

引文格式: 王晓晨, 毛星, 张佳敏, 等. 基于激光超声的金属材料晶粒尺寸在线无损检测技术 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(20): 54-62.  
WANG Xiaochen, MAO Xing, ZHANG Jiamin, et al. Online nondestructive testing for grain size of metal materials based on laser ultrasonic [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 54-62.

# 基于激光超声的金属材料晶粒尺寸在线无损检测技术\*

王晓晨, 毛星, 张佳敏, 杨荃, 徐冬, 薛仁杰

(北京科技大学, 北京 100083)

[摘要] 金属材料的晶粒尺寸是材料力学性能表征的关键参数, 实现晶粒尺寸在线检测对提高产品质量、智能工厂的改造升级、智能排产具有重要作用。首先介绍了基于热弹机制的激光超声在线无损检测试验平台; 然后分析了基于频域能量衰减计算晶粒尺寸, 基于频谱衰减计算晶粒尺寸及分布的建模方法; 最后对生产现场可能出现的部分环境干扰进行了试验模拟。实现了基于激光超声方法的晶粒尺寸在线检测, 检测精度可达到 86% 以上。样品运动速度在 20 mm/s 以内、面外抖动  $\pm 7$  mm 及偏转角度在  $0.8^\circ$  以内时, 能够有效保证检测效果。

关键词: 激光超声; 环形激光; 无损检测; 晶粒尺寸; 在线检测

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.20.054



王晓晨

研究员, 研究方向为板带生产过程质量在线测控技术。

金属材料晶粒尺寸在材料力学性能表征中起到关键作用<sup>[1-3]</sup>。近年

来, 随着智能工厂建设的推进, 基于工业互联网的生产信息实时互联和实时交互对冶金装备智能化提出了新的要求。研究和开发金属材料晶粒尺寸在线检测和质量监控技术, 做到在线、全程、实时、无损检测, 并在条件成熟的情况下将检测信息及时反馈至相应的生产工序, 从而调整工艺参数, 改进生产流程, 对保障板带金属产品质量, 提高产品稳定性、均匀性具有十分重要的意义, 是当前工业上亟须发展的先进技术。

目前常用的晶粒尺寸检测方法有金相法<sup>[4-7]</sup>、X 射线衍射 (XRD) 法和超声法。其中, 金相法通过多道工序获取金属材料的显微组织图像后, 对晶粒尺寸进行统计, 这种方法检测精度较高, 但为离线式、破坏性检测。对于静态或缓慢移动的样品, X 射线

衍射方法<sup>[8]</sup>可以实现晶粒尺寸的原位检测, 但 X 射线对人体具有一定的危害, 必须做好防护措施<sup>[9]</sup>。传统的超声法根据激发和接收超声的方式不同, 主要包括压电超声技术、水浸超声技术和电磁超声技术<sup>[10]</sup>。上述方法均难以在工业现场实现晶粒尺寸的在线检测。

激光超声技术通过激光在物体表面激发和接收超声波, 具有非接触、能够实现远距离激发和接收、响应速度快等特点, 是一项具有工业应用前景的检测技术。1963 年, White<sup>[11]</sup>提出用脉冲激光照射固体表面产生脉冲超声后, 激光超声技术以其独有的特点, 受到国内外科科研人员的广泛关注<sup>[12]</sup>。2008 年, Sarkar 等<sup>[13]</sup>基于激光超声技术对以 Mn、Mo 和 Nb 为主要合金元素的低碳钢晶粒尺寸

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51975043); 博士后科学基金面上资助 (2021M690352); 中央高校基本科研业务费 (FRF-TP-20-105A1)。

的变化进行了监测。在2012年, Maalekian等<sup>[14]</sup>采用激光超声的方法监测了Ti/Nb合金中奥氏体晶粒的长大过程,其团队的Militzer等<sup>[15]</sup>对奥氏体晶粒的长大过程做了相关的研究。2014年, Sano等<sup>[16]</sup>利用激光超声技术测量了钢板的晶粒尺寸。

北京科技大学工程技术研究院研究团队自2010年开始,基于激光超声检测技术对金属材料微观组织进行了大量的研究。在复合结构材料检测方面,根据环氧树脂固化过程中超声波的衰减、频散等参数的变化,对环氧树脂胶层进行固化监测<sup>[17]</sup>。在晶粒尺寸检测方面,通过探索金属内部超声激发与传播规律、超声波衰减与微观晶粒尺寸的影响关系<sup>[18]</sup>,研究了基于超声能量衰减<sup>[19]</sup>及其频谱特性的平均晶粒尺寸<sup>[20-22]</sup>与分布规律表征模型<sup>[23]</sup>和基于集合经验模态分解的激光超声晶粒尺寸表征<sup>[24]</sup>;搭建了严格无损检测光路,将粒子群优化神经网络算法应用于超声信号预测金属晶粒尺寸与分布<sup>[25]</sup>;建立了与超声纵波速度线性相关的双相钛合金初生 $\alpha$ 相体积分数的预测模型<sup>[26]</sup>。

超声波在金属上下表面往复传播时,超声特征参数如声速、衰减等会携带传播路径上材料内部的微观组织结构信息,因而超声纵波和横波常作为检测金属板带晶粒尺寸的媒介<sup>[27]</sup>。基于激光超声的晶粒尺寸在线无损检测技术中的关键技术是能在严格无损的情况下,对运动中试样的晶粒尺寸实现精确检测。本文将围绕激光超声检测试验系统设计、基于超声衰减法的金属晶粒尺寸及其分布表征模型及检测系统动态特性分析展开研究。

