for surface hardness of train wheel steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(4): 425-434 (in Chinese))
- [5] 何存富,窦文巧,刘秀成,等.调幅切向磁场对低碳钢残余塑性应变的检测灵敏度矩阵分析方法[J].实验力学,2019,34(4):547-553 (HE Cunfu, DOU Wenqiao, LIU Xiucheng, et al. Sensitivity matrix analysis for residual plastic strain evaluation method using amplitude modulation tangential magnetic field in low carbon steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4): 547-553 (in Chinese))
- [6] XIE S J, CHEN Z M, CHEN H E, et al. Evaluation of plastic deformation and characterization of electromagnetic properties using pulsed eddy current testing method[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45:755-761.
- [7] STUPAKOV O, PAL' A J, TOMÁS I, et al. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 462(1/2):351-354.
- [8] 何存富,王志,刘秀成,等.基于GA-PSO混合算法的钢杆磁特性参数识别方法[J].仪器仪表学报,2017,38(4):838-843 (HE Cunfu, WANG Zhi, LIU Xiucheng, et al. Magnetic property parameter identification of steel pole based on GA-PSO hybrid algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 838-843 (in Chinese))
- [9] 李丽娟,解社娟,陈洪恩,等.碳钢塑性变形对增量磁导率信号的影响[J].中国机械工程,2018,29(14):1653-1660 (LI Lijuan, XIE Shejuan, CHEN Hongen, et al. Influence of plastic deformation on signals of magnetic incremental permeability for carbon steel[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(14): 1653-1660 (in Chinese))
- [10] 王志,何存富,刘秀成,等.应力和组分占比对马氏体-铁素体双相钢中磁巴克豪森噪声的影响[J].实验力学,2021,36(1):43-50 (WANG Zhi, HE Cunfu, LIU Xiucheng, et al. Effect of applied stress and phase proportion on the magnetic Barkhausen noise in martensite-ferrite steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(1): 43-50 (in Chinese))
- [11] K TENA A, HRISTOFOROU E, GERHARDT G J L, et al. Barkhausen noise as a microstructure characterization tool[J]. Physica B Condensed Matter, 2014, 435:109-112.
- [12] NESLUŠAN M, MIETOVÁ A, HADZIMA B, et al. Barkhausen noise emission in hard-milled surfaces[J]. Materials, 2019, 12(4):660.
- [13] BATISTA L, RABE U, ALTPETER I, et al. On the mechanism of nondestructive evaluation of cementite content in steels using a combination of magnetic Barkhausen noise and magnetic force microscopy techniques[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 354:248-256.
- [14] WANG X X, HE C F, LI P, et al. Micromagnetic and quantitative prediction of surface hardness in carbon steels based on a joint classification-regression method[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(3):1-13.
- [15] XING Z X, WANG X X, NING M S, et al. Micromagnetic and robust evaluation of surface hardness in Cr12MoV steel considering repeatability of the instrument[J]. Sensors, 2023, 23(3):1273-1289.
- [16] NESLUŠAN M, PITOÁK M, APEK J, et al. Measurement of the rate of transformation induced plasticity in TRIP steel by the use of Barkhausen noise emission as a function of plastic straining[J]. ISA Transactions, 2021, 125(10):318-329.
- [17] TAN X D, PONGE D, LU W J, et al. Joint investigation of strain partitioning and chemical partitioning in ferrite-containing TRIP-assisted steels[J]. Acta Materialia, 2020, 186:374-388.
- [18] TAN X D, HE H S, LU W J, et al. Effect of matrix structures on TRIP effect and mechanical properties of low-C low-Si Al-added hotrolled TRIP steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 771:138629.
- [19] EI-SHERBINY A, EI-FAWKHRY M K, SHASH A Y, et al. Replacement of silicon by aluminium with the aid of vanadium for galvanized TRIP steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3):3578-3589.
- [20] MÉSZÁROS I. Magnetic characterisation of phase transformations in TRIP steels[J]. Journal of Electrical Engineering, 2008, 59(7):86-89.

