

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230405001

文章编号: 1672-9331(2024)02-0077-07

引用格式: 吕铎, 郭昱宏, 胡宏伟, 等. 基于非线性超声表面波的轴承钢激光损伤程度表征[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(2): 77-83, 103.

Citation: LYU Duo, GUO Yuhong, HU Hongwei, et al. Characterization of bearing steel laser damage degree based on nonlinear ultrasonic surface waves[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(2): 77-83, 103.

基于非线性超声表面波的轴承钢激光损伤程度表征

吕铎, 郭昱宏, 胡宏伟, 张明军

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】针对轴承钢在激光加工过程中易出现表面损伤的情况, 研究利用非线性超声表面波对轴承钢激光加工损伤程度进行表征的方法。【方法】利用不同工艺参数的激光对轴承钢 GCr15 试件进行表面处理, 形成不同程度的表面损伤; 搭建非线性超声表面波检测系统, 测量不同损伤程度下的轴承钢超声表面波的非线性系数, 分析损伤程度与表面波非线性系数的关系。【结果】经激光表面处理后, 轴承钢的表面波非线性系数变大且与损伤程度成正相关关系, 当出现重度损伤时, 非线性系数变化更为剧烈; 与传统的线性声学参数相比, 表面波非线性系数对轴承钢的表面损伤程度更加敏感。对常规线性与非线性声学参数进行归一化处理, 发现波速几乎不受表面损伤程度的影响, 声衰减系数随损伤程度的变化率仅为 0.25, 而表面波非线性系数随损伤程度的变化率为 0.98。【结论】利用表面波非线性系数可以对轴承钢表面的激光损伤程度进行有效表征。

关键词: 激光表面处理; 轴承钢; 表面损伤; 超声表面波; 非线性系数

中图分类号: TB559

文献标志码: A

Characterization of bearing steel laser damage degree based on nonlinear ultrasonic surface waves

LYU Duo, GUO Yuhong, HU Hongwei, ZHANG Mingjun

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] Surface damage is prone to occur during the process of laser machining of bearing steel. Therefore, a method of characterizing the degree of damage in laser machined bearing steel using nonlinear ultrasonic surface waves are investigated. [Methods] Different laser processing parameters are employed to carry out surface treatment of GCr15 bearing steel specimens, resulting in various degrees of surface damage. A nonlinear ultrasonic surface wave detection system is established to measure the nonlinear coefficient of the ultrasonic surface wave of the bearing steel at different levels of damage, which also analyzed the relationship between the degree of damage and the nonlinear coefficient of the surface wave. [Findings] After laser surface treatment, the nonlinear coefficient of the surface wave on the bearing steel increased, and it is

收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-05-13; 接受日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075049); 湖南省重点研发计划项目(2022GK2058); 长沙市自然科学基金资助项目(kq2208228)

通信作者: 吕铎(1988—)(ORCID: 0000-0003-3102-6820), 男, 讲师, 主要从事超声无损检测及智能化检测技术方面的研究。E-mail: lyuduo@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

positively correlated with the degree of damage. When severe damage occurred, the change in the nonlinear coefficient became more drastic. Comparing with traditional linear acoustic parameters, the nonlinear coefficient of the surface wave is more sensitive to the degree of surface damage on the bearing steel. After normalizing conventional linear and nonlinear acoustic parameters, it is discovered that the wave velocity is hardly affected by the surface damage level, and the rate of change in the sound attenuation coefficient is only 0.25 with respect to the degree of damage. However, the rate of change in the nonlinear coefficient of the surface wave is 0.98 with respect to the degree of damage. [Conclusions] The use of the nonlinear coefficient of the surface wave can effectively characterize the degree of laser damage on the surface of the bearing steel.

