

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413275

基于激光超声的 TA1 工业纯钛塑性变形损伤检测*

夏振鑫^{1,2}, 陈丹³, 袁培龙⁴, 刘涛⁵, 殷安民^{1,2}

(1. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室 宁波 315211;
3. 深圳职业技术大学 深圳 518055; 4. 海军工程大学 武汉 430030; 5. 浙江申吉钛业股份有限公司 湖州 313306)

摘要:采用激光超声纵波对均匀和不均匀塑性变形的 TA1 工业纯钛样品进行检测,利用 CEEMD 对信号进行降噪处理,获取激光超声特征值并进行成像,通过 EBSD 实验获取微观组织信息。首先对均匀塑性变形样品的成像图分析发现,随着变形量的增加,纵波声速和频域衰减系数整体呈下降趋势,时域衰减系数变化不大。随后,分析了微观组织与激光超声特征值相关性,通过加权平均法进行 MFFP 成像处理, MFFP 整体分布呈下降趋势,与微观组织演变规律相对应。最后,对不均匀塑性变形样品进行分析,研究发现纵波声速和 MFFP 可以区分出不同变形区域,与微观组织区分区域相似,证实了激光超声 MFFP 可以用来评估 TA1 工业纯钛塑性变形损伤。

关键词: 激光超声; TA1 工业纯钛; 塑性变形损伤; 多特征融合参数(MFFP)

中图分类号: TH878 TG115.285 TB551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Plastic deformation damage detection of TA1 industrial pure titanium by laser ultrasonics

Xia Zhenxin^{1,2}, Chen Dan³, Yuan Peilong⁴, Liu Tao⁵, Yin Anmin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China; 3. Institute of Intelligent Manufacturing Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China; 4. Naval University of Engineering, Wuhan 430030, China; 5. Zhejiang Shenji Titanium Industry Co., Ltd, Huzhou 313306, China)

Abstract: Laser ultrasonics longitudinal wave is used to detect the uniform and non-uniform plastic deformation of TA1 industrial pure titanium samples, and CEEMD is used to denoise the signal, obtain the laser ultrasonics eigenvalue and imaging, and obtain the microstructure information by EBSD experiment. Firstly, the imaging analysis of uniform plastic deformation samples shows that with the increase of deformation, the longitudinal wave sound velocity and attenuation coefficient in the frequency domain decrease, while the attenuation coefficient in the time domain does not change much. Then, the correlation between the microstructure and laser ultrasonics eigenvalue is analyzed, and multi-feature fusion parameters (MFFP) imaging is processed by the weighted average method. The overall distribution of MFFP shows a decreasing trend, which corresponds to the evolution of microstructure. Finally, the analysis of non-uniform plastic deformation shows that the laser ultrasonics longitudinal wave velocity and MFFP can distinguish different deformation regions, which is similar to the microstructure distinction regions, confirming that laser ultrasonics MFFP can be used to evaluate the plastic deformation damage of TA1 industrial pure titanium.

Keywords: laser ultrasonics; TA1 industrial pure titanium; plastic deformation damage; multi-feature fusion parameters (MFFP)

收稿日期: 2024-09-13 Received Date: 2024-09-13

* 基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY24E050001)、国家自然科学基金 (12304535)、深圳市高等院校稳定支持计划 (20231123154444001) 项目资助

0 引 言

钛合金具有耐腐蚀、低密度、耐高温等优良的综合性能^[1-4],广泛应用于军事、航空航天、核电厂等领域^[5-8]。在服役过程中,金属构件在一定载荷下发生过量变形等损伤,使构件的功能丧失或降低,如果不能在早期及时发现并控制,产生的影响包括引起灾难性事故、造成人员伤亡、影响企业生产、严重影响国民经济发展等^[9-10]。因此钛合金构件早期塑性变形失效检测与表征具有重要意义。

激光超声检测技术可以检测微观组织均匀性、力学性能、残余应力分布等,可以对原材料、设备运行前期和服役过程进行无损检测,并且具有频带宽、非接触、非破坏性、灵敏度高、时空分辨率高、检测精度高等优势^[11-15]。目前国内外学者对超声波检测塑性变形引起的微观组织结构变化进行了大量研究。Tang 等^[16]利用有限元研究了铝合金 A6061 塑性变形引起的微观组织结构变化对纵波和横波声速的影响,结果表明横波声速主要受结构演变的影响,而纵波声速对点缺陷和表面的晶体取向更敏感。Kobayashi^[17]提出了一种超声波声速评估微观组织结构变化的理论模型,将其理论应用到退火和非退火下铝合金塑性变形状态的研究,发现模拟结果和实验结果吻合,并可以利用单轴拉伸试验下的超声波声速变化预测复合应力状态下的塑性各向异性增长。Yaghoubi 等^[18]对 AA1100 和 AA2024 铝合金严重塑性变形(severe plastic deformation, SPD)下的超声声速和剪切强度进行了研究,研究发现多轴压缩(multi-axial compression, MAC)的剪切强度和声速随变形应变的变化趋势相反,为研究超声声速与材料力学性能之间的联系提供了理论支撑。以上学者研究了塑性变形引起的微观组织结构演变对超声声速的影响规律,但是塑性变形与超声波散射衰减方面的关联性研究还较少,也没有考虑塑性变形过程中存在的不均匀塑性变形和微变形情况。

在成像技术方面,Carlos 等^[19]通过将被动热成像技术和数字图像处理相结合,损伤检测的分辨率提高至 0.4 mm,实现了对损伤位置和特性的精确描述。沈平单^[20]研究了激光超声 Lamb 波与构件损伤之间的关系,采用激光超声成像技术对金属铝板不同缺陷类型进行表征,引入深度学习算法进一步提高了激光超声损伤成像精度和效率,实现了高分辨率的激光超声成像损伤检测。Li 等^[21]通过深度学习增强的激光超声 B 扫和 C 扫成像方法对激光熔覆涂层中的界面缺陷进行检测,成功检测到直径为 0.5 mm 的界面缺陷,证明了深度学习增强的激光超声成像在缺陷检测中可行性。但是激光超声成像在塑性变形损伤评价中的应用研究还不够。

采用激光超声检测技术对均匀塑性变形和不均匀塑性变形下的 TA1 工业纯钛样品进行检测,研究了塑性变形引起的微观组织结构的演变对激光超声声速与衰减系数的影响规律。通过拉伸实验获取均匀塑性变形损伤和不均匀塑性变形损伤的 TA1 工业纯钛样品,首先,采用激光超声无损检测方法对损伤进行检测,利用互补集合经验拟态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)信号处理方法对激光超声信号进行处理,提取激光超声特征值并对其成像;采用电子背散射衍射(electron back scatter diffraction, EBSD)技术表征塑性变形损伤样品不同位置的晶粒尺寸、小角度晶界、织构强度等微观组织,并与激光超声波速度、时域衰减、频域衰减等激光超声特征值进行相关性分析。为了避免单一激光超声特征参数带来的偶然性,提出了激光超声多特征融合参数(multi-feature fusion parameters, MFFP)成像方法,并采用激光超声 MFFP 方法对不均匀塑性变形损伤的 TA1 工业纯钛样品进行成像。本研究将激光超声成像技术应用于均匀塑性变形和不均匀塑性变形下材料的微观组织演变规律分析,进一步探索了激光超声声速、衰减特性与微观组织变化之间的关联性,并提出了激光超声 MFFP 成像方法评估塑性变形损伤,为钛合金塑性变形损伤无损检测进一步研究提供了理论支撑。

