

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205889

钢材微观组织在线无损检测研究进展与展望*

周光明¹ 刘睿¹ 李亮亮² 刘辉³ 谢跃东⁴

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司工程技术研究院 天津 300450;

3. 川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院 广汉 618300;

4. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘要: 钢材的微观组织参数可以表征其多种物理特性, 在役的核工业设施及关键钢带等需要开展在线无损检测其微观组织参数。本文分析了金属材料微观组织在线检测方法, 归纳和分析了电磁方法(磁滞回线、磁巴克豪森噪声、多频涡流、切线磁场强度的谐波分析)和超声方法(声速法、衰减系数法、非线性超声法及多超声参数结合)等金属材料微观组织无损检测方法的研究现状及现存问题, 探讨了金属材料物理特性与微观组织参数之间的联系及尚未明确的关系, 展望了金属微观组织无损检测的发展潜力与方向。

关键词: 微观组织; 晶粒尺寸; 电磁检测; 超声检测; 性能表征

中图分类号: TG141.1⁺1; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Research progress and prospect of on-line nondestructive testing of steel microstructure

Zhou Zhaoming¹ Liu Rui¹ Li Liangliang² Liu Hui³ Xie Yuedong⁴

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Engineering Technology Research Institute of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Tianjin 300450, China; 3. HSE Quality Surveillance & Inspection Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Guanghan 618300, China; 4. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The microstructure parameters of steel can characterize a variety of physical properties. Steel strips and key pressure vessels in service need to be tested online for their microstructure parameters. This paper analyzes the on-line detection method of metal material microstructure. The research status and existing problems of electromagnetic methods (hysteresis loop, magnetic Barkhausen noise, multi-frequency eddy current, harmonic analysis of tangential magnetic field strength) and ultrasonic methods (sound velocity method, attenuation coefficient method, nonlinear ultrasonic method and combination of multiple ultrasonic parameters) in microstructure detection of metal materials are summarized. The relationship between the physical properties of metal materials and the microstructure parameters and the unclear relationship are discussed, and the development potential and direction of metal microstructure detection are prospected.

Keywords: microstructures; grain size; electromagnetic measurement; ultrasonic testing; performance characterization

0 引言

钢材具有相变多样性, 良好的强韧性组合以及冶炼、轧制技术成熟等优势, 是国民经济和国防建设中最重要

的功能材料。钢的制备或生产过程中, 不同钢种由于工艺参数不同, 微观组织形成过程和结果也不同, 同种钢种在不同作业条件下由于疲劳、腐蚀等原因, 其微观组织参数变化也不尽相同。钢结构微观组织参数可以表征金属材料机械性能^[1], 材料的晶粒尺寸与力学性能(如屈服

强度、疲劳强度、抗腐蚀等)具有明显的关系,及时掌握钢材相关微观组织参数变化可以对材料的物理特性进行准确的评估与应用,如压水堆型核反应堆主管道采用离心铸造奥氏体不锈钢制造和焊接^[2],传统检测方法难以检测疲劳损伤,但其力学性能变化时,材料微观组织会产生显著变化^[3-7]。因此研究针对钢铁材料进行有效微观组织检测的手段,可以准确掌握钢材产品的物理特性,实时在线评价钢材的质量,提高产品可靠性和适用性^[8-9]。

本文针对钢材的微观组织,分析了超声、电磁等微观组织检测方法的应用现状及现存问题,研究了各种检测方法下钢材相关物理特性与微观组织参数之间的关系,探讨了钢材微观组织检测研究中仍需解决的问题与发展前景。

1 钢材微观组织参数检测研究进展

目前钢材料的微观组织检测通常采用实验室有损测量的方法,将材料进行截取制备并利用静态仪器进行检测分析,如金相法、扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)、透射电镜(transmission electron microscope, TEM)、电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, EBSD)等,图 1 为扫描电镜下的微观组织。长期以来,钢材微观组织评价就使用这些静态、离线和破坏性检测方法^[10],这虽然能够获得最终产品的组织性能参数,但是需要在该材料的典型部位截取样块,然后通过一系列的制备过程:取样、研磨、抛光、腐蚀,最后才能制成符合要求的显微试样。为了能获得清晰的显微图像,要求制备过程的每一步都做到精细,对人员的操作能力要求极高,也会对被测材料造成损害,且只能检测到试样的微观组织,效率较低、随机性较大,所得结果只对截取测量部分是准确的,并不能保证整体材料与检测结果一致。此外在现代工业生产中,大多数制造企业都需要能在不影响正常生产的情况下对产品的性能参数进行在线检测和质量控制,以达到经济效益最大化,因此针对微观组织的静态有损检测更适用于实验室研究中,不适合于大规模的工业化生产。

在线无损检测是一种实时非破坏性检测,可以在不损坏产品的情况下有效检测产品内部组织状态且支持在产品生产或作业的情况下进行实时在线检测。因此相较于传统有损检测技术,在线无损检测在金属微观组织检测评价上具有更好的发展前景。目前针对金属微观组织的无损检测研究大都是基于材料物理特性随微观组织的变化关系,本文主要介绍利用电磁方法(磁滞回线、磁巴克豪森噪声、多频涡流、切线磁场强度的谐波分析)和超声方法(声速法、衰减系数法、非线性系数法及多参数复合检测)。

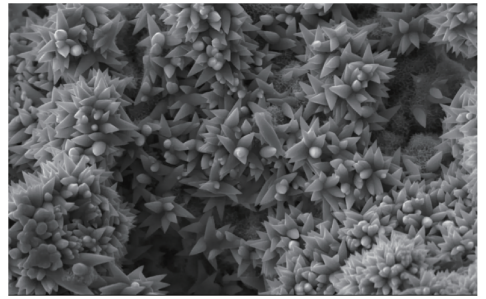


图 1 扫描电镜下的微观组织

Fig. 1 Microstructure under scanning electron microscope

2 微观组织的电磁无损方法

电磁信号参数(磁特性、涡流特性)、材料物理特性(磁导率、电阻率)等与材料的微观组织(晶粒尺寸及相组分)有一定的关系,微观组织参数与物理特性互相影响,德国无损检测技术研究院较先提出了将电磁特征信号与微观组织、应力分析结合分析的思想^[11],并应用于钢铁材料的机械性能表征。此后许多学者和机构也开始利用材料的电磁特性变化对钢材进行微观组织无损检测,目前主要研究磁滞回线、巴克豪森噪声、涡流特性、切线磁场强度时变信号等电磁参数随微观组织的变化关系并进行力学性能表征。