Key words: laser surface treatment; bearing steel; surface damage; ultrasound surface wave; nonlinear coefficient

Foundation item: Project (52075049) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022GK2058) supported by Hunan Provincial Key R & D Program; Project (kq2208228) supported by Changsha Natural Science Foundation

Corresponding author: LYU Duo (1988—) (ORCID: 0000-0003-3102-6820), male, lecturer, research interest: ultrasonic nondestructive testing and intelligent detection technology. E-mail: lyuduo@csust.edu.cn

0 引言

激光表面处理技术是现代制造业中重要的工件表面处理技术之一,广泛应用于轴承和齿轮等高精度部件的制造。通过激光表面处理可以生成新的化合物和相,从而提高材料表面硬度和疲劳强度^[1]。然而,激光加工过程中的快速加热和冷却可能会使轴承钢零件表面出现损伤,这些损伤常以塑性变形、微裂纹和热影响区的形式出现^[2-3],也会出现不同的残余应力分布^[4-5],严重缩短零件使用寿命,降低零件强度,从而影响设备的可靠性。因此,有必要开发高效、可靠的技术来评估轴承钢表面的激光损伤程度。

目前,常用的表面损伤程度检测方法有涡流检测、射线照相、巴克豪森噪声、超声波检测、光学显微镜、电子显微镜和扫描探针显微镜技术等^[6-10]。超声波检测因灵敏度高、检测速度快和携带方便等优点在机械制造等工业领域得到广泛应用。线性超声检测基于超声波与材料缺陷的相互作用,通过测量波速和声衰减系数等参数对材料性能进行评估,但是这些参数对于激光表面处理产生的塑性变形等微损伤的变化不敏感^[11-12]。材料中存在的微裂纹、塑性变形和不均匀等缺陷具有非线性声学效应,这些缺陷在受到大幅度超声波的作用时,会产生较明显的非线性声学响应信

号,而这些信号可以有效表征材料内部微观结构的变化。

国内外学者已利用非线性超声表面波开展了一些材料损伤检测方面的研究工作。PFEIFER等^[13]使用非线性瑞利波检测X52管道材料内部不同水平的塑性应变,取得了较好的检测效果。ABRAHAM等^[14]对大型锻件中的异质微结构进行了非线性超声表征,发现材料晶粒大小、晶界等差异会使材料表现出不同的非线性行为。LI等^[15]测量了AISI 316L钢在不同程度拉伸损伤时的声学非线性参数,发现非线性超声系数随着应变、晶界滑移和位错密度的增加而增大。石媛媛等^[16]采用有限元软件ABAQUS分析验证了非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀损伤程度的可行性。李海洋等^[17]通过变化腐蚀环境来控制Q235钢试样的疲劳损伤程度,发现表面波非线性系数随着疲劳损伤的增加而变化。以上研究都是对材料整体疲劳性能、微观结构改变的评价,无法直接用于材料表层损伤的检测。

针对材料表层损伤,HU等^[18]对喷丸加工导致应力集中、变形的7075铝合金进行非线性超声表面波检测,发现非线性系数随着表层残余应力的增加而增大;SHUI等^[19]研究了带涂层的AZ31镁合金板在不同水平的外载荷下,涂层内或涂层与材料基体界面处的不同程度损伤对超声非线性响应,研究表明,在一定范围内随着拉应力的增

加,非线性超声系数显著增大。然而,激光加工造成的轴承钢材料表层及亚表层微观损伤与传统材料表层损伤的有所不同,前者的损伤层厚度更小^[2],目前尚缺少相关非线性表面波检测方法的研究。

针对激光加工造成的损伤层厚度小及传统线性超声检测无法区分不同的表面损伤程度这两个问题,本文以激光表面处理后的轴承钢GCr15为检测对象,开展用非线性表面波评价材料表面损伤程度的研究。首先,对轴承钢GCr15进行不同程度的激光表面处理,使材料表面具有不同的组织和性能,形成不同程度的损伤;然后,采用非线性表面波对其进行检测,利用表面波的非线性系数来评估激光加工造成的损伤程度,为非线性超声表面波表征轴承钢表面损伤程度提供参考。