1 实验材料与方法

实验材料选用 TA1 工业纯钛板材,TA1 板材化学成分如表 1 所示。为了获得不同的塑性变形板材试样,采用线切割切取 4 块长×宽×高分别为 150 mm×40 mm×3 mm 的 TA1 工业纯钛拉伸试样。使用拉伸试验机对 3 块 TA1 拉伸试样进行拉伸实验,拉伸变形量分别为 0%、2%、6%、8%,为了获得不均匀塑形变形的 TA1 板材试样,对其中 8%变形量的 TA1 板材的下半部分夹持端进行一定的抛磨处理减少拉伸过程中的夹持力,从而获得不均匀的塑性变形 TA1 板材试样。

表 1 TA1 的化学成分表	
Table 1 Chemical composition of TA1	
化学元素	含量/%
Ti	99.290 9
O	0.152 4
N	0.012 2
C	0.031 0
H	0.000 5
Fe	0.513 0

其次,经过拉伸实验后的样品进行激光超声检测实验。实验使用的激光超声检测系统如图 1 所示,采用 Centurion+脉冲激光器(脉冲时间宽度 8 ns,能量 50 mJ,波长 1 064 nm)产生的脉冲激光经过两个反射镜和一个柱面透镜照射在 TA1 工业纯钛拉伸试样表面,从而使样品表面温度急剧升高产生纵向超声波。在试样的另一侧采用带宽为 20 MHz、波长为 532 nm 的双波混合干涉仪(Tempo 2D, Sound & Bright)接收传播到另一侧的纵向超声波,接收到的信号通过采集卡储存在计算机中。随后,由于采集到的信号存在大量的高频噪声,为了提高

激光超声特征值提取精度,将采集到的信号导入 Matlab 软件,利用 CEEMD 对信号进行降噪处理,降噪后提取激光超声特征值,最后利用成像处理程序对激光超声特征值进行成像处理,成像结果如图所示。为了实现信号的同步发射与接收,最大采样率为 250 MHz 的采集卡(NI PXI-5114)、激光器、双波混合干涉仪三者同步工作。试样夹持在最小步长为 4 μm 的二位机械运动平台(Bislide),实现对 TA1 工业纯钛试样表面的激光超声高精度二维扫描,获得塑性变形后 TA1 工业纯钛试样的二维分布图,扫描区域为 10 mm×57 mm,步长为 1 mm。

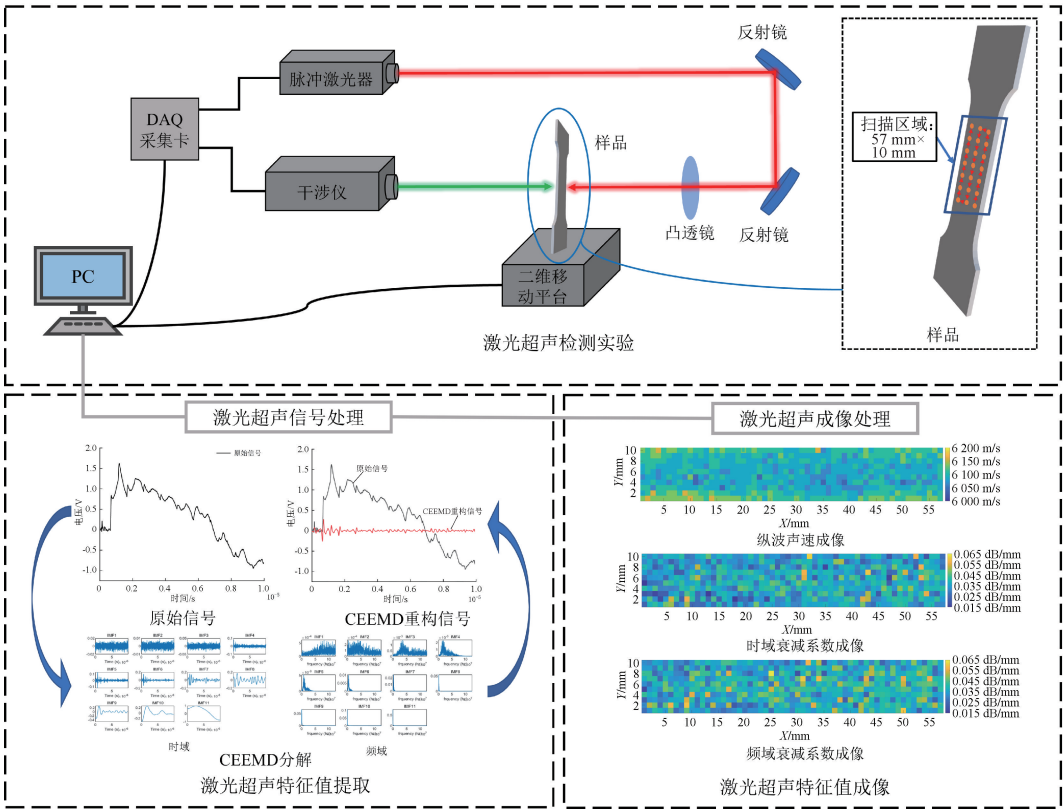


图 1 TA1 工业纯钛塑性变形损伤检测流程

Fig. 1 TA1 flow chart of plastic deformation damage detection of industrial pure titanium

最后,激光超声实验后的板材试样采用线切割切取 13 块长×宽×高为 10 mm×6 mm×3 mm 的 TD 样品,对 TD 样品进行打磨抛光,然后在 1:19 的 70% 的高氯酸溶液和 99.5% 的甲醇溶液的电解抛光光液中用 30 V、0.5 A 的电流电解抛光 30 s。最后用 Apreo 2 SEM 场发射扫描电镜和附带的电子背散射衍射系统对样品 TD 面进行 EBSD 检测,获取不同塑性变形后的 TA1 的微观组织。

2 实验结果与分析

2.1 均匀塑性变形损伤激光超声成像

1) 塑性变形量与超声特征值的关联度分析

通过 Aztec 和 Matlab 软件对 TA1 工业纯钛试样在不同变形量下的 EBSD 数据进行分析,获取的 IPF、晶界及孪晶界图、晶粒尺寸分布图、施密特因子图及分布图和织构图,如图 2 所示。图 2 (a0~c0) 为实验样品;(a1~c1) 为 IPF 图;(a2~c2) 为晶界图;(a3~c3) 为施密特因子图;(a4~c4) 为孪晶界图;(a5~c5) 为晶粒尺寸分布图;(a6~c6) 为施密特因子分布图;(a7~c7) 为极图;(a8~c8) 为纵波声速成像图;(a9~c9) 为时域衰减成像图;(a10~c10) 为时域衰减成像图。晶粒尺寸、织构强度和大小角晶界统计如表 2 所示。