2.1 磁滞回线法

铁磁性材料的磁滞回线上有许多与微观组织密切相关的特征参数(如矫顽力、磁导率变化率等),通过提取这些特征参数并进行数据分析,可以表征材料微观组织的变化,许多学者据此开展研究以评价材料晶粒尺寸、相组分及其他特征参数等,并进一步研究有关参数与金属材料物理性能之间的关系。

Liu 等^[12]利用磁滞回线作为工具测量 P9 和 T22 型双相钢的马氏体含量,发现磁特性参数矫顽力与马氏体体积含量成线性比例。张文旺等^[13]发现随着 Co 元素在金属材料中的含量改变,材料的晶粒尺寸与矫顽力参数会发生变化。张映桃等^[14]对磁性材料采用不同退火工艺并分析其微观组织及磁特性的变化,研究发现原始晶粒尺寸较小,随着退火温度的升高,晶粒尺寸不断变大,其矫顽力会不断减小。Wang 等^[15]提取磁滞回线上的特性参数来表征晶粒变化,提出了一种基于磁特性的金属相变监测方法,可以一定程度上预测合金钢材的临界失效时间,评估剩余寿命。何存富等^[16]设计了基于闭环磁路的磁滞回线测量装置,实现了对不同材质钢杆磁滞回线的快速识别和表面硬度的评估。任尚坤等^[17]利用测量磁滞回线,并分析其微分磁导率及增量磁导率来判别材料的相组分及力学性能。西安交通大学的李丽娟等^[18]分析了磁滞回线的特征参数,发现塑性形变过程中

磁滞回线中剩磁的变化对材料增量磁导率存在明显影响,如图2所示。

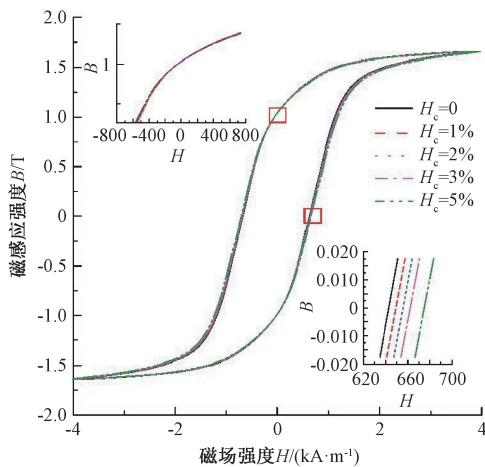


图2 不同 ΔBr 下的 $B-H$ 曲线^[18]

Fig. 2 $B-H$ curves under different ΔBr

上述研究发现磁滞回线上可以获得与金属材料微观组织密切相关的特征参数,但基于磁滞回线特征参数的微观组织检测方法大都需要制备检测试样并进行数据后处理,且在实现工业化应用上仍然面临关系机理、测量精度等难题,如何实现磁滞回线特征参数的精确在线检测是未来研究的重点之一。

2.2 磁巴克豪森噪声法

磁巴克豪森噪声 (magnetic Barkhausen noise, MBN) 是铁磁材料在磁化过程中由于内部磁畴旋转和磁畴壁位移产生非连续的、不可逆的跳跃,并在检测线圈中感应出一系列电压脉冲信号,即 MBN 信号。研究发现,MBN 噪声主要是由 180° 畴壁的不可逆位移引起的,并且发生在磁滞回线的最陡峭阶段。MBN 信号强度与材料微观组织变化和应力状况紧密相,根据 MBN 信号强度变化可以推测材料显微结构变化和应力状态,进而评估铁磁材料的疲劳损伤。

Yamaura 等^[19] 利用 MBN 开展了评估铁磁性材料微观组织结构变化等方面的研究,发现双相钢中马氏体含量的增大会使 MBN 信号峰值增大和晶粒尺寸的减小,从而导致 MBN 信号增加。但是 Pal-a 等^[20] 通过研究认为,MBN 信号与晶粒尺寸虽然存在显著联系,但并不是线性关系。蒋生辉等^[21] 搭建了基于 MBN 的无损检测系统,研究了钢轨中微观组织变化与 MBN 信号之间的关系,发现当钢轨白层的厚度大于 $5 \mu\text{m}$ 后,白层厚度与 MBN 特征信号之间存在线性负相关的变化关系且具有较好的灵敏性。王志等^[22] 研究了马氏体-铁素体双相钢中铁素体占比对 MBN 信号的影响,发现不同组分比例下,MBN 信号呈现明显的双峰现象,且峰值随组分占比的变化而波

动,结果如图3所示。沈功田等^[23] 和王丹民等^[24] 认为 MBN 信号受到多种因素的影响,相含量改变往往伴随其他因素的改变。

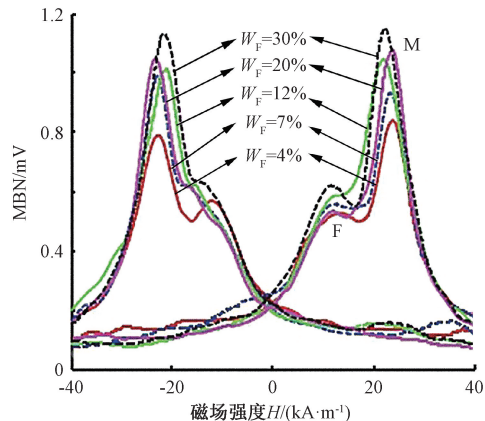


图3 不同组分占比下的 MBN 峰值蝶形曲线^[22]