1 非线性超声表面波的损伤表征原理

在材料表面发生的非线性声学现象,可以用来表征轴承钢激光加工表面的损伤程度。当声波以单一频率在固体介质中传播时,由于固体介质的非线性特性,声波在传播过程中会产生复杂的非线性相互作用。这种相互作用会导致声波的时域波形发生畸变,从而在频域中产生高次谐波分量^[20]。固体介质的非线性特性可以通过高阶弹性常数来表示。这种非线性一般源自两个方面:1) 固体介质晶格的非谐性;2) 晶格缺陷如位错、滑移带等引起的非线性。描述固体介质非线性声学特性的非线性系数 β 可用式(1)表示^[21]:

$$\beta = -\frac{3K_2 + K_3}{K_2} \quad (1)$$

式中: K_2 、 K_3 分别为固体介质的二阶和三阶弹性常数。

由式(1)可知,非线性系数与高阶弹性常数密切相关。当材料早期的力学性能出现变化时,材料的高阶弹性常数也会随之变化^[22],因此可采用非线性系数来评价材料的疲劳损伤。

对各向同性的固体材料采用超声表面波作为检测波,求解得到非线性系数 β 的表达式如式(2)所示^[23]:

$$\beta = \frac{8A_2}{\omega^2 A_1^2 X} \frac{c_L \sqrt{c_L^2 - c_R^2}}{2(c_s/c_R)^2 - 1} \quad (2)$$

式中: ω 为声波的角频率; X 为声波的传播距离; c_s 、 c_L 和 c_R 分别为横波、纵波和表面波的声速; A_1 与 A_2

分别为基波幅值和二次谐波幅值。

在频率与传播距离为固定值时,材料的超声非线性系数只与 A_1 、 A_2 有关,在检测过程中,相对非线性系数 β' 的计算如式(3)所示:

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (3)$$

因此,本文通过测量基波幅值和二次谐波幅值来计算相对非线性系数,该系数与非线性系数成正比。然后,通过计算不同传播距离时的相对非线性系数并对其进行拟合,得到拟合直线斜率即可确定非线性系数的大小。

2 表面损伤的非线性超声试验

2.1 试件制备

本试验检测材料为轴承钢GCr15,其经淬火加回火处理后具有较高的硬度、较好的耐磨性和良好的接触疲劳性能,应用范围广泛。轴承钢GCr15的化学成分及其质量分数见表1。

表1 轴承钢GCr15的化学成分及其质量分数
Table 1 The chemical composition and mass fraction of bearing steel GCr15 %

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(S)$	$w(Gr)$
0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	<0.025	1.40~1.65

为确保微观结构和机械性能的一致性,试件由同一批材料切割而成,包括原始状态下的试件,共5组试件。为了制备出具有不同程度损伤的材料表面,在激光加工时设置两组激光输出功率,分别为300、350 W。若功率过低,材料表面的温度不能达到临界相变温度以上,无法对材料表面进行有效加工;若功率过高,材料表面会熔化。激光加工是在受控环境中进行的,以尽可能地减少温度和湿度等外部因素的影响。每组功率下设置两种激光扫描速度,分别为10、20 mm/s。通过控制激光功率和扫描速度,使材料表面形成了不同的损伤程度。各试件的激光加工参数见表2。

表2 试件激光加工参数

Table 2 The laser machining parameters for the specimens

试件编号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	损伤程度
试件1			无损伤
试件2	300	20	轻微损伤
试件3	300	10	轻度损伤
试件4	350	20	中度损伤
试件5	350	10	重度损伤