### 1 激光超声无损检测试验系统

激光超声无损检测试验系统主要包括超声波的激发系统、探测系统、信号采集和信号处理4个部分,如图1所示。

#### 1.1 超声波激发系统

激光激发超声波的原理主要有两种,低能量严格无损的热弹激发机制和高能量有一定损伤的烧蚀激发机制<sup>[28]</sup>。当激光脉冲的能量密度较低,不足以引起表面发生不可逆的熔融等物理变化时,获得能量的脉冲激光辐照区域温度升高,产生热膨胀,脉冲激光辐照过后随着温度降低材料发生收缩,这种由局部应力和位移的快速变化形成的具有梯度分布的位移激发超声波的机制为热弹机制,入射激光只造成了材料表面的温升,是在热弹机制下无材料损伤的超声波激发过程,如图2(a)和(b)所示;当入射到物体表面的脉冲激光的能

量密度较高,超过物体表面的损伤阈值时,照射则会引起材料发生不可逆的表面熔融,发生气化、等离子体喷溅等现象,即烧蚀机制,表面材料的喷溅产生反向作用力,激发超声波<sup>[28]</sup>,如图2(c)和(d)所示。

基于无损检测需求,本文采用热弹机制激发超声波,热弹机制对试样表面无损伤,但存在激发能量较低的问题。为解决这一问题,常见的光学阵列增强激发能量的方法包括通过时间或空间调制增强信号幅值<sup>[27]</sup>。考虑到超声波的方向性等因素,采用环形激光激发来增强超声波。如图3所示,超声波的激发系统和探测系统分别位于被检测样品的

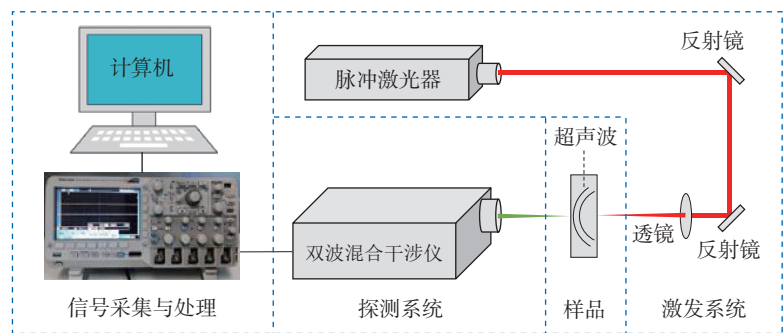


图1 激光超声无损检测试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of laser ultrasonic nondestructive testing experimental system

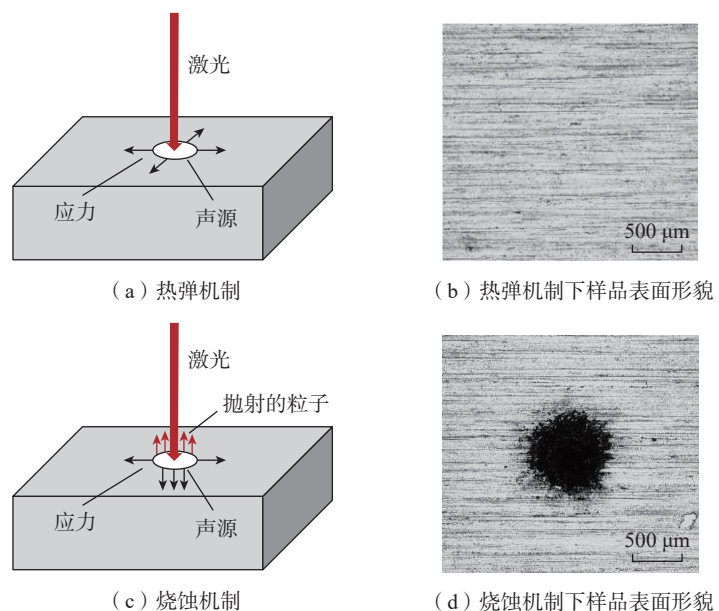


图2 激光激发超声波原理及对应的样品表面形貌

Fig.2 Laser-excited ultrasonic wave principle and sample surface morphology

两侧。在激发侧,脉冲激光通过凹透镜将光束扩大,经两个凸透镜将光源汇聚到合适的大小,再通过锥透镜由圆形光斑转换为环形光斑,照射到样品表面,产生超声波。其中锥透镜的位置决定了环形光源的半径,通过调节凸透镜(图3中凸透镜2)和锥透镜之间的距离可以调节环形源的宽度。系统采用型号为Dawa-200的Nd:YAG激光器进行超声波的激励,Dawa系列激光器采用了VRM(Variable reflectivity mirror)的先进技术,近场为近平顶光束,光斑模式分布均匀,远场为高斯光束,该激光器主要参数见表1。

### 1.2 超声波探测系统

在诸多超声波探测方法中,光学检测法利用连续激光辐照在试样表面,通过接收其反射光,感知振幅、相位、频率等的改变,从而获得超声振

动信号<sup>[29]</sup>。由于工业现场生产环境的复杂性,生产时金属板带有一定的粗糙度且可能存在低频振动等干扰。针对这一问题,段昌琪<sup>[30]</sup>认为带有硅酸铋(Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>)光折变晶体的双波混合干涉仪探测系统适合这一工况,它具有如下特点:(1)可测量较大粗糙度的表面;(2)能自动滤除低频噪声信号及低频振动信号;(3)参考光路和信号光路路径长度可调节;(4)聚光能力强。

本文搭建的双波混合干涉仪采用532 nm的单纵模连续激光器,具体性能参数见表2。如图3所示,由试样表面反射信号光束与参考光束在BSO光学变晶体中相干涉而形成动态光栅,参考光通过全息光栅,入射到晶体内部的部分参考光能量会被泵浦到信号光中,信号光光强发生明显变化,并被光电探测器接收,

从而获取试样表面的信息。单纵模连续激光器即以单一的频率在激光器谐振腔内反复振荡,其光强在空间分布上为高斯分布。Thorlabs公司的偏振分光镜立方体通过介电分束器涂层分离S和P偏振分量,偏振S分量作为反射光输出,偏振P分量作为透射光穿透偏振分光镜。这些立方体用于传输光束,对于透射光,分光镜的消光比 $T_p : T_s > 1000 : 1$ ;对于反射光,分光镜的消光比大约是 $(20 : 1) \sim (100 : 1)$ 。