Fig. 3 MBN peak butterfly curve under different component proportions

MBN 信号对试件表面要求较高,任何的氧化物或者锈蚀都影响测量,需要对被测试件表面进行清理,同时对提高高度要保持不变,还需要通过和已知含量的标准试样 MBN 信号进行参考比对^[25-28],因此在研发基于 MBN 信号的微观组织检测仪器时需要综合考虑多种影响因素以适用于复杂的现场工业生产环境。

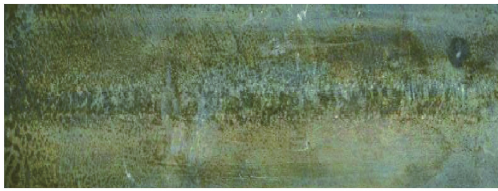
2.3 多频涡流检测方法

涡流检测是用交流电流激励导电线圈,在线圈中心形成一个磁通线集中的交变磁场,当线圈靠近被测物体时,交变磁通线穿透材料并产生连续的圆形涡流,通过分析涡流信号的变化来研究金属材料的各种参数。多频涡流法在常规涡流检测的基础上对电涡流检测线圈施加不同频率的激励信号,研究不同频率下涡流阻抗的变化并消除提取信息时的干扰,能成功抑制各种干扰因素,提高检测的准确性^[29-30]。

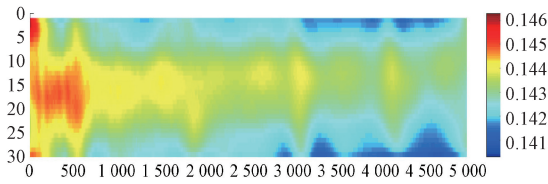
英国曼彻斯特大学 WULIANG YIN、PEYTON、英国华威大学 DAVIS 联合团队^[31-43] 利用多频涡流技术开展微观组织研究,发现传感器信号中的特征值与钢铁微观组织有相关性并据此建立了多频感应电磁传感器输出频率特性关键特征点和钢铁微观组织的理论关系,还利用自主开发的传感器对铁素体/奥氏体两种相组分材料的磁导率和相变比进行检测,建立感抗测量值与相组分的关系,发现多频涡流检测方法获的信号特征值与微观组织相组分及晶粒尺寸存在一定关系,磁导率与相组分、晶粒尺寸的存在一定的关系,但晶粒尺寸及其他相组分或多相组分结构对信号的明确对应关系仍需要研究。周兆明等^[44] 联合北京航空航天大学及英国曼彻斯特大学开

展了连续油管焊缝微观组织的多频涡流检测扫描成像研究,图 4(b)对图 4(a)是连续油管焊缝试样的多频涡流检测扫描结果图。针对连续油管偏焊缝与母材多频涡流检测,初步发现偏焊缝与母材微观组织产生不同的信号,并据此对焊缝晶粒尺寸和焊缝质量进行评价。

多频涡流在铁磁材料的微观组织结构的表征上具有很大潜力,该检测方法无需耦合剂,也更容易实现无损、实时、非接触测量。但涡流信号与金属微观组织之间互相对应的关系尚未有清楚的定论,晶粒尺寸及相组分两种参数与涡流信号之间明确的数学模型仍需要进一步开展研究。



(a) 连续油管焊缝试样
(a) Coiled tubing weld specimen



(b) 检测信号成像云图
(b) Detection signal imaging cloud

图 4 连续油管偏焊缝与母材多频涡流信号二维成像云图^[44]

Fig. 4 Coiled tubing partial weld and base metal multi-frequency eddy current signal two-dimensional imaging cloud diagram

2.4 切向磁场强度的谐波分析法

当铁磁性材料被外部信号磁化时,电磁铁会以切向磁场的形式将其内部磁场激发到材料外部,利用霍尔传感器可以检测到铁磁性材料的切向磁场信号,由于激发过程并不是完全线性的,切向磁场存在一定的畸变,并含有大量的高次谐波信号,通过对磁场中的高次谐波信号进行频谱分析,可以建立切线磁场强度与材料磁特性之间的关系,而材料磁特性与微观组织参数也存在关系,因此测量切线磁场强度并进行特征量分析也是一种间接表征材料微观组织的方法^[5,10]。

Martins 等^[45]采用切向磁场谐波分析的方法来表征超高强度钢材的微观结构,分析了不同数量的马氏体对超高强度钢材的磁特性和力学性能的影响,发现微磁信号参数与材料的机械韧性具有较强的相关性。吴斌^[46]设计了一种可测量切线磁场强度时变信号的检测装置对不同淬火工艺下的钢杆进行微磁信号测量和频谱分析,如图 5 所示,并实时测量对应参数下的材料硬度,研究表

明随着马氏体占比增大,切向磁场强度时变信号的奇次谐波幅值呈下降趋势。

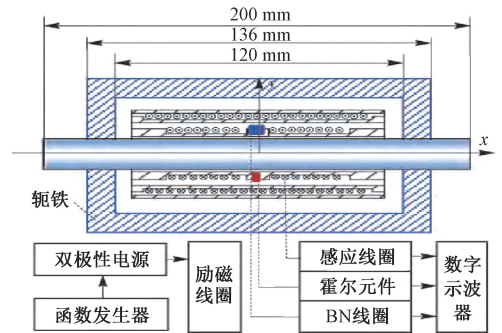


图 5 切向磁场强度时变信号检测结构示意图^[46]

Fig. 5 Time-varying signal detection structure diagram of tangential magnetic field intensity

相较于其他电磁测量方法,对切线磁场强度时变信号的谐波分析可以测量材料中较深层次的微观组织的相组分变化,具有一定优势。但这种方法在现场测试中易受各种环境因素干扰,进行成套装备的设计时需要重点考虑抗干扰能力,进行精准的滤波分析和数据优化,设计难度较大。