采用 YLS-3000 型连续波光纤激光器对工件表面进行辐照工件。该激光器装置如图 1 所示。

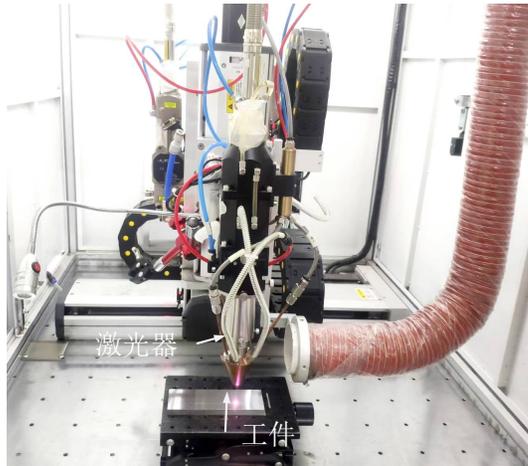


图 1 YLS-3000 型激光器
Fig. 1 YLS-3000 laser

为便于对每组试件进行激光表面处理,将试件尺寸设计成 $150\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。图 2 所示为原始状态的试件及在不同功率、扫描速度下进行激光加工的试件。其中,图 2(a)所示为未进行激光加工的试件。随着试件出现轻微损伤,其表面颜色开始略微变化,如图 2(b)所示;随着试件发生轻度损伤,其表面开始出现轻微痕迹,如图 2(c)所示;当试件出现中度损伤时,其颜色发生较为明显的变化,如图 2(d)所示;当试件出现重度损伤时,其表面颜色呈深青色,如图 2(e)所示。

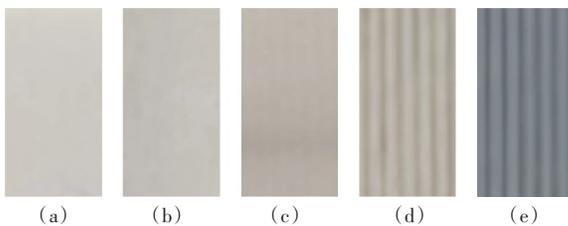


图 2 不同损伤程度下试件的表面样貌

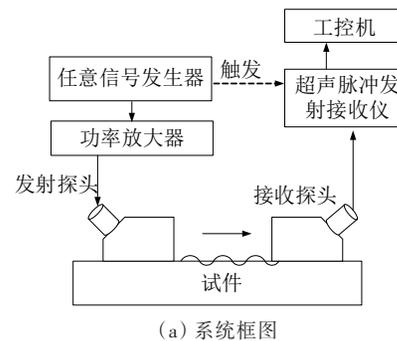
Fig. 2 The appearance of specimens with different damage degrees

不同表面损伤程度不仅仅反映在试件表面颜色的变化上。在激光表面处理过程中,试件表面出现的急热或急冷的现象会使试件材料金相组织发生变化,甚至使材料表面出现塑性变形、位错等微观损伤,从而影响表层硬度,且损伤程度不同,表层硬度也不同。试件表层硬度变化符合 Hall-Petch 关系^[24],即材料的显微硬度随着其微观组织平均晶粒尺寸的减小而增大。因此,可以根据材料表面颜色及材料表层硬度来确定材料表面损伤

程度。

2.2 试验设备

图 3 为金属材料非线性系数测量试验系统框图和系统实物图。该系统主要包含任意信号发生器 (Tektronix AFG2021)、功率放大器 (Electronics & Innovation 2100L)、楔块探头、超声脉冲发射接收仪 (JSR DPR300) 和工控机等。其中,任意信号发生器用于产生多周期的正弦波信号;功率放大器对产生的信号进行放大以便二次谐波能被检测到;楔块探头用于发射和接收表面波;超声脉冲发射接收仪用于接收超声表面波信号并进行初步滤波;工控机通过软件与超声脉冲发射接收仪进行数据交换,实现数据的采集和存储。该检测系统中还包含用于测量距离的直尺(精度为 0.5 mm)和用于固定楔块探头的装夹装置等。



(a) 系统框图



(b) 系统实物图

图 3 非线性超声检测试验设备

Fig. 3 Nonlinear ultrasonic testing experiment

2.3 试验方案

试验使用中心频率为 2.25 MHz 的压电换能器发射信号,用中心频率为 5.00 MHz 的接收换能器来检测所产生的二次谐波。为增强接收到的二次谐波振幅,使用后置放大器进行放大。将两个换能器沿试件长度方向布置,并使用支架确保耦合条件的均匀。图 4(a)展示了接收换能器接收到的 15 个周期典型时域信号。由于开始信号未完全响应及尾部信号有振铃效应,所以本研究首先通过观察信号的波形和幅度变化来确定信号的稳定部分,接着用 Hanning 窗进行加窗处理,然后对加窗