室温下,TA1 工业纯钛塑性变形主要形式为滑移和孪生,而由于多晶体的材料中各晶粒之间存在取向不同

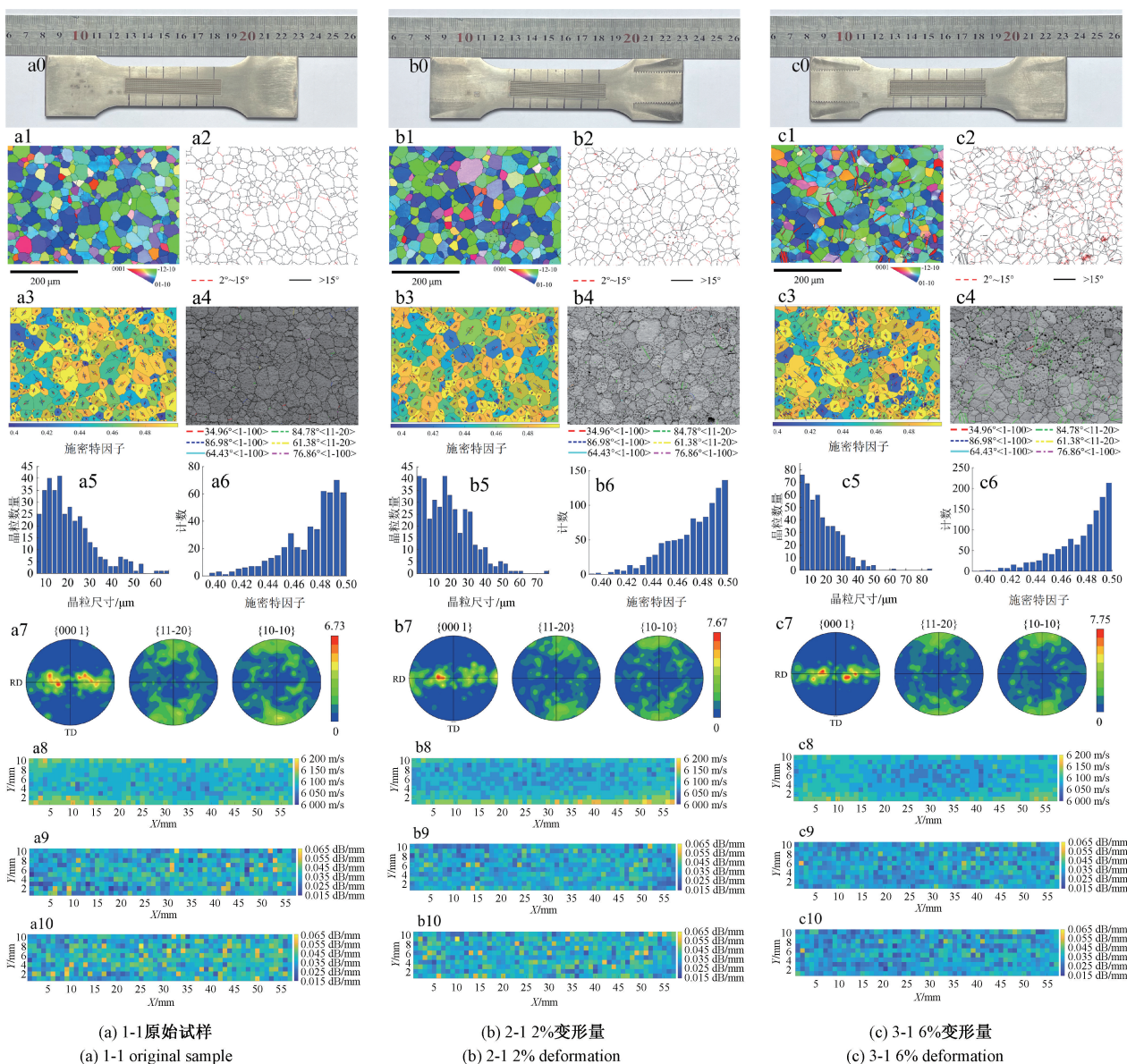


图2 原始试样与不同变形量下 TA1 工业纯钛的微观组织和超声特征值成像

Fig.2 Microstructure and ultrasonics eigenvalue imaging of original sample and TA1 industrial pure titanium under different deformation

表 2 原始试样与不同变形量下 TA1 工业纯钛的微观组织参数

Table 2 Microstructure parameters of original sample and TA1 industrial pure titanium under different deformation

编号	平均晶粒尺寸/ μm	织构强度/ μd	小角度晶界含量/%
1-1	22.07	6.37	6.89
2-1	20.27	7.67	8.85
2-2	20.76	10.09	7.05
2-3	22.43	9.09	5.24
3-1	18.73	7.75	20.6
3-2	19.42	10.67	18.8
3-3	19.92	7.14	10.9

和晶界^[22],在塑性变形时不仅需要克服晶界的阻碍,还需要各晶粒之间相互协调变形。对于 α -Ti 相主要有以下 4 种滑移系统,分别为 $\langle a \rangle$ 基底滑移 ($\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$)、 $\langle a \rangle$ 棱柱形滑移 ($\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$)、 $\langle a \rangle$ 锥体滑移 ($\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$)、 $\langle c+a \rangle$ 锥体滑移 ($\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$)。而根据 Von Mises 准则,在多晶体材料中,至少需要 5 个独立的滑移系统来相互协调变形,当不满足时,会激活孪生来协调变形^[23]。在金属材料中,施密特 (Schmid) 定律^[24]通常用于研究不同滑移系统的产生:

$$m = \cos \varphi \times \cos \lambda \quad (1)$$

式中: m 为施密特因子; φ 为应力方向与滑移面法线之间的夹角; λ 为应力方向与滑移方向之间的夹角。利用

Matlab 软件计算 α -Ti 中 4 种常见滑移系的施密特因子, 设置拉伸方向为应力方向, 在统计分析中分别选择 4 种不同滑移系统中施密特因子的最大绝对值进行作图, 结果如图 2(a3~c3) 所示。