3 超声法微观组织检测

超声无损检测是利用 20 kHz 以上的高频声波对材料进行检测,通过对超声波的特征如速度、衰减系数及其他超声特征参数进行分析,可以研究材料的尺寸、成分、微观结构和弹性特性,激发方式有压电、电磁、激光、相控阵等^[47-48]。当超声波在金属材料中传播时,材料的微观组织对超声波的特征参数具有明显的影响作用,许多学者和单位利用这种对应关系研究超声波在钢材微观组织表征上的可行性,加拿大国家委员会、瑞典腐蚀和金属研究所、日本浦项钢铁公司还进行了工业化应用的尝试^[49-50]。其中利用声速和衰减系数对微观组织进行表征是目前研究较多的,也有学者尝试研究多参数融合的方法来进行微观组织的超声检测。

3.1 声速法

由于材料晶粒尺寸、相组分等与材料的密度、弹性模量、泊松比等有密切联系,而这些材料属性又与超声的声速有关,因此可以通过监测超声波的声速大小来表征材料微观组织的变化,进而对材料物理特性进行无损评价。

Dubois 等^[51]利用超声波检测展开了微观组织结构无损检测评价研究,发现超声的声速与微观组织(如相组分、晶粒尺寸)有一定程度上的关系。Huang 等^[52]利用超声检测对增材制造的 316 不锈钢进行了微观组织表征,研究了超声波速与钢材的孔隙率、晶粒尺寸的对应该

系,提出了一种用超声波特征参数来实时表征钢材力学性能变化的方案。李萍等^[53]研究了不同固溶处理条件下,304 不锈钢晶粒尺寸与超声波声速的变化关系。张晨昕等^[54]基于 Wigner-D 函数建立了单晶合金材料晶体取向的声速评价模型,并与 EBSD 法进行了数据对比,结果如图 6 所示。材料相组分的含量不同对超声波速也有影响,Roy 等^[55]提出了一种优化的超声传播路径,发现金属增材制造过程中由于温度变化引起的微观组织相组分变化对声速有显著影响。Kennedy 等^[56]对经奥氏体化后的 L80 钢管进行超声测试,发现剪切波速会随着钢管相组分含量变化而增加,且剪切波速与钢管屈服强度存在负相关,但各相组分含量与超声波速的线性对应关系尚未明确。

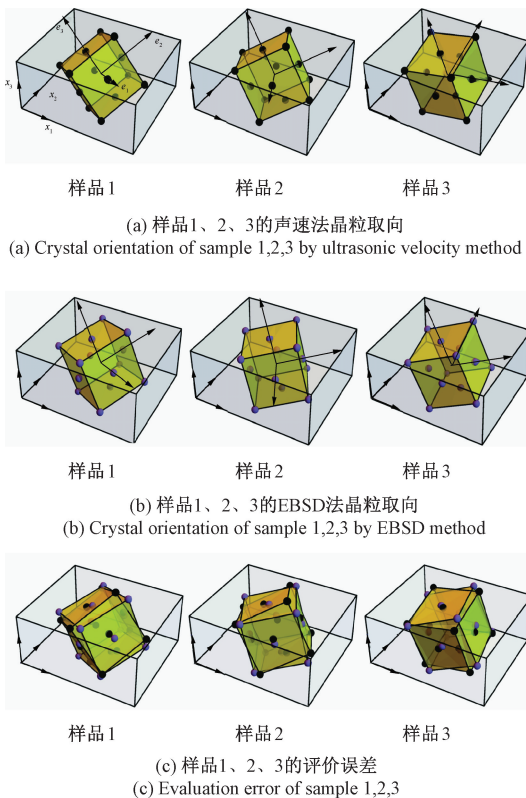


图 6 超声晶体的声速评价及对比结果^[54]

Fig. 6 Sound velocity evaluation and comparison results of ultrasonic crystal

研究发现声速法受材料性质影响较大,当被测材料不同时,实验数据会有较大差别,例如不锈钢材料与陶瓷-金属复合材料在进行超声检测时,纵波声速随晶粒尺寸的变化趋势相反,因此利用声速法进行材料微观组织表征很难得到普遍规律。

3.2 衰减系数法

超声波在介质中传播时,声波的散射和吸收会引发超声能力衰减,常用金属材料中超声衰减主要由散射导

致,吸收衰减通常影响较小,根据晶粒尺寸与超声波长的比值散射衰减可以分 3 种类型^[47],如图 7 所示,利用这一原理建立超声散射衰减模型,可以对不同的金属材料进行超声衰减系数和微观组织参数的计算,进而实现对材料微观组织和机械性能的无损评价。

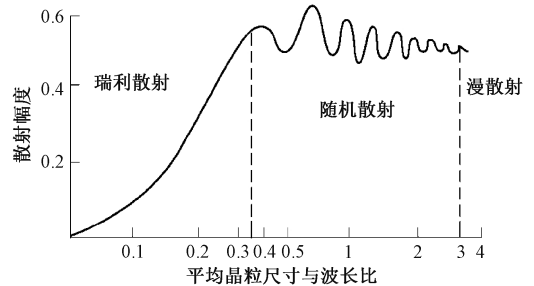


图 7 超声波的散射类型

Fig. 7 Types of ultrasonic scattering

国外针对超声衰减系数的研究较早,早在 1999 年,Ahn 等^[57]就开始对主要成分为铁素体和珠光体的低碳合金钢进行超声测试,发现材料平均晶粒尺寸与声波衰减系数、材料屈服强度之间存在明显的相关性。Du 等^[58]利用超声换能器对淬火后的双相不锈钢样品进行超声无损检测,发现珠光体组分和淬火深度对超声衰减都具有较大影响。Arguelles 等^[59]研究了多晶材料超声衰减系数与晶粒尺寸的关系。Moghanizadeh 等^[60]通过实验验证了利用超声衰减系数表征钢材力学性能的可行性。国内方面,宁波大学的殷安民等^[61]在进行微观组织研究时发现当被测试件与标准晶粒尺寸相差较大时,利用幅值衰减系数计算晶粒尺寸误差较大,提出了一种利用根据超声回波时域信号的衰减来计算衰减系数的方法,降低了计算误差。李雄兵等^[62]改进了传统的衰减系数法,利用小波变换和粒子群算法构建了一种多尺度超声衰减评价模型,提高了超声检测微观组织的抗干扰能力。张彦杰等^[63]利用激光超声实验系统对金属板材进行了微观组织表征,建立了激光超声衰减系数与晶粒尺寸的关系,发现偏转角度和环境干扰对激光超声表征晶粒尺寸的精度影响较大,如图 8 所示。