后的时域信号进行补零处理,以提高频谱图的分辨率,最后对补零处理后的信号进行快速傅里叶变换,得到如图 4(b)所示的频域图。通过测量基频 A_1 和倍频 A_2 的幅值,计算相对非线性系数 β' 。

为了减小试验误差对分析结果的影响,所有试验都在相同条件下重复 5 次。每次试验都在试件的不同区域进行检测,以尽可能地减小随机误差和试件不均匀性对试验结果的影响。

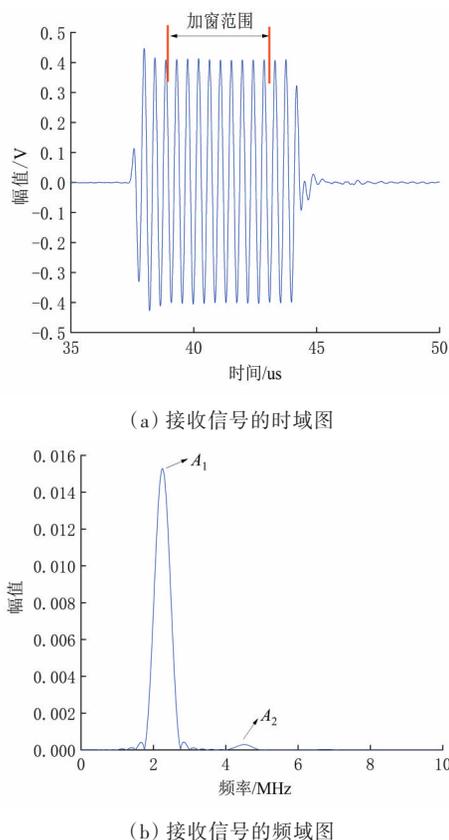


图 4 接收信号的时域和频域图

Fig. 4 Time domain and spectrum of the received signal

3 试验结果讨论与分析

图 5 所示为在不同传播距离下测得的不同试件的相对非线性系数。在传播距离较小时,由于近场效应^[25],每个试件的二次谐波振幅是不稳定的。从图 5 可以看出,计算的相对非线性系数在传播距离较小时出现了波动,而在传播距离较大时,由于声波在试件侧面的散射及衰减的影响,二次谐波振幅达到稳定直至开始衰减。考虑到上述因素对相对非线性系数的影响,本文采用传播距离适中时的部分数据进行超声非线性系数的计算。

在传播距离适中时, A_2/A_1^2 的值与传播距离之

间存在近似的线性关系。通过对每个试件的 A_2/A_1^2 值和传播距离进行线性拟合,得到图 5 所示的 5 条拟合曲线,拟合曲线的线性拟合残差平方和从上至下分别为 5.840、7.630、6.070、2.210、0.223,决定系数 R^2 分别为 0.984、0.899、0.967、0.971、0.984。将拟合曲线的斜率作为非线性系数 β ,得到非线性系数 β 与材料损伤程度的关系,如图 6 所示。从图 6 可以看出,与未经任何处理的原始试件相比,4 个用激光加工后的试件明显具有更大的非线性系数,并且损伤程度越大非线性系数越大。

图 7 显示了不同线性和非线性声学参数对不同表面损伤程度的敏感性。激光处理试件中的所有声学参数已根据原始试件的初始值进行了归一化处理,将每个试件的参数除以所有试件中此参数的最大值,以显示每个参数的相对变化。试验结果表明,激光加工后材料的非线性系数变化比