### 1.3 高速信号采集系统

为了实现对工业现场移动板带的在线检测,需要对采集到的超声波信号进行实时存储和处理,传统的示波器难以应对工业现场高速实时监测需求。文献[27]中搭建的高速信号采集系统以NI-PXIE5160高速采集平台作为开发平台,以数据采集卡

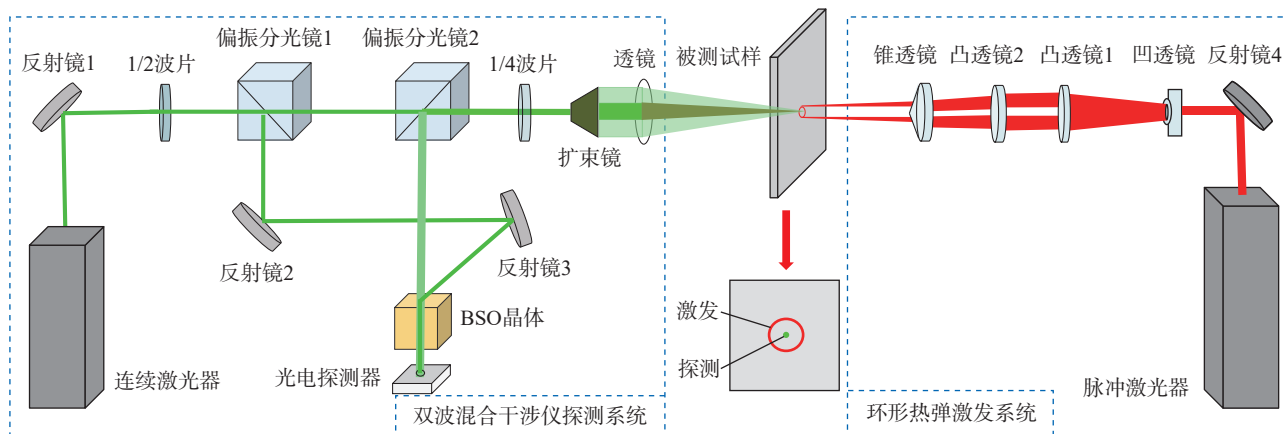


图3 超声波激发系统及探测系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic excitation system and detection system mechanism

表1 Dawa-200型脉冲激光器参数  
Table 1 Parameters of Dawa-200 pulsed laser

波长/nm	脉宽/ns	单脉冲能量/mJ	脉冲频率/Hz	功率波动范围/%	发散角/mrad	光斑直径/mm
1064	≤8	200	1~20	1	1	6

表2 连续激光器参数  
Table 2 Parameters of continuous laser

波长/nm	操作模式	输出功率/W	线宽/nm	功率波动范围/%	传播模式	发散角/mrad	光斑直径/(1/e <sup>2</sup> , mm)
532 ± 1	连续	0.8	<0.00001	2	TEM <sub>00</sub>	<1.5	约1.5

为硬件, LabVIEW 为软件。采集卡的采样率达到 2.5 G/s, 采样点数  $10^4$ , 幅值采样精度为 4 mV。此外, 该平台在实现信号高速采集的同时还可以实时处理信号, 是传统示波器和信号分析仪器的结合。通过设置数据采集卡以队列形式实现 10 Hz 的采集存储速率, 并通过嵌入 Matlab 程序实现超声波信号的实时数据处理。NI-PXIE 5160 高速采集平台主要参数如表 3 所示。

### 1.4 激光超声信号处理

为从超声信号中获取更多的有效信息, 在建立精准的代表模型之前, 需要对超声波信号进行降噪处理, 消除由系统以及环境引起的噪音, 提高信噪比。为此, Xuc 等<sup>[24]</sup> 针对采集到的激光超声信号, 用基于集合经验模态的分解与重构方法对探测到的信号进行去噪, 其计算过程为: 首先, 将有限幅度的白噪声添加到原始信号  $x(t)$ , 然后使用经验模态分解方法将其分解为不同阶次的固有模态函数 (IMF), 重复上述两个步骤, 每次分解加入幅值不同的白噪声信号得到 IMF 集合; 计算 IMF 集合中每个 IMF 的平均值, 作为最终 IMF; 其次, 通过皮尔逊相关系数法, 去除前几个相关性差的高频噪声及后几个相关性突然增加的线性趋势部分; 最后, 将剩余的 IMF 重构, 得到去噪去趋势的信号。集合经验模态分解与重构的效果见图 4, 去噪后的信号可用于后续计算超声波的衰减系数, 为最终的平均晶粒尺寸精度提供基本保障。

## 2 金属材料晶粒尺寸及分布预测模型

### 2.1 超声法检测金属材料晶粒尺寸原理

基于激光超声技术的金属材料晶粒尺寸检测是根据超声波在多晶材料中传播时的能量耗散进行表征的。由于晶粒界面声阻抗不同, 超声

波在多晶体中传播时会发生散射衰减。通常按照晶粒尺寸  $D$  与超声波波长  $\lambda$  的相对关系, 衰减系数  $\alpha$  与晶粒尺寸的关系可以分为 3 种情况<sup>[31]</sup>:

$$\alpha = \begin{cases} K_r D^3 f^4, D \ll \lambda \text{ (瑞利散射)} \\ K_s D f^2, D \approx \lambda \text{ (随机散射)} \\ K_d / D, D \gg \lambda \text{ (扩散散射)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $K_r$ 、 $K_s$ 、 $K_d$  为与材料有关的常数;  $f$  为超声波频率。

超声波衰减系数可以通过时域信息计算不同回波的能量衰减获得。为了消除近场衍射效应造成的误差, 截取靠后的两次相邻回波。通过两次波峰的能量谱 (幅值的平方), 计算出超声波能量衰减系数<sup>[32]</sup>:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \frac{\int_{t_1}^{t_2} x_i^2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} x_{i+1}^2(t) dt} \quad (2)$$