3.3 非线性超声法

由于超声波在固体介质中的传播一般会产生非线性效应,当输入高能量超声波时,非线性效应会变得较为明显并产生谐波信号,而当材料晶体结构产生变化或存在缺陷时,会造成非线性效应的改变,许多学者通过分析超声非线性效应改变过程中有关特征参数的变化表征材料的微观组织。

英国皇家两院院士、帝国理工学院的 Peter Cawley 教授对超声波非线性效应进行了大量研究,并利用超声非线性效应进行了金属材料的微观组织表征^[64-66]。文献

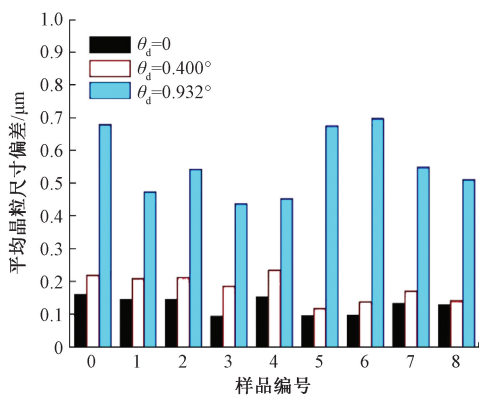


图 8 不同偏转角度下晶粒尺寸检测结果^[63]

Fig. 8 Grain size test results at different deflection angles

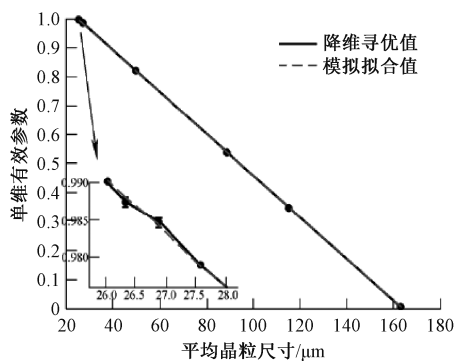
[67-68]研究了非线性超声效应在不完美界面上的强度,并探讨了利用超声非线性检测对钛合金组件进行微观组织表征的可行性。Chen 等^[69]研究了高温下合金材料的超声非线性系数与微观组织的关系,发现超声非线性系数对晶粒尺寸的变化非常敏感。袁廷璧等^[70]利用非线性超声技术对高温下奥氏体耐热钢的微观组织演变进行了分析,发现超声非线性系数与钢材的晶粒尺寸有密切关系并据此进行钢材高温老化研究。

然而微观组织的变化对超声特征参数的影响是复杂的,晶粒的尺寸、形状、分布,相组分含量的不同都会对各种超声特征参数产生影响,利用单一参数评价微观组织只能反应普遍趋势,无法建立精确的对应关系。随着制造技术的发展,材料微观组织的复杂化和表征精度要求不断提高,以单一参数为主的超声评价方法将不适用于高精度的工业化生产^[71],利用优化的算法进行多参数结合的微观组织表征才是未来发展的方向。陈昊等^[72]根据相关性原则,融合声速、衰减系数、非线性系数等多个超声特征参数,通过算法求解找出最优的映射函数及单维目标参数,建立了一个多参数结合的微观组织无损评价模型并与单一模型对比,测试数据显示,该模型相较于单一参数的超声评价方法,具有更好的测量精度及抗干扰能力,如图 9 所示。

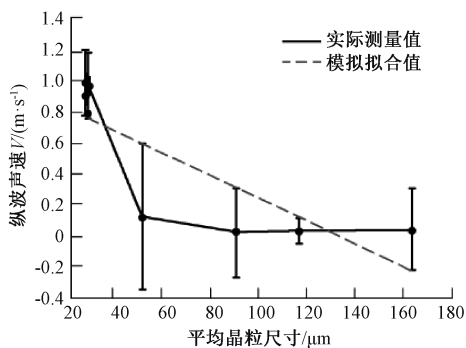
随着深度学习技术的不断发展并逐渐应用到无损检测领域,利用各种不断优化的算法模型将多种特征参数融合,甚至将材料的成分、生产及处理工艺、检测环境等众多影响因素转化成量化指标,进而提高钢材微观组织的准确性和完整性,建立精确完整的微观组织无损评价模型是未来发展的重点。

4 结 论

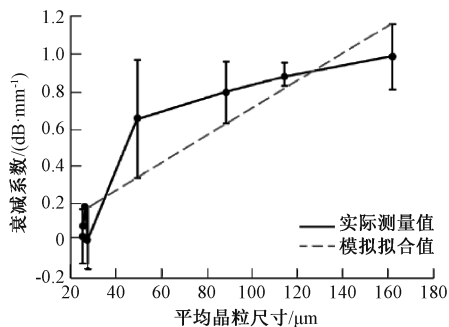
本文介绍了目前主流的钢材微观组织表检测方法,



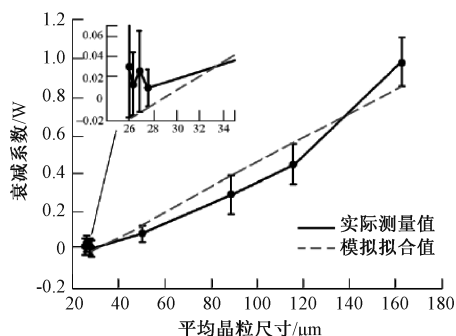
(a) Parameter fusion model



(b) Sound velocity model



(c) Attenuation coefficient method model



(d) Backscattering model

图 9 4 种评价模型的拟合曲线^[72]