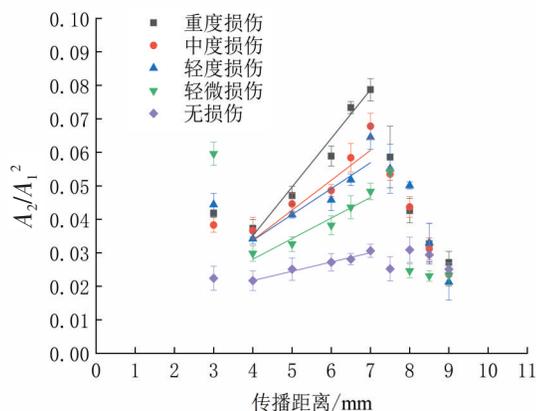


图 5 试件相对非线性系数随传播距离的变化

Fig. 5 The variation of relative nonlinear coefficients of specimen with propagation distance

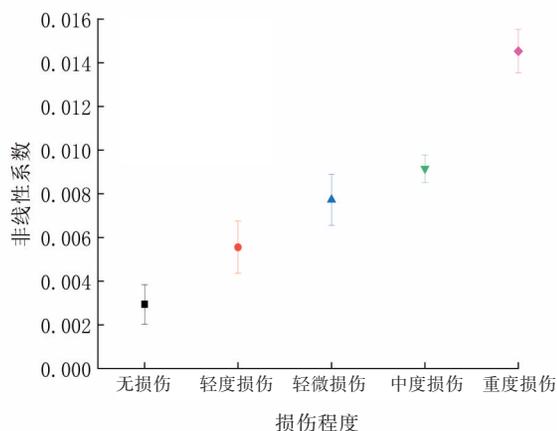


图 6 非线性系数随损伤程度的变化

Fig. 6 The nonlinear coefficients changing with the damage degree

波速、声衰减等线性系数的变化更加明显。

为证明非线性系数的变化与损伤程度之间具有一定的关系,本文使用维氏显微硬度仪测量各试件的表面硬度。在加载载荷为 100 g 并持续加载 10 s 的情况下,各试件的测量结果如图 8 所示。由图 8 可知,与未进行加工的试件相比,随着损伤程度的增大,材料的表面硬度也逐渐增大。

材料表面硬度的变化是由加工过程中激光功率和扫描速度的差异(即试件表面吸收能量的不同)导致的。试验中,试件表面损伤程度越大,吸收的能量就越大,导致更大程度的塑性变形和位错,进而使得试件表面组织变得更加细小。根据 Hall-Petch 关系,材料的平均晶粒尺寸越小,其表面硬度就越高,和本文的试验结果相符。在试件未处理时,材料表面的原始硬度为 736 kgf/mm²(维氏硬度),随着材料表面损伤程度的增加,表面硬度逐渐增加至 943 kgf/mm²(维氏硬度),而表层微