式中,  $l$  为样品厚度;  $x_i(t)$  和  $x_{i+1}(t)$  分别为相邻两次回波波峰的时间序列。

根据得到的超声波能量衰减系数, 通过式 (1) 中衰减系数  $\alpha$  与晶粒尺寸的关系, 最终得到金属材料的平均晶粒尺寸。

### 2.2 基于能量衰减的平均晶粒尺寸表征模型

以一组铝合金样品为例, 简要说明根据超声波衰减表征平均晶粒尺寸的建模过程。首先, 通过不同的热处理工艺获取不同平均晶粒

表 3 NI-PXIE 采集平台主要参数  
Table 3 Main parameters of NI-PXIE acquisition platform

总线方式	总线带宽/(GB · s <sup>-1</sup> )	采样率/(GS · s <sup>-1</sup> )	信号带宽/MHz
PXIE	4	2.5	500
分辨率位数	输入电压范围/V	内存/MB	通道数
10	± 25	64	2

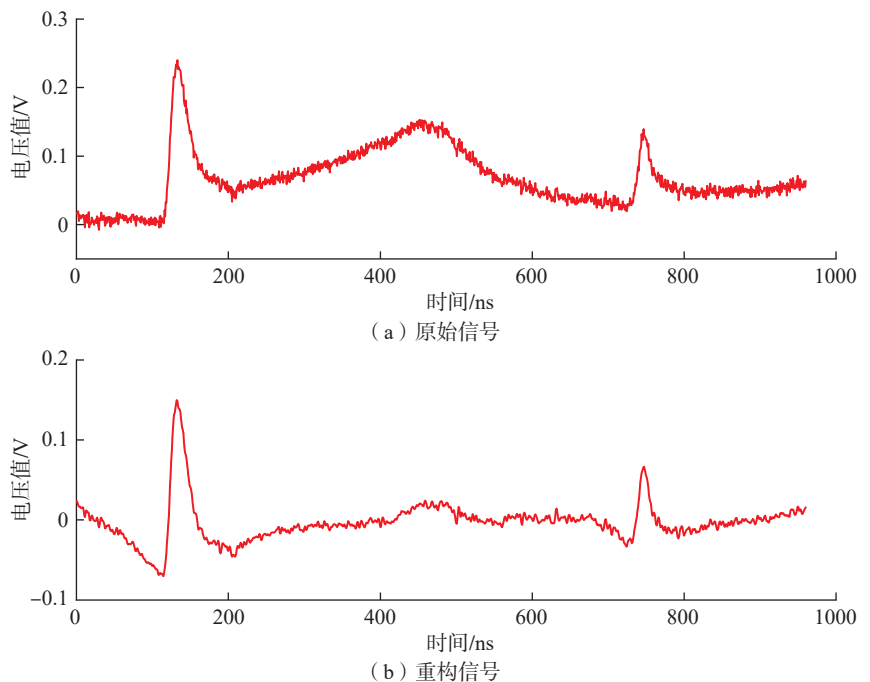


图 4 集合经验模态分解与重构的原始信号和重构信号

Fig.4 Original and reconstructed signals of ensemble empirical mode decomposition and reconstruction

尺寸的检测试样,将每个试样一分为二,一部分用于通过电子背散衍射(EBSD)方法统计试样的平均晶粒尺寸,另一部分用于激光超声试验,取激光超声信号中心频率 $f=15$  MHz,按照式(1)对EBSD法获得的平均晶粒尺寸 $D_{AVE}$ 和激光超声试验得到的不同试样的衰减系数 $\alpha$ 之间的关系进行拟合(图5<sup>[27]</sup>),得到平均晶粒尺寸 $D_{AVE}$ 和衰减系数 $\alpha$ 之间的关系式:

$$\alpha = 1.55 \times 10^{-5} D_{AVE}^{2.67} + 2.05 \quad (3)$$

该建模过程适用于钢铁、铝等单相金属材料,实际应用时,输入由激光超声试验信号得到的衰减系数就能根据式(3)得到金属的平均晶粒尺寸。

### 2.3 基于频谱衰减的晶粒尺寸分布表征模型

许多科研团队研究发现,大多数情况下,金属材料晶粒尺寸分布服从对数-正态分布<sup>[32-34]</sup>,分布形式为

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}D} \exp\left(-\frac{(\ln D - \ln \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中, $D$ 为晶粒尺寸; $\mu$ 为晶粒尺寸的均值; $\sigma$ 为晶粒尺寸的标准差。

为了精确表征材料的微观组织,董峰<sup>[27]</sup>以TC4钛合金为例,简要介绍了基于衰减系数谱对晶粒尺寸分布进行表征的建模过程。将经过不同热处理工艺后的TC4钛合金试样分为两组,第1组试样标记0#~4#,为标定组,第2组试样标记5#~8#,为验证组。将通过EBSD试验得到的二维晶粒尺寸分布,采用Schwartz-Saltykov<sup>[35-36]</sup>法转换为三维晶粒尺寸离散分布,得到晶粒尺寸统计结果,如图6所示<sup>[23]</sup>,基本符合对数-正态分布规律。

根据波长与晶粒尺寸之间的关系,本组试样的衰减机制为瑞利散射,衰减系数与晶粒尺寸及分布的关系为

$$\alpha = C_R f^4 \int_0^{+\infty} P(D) D^3 dD + \alpha_0 = C_R f^4 \mu^3 \exp(9\sigma^2/2) + \alpha_0 \quad (5)$$

式中, $C_R$ 和 $\alpha_0$ 均为常数,需要根据试验数据对其进行计算。

图7<sup>[23]</sup>为标定试样0#~4#在不同频率下的衰减系数谱。由式(5)

可知,衰减系数 $\alpha$ 与 $f^4$ 呈线性关系,通过引入式(6)的皮尔逊相关系数 $\rho_c$ 对不同试样的衰减系数 $\alpha$ 与 $f^4$ 间的线性关系进行衡量。

$$\rho_c = \frac{E(f^4 \alpha) - E(f^4)E(\alpha)}{\sqrt{E((f^4)^2) - (E(f^4))^2} \sqrt{E(\alpha^2) - (E(\alpha))^2}} \quad (6)$$