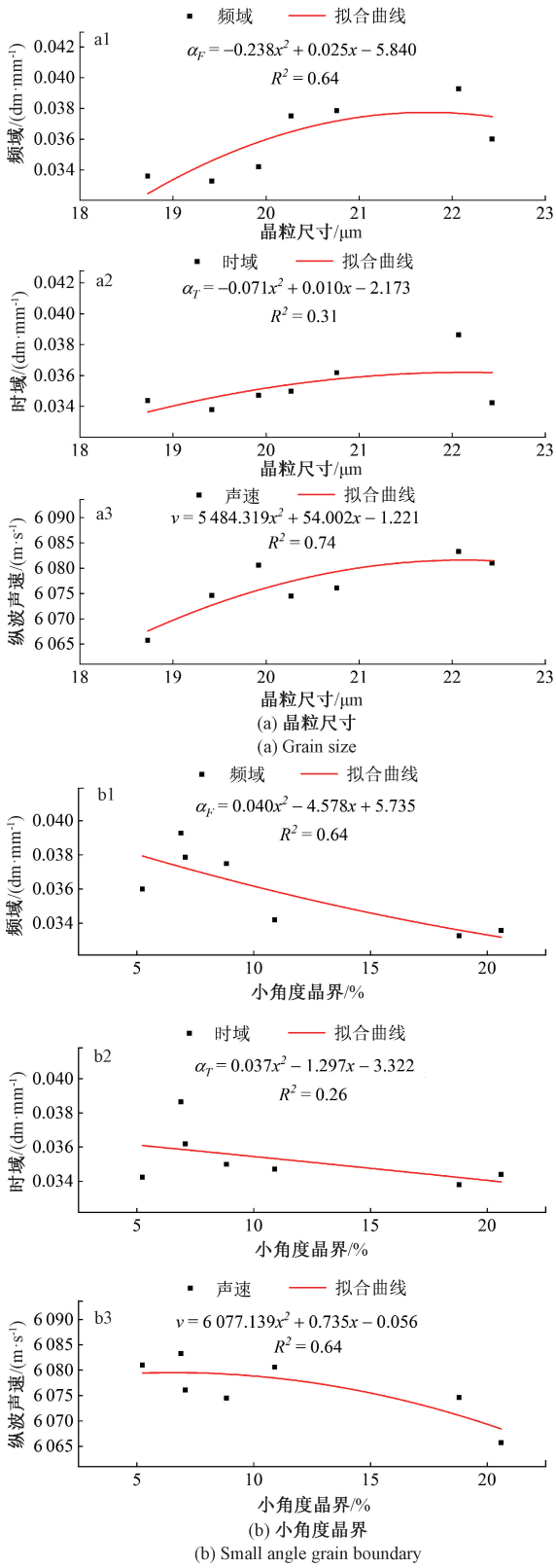
如图 2 与表 2 所示, 随着变形量的增加, 当变形量为 2% 时, 织构强度明显增加, 织构取向发生少量偏转, 小角度晶界有少量增加, 平均晶粒尺寸变化不大, 晶粒内部出现少量孪晶界, 不同滑移系的施密特因子整体分布略大于原始试样。当变形量增加到 6% 时织构强度有少量增加, 织构取向偏转明显, 小角度晶界明显增多, 晶粒内部的孪晶数量增多且密度增大, 平均晶粒尺寸有少量减小, 但总体晶粒均未出现破碎现象, 与原始组织相比晶粒分布变化不大, 不同滑移系的施密特因子整体分布有明显的增加, 位错运动更为活跃, 材料更容易发生塑性变形。以上现象表明, 随着变形量的增加, 塑性变形程度逐渐增大。

提取不同变形量的激光超声特征值, 进行激光超声特征值成像处理, 得到纵波声速、时域衰减系数和频域衰减系数成像图, 如图 2(a8~a10)~(c8~c10) 所示。从图 2(a8~c8) 纵波声速成像图可以看出, 在 2% 变形量时, 纵波声速有略微的减小, 随着变形量的继续增大, 当变形量为 6% 时激光超声声速有明显的下降趋势, 纵波声速的下降是由于塑性变形后晶粒尺寸减小、织构强度增加和小角度晶界增多导致的, 已有研究表明^[25], 晶粒尺寸减小和织构强度增加会使纵波声速发生改变。从(a9~c9) 时域衰减系数分布图中发现, 随着变形量的增加, 2% 变形量时与未变形板材相比时域衰减系数变化不大, 而当变形量增加到 6% 时, 时域衰减系数有一定的降低。(a10~c10) 图显示了 TA1 工业纯钛拉伸试样的频域衰减系数图像, 发现频域衰减系数与时域衰减系数变化趋势一致。这是由于小角度晶界和孪晶界与大角度晶界相比具有较小的晶格错配, 材料结构相对较为均匀, 对超声波的散射效应相对较少, 减少了超声波能量的衰减, 而超声波散射理论可知, 材料的各向异性(织构和晶粒尺寸分布) 会对超声的衰减产生一定的影响, 导致 2% 变形量时频域衰减系数变化不大, 6% 变形量时频域衰减系数有一定减小, 结果表明可以通过激光超声检测均匀塑性变形下的 TA1 工业纯钛板材。

2) 塑性变形损伤激光超声成像

由 1) 研究发现, 随着变形量的增加, 激光超声特征值发生了不同程度的变化, 这是由于塑性变形会引起微观组织发生变化, 从而导致激光超声特征值产生了变化。将 TA1 工业纯钛试样塑性变形后得到的晶粒尺寸、小角度晶界和织构强度与激光超声特征值进行相关性分析, 分别提取 TA1 工业纯钛试样 EBSD 实验对应部分的激光超声特征值与晶粒尺寸、小角度晶界和织构强度进行相关性分析, 结果与公式如图 3 所示。图 3 中, a1~c1

为频域衰减系数; a2~c2 为时域衰减系数; a3~c3 为纵波声速。可以发现晶粒尺寸和小角度晶界与纵波声速的相关性较好, 分别为 0.74、0.64, 频域衰减系数的相关性次之, 分别为 0.64、0.64, 时域衰减系数的相关性最差, 分



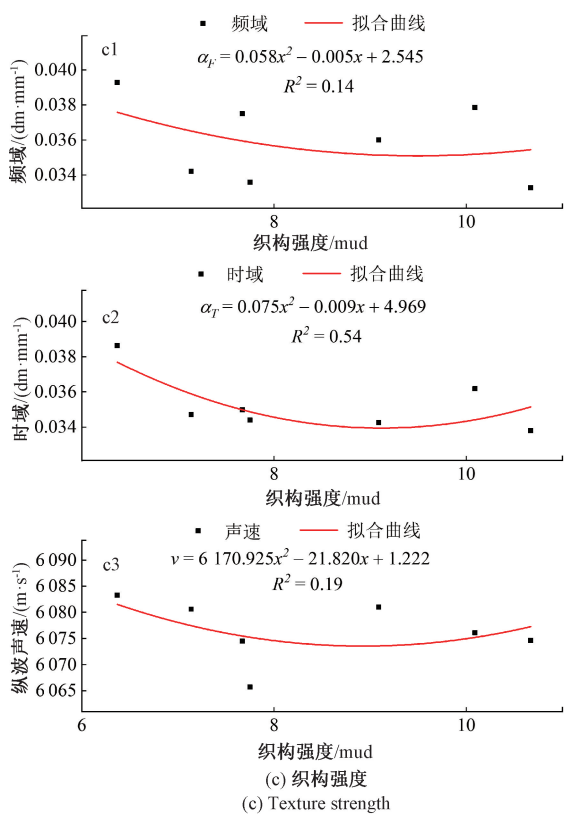


图 3 激光超声特征值与微观组织的相关性
Fig. 3 The correlation between laser ultrasonics eigenvalue and microstructure

别为 0.31、0.26。织构强度与时域衰减系数的存在一定的相关性,为 0.54,纵波声速和频域衰减系数的相关性较弱,分别为 0.19、0.14。结果表明,纵波声速与塑性变形后的微观组织相关性较强,频域衰减系数次之,时域衰减系数较差。通过分析可知,不同激光超声特征值对塑性变形后的各微观组织变化的敏感性不一,在实际测量过程中,为了减小单一激光超声特征参数带来的偶然性,故提出了激光超声 MFFP 成像方法。