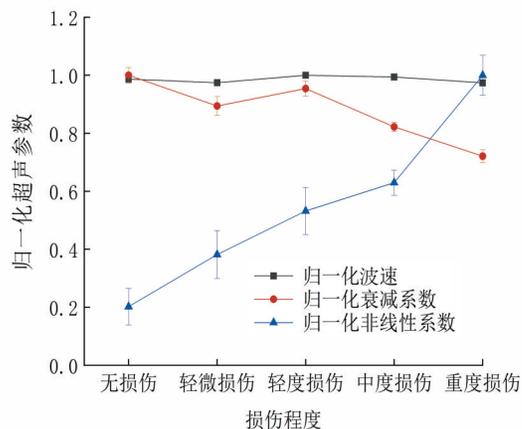


图7 各试件归一化线性和非线性声学参数的变化

Fig. 7 The normalized linear and nonlinear acoustic parameters of each specimen

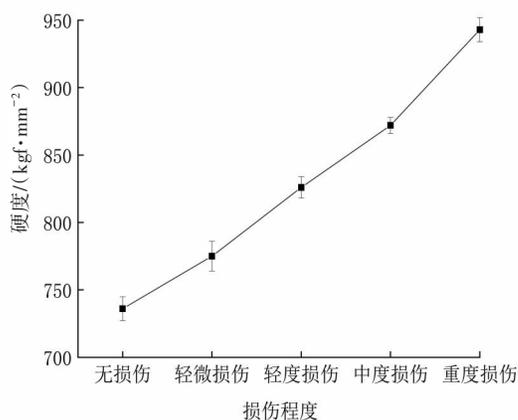


图8 各试件表面的显微硬度

Fig. 8 The microhardness of each specimen surface

观结构的变化将进一步影响材料的非线性特性。

由图 7~8 可以看出,与原始试件相比,随着试件表面损伤程度的变化,表面硬度随之发生变化且最大变化约为 28.1%;波速变化不具有规律性,其变化仅有 1.8%;声衰减系数随着损伤程度的增加基本呈逐渐减小的趋势,最大减小了 27.9% 左右,但与表面硬度的相关性较小。值得注意的是,超声非线性系数变化最为显著,在激光加工出现轻度损伤后,相对于无损伤其增加了约 162.9%。在从轻度损伤到中度损伤的过程中,非线性系数约增加了 18.4%;当出现重度损伤时,相对于中度损伤,非线性系数约增加了 58.5%。该变化与表面硬度变化呈显著的相关性。检测结果表明,超声非线性系数与损伤程度密切相关,并且随着激光表面处理损伤程度的增加,试件的超声非线性系数也逐渐增大,二者成正相关关系。究其原因,材料硬度的变化与微观组织的变化密不可分,试件表面硬度随着损伤程度的增大而增大,即激光表面处理引起了材料表面微观组织的改变,从而增加了材料的非线性。

4 结论

本文通过对不同损伤程度的轴承钢 GCr15 开展非线性表面波试验,分析超声非线性系数的变化,得出以下结论:

1) 与未处理的原始试件相比,激光加工损伤试件的非线性系数更大,并且与轴承钢的损伤程度成正相关关系,当出现重度损伤时,非线性系数变化最为剧烈。

2) 与常用线性声学参数相比,超声非线性系数对激光表面处理产生的损伤更为敏感,更具有检测轴承钢表层激光损伤情况及监测损伤程度演变的能力。

3) 本文仅研究了轴承钢 GCr15,后续还须进一步研究其他材料以验证本文方法的适用范围。耦合条件、材料表面粗糙度等因素也会对结果产生影响,因此需要开展进一步研究以验证本文方法在不同操作条件和材料特性下的稳健性和可靠性。

[参考文献]