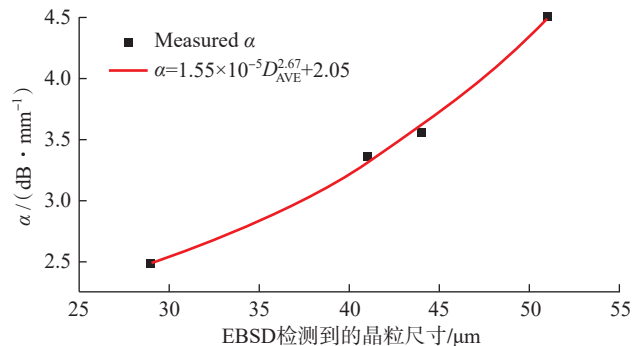


图5 晶粒尺寸与衰减系数的关系<sup>[27]</sup>

Fig.5 Relationship between grain size and attenuation coefficient<sup>[27]</sup>

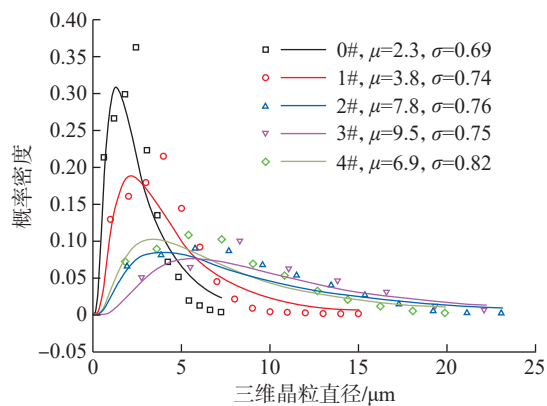


图6 试样晶粒尺寸分布<sup>[23]</sup>

Fig.6 Grain size distribution of samples<sup>[23]</sup>

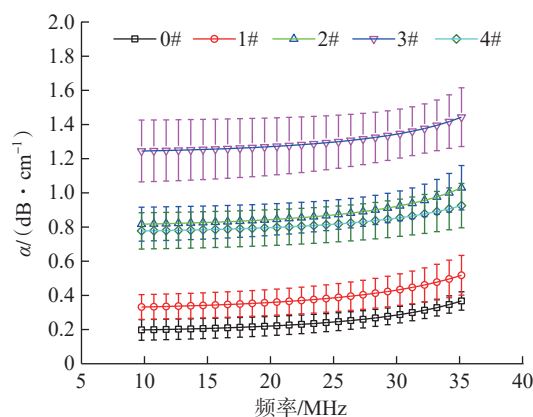


图7 标定组的衰减系数谱<sup>[23]</sup>

Fig.7 Attenuation coefficient spectrum of calibration samples<sup>[23]</sup>

建立皮尔逊相关系数  $\rho_c$  与晶粒尺寸分布标准差  $\sigma$  的关系,如图 8 所示<sup>[23]</sup>。可以看出,晶粒尺寸标准差  $\sigma$  越大的试样,相关系数  $\rho_c$  越小,且二者呈较好的线性关系。将试验获得的各参数值代入式(5),即可对常数  $C_R$  和  $\alpha_0$  进行求解,标定后的模型可用于晶粒尺寸分布的预测。

$$\sigma = (1.01 - \rho_c) / 0.0207 \quad (7)$$

建立表征模型后,采用与标定组同批次的验证组样品 5#~8# 对表征模型进行验证。每个样品取 20 个点进行激光超声试验,计算出每个试样晶粒尺寸的均值和标准差。表 4 为标定组 EBSD 试验结果与激光超声试验表征模型预测结果对比。与 EBSD 试验结果相比,4 个验证样品表征模型的均值  $\mu$  的平均值误差最大为 4.483%,最大误差为 13.293%;标准差  $\sigma$  平均值误差最大为 2.605%,最大误差为 7.037%。因此,建立的表征模型的晶粒尺寸及分布的预测精度为均值  $\mu$  的误差不超过 13.293%,标准差  $\sigma$  的误差不超过 7.037%。

### 3 检测系统动态特性分析

高速移动的板带不仅对于干涉仪和信号采集系统的快速响应能力有要求,而且要求整个检测系统具有高稳定性和抗干扰能力。由于板带移动引起的面外抖动致使离焦量超出景深范围或角度偏转超出一定范围,

从而导致检测系统接收不到信号,为此,董峰<sup>[27]</sup>采用带有旋转和平移台的微型轧机来实现金属板带样品的移动控制(图 9),并研究了板带移动速度、偏转角及面外抖动等 3 种因素对信号质量的影响。

将样品固定在试验轧机上进行激光超声试验,样品平移速度在 0~20 mm/s 变化,分析移动速度对超声信号质量的影响。采用 1.4 节中的方法处理后,信号如图 10 所示<sup>[27]</sup>。结果表明,当样品移动速度在 20 mm/s 以内时,采用本文所设计的激光超声检测试验系统及相关的信号处理方法,不受移动速度影响。

为确定检测系统兼容的最大面外振动幅值,让样品处于不同的离焦量下进行以上类似试验。采用 1.4 节中介绍的方法处理后,信号如图 11 所示<sup>[27]</sup>。结果表明,随着离焦量的增加,测得的超声信号信噪比逐渐降低;当离焦量在 7.2 mm 以内时,超声信号满足后续模型计算。

为确定检测系统兼容的最大偏转角度,让样品处于不同的偏转角度下进行以上类似试验。采用第 1.4 节中介绍的方法处理后,信号如图 12 所示<sup>[27]</sup>。结果表明,本文所设计的激光超声检测试验系统可兼容的板带偏转角度不超过 0.8°。

表 4 验证组试样 EBSD 和激光超声试验表征结果统计  
Table 4 Statistics of the EBSD and laser ultrasonic experiment of the verification group samples