采用 Matlab 软件进行激光超声 MFFP 成像处理,通过对不同变形量下 TA1 工业纯钛的相关性分析可知,纵波声速对塑性变形后微观组织敏感性较强,频域衰减系数次之,时域衰减系数较差,故分别设置纵波声速、频域衰减系数和时域衰减系数的权重系数为 0.5、0.3、0.2,各权重系数之和为 1。按图 4 所示激光超声 MFFP 成像方法,将实验得到的不同变形量下的各特征参数通过特征归一化公式(式(2))进行归一化处理,将归一化处理后的数据和对应的权重系数带入式(3)进行计算,最后进行 MFFP 成像,结果如图 5 所示。

$$X_t^{\text{norm}} = \frac{X_t - X_t^{\min}}{X_t^{\max} - X_t^{\min}} \quad (2)$$

式中: X_t^{norm} 为不同特征参数归一化后参数; X_t 为不同特

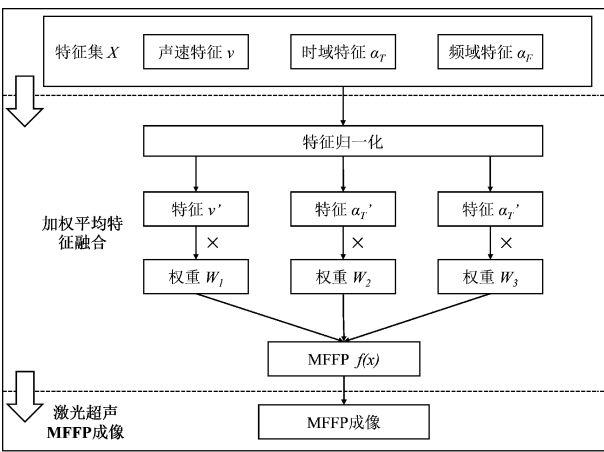


图 4 TA1 工业纯钛激光超声 MFFP 成像方法
Fig. 4 TA1 industrial pure titanium laser ultrasonics MFFP imaging method

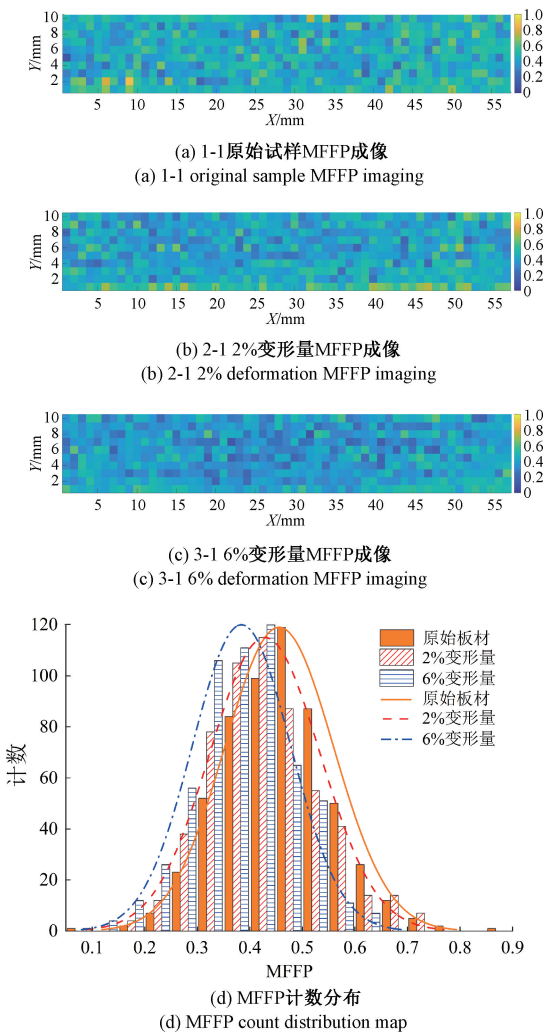


图 5 原始试样与不同变形量 TA1 下工业纯钛 MFFP 成像
Fig. 5 MFFP imaging of original sample and TA1 industrial pure titanium under different deformation

征参数; $X_i^{\max}$ 为不同特征参数最大值; $X_i^{\min}$ 为不同特征参数最小值。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i^{\text{norm}} \tag{3}$$

式中: $f(x)$ 为多特征融合参数 MFFP; W_i 为第 n 个特征参数对应的权重系数。文中 $n=1, 2, 3$ 时分别代表纵波声速、时域衰减系数、频域衰减系数。

从图 5 中可以看出,随着变形量的增加,在 2% 变形量时,相较于原始试样 MFFP 的整体分布有少量减少,而随着变形量的继续增加,当变形量为 6% 时整体分布发生明显的下降,这与不同变形量下微观组织演变规律相对应,并且可以发现与单一激光超声特征参数表征相比 MFFP 的变化规律更加明显。结果表明随着变形量的增加,MFFP 分布整体呈下降趋势,结果证实了激光超声 MFFP 可以用来评估 TA1 工业纯钛不同变形量下均匀塑性变形,提出了 TA1 工业纯钛激光超声 MFFP 成像方法。

2.2 不均匀塑性变形损伤激光超声成像

通过 Aztec 软件对 TA1 工业纯钛试样在不均匀塑性变形后的 EBSD 数据进行分析,如图 6 所示。获取的 IPF 图如图 6(b1~c1) 所示;晶界图如图 6(b2~c2) 所示;施密特因子图如图 6(b3~c3) 所示;孪晶界图如图 6(b4~c4) 所示;晶粒尺寸分布图如图 6(b5~c5) 所示;施密特因子分布图如图 6(b6~c6) 所示;极图如图 6(b7~c7) 所示。晶粒尺寸、织构强度和大小角晶界统计如表 3 所示。