Fig. 9 The fitting curves of four evaluation models

针对微观组织的无损检测,研究对比了目前研究较多的电磁方法(磁滞回线、磁巴克豪森噪声、多频涡流、切线磁场强度的谐波分析)和超声方法(声速法、衰减系数法、非线性系数法及多超声参数结合),并得出如下结论:

1) 研究发现钢材的晶粒尺寸、相组分等与其电磁、超声物理特性之间存在明显联系,微观组织参数之间也相互影响,但并未建立确定的数学模型,微观组织参数与物理性质之间的明确映射关系也还需要继续研究。

2) 目前的钢材微观组织的研究主要针对双相钢(铁素体和奥氏体),钢材存在多相组分,其他组分或者多个混合组分(铁素体、贝氏体、珠光体、回火马氏体)与钢材物理特性的关系开展研究较少,后续需要针对钢材的其他组分进行相应的检测研究与理论分析。

3) 目前各种针对钢材微观组织检测的研究主要停留实验研究阶段,国外已经尝试用在双相钢微观组织在线检测,同时在核工业关键设备开展了实验研究。

4) 无损检测技术从检测表面缺陷到检测微观组织的变化是未来发展的方向之一。近年来,随着高强度钢和特殊钢的需求不断加大,针对微观组织的无损检测与精细测评变得尤为重要,微观组织在线检测技术及相关产品的研究具备较好的工业前景。

参考文献

- [1] 黄松岭,孙洪宇,王坤,等. 压水堆核电站无损检测与状态监测研究综述[J]. 机械工程学报,2022,58(4): 1-13.
HUANG S L, SUN H Y, WANG K, et al. Review on nondestructive testing and condition monitoring of PWR nuclear power plant[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2022,58(4):1-13.
- [2] 张辉,宋雅男,王耀南,等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):11-25.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Summary of nondestructive testing and evaluation technology for rail defects[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(2):11-25.
- [3] JIANG Q, ZHANG P, TAN J, et al. Influence of the microstructure on mechanical properties of SLM additive manufacturing Fe-based bulk metallic glasses [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162525.
- [4] MANDAL A, KARMAKAR A, CHAKRABARTI D, et al. Effect of alloying and coiling temperature on the microstructure and bending performance of ultra-high-strength strip steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49(12): 6359-6374.
- [5] 张志东. 磁性材料的磁结构,磁畴结构和拓扑磁结构[J]. 物理学报,2015,64(6):5-21.
ZHANG ZH D. Magnetic structure, domain structure and

topological magnetic structure of magnetic materials [J]. Journal of Physics, 2015, 64(6):5-21.

- [6] MA Z, ZHANG H, FU H, et al. Modelling flow-induced microstructural segregation in semi-solid metals [J]. Materials & Design, 2022, 213:110364.
- [7] EM A, DL B, HG C, et al. Residual stress modeling considering microstructure evolution in metal additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68:383-397.
- [8] GODFREY A, MISHIN O V. Quantification of heterogeneity in microstructural refinement in metals and alloys deformed to high plastic strains [J]. Micron, 2021, 148: 103107.
- [9] SIDOR J J. Modelling the deformation, recrystallization, and microstructure-related properties in metals [J]. Metals, 2021, 11(11):1759.
- [10] 殷安民. 超低碳钢微观组织在线检测技术应用基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
YIN AN M. Basic research on application of on-line microstructure detection technology for ultra low carbon steel[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2015.
- [11] NEZHAD K K, KAHROBAEE S, AKHLAGHI I A. Application of magnetic hysteresis loop method to determine prior austenite grain size in plain carbon steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 477: 275-282.
- [12] LIU J, WILSON J, STRANGWOOD M, et al. Magnetic characterization of microstructural feature distribution in P9 and T22 steels by major and minor BH loop measurements[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016, 401:579-592.
- [13] 张文旺,潘晶,刘新才,等. Nd₉Fe_(85.5-x)Co_xB_(5.5)(x=0,1,3,5)合金快淬薄带及其热变形磁体的微观组织与矫顽力[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40(4):600-604.
ZHANG W W, PAN J, LIU X C, et al. Microstructure and coercivity of Nd₉Fe_(85.5-x)Co_xB_(5.5)(x = 0, 1, 3, 5) alloy melt-spun ribbons and their hot deformed magnets [J]. Rare Metal Materials and Engineering,2011,40(4):600-604.
- [14] 张映桃,王罡,聂振国,等. 真空退火处理软磁合金的直流磁性能[J]. 材料热处理学报,2013,34(S2): 32-36.
ZHANG Y T, WANG G, NIE ZH G, et al. DC magnetic properties of soft magnetic alloys by vacuum annealing[J]. Journal of Material Heat Treatment, 2013, 34(S2): 32-36.