样品晶粒尺寸	EBSD 结果/ $\mu\text{m}$	激光超声结果/ $\mu\text{m}$	平均值误差/%	最大误差/%	
5#	均值 $\mu$	6.365	6.367	0.028	6.599
	标准差 $\sigma$	0.79	0.786	0.519	4.810
6#	均值 $\mu$	6.928	6.739	2.725	7.794
	标准差 $\sigma$	0.76	0.757	0.421	5.000
7#	均值 $\mu$	7.049	7.365	4.483	13.293
	标准差 $\sigma$	0.81	0.789	2.605	7.037
8#	均值 $\mu$	8.528	8.248	3.287	9.217
	标准差 $\sigma$	0.73	0.723	0.911	3.973

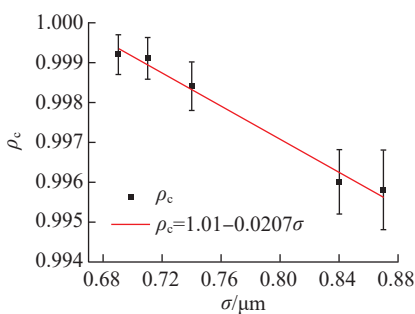


图 8 皮尔逊相关系数与晶粒尺寸标准差的关系<sup>[23]</sup>

Fig.8 Relationship between Pearson correlation coefficient and standard deviation of grain size<sup>[23]</sup>

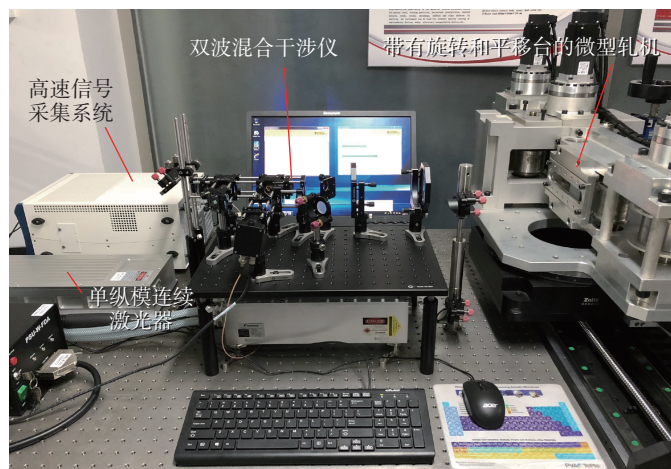


图 9 基于激光超声的晶粒尺寸在线检测试验平台<sup>[27]</sup>

Fig.9 Experimental platform for online detection of grain size based on laser ultrasound<sup>[27]</sup>

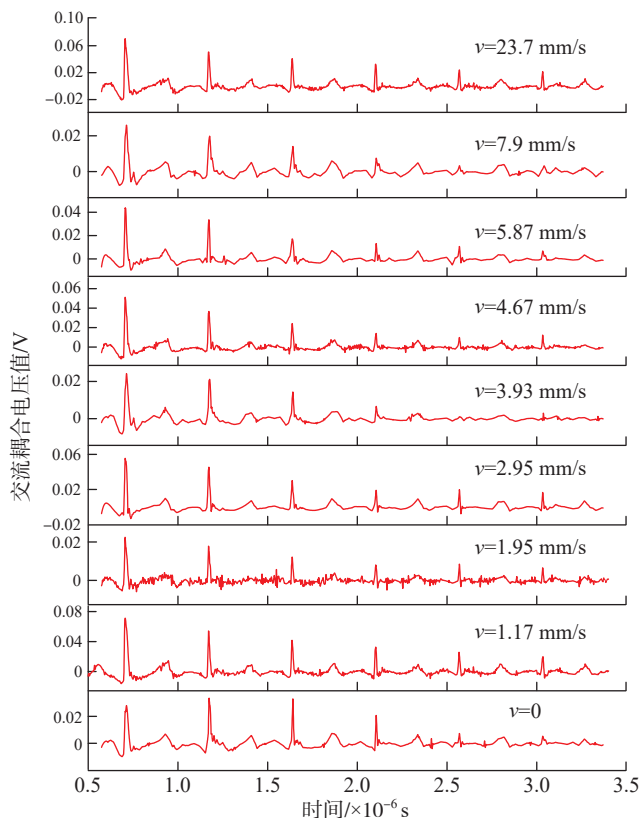


图 10 不同移动速度的超声波信号<sup>[27]</sup>

Fig.10 Ultrasonic signals with different moving speeds<sup>[27]</sup>

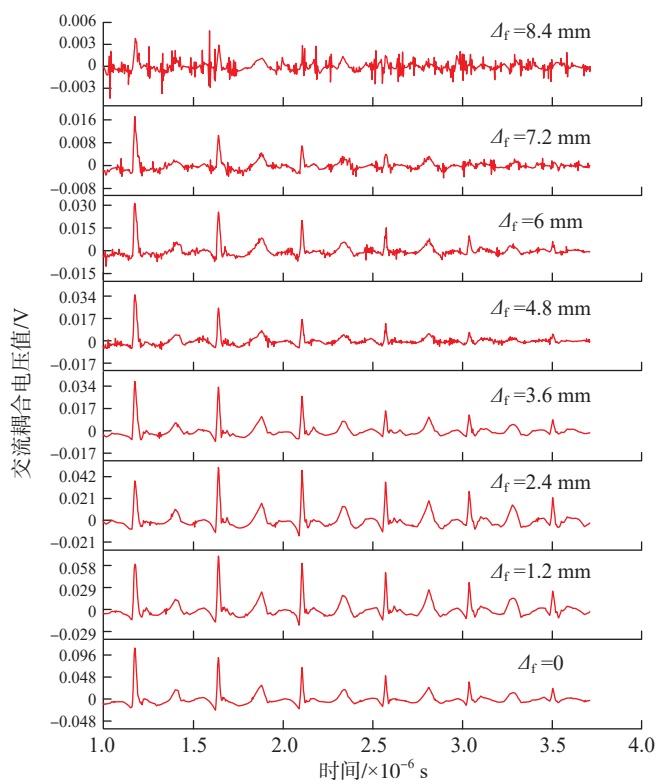


图 11 不同离焦量对应的超声波信号<sup>[27]</sup>

Fig.11 Ultrasonic signals with different out-of-focus amounts<sup>[27]</sup>

## 4 结论

本文分析了激光超声检测晶粒尺寸及分布的最新研究进展,并进行总结描述。

(1) 采用环形光源激发超声波,搭建了一个基于热弹机制的激光超声无损检测试验平台,避免了烧蚀机制对试样表面约 0.3 μm 的损伤,实现了严格无损检测。该平台所含的高速信号采集系统对超声波信号进行高速采集和存储的同时可以实现信号的实时处理。