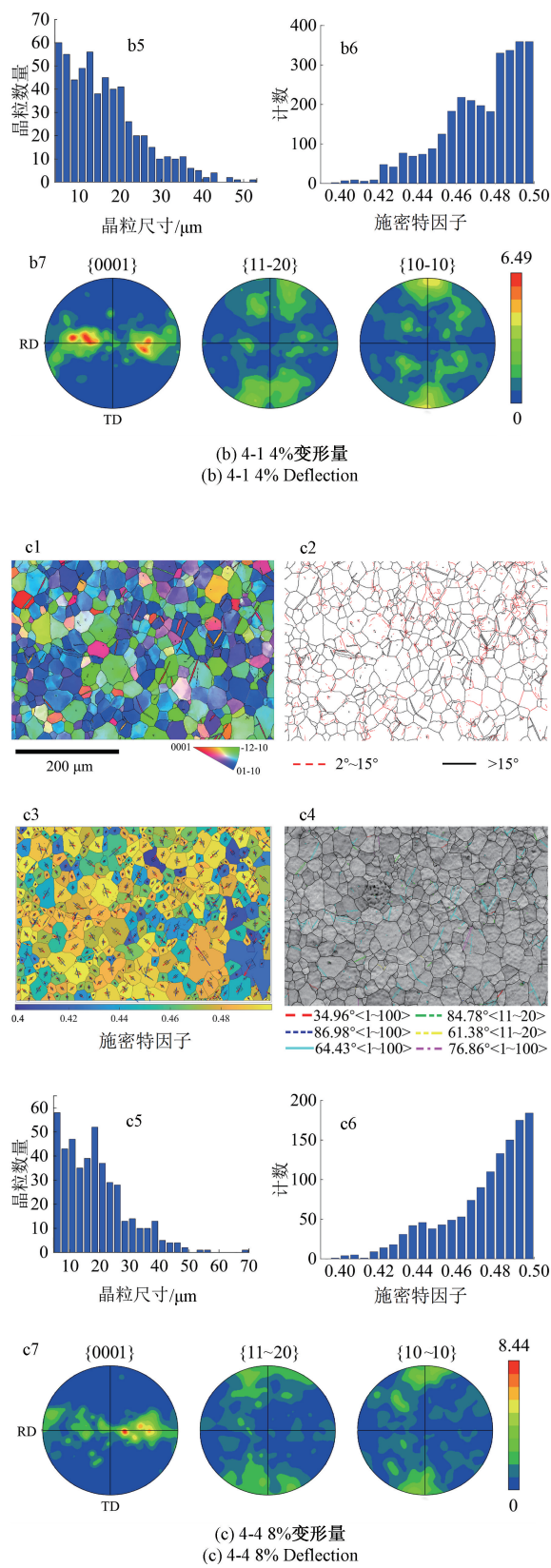
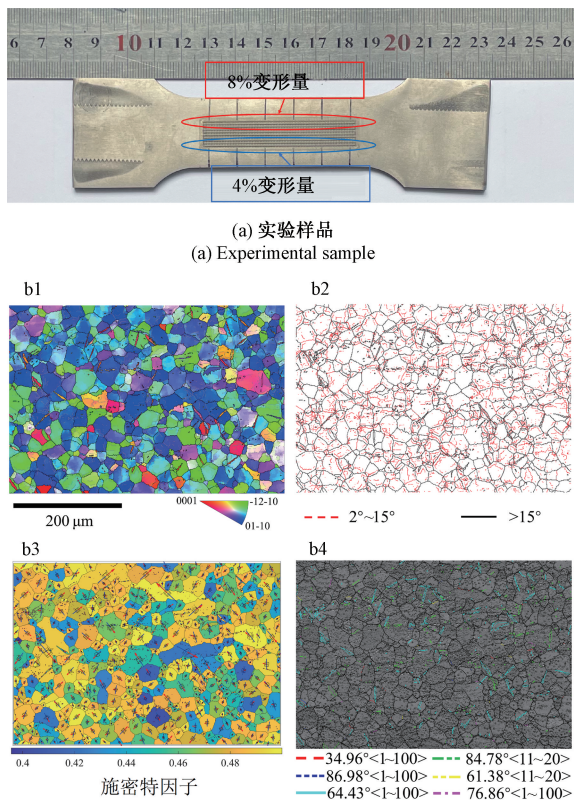


图 6 不均匀塑性变形 TA1 工业纯钛的微观组织
Fig. 6 Microstructure of non-uniform plastic deformation of TA1 industrial pure titanium

表 3 原始试样与不均匀塑性变形下 TA1 工业纯钛的微观组织参数

Table 3 Microstructure parameters of original sample and TA1 industrial pure titanium under non-uniform plastic deformation

编号	平均晶粒尺寸/ μm	织构强度/ mud	小角度晶界含量/%
1-1	22.07	6.37	6.89
4-1	19.35	6.49	38.6
4-2	15.6	7.56	27.4
4-3	17.43	7.49	25.3
4-4	19.74	8.44	22.7
4-5	17.21	8.42	24.7
4-6	18.48	8.03	17.4

如图 6(b)~(c) 与表 3 所示,可以看出相较于原始试样组织,不均匀塑性变形后 TA1 工业纯钛试样组织内

部出现大量孪晶界,织构强度少量增加,织构取向发生偏转,小角度晶界大量增加,小晶粒分布增多,平均晶粒尺寸减小,变形程度明显增加,不同滑移系的施密特因子整体分布增大。8% 变形量区域相较于 4% 变形量区域织构取向偏转明显,晶粒内部的孪晶界更多,小角度晶界增多,不同滑移系的施密特因子整体分布增大,不同变形区域的微观组织变化区分明显,这是由于在不均匀的塑性变形下,承受较大变形量的区域会产生大量的滑移,而因为应力的作用使得位错在晶粒内部运动和堆积,位错运动活跃密度增加,从而使晶粒内部发生局部畸变,导致小角度晶界和孪晶界的大量增加,施密特因子增大。结果表明不均匀塑性变形后 TA1 工业纯钛试样内部微观组织分布呈现出明显的不均匀性,与均匀变形后的 TA1 工业纯钛试样微观组织有差异。