- [15] WANG Q, CONG G, LYU Y, et al. A new Cr25Ni35Nb alloy critical failure time prediction method based on coercive force magnetic signature [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 549: 168809.
- [16] 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 C F, WANG ZH, LIU X CH, et al. Parameter identification method of steel rod magnetic properties based on GA-PSO hybrid algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 838-843.
- [17] 任尚坤, 郭峰, 徐振瀚. 20#钢构件应力疲劳检测的新技术及试验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5): 1155-1160.
- REN SH K, GUO F, XU ZH H. New technology and experimental study on stress fatigue detection of 20 # steel member [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1155-1160.
- [18] 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 L J, JIE SH J, CHEN H EN, et al. Effect of plastic deformation of carbon steel on incremental permeability signal [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(14): 1653-1660.
- [19] YAMAURA S, FURUYA Y, WATANABE T. The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49, 15: 3019-3027.
- [20] PAL-A J, BYDŽOVSKY J. Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel [J]. *Measurement*, 2013, 46: 866-870.
- [21] 蒋生辉, 丁昊昊, 张翔, 等. 基于磁巴克豪森噪声的钢轨白层无损检测研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(18): 49-56.
- JIANG SH H, DING H H, ZHANG X, et al. Research on nondestructive testing of rail white layer based on magnetic Barkhausen noise [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(18): 49-56.
- [22] 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 ZH, HE C F, LIU X CH, et al. Effect of stress and composition ratio on magnetic Barkhausen noise in martensitic-ferritic dual phase steel [J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 36(1): 43-50.
- [23] 沈功田, 郑阳, 蒋政培, 等. 磁巴克豪森噪声技术的发展现状 [J]. *无损检测*, 2016, 38(7): 66-74.
- SHEN G T, ZHENG Y, JIANG ZH P, et al. Development of magnetic Barkhausen noise technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(7): 66-74.
- [24] 王丹民, 李华德, 周建龙, 等. 热轧带钢力学性能预测模型及其应用 [J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(7): 687-690.
- WANG D M, LI H D, ZHOU J L, et al. Prediction model of mechanical properties of hot rolled strip and its application [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(7): 687-690.
- [25] JANULA M, NESLUAN M, PASTOREK F, et al. Monitoring of corrosion extent in steel S460MC by the use of magnetic Barkhausen noise emission [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2021, 40(3): 1-11.
- [26] WANG Y MEYDAN T, MELIKHOV Y. Quantitative evaluation of the effect of temperature on magnetic Barkhausen noise [J]. *Sensors*, 2021, 21(3): 898.
- [27] TAKAHIRO Y, YASUBUMI F, SEIICHI H, et al. Stress-driven magnetic Barkhausen noise generation in FeCo magnetostrictive alloy [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, 58(1): 1-8.
- [28] SAQUET O, CHICOIS J, VINCENT A. Barkhausen noise from plain carbon steels: Analysis of the influence of microstructure [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 269(1-2): 73-82.
- [29] CHEN Z, SALAS-AVLIA J R, TAO Y, et al. A novel hybrid serial/parallel multi-frequency measurement method for impedance analysis in eddy current testing [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 024703.
- [30] VALDEZ M, GOMEZ G, COLOSCHI M, et al. A metallurgical look at coiled tubing [C]. *SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [31] YIN W, PEYTON A J, STRANGWOOD M, et al. Exploring the relationship between ferrite fraction and morphology and the electromagnetic properties of steel [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(16): 6854-6861.
- [32] ZHOU L. Non-destructive characterisation of steel microstructures using electromagnetic sensors [D]. Birmingham: University of Birmingham, 2015.
- [33] LANDGRAF F J G, DA SILVEIRA J R F, RODRIGUES-JR D. Determining the effect of grain size and maximum induction upon coercive field of electrical steels [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2011, 323(18-19): 2335-2339.
- [34] LU M, XIE Y, ZHU W, et al. Determination of the magnetic permeability, electrical conductivity, and thickness of ferrite metallic plates using a multifrequency

- electromagnetic sensing system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(7): 4111-4119.
- [35] ZHOU W B, LU M Y, CHEN Z Q, et al. Three-dimensional electromagnetic mixing models for dual-phase steel microstructures [J]. Applied Sciences, 2018, 8(4): 529-538.
- [36] ZHOU L, LIU J, HAO X J, et al. Quantification of the phase fraction in steel using an electromagnetic sensor [J]. NDT & E International, 2014, 67(10): 31-35.
- [37] SHEN J, ZHOU L, JACOBS W, et al. Real-time in-line steel microstructure control through magnetic properties using an EM sensor [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2019, 490(11): 165504. 1-165504. 8.
- [38] CHADY T, SIKORA R. Optimization of eddy-current sensor for multifrequency systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1313-1316.
- [39] BETTA G, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. An experimental comparison of multi-frequency and chirp excitations for eddy current testing on thin defects [J]. Measurement, 2015, 63: 207-220.
- [40] AVILA J R S, HOW K Y, LU M, et al. A novel dual modality sensor with sensitivities to permittivity, conductivity, and permeability [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 18(1): 356-362.
- [41] YIN W, XU K. A novel triple-coil electromagnetic sensor for thickness measurement immune to lift-off variations [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1): 164-169.
- [42] LU M, XU H, ZHU W, et al. Conductivity lift-off invariance and measurement of permeability for ferrite metallic plates [J]. Ndt & E International, 2018, 95(4): 36-44.
- [43] LU M, ZHU W, YIN L, et al. Reducing the lift-off effect on permeability measurement for magnetic plates from multifrequency induction data [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 67(1): 167-174.
- [44] 周兆明, 杜铁成, 万夫, 等. 多频涡流检测连续油管偏焊缝晶粒尺寸的试验研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 188-195.
- ZHOU ZH M, DU T CH, WAN F, et al. Experimental study on multi-frequency eddy current testing of coiled tubing offset weld grain size [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 188-195.
- [45] MARTINS C O D, ALTENHOFEN A, CLARKE T G R, et al. Applying micromagnetic methods for the non-destructive metallurgical characterization of AISI 4140 steel materials [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013, 55(3): 123-135.
- [46] 吴斌, 王学迁, 刘秀成, 等. 基于微磁检测技术的钢杆淬硬层深度定量预测 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 687-692.
- WU B, WANG X Q, LIU X CH, et al. Quantitative prediction of hardened layer depth of steel rod based on micromagnetic detection technology [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2018, 44(5): 687-692.
- [47] 董峰. 基于激光超声的金属板带晶粒尺寸在线检测方法研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- DONG F. Research on on-line detection method of metal strip grain size based on laser ultrasonic [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [48] 彭昊, 朱振格, 宋学勇, 等. 基于奇异值分解的激光超声晶粒尺寸检测研究 [J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1586-1593.
- PENG H, ZHU ZH G, SONG X Y, et al. Research on laser ultrasonic grain size detection based on singular value decomposition [J]. Laser and Infrared Sensors, 2021, 51(12): 1586-1593.
- [49] LIAO J, ZHANG L, XIANG H, et al. Mechanical behavior and microstructure evolution of AZ31 magnesium alloy sheet in an ultrasonic vibration-assisted hot tensile test [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 895: 162575.
- [50] 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 1-10.
- ZHOU ZH G, SUN G K. Research and application progress of advanced ultrasonic testing technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 1-10.
- [51] DUBOIS M, MILITZER M, MOREAU A, et al. A new technique for the quantitative real-time monitoring of austenite grain growth in steel [J]. Scripta Materialia. 2000; 42(9): 867-874.
- [52] HUANG N, COOK O J, SMITHSONN R L W, et al. Use of ultrasound to identify microstructure-property relationships in 316 stainless steel fabricated with binder jet additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2022, 51: 102591.
- [53] 李萍, 程向梅, 李安娜, 等. 304 不锈钢固溶产物晶粒尺寸的超声无损表征研究 [J]. 材料工程, 2013(6): 77-81, 86.
- LI P, CHENG X M, LI AN N, et al. Ultrasonic nondestructive characterization of grain size of 304 stainless steel solid solution products [J]. Material