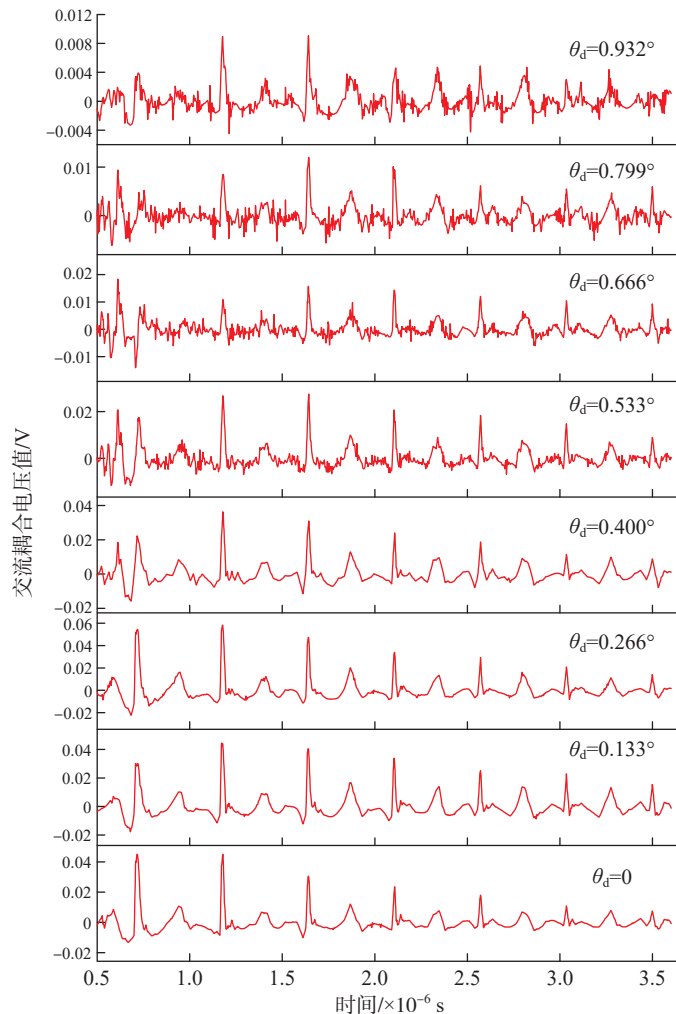
(2) 对数字信号采用集合经验模态分解及重构方法,实现信号去噪的同时去除趋势线,为进一步提高晶粒度预测精度做好基础。

(3) 提出基于能量衰减的平均晶粒尺寸表征模型、基于频谱衰减的晶粒尺寸分布表征模型。其中,晶粒尺寸及分布的表征模型预测精度为均值  $\mu$  误差不超过 13.293%,标准差  $\sigma$  误差不超过 7.037%。

(4) 对板带移动过程中可能出现的偏转、面外抖动等进行了试验研究,并提出了对于低频振动信号的处理方法。可以实现移动速度在 20 mm/s 以内、面外抖动  $\pm 7$  mm 及偏转角度在 0.8° 以内,整套系统不受移动速度影响。

## 参考文献

- [1] WEI H L, ELMER J W, DEBROY T. Three-dimensional modeling of grain structure evolution during welding of an aluminum alloy[J]. Acta Materialia, 2017, 126: 413–425.
- [2] ABBRUZZESE G, LÜCKE K. A theory of texture controlled grain growth—I. Derivation and general discussion of the model[J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(5): 905–914.
- [3] YAMASHITA T, SHIMAMURA J, OI K, et al. Grain refinement of heat affected zone in high heat input welding by liquid phase pinning of oxy-sulfide[J]. ISIJ International, 2015, 55(9): 2018–2026.
- [4] 孙朝明, 孟玉堂, 杨桂珠. 金相晶粒度定量评定技术进展 [J]. 理化检验 (物理

图 12 不同偏转角度的超声波信号<sup>[27]</sup>Fig.12 Ultrasonic signals with different deflection angles<sup>[27]</sup>

分册), 2012, 48(12): 814–817.

SUN Chaoming, MENG Yutang, YANG Guizhu. Progress of quantitative estimating techniques for metallographic grain size[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2012, 48(12): 814–817.

[5] CALCAGNOTTO M, PONGE D, DEMIR E, et al. Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D EBSD[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(10–11): 2738–2746.

[6] HUMPHREYS F J. Characterisation of fine-scale microstructures by electron backscatter diffraction (EBSD)[J]. Scripta Materialia, 2004, 51(8): 771–776.

[7] CALCAGNOTTO M, PONGE D, DEMIR E, et al. Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine grained dual-phase steels studied by 2D and 3D

EBSD[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(10–11): 2738–2746.

[8] KRIL C E, BIRINGER R. Estimating grain-size distributions in nanocrystalline materials from X-ray diffraction profile analysis[J]. Philosophical Magazine A, 1998, 77(3): 621–640.

[9] 陈冷, 毛卫民, 杨平, 等. 基于 X 射线二维衍射图像的晶粒尺寸在线检测方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2004, 9(3): 164–168.

CHEN Leng, MAO Weimin, YANG Ping, et al. A method of online grain size measurement based on X-ray two-dimensional diffraction frame[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2004, 9(3): 164–168.