提取不均匀塑性变形下的激光超声特征值,进行激光超声特征值成像处理,得到纵波声速、时域衰减系数和频域衰减系数成像图,如图 7 所示。

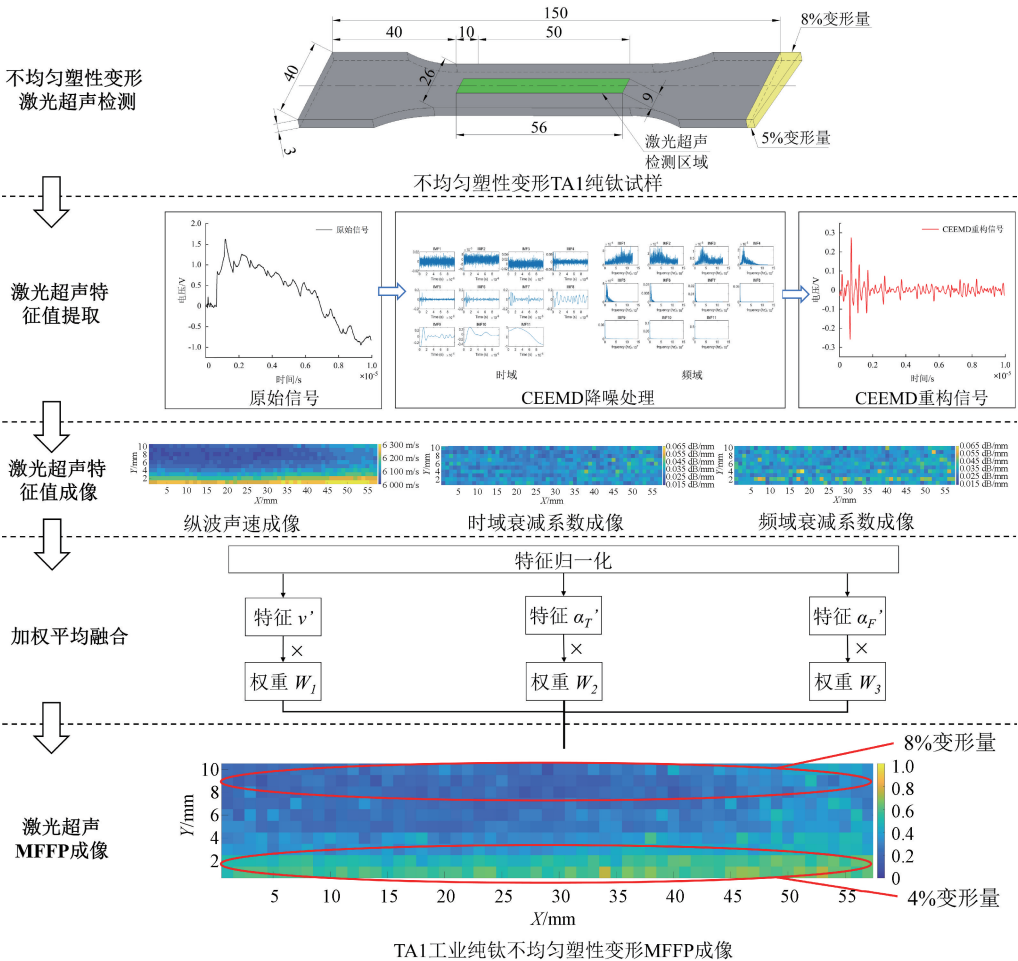


图 7 TA1 工业纯钛不均匀塑性变形 MFFP 成像检测流程

Fig. 7 MFFP imaging detection process of non-uniform plastic deformation of TA1 industrial pure titanium

从图 7 纵波声速成像图可以看出,不均匀塑性变形下 TA1 工业纯钛试样的纵波声速有明显的变化,不同区域的纵波声速存在显著差异,这是由于不均匀塑性变形后的试样,内部微观组织发生了变化,8% 变形量区域的晶粒尺寸减小,晶粒内部的孪晶界和小角度晶界增多,晶粒内部结构更为复杂,导致纵波声速出现明显差异。图 7 时域衰减系数和频域衰减系数分布图中发现不均匀塑性变形 TA1 工业纯钛板材的时频域衰减系数有所下降,不同变形区域区别不大。小角度晶界和孪晶界的增多,会减少超声波能量的衰减,这就导致相较于原始试样不均匀变形板材的时频域衰减系数分布有一定的下降,而又由于时频域衰减系数对塑性变形的敏感性不强,这就导致不同塑性变形区域时频域系数分布区别不明显,整体与不均匀塑性变形微观组织检测结果一致,结果证实了激光超声特征值评估 TA1 工业纯钛不均匀塑性变形的可行性。

通过 2.1 节分析可知,纵波声速对塑性变形后微观组织敏感性较强,频域衰减系数次之,时域衰减系数较差,对不均匀塑性变形下的激光超声特征值进行归一化处理,分别设置纵波声速、频域衰减系数和时域衰减系数的权重系数为 0.5、0.3、0.2,各权重系数之和为 1。按图 7 所示流程进行 MFFP 成像,将实验得到的不均匀塑性变形下的各特征参数带入式(2)进行归一化处理,将归一化处理后的数据和对应的权重系数带入式(3)进行计算,最后进行 MFFP 成像处理。

由图 7 MFFP 成像图可以发现,不均匀塑性变形后 TA1 工业纯钛板材相较于原始试样 MFFP 整体分布呈现出明显的差异,不同变形区域的 MFFP 分布区分明显,整体变化规律与不均匀塑性变形下激光超声特征值成像表征相似,研究发现能够通过 MFFP 表征出由于不均匀塑性变形引起的内部微观组织变化,并能明显区分出不同的变形区域。结果证实了激光超声 MFFP 评估 TA1 工业纯钛不均匀塑性变形的可行性,验证了 TA1 工业纯钛塑性变形激光超声 MFFP 成像方法可以应用于不均匀塑性变形的检测。

3 结 论

利用激光超声技术对均匀塑性变形后的 TA1 工业纯钛检测发现,随着变形量的增加,纵波声速整体分布呈下降趋势,时频域衰减系数分布整体有一定的减少。本文提出了 TA1 工业纯钛塑性变形损伤激光超声 MFFP 成像方法,通过对微观组织与激光超声特征值相关性分析发现,纵波声速对塑性变形的敏感性较强,频域衰减系数次之,时域衰减系数最差,确定不同激光超声特征值的权重系数,采用加权平均算法进行激光超声 MFFP 成像,研

究发现 MFFP 的整体分布呈下降趋势,与不同变形量下 TA1 工业纯钛微观组织演变规律相对应,并且可以发现与单一激光超声特征参数成像表征相比,基于 MFFP 的 TA1 工业纯钛塑性变形激光超声成像更为显著。

不均匀塑性变形损伤下的 TA1 工业纯钛微观组织分布不均匀,不同变形区域区分明显,利用激光超声检测发现,与原始试样相比激光超声声速有明显的变化,时频域衰减系数有所下降,不同变形区域激光超声声速出现明显差异,时频域衰减系数变化不大。利用激光超声 MFFP 成像方法进行成像分析,研究发现 MFFP 可以明显区分出不同变形区域,与微观组织区分区域相似,结果证实了激光超声 MFFP 可以用来评估 TA1 工业纯钛不均匀塑性变形。

参考文献

- [1] 陈源,李淑慧,李永丰,等. TA15 钛合金应力松弛行为宏微耦合本构建模[J]. 机械工程学报, 2022, 58(12): 64-74.
CHEN Y, LI SH H, LI Y F, et al. Macro-micro coupled constitutive modeling for stress relaxation behavior of TA15 alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 64-74.
- [2] 黄健康,吴昊盛,于晓全,等. 钛合金电弧增材制造工艺及微观组织调控的研究现状[J]. 材料导报, 2023, 37(14): 101-106.
HUANG J K, WU H SH, YU X Q, et al. State of the arc for titanium alloy wire arc additive manufacturing process and microstructure control[J]. Materials Reports, 2023, 37(14): 101-106.
- [3] 熊爱明,张志清,李森泉. TC6 钛合金的超塑性变形研究[J]. 航空学报, 2003(5): 477-480.
XIONG AI M, ZHANG ZH Q, LI M Q. Study on the superplastic deformation of the TC6 alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003(5): 477-480.
- [4] 张龙赐,周国方,蓝镇立. 钛合金纳米薄膜压力传感器非线性及灵敏度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 153-159.
ZHANG L C, ZHOU G F, LAN ZH L. Study for the nonlinearity and sensitivity of the titanium alloy nano film pressure sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 153-159.
- [5] 许国琛,邓江勇,陈振华,等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 196-202.
XU G CH, DENG J Y, CHEN ZH H, et al. The combination detection technology of the linear and the nonlinear ultrasound for fatigue cracks in titanium alloys[J]. Journal of Electronic Measurement and