## Comprehensive indicator of multi-dimensional micromagnetic parameters for evaluation of plastic deformation and residual austenite of DH590 steel

FU Ping<sup>1</sup>, WANG Yujue<sup>2</sup>, HE Cunfu<sup>2</sup>, LIU Xiucheng<sup>2</sup>,  
ZHANG Yangyang<sup>3</sup>, WANG Lin<sup>1,3</sup>, WANG Xianxian<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing 100124, China;

2. Faculty of information technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Strip Technology Department, Research Institute of Technology, Shougan Co., Ltd., Beijing 100043, China)

**Abstract:** The micromagnetic method was used to quantitatively characterize the plastic deformation and retained austenite of DH590 steel. The magnetic parameters utilized for the characterization of plastic deformation and residual austenite were extracted, particularly focusing on the distinctive double-peak characteristics observed in magnetic Barkhausen noise. By analyzing the variation coefficient of magnetic parameters, magnetic parameters with high consistency in repeated measurements were selected as candidate evaluation parameters, and a comprehensive indicator of magnetic parameters based on goodness of fit, normalized sensitivity and relative error was proposed to analyze the characterization ability of candidate magnetic parameters on the plastic deformation and residual austenite content in DH590 steel. Through comparative analysis, the double-peak magnetic parameters of magnetic Barkhausen noise and incremental permeability signals, extracted by fitting with a double-Gaussian function, could effectively characterize both plastic deformation and residual austenite content. This research methodology offered valuable insights for quantitatively characterizing plastic deformation and residual austenite content in ferromagnetic materials.

**Keywords:** micromagnetic testing; plastic deformation evaluation; residual austenite content evaluation; comprehensive indicator

附表 1 微磁特征参量表  
Appendix 1 Table of micromagnetic characteristic parameters

微磁参量	符号	单位	含义
$A_1, A_3, A_5, A_7$	T1, T2, T3, T4	kA/m	1 次、3 次、5 次和 7 次谐波的幅值
$P_3, P_5, P_7$	T5, T6, T7	rad	3 次、5 次和 7 次谐波的相位
K	T8	%	畸变因子 ( $K = \sqrt{\frac{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2}{A_1^2}}$ )
UHS	T9	kA/m	3 次、5 次和 7 次谐波的幅值之和
$H_m$	T10	kA/m	切向磁场强度过零点处谐波幅值
$H_{co}$	T11	kA/m	谐波信号第一个过零点处切向磁场信号幅值
$M_{max}$	T12	mV	MBN 包络线的最大值
$H_{en}$	T13	kA/m	$M_{max}$ 对应的切向磁场强度 $H$
$DH75_m$	T14	kA/m	75% $M_{max}$ 处对应的峰宽
$DH50_m$	T15	kA/m	50% $M_{max}$ 处对应的峰宽
$DH25_m$	T16	kA/m	25% $M_{max}$ 处对应的峰宽
$M_r$	T17	mV	MBN 包络线与纵轴的截距
$M_{mean}$	T18	mV	单一磁化周期 MBN 包络线均值
$\mu_{max}$	T19	mV	IP 包络线的最大值
$H_{\mu}$	T20	kA/m	$\mu_{max}$ 对应的切向磁场强度 $H$
$DH75_{\mu}$	T21	kA/m	75% $\mu_{max}$ 处对应的峰宽
$DH50_{\mu}$	T22	kA/m	50% $\mu_{max}$ 处对应的峰宽
$DH25_{\mu}$	T23	kA/m	25% $\mu_{max}$ 处对应的峰宽
$\mu_r$	T24	mV	IP 包络线与纵轴的截距
$\mu_{mean}$	T25	mV	单一磁化周期 IP 包络线均值
$Re_1, Re_2, Re_3, Re_4$	T26, T27, T28, T29	—	4 个频率涡流信号实部
$Im_1, Im_2, Im_3, Im_4$	T30, T31, T32, T33	—	4 个频率涡流信号虚部
$Am_1, Am_2, Am_3, Am_4$	T34, T35, T36, T37	—	4 个频率涡流信号幅值
$Ph_1, Ph_2, Ph_3, Ph_4$	T38, T39, T40, T41	—	4 个频率涡流信号相位
$Q_m$	T42	kA/m	MBN 峰间距
$G_m$	T43	mV	MBN 峰高差
$Q_i$	T44	kA/m	IP 峰间距
$G_i$	T45	mV	IP 峰高差

附表 2 表征塑性变形磁参量评价指标统计结果

Appendix 2 Statistical results of evaluation indicators for magnetic parameters characterizing plastic deformation