- Engineering, 2013(6): 77-81, 86.
- [54] 张晨昕, 姚松, 李雄兵, 等. 基于超声声速法的镍基单晶材料晶体取向评价[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 447-455.
- ZHANG CH X, YAO S, LI X B, et al. Crystal orientation evaluation of nickel-based single crystal materials based on ultrasonic velocity method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(7): 447-455.
- [55] ROY M, WALTON K, HARLEY J B, et al. Ultrasonic evaluation of segmental variability in additively manufactured metal components [C]. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, 2018: 1-4.
- [56] WISKEL J B, IVEY D G, KENNEDY J R, et al. L80 pipe steel microstructure assessment using ultrasonic testing[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(16): 1942-1949.
- [57] AHN B, LEES S, HONG S T, et al. Application of the acoustic resonance method to evaluate the grain size of low carbon steels[J]. NDT & E International, 1999, 32(2): 85-89.
- [58] DU H, TURNER J A. Ultrasonic attenuation in pearlitic steel[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 882-887.
- [59] ARGUELLES A P, TURNER J A. Ultrasonic attenuation of polycrystalline materials with a distribution of grain sizes[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(6): 4347-4353.
- [60] MOGHANIZADEH A, FARZI A. Effect of heat treatment on an AISI 304 austenitic stainless steel evaluated by the ultrasonic attenuation coefficient[J]. Materials Testing, 2016, 58(5): 448-452.
- [61] 殷安民, 杨荃, 何飞, 等. 基于激光超声的低碳钢平均晶粒尺寸无损检测方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 11-19.
- YIN AN M, YANG Q, HE F, et al. Nondestructive testing method for average grain size of low carbon steel based on laser ultrasonic [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 11-19.
- [62] 李雄兵, 宋永锋, 倪培君, 等. 面向晶粒尺寸的超声多尺度衰减评价方法[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 121-128.
- LI X B, SONG Y F, NI P J, et al. Ultrasonic multi-scale attenuation evaluation method for grain size[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 121-128.
- [63] 张彦杰, 徐冬, 王晓晨, 等. 基于激光超声的晶粒尺寸动态检测稳定性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1427-1435.
- ZHANG Y J, XU D, WANG X CH, et al. Study on the stability of dynamic detection of grain size based on laser ultrasonic[J]. Journal of Central South University, 2021, 52(5): 1427-1435.
- [64] DOBSON J, CAWLEY P. The scattering of torsional guided waves from Gaussian rough surfaces in pipework[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(3): 1852-1861.
- [65] SPOSITO G, WARD C, CAWLEY P, et al. A review of non-destructive techniques for the detection of creep damage in power plant steels [J]. NDT & E International, 2010, 43(7): 555-567.
- [66] MA J, CAWLEY P. Low-frequency pulse echo reflection of the fundamental shear horizontal mode from part-thickness elliptical defects in plates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(6): 3485-3493.
- [67] ZHANG Z, NAGY P B, HASSAN W. Analytical and numerical modeling of non-collinear shear wave mixing at an imperfect interface [J]. Ultrasonics, 2016, 65: 165-176.
- [68] ESCOBAR-RUIZ E, RUIZ A, HASSAN W, et al. Non-linear ultrasonic NDE of titanium diffusion bonds[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(2): 187-195.
- [69] CHEN X, WU G, ZHOU Z, et al. Study of the relationship between ultrasonic properties and microstructure of nickel-based superalloy GH706 [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(11): 609-614.
- [70] 袁廷璧, 纳日苏, 常青, 等. TP347HFG 钢高温老化非线性超声检测技术[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 58-63.
- YUAN T B, NA R S, CHANG Q, et al. Nonlinear ultrasonic testing technology for high temperature aging of TP347HFG steel [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 58-63.
- [71] GODFREY A, MISHIN O V. Quantification of heterogeneity in microstructural refinement in metals and alloys deformed to high plastic strains [J]. Micron, 2021, 148: 103107.
- [72] 陈昊, 董金龙, 陈曦, 等. GH4169 晶粒尺寸的多参数超声评价方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 18-26.
- CHEN H, DONG J L, CHEN X, et al. Multi-parameter ultrasonic evaluation method of GH4169 grain size [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 18-26.

作者简介



周兆明(通信作者),2016 年于西南石油大学获得博士学位,现为西南石油大学副教授,主要研究方向为油气设施健康安全监/检测、油气计量、油气生产安全工程与测量。

E-mail: Zhouzhaom@126.com

Zhou Zhaoming (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Southwest Petroleum University in 2016. He is currently an associate professor at Southwest Petroleum University. His main research interests include health and safety monitoring/inspection of oil and gas facilities, oil and

gas measurement, oil and gas production safety engineering and measurement.



刘睿,2019 年于西南石油大学获得学士学位,现为西南石油大学研究生,主要研究方向为金属微观组织无损检测。

E-mail: 763622153@qq.com

Liu Rui received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is

currently a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes nondestructive testing of metal microstructure.