- Instrumentation, 2022, 36(2): 196-202.
- [6] 韩飞, 辛柏朴, 刘冉. 钛合金板材辊弯成形特性及显微组织和织构演化规律[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(6): 1804-1820.
- HAN F, XIN B P, LIU R. Roll forming characteristics and evolution law of microstructure and texture of titanium alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(6): 1804-1820.
- [7] 李超, 韩飞. 工业纯钛 TA2 辊弯成形微观组织演变及其变形机理[J/OL]. 材料工程, 1-12[2024-09-10].
- LI CH, HAN F. Microstructure evolution and deformation mechanism of industrial pure titanium TA2 roll forming process[J/OL]. Journal of Materials Engineering, 1-12 [2024-09-10].
- [8] 包俊, 叶波, 王晓东, 等. 基于 SSDAE 深度神经网络的钛板电涡流检测图像分类研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 238-247.
- BAO J, YE B, WANG X D, et al. Research on eddy current detection image classification of titanium plate based on SSDAE deep neural networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 238-247.
- [9] 张玉华, 全四龙, 胡筱雅, 等. 基于非线性临界折射纵波的金属材料塑性损伤评估[J]. 实验力学, 2022, 37(4): 507-516.
- ZHANG Y H, QUAN S L, HU X Y, et al. Plastic damage evaluation of metal materials based on the nonlinear critical refraction longitudinal wave[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(4): 507-516.
- [10] 丁睿, 邱雷. 小型化便携式压电导波结构健康监测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6): 64-70.
- DING R, QIU L. Design of miniaturized and portable structural health monitoring system for piezoelectric guided wave[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6): 64-70.
- [11] 徐值, 张泽文, 鲁宇杰, 等. 基于频域衰减系数的 Al-Cu-Mg 铝合金激光超声评价[J]. 激光与红外, 2023, 53(12): 1846-1854.
- XU ZH, ZHANG Z W, LU Y J, et al. Laser-ultrasonic evaluation of Al-Cu-Mg based on frequency-domain attenuation coefficient[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(12): 1846-1854.
- [12] 田雪雪, 赵纪元, 卢秉恒, 等. 增材制件内部缺陷埋藏深度的激光超声定量检测[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8): 952-959.
- TIAN X X, ZHAO J Y, LU B H, et al. Laser ultrasonic quantitative detection of buried depth of internal defects in additive manufacturing parts[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(8): 952-959.
- [13] 刘洋, 宋鹏, 刘湘玥, 等. BGA 焊点缺陷的全光学激光超声检测技术[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(6): 107-114.
- LIU Y, SONG P, LIU X Y, et al. Infrared and laser engineering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(6): 107-114.
- [14] 姬保平, 曹建树, 黄钢, 等. 钢板内应力激光超声导波检测方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 7-15.
- JI B P, CAO J SH, HUANG G, et al. New method for detecting steel strip stress distribution based on laser ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 7-15.
- [15] 颜江涛, 赵纪元, 訾艳阳, 等. 激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
- YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variational mode decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [16] TANG SH H, HAO J W, PAN H L. Material microstructure effects on ultrasonic waves under simple shear and pure shear[J]. NDT & E International, 2007, 40(6): 486-495.
- [17] KOBAYASHI M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation—part II. experiment and simulation [J]. International Journal of Plasticity, 1998, 14(6): 523-535.
- [18] YAGHOUBI F, KHANI MOGHANAKI S, KAZEMINEZHAD M. Sound velocity in severely deformed aluminum alloys: AA1100 and AA2024 [J]. Applied Physics, A Materials Science & Processing, 2020, 126(4): 1-10.
- [19] CARLOS R M M, EMMANUEL D M G, JIMMY J R J, et al. Improvement of the manufacturing quality test of plastic containers by using thermography scans[J]. Quantitative Infrared Thermography Journal, 2023, 20(4/5): 277-291.
- [20] 沈平单. 基于深度学习的构件损伤激光超声成像研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- SHEN P D. Research on laser ultrasonic imaging of component damage based on deep learning[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [21] LI Y, ZHU W, ZOU Y. Nondestructive detection of laser-cladding coating interface defects: A deep learning-enhanced laser ultrasonics approach [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2024: 1-18.

- [22] 王江伟, 陈映彬, 祝祺, 等. 金属材料的晶界塑性变形机制[J]. 金属学报, 2022, 58(6): 726-745.
WANG J W, CHEN Y B, ZHU Q, et al. Grain boundary dominated plasticity in metallic materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(6): 726-745.
- [23] JI X Y, XU J W, ZHANG H, et al. Plastic deformation mechanism of TA1 pure titanium plate using SEM-EBSD in-situ tensile testing[J]. Materials Science and Engineering, A. Structural Materials, 2024, 908: 146768.
- [24] SHOJA S A, NORGRÉN O, ANDRÉN S, et al. Calculated and experimental Schmid factors for chip flow deformation of textured CVD α -alumina coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 412: 126991.
- [25] 宋雪勇, 张巨豪, 殷安民, 等. 基于 RFR 的 Ti-6Al-4V 激光超声微观组织特征检测[J]. 激光杂志, 2022, 43(3): 42-49.
SONG X Y, ZHANG J H, YIN AN M, et al. Importance analysis of Ti-6Al-4V microstructure characteristics on laser ultrasonic longitudinal wave velocity based on RFR[J]. Laser Journal, 2022, 43(3): 42-49.

作者简介



夏振鑫, 2021 年于浙江工业大学获得学士学位, 现为宁波大学研究生, 主要研究方向为激光超声检测技术。

E-mail: 1491391404@qq.com

Xia Zhenxin received his B.Sc. degree from Zhejiang University of Technology in 2021. He is currently a graduate student at Ningbo University. His main research interest includes laser ultrasonics detection technology.



陈丹, 2019 年于北京科技大学获得博士学位, 现为深圳职业技术大学智能制造技术研究院副研究员。主要研究方向包括: 高频超声显微成像系统研发、增材制造激光超声检测、超声信号处理及人工智能算法开发等。

E-mail: danchen@szup.edu.cn

Chen Dan received his Ph.D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2019. He is currently an associate researcher in the Intelligent Manufacturing Technology Research Institute at Shenzhen Polytechnic University. His main research interests include research and development of high-frequency ultrasonic micro-imaging system, laser ultrasonic detection of additive manufacturing, ultrasonic signal processing, and artificial intelligence algorithm development.



袁培龙, 2022 年于比利时鲁汶大学获得博士学位, 现为海军工程大学讲师。主要研究方向为激光超声材料特性表征与无损检测技术。

E-mail: yuanpeilong92@163.com

Yuan Peilong received his Ph.D. degree from University of Leuven in 2022. He is currently a lecturer at Naval University of Engineering. His main research interests include laser ultrasonic material characterization and nondestructive testing.



刘涛, 2009 年于德国波鸿大学获得博士学位, 现为浙江申吉钛业股份有限公司的正高级工程师, 主要研究方向为钛合金设计及性能提升。

E-mail: t.liu@shenjiti.com

Liu Tao received his Ph.D. degree from Ruhr-Universität Bochum in 2009. He is currently a senior engineer at Zhejiang Shenji Titanium Industry Co., Ltd. His main research interests include titanium alloy design and performance improvement.



殷安民 (通信作者), 2015 年于北京科技大学获得博士学位, 现为宁波大学副教授, 主要研究方向为激光超声检测技术。

E-mail: yinanmin@nbu.edu.cn

Yin Anmin (Corresponding author) received his Ph.D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2015. He is currently an associate professor at Ningbo University. His main research interest is laser ultrasonics detection technology.