磁信 号	微磁 参量	拟合 函数	拟合优 度 $R^2$	归一化灵 敏度 $\chi$	平均相对 误差 $\bar{\delta}/\%$	综合指 标 $\psi$
磁 巴 克 豪 森 噪 声	T12	$y = -200.27x + 64.09$	0.806	0.376	114.838	0.264
		$y = 1816.58x^2 - 522.39x + 73.09$	0.976	0.149	810.430	0.018
		$y = 25.85x^{-0.2087}$	0.951	0.170	20.567	0.786
	T14	$y = 14.259x + 4.845$	0.918	0.246	50.268	0.449
		$y = -67.893x^2 - 522.39x + 73.09$	0.971	0.123	1139.368	0.010
		$y = 25.85x^{-0.2087}$	0.913	0.130	36.174	0.328
	T15	$y = 30.923x + 9.054$	0.916	0.260	61.602	0.387
		$y = -157.311x^2 + 58.817x + 8.275$	0.976	0.130	1099.500	0.012
		$y = 17.974x^{0.159}$	0.952	0.141	24.441	0.549
	T16	$y = 72.465x + 24.246$	0.849	0.247	103.490	0.203
		$y = -558.134x^2 + 171.433x + 21.482$	0.978	0.125	877.660	0.014
		$y = 45.522x^{0.148}$	0.990	0.136	11.439	1.177
T18	$y = -27.915x + 17.197$	0.814	0.227	106.594	0.173	
	$y = 235.939x^2 - 69.751x + 18.366$	0.962	0.110	835.403	0.013	
	$y = 11.203x^{-0.099}$	0.937	0.112	21.219	0.495	
增 量 磁 导 率	T20	$y = 31.812x + 0.998$	0.915	1	56.555	1.618
		$y = -174.839x^2 - 62.814x + 0.133$	0.986	1	1045.175	0.094
		$y = 18.366x^{0.623}$	0.967	0.777	18.221	4.124
	T24	$y = -125.597x + 44.962$	0.793	0.329	137.190	0.190
		$y = 1079.029x^2 - 316.929x + 50.035$	0.943	0.139	839.678	0.016
双 峰 磁 参 量	T42	$y = 19.879x^{-0.190}$	0.991	0.159	10.075	1.564
		$y = 26.820x + 11.458$	0.866	0.228	93.047	0.212
		$y = -191.963x^2 + 60.895x + 10.507$	0.980	0.115	909.907	0.012
	T43	$y = 18.967x^{0.118}$	0.980	0.121	12.887	0.920
		$y = -134.636x + 39.177$	0.737	0.433	143.107	0.223
		$y = 1432.64x^2 - 388.688x + 46.271$	0.951	0.156	755.362	0.020
	T44	$y = 13.767x^{-0.242}$	0.934	0.193	23.392	0.771
		$y = 30.792x + 14.867$	0.845	0.220	116.009	0.160
		$y = -200.271x^2 + 66.304x + 13.874$	0.937	0.111	968.733	0.011
	T45	$y = 23.435x^{0.107}$	0.986	0.116	9.042	1.265
$y = -103.426x + 25.662$		0.707	0.607	175.776	0.244	
$y = 1101.675x^2 - 298.774x + 31.117$		0.912	0.181	765.504	0.022	
		$y = 6.740x^{-0.312}$	0.994	0.250	7.013	3.543

附表3 表征残余奥氏体含量磁参量评价指标统计结果

Appendix 3 Statistical results of magnetic parameter evaluation indicators for characterizing residual austenite content

磁信号	微磁参量	拟合函数	拟合优度 $R^2$	归一化灵敏度 $\chi$	平均相对误差 $\bar{\delta}/\%$	综合指标 $\psi$
磁巴克豪森噪声	T12	$y=2630.677x+9.739$	0.918	0.974	6.906	12.947
		$y=23371.335x^2+1731.334x+16.553$	0.919	0.090	7.244	1.142
		$y=1491.076x^{0.811}$	0.916	0.365	6.788	4.925
		$y=367.205x+9.613$	0.929	0.972	6.523	13.843
		$y=1141.970x^2+329.683x+9.898$	0.929	0.064	6.672	0.891
		$y=72.872x^{0.372}$	0.921	0.231	6.094	3.491
增量磁导率	T24	$y=1656.201x+10.779$	0.910	0.974	7.172	12.358
		$y=44712.100x^2+187.089x+21.910$	0.920	0.084	8.971	0.861
		$y=703.598x^{0.708}$	0.903	0.329	7.137	4.163
双峰磁参量	T43	$y=1844.577x+1.510$	0.913	0.975	7.383	12.057
		$y=38927.804x^2+565.500x+21.910$	0.918	0.101	7.794	1.190
		$y=1638.939x^{0.959}$	0.912	0.425	7.396	5.241
	T44	$y=-391.428x+23.030$	0.901	0.972	8.316	10.531
		$y=-3210.822x^2-285.929x+22.231$	0.902	0.066	8.850	0.673
		$y=3.802x^{-0.354}$	0.878	0.227	8.339	2.390