[10] 李望, 吴长青, 赵炜炜, 等. 电磁超声检测技术的应用[J]. 电子测试, 2021(3): 115–116, 126.

LI Wang, WU Changqing, ZHAO Weiwei, et al. Application of electromagnetic ultrasonic

testing technology[J]. Electronic Test, 2021(3): 115–116, 126.

[11] WHITE R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559–3567.

[12] HUTCHINSON B, MOSS B, SMITH A, et al. Online characterisation of steel structures in hot strip mill using laser ultrasonic measurements[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2002, 29(1): 77–80.

[13] SARKAR S, MOREAU A, MILITZER M, et al. Evolution of austenite recrystallization and grain growth using laser ultrasonics[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(4): 897–907.

[14] MAALEKIAN M, RADIS R, MILITZER M, et al. In situ measurement and modelling of austenite grain growth in a Ti/Nb microalloyed steel[J]. Acta Materialia, 2012, 60(3): 1015–1026.

[15] MILITZER M, MAALEKIAN M, MOREAU A. Laser-ultrasonic austenite grain size measurements in low-carbon steels[J]. Materials Science Forum, 2012, 715–716: 407–414.

[16] SANO M, OHARA K, SHIMODA N, et al. Measurement of material properties of steel sheets using laser ultrasonic technology[J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 1414–1419.

[17] ZHANG Y J, WANG X C, YANG Q, et al. Research on epoxy resin curing monitoring using laser ultrasonic[J]. Measurement, 2020, 158: 107737.

[18] DONG F, WANG X C, YANG Q, et al. Directional dependence of aluminum grain size measurement by laser-ultrasonic technique[J]. Materials Characterization, 2017, 129: 114–120.

[19] FEI H, YIN A M, YANG Q. Grain size measurement in steel by laser ultrasonics based on time domain energy[J]. Materials Transactions, 2015, 56(6): 808–812.

[20] ZHANG Y J, WANG X C, YANG Q, et al. Nondestructive evaluation method of average grain size in TWIP steel by laser ultrasonic[J]. Materials Science Forum, 2018, 913: 324–330.

[21] ZHANG Y J, WANG X C, YANG Q, et al. Characterization of mean grain size of interstitial-free steel based on laser ultrasonic[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(11): 8510–8522.

[22] YIN A M, YANG Q, HE F, et al. Determination of grain size in deep drawing steel sheet by laser ultrasonics[J]. Materials Transactions, 2014, 55(7): 994–997.

[23] DONG F, WANG X C, YANG Q, et

al. In-situ measurement of Ti-6Al-4V grain size distribution using laser-ultrasonic technique[J]. Scripta Materialia, 2018, 154: 40-44.

[24] XUE R J, WANG X C, YANG Q, et al. Grain size characterization of aluminum based on ensemble empirical mode decomposition using a laser ultrasonic technique[J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 378-386.

[25] XUE R J, WANG X C, YANG Q, et al. Grain size distribution characterization of aluminum with a particle swarm optimization neural network using laser ultrasonics[J]. Applied Acoustics, 2021, 180: 108125.

[26] ZHANG J M, WANG X C, XU D, et al. Prediction of volume fraction of primary  $\alpha$  phase in dual-phase titanium alloy based on laser ultrasonic[J]. Measurement, 2022, 195: 111115.

[27] 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 Feng. In-situ measurement of metal strip grain size based on laser-ultrasonics[D]. Beijing: University of Science and Technology

Beijing, 2019.

[28] 沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.

SHEN Zhonghua, YUAN Ling, ZHANG Hongchao, et al. Laser ultrasound in solids[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.

[29] 张弼兴. 硅探测器结构中激光超声及粘接缺陷检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.

ZHANG Bixing. Laser ultrasonic in silicon detector structure and research on adhesive defect detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[30] 段昌琪. 基于双波混合干涉仪的振动测量及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

DUAN Changqi. Vibration measurement and its application using two-wave-mixing interferometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[31] PAPADAKIS E P. Ultrasonic attenuation caused by scattering in polycrystalline media[J]. Physical Acoustics, 1968, 4(Part B): 269-328.

[32] BERBENNI S, FAVIER V, BERVEILLER M. Impact of the grain size distribution on the yield stress of heterogeneous materials[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23(1): 114-142.

[33] PAPADAKIS E P. From micrograph to grain-size distribution with ultrasonic applications[J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35(5): 1586-1594.

[34] NÚÑEZ C, DOMINGO S. Statistical considerations on uniform grain size[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(12): 2937-2944.

[35] SAHAGIAN D L, PROUSSEVITCH A A. 3D particle size distributions from 2D observations: Stereology for natural applications[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 84(3-4): 173-196.

[36] SALTIKOV S A. The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distribution of their sections[C]//Stereology. Heidelberg: Springer, 1967: 163-173.

## Online Nondestructive Testing for Grain Size of Metal Materials Based on Laser Ultrasonic

WANG Xiaochen, MAO Xing, ZHANG Jiamin, YANG Quan, XU Dong, XUE Renjie

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**[ABSTRACT]** The grain size of metal materials is an important parameter for the characterization of mechanical properties. Realizing the online detection of grain size plays an important role on improving product quality, upgrading intelligent factories, and intelligent scheduling. Firstly, the experimental platform of laser ultrasonic online nondestructive testing based on the thermoelastic mechanism was introduced in this paper. Then the modeling methods characterizing grain size based on frequency domain energy attenuation, and the grain size and distribution based on spectral attenuation, were analyzed. Finally, the experimental simulation of some environmental disturbance was carried out. The online detection of grain size based on laser ultrasonic technology is realized, and the detection accuracy can reach more than 86%. When the sample movement is within 20 mm/s, the out-of-plane jitter is  $\pm 7$  mm and the deflection angle is within  $0.8^\circ$ , the detection results can be effectively ensured.

**Keywords:** Laser ultrasonic; Ring-shaped laser; Nondestructive testing; Grain size; Online detection

(责编 雷松)