[1] 王程,刘杰,顾彩香.激光相硬化及感应表面淬火

- 技术对结构钢组织和耐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 211–216. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.18.055.
- WANG Cheng, LIU Jie, GU Caixiang. Effects of laser transformation hardening and induction surface hardening on microstructure and corrosion resistance of structural steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(18): 211–216. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.18.055.
- [2] KASEM H, BRUNEL J F, DUFRÉNOY P, et al. Thermal levels and subsurface damage induced by the occurrence of hot spots during high-energy braking[J]. Wear, 2011, 270(5–6): 355–364. DOI: 10.1016/j.wear.2010.11.007.
- [3] UHLMANN E, SPUR G, HOCHENG H, et al. The extent of laser-induced thermal damage of UD and crossply composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(4): 639–650. DOI: 10.1016/s0890-6955(98)00045-5.
- [4] SOLINA A, DE SANCTIS M, PAGANINI L, et al. Origin and development of residual stresses induced by laser surface-hardening treatments[J]. Journal of Heat Treating, 1984, 3(3): 193–204. DOI: 10.1007/BF02833261.
- [5] CSEH D, MERTINGER V, LUKACS J. Residual stress behavior in hardened shot peened 42CrMo4 specimens during fatigue load [J]. Materials Research Proceedings, 2017, 2: 491–496. DOI: 10.21741/9781945291173-83.
- [6] 秦娜, 郑亮, 刘亚龙, 等. RB-SiC亚表面损伤检测及其旋转超声磨削亚表面损伤特征[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2714. DOI: 10.3788/OPE.20172510.2714.
- QIN Na, ZHENG Liang, LIU Yalong, et al. Subsurface damage detection of RB-SiC and its subsurface damage characteristics in rotating ultrasonic grinding [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2714. DOI: 10.3788/OPE.20172510.2714.
- [7] 王健, 郑非非, 董志刚, 等. 碳化硅磨削亚表面损伤检测方法[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(4): 60–65. DOI: 10.13394/j.cnki.jgszz.2015.4.0013.
- WANG Jian, ZHENG Feifei, DONG Zhigang, et al. Detection method of subsurface damage of silicon carbide after grinding [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(4): 60–65. DOI: 10.13394/j.cnki.jgszz.2015.4.0013.
- [8] 张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 80–90. DOI: 10.3901/JME.2013.07.080.
- ZHANG Yuanliang, ZHANG Hongchao, ZHAO Jiayu, et al. Review of non-destructive testing for remanufacturing of high-end equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 80–90. DOI: 10.3901/JME.2013.07.080.
- [9] NESLUŠAN M, MINÁRIK P, GREŇČÍK J, et al. Non-destructive evaluation of the railway wheel surface damage after long-term operation via Barkhausen noise technique[J]. Wear, 2019, 420–421: 195–206. DOI: 10.1016/j.wear.2018.10.016.
- [10] SRIVASTAVA A, AWALE A, VASHISTA M, et al. Monitoring of thermal damages upon grinding of hardened steel using Barkhausen noise analysis [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(5): 2145–2151. DOI: 10.1007/s12206-020-0435-6.
- [11] HIRSEKORN S, VAN ANDEL P, NETZELMANN U. Ultrasonic methods to detect and evaluate damage in steel [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2000, 15(6): 373–393.
- [12] GÜR C H, TUNCER B O. Investigating the microstructure-ultrasonic property relationships in steels [C]// Proceedings of 16th WCNDT-World Conference on NDT. Montreal: International Committee for Non-Destructive Testing, 2004.
- [13] PFEIFER D, KIM J Y, JACOBS L J. Nonlinear Rayleigh waves to evaluate plasticity damage in X52 pipeline material [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 143: 106794. DOI: 10.1016/j.ymsp.2020.106794.
- [14] ABRAHAM S T, SHIVAPRASAD S, DAS C R, et al. Characterisation of heterogeneous microstructure in large forged products using nonlinear ultrasonic method [J]. Materials Science and Technology, 2020, 36(6): 699–708. DOI: 10.1080/02670836.2020.1732077.
- [15] LI J, WANG M, CHEN H, et al. Investigation on characteristics of tensile damage and microstructure evolution of steel AISI 316L by nonlinear ultrasonic Lamb wave [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 198: 104680. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104680.
- [16] 石媛媛, 李萍, 赵杰, 等. 基于非线性表面波检测奥氏体不锈钢应力腐蚀早期损伤的仿真研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 50–56. DOI: 10.3901/JME.2020.10.050.
- SHI Yuanyuan, LI Ping, ZHAO Jie, et al. Simulation study on early stress corrosion damage detection of austenitic stainless steel based on nonlinear surface wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 50–56. DOI: 10.3901/JME.2020.10.050.
- [17] 李海洋, 史慧扬, 王召巴. 利用非线性表面波评价材料疲劳损伤[J]. 声学技术, 2019, 38(3): 296–300. DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.03.010.
- LI Haiyang, SHI Huiyang, WANG Zhaoba. A method

(下转第103页)

- [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, 12(3): 165–174. DOI: 10.21037/jtd.2020.02.64.
- [25] JIANG M L, GAO Q W, ZHUANG J. Reciprocal spreading and debunking processes of online misinformation: a new rumor spreading-debunking model with a case study [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, 565: 125572. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125572.
- [26] 庄文英, 许英姿, 任俊玲, 等. 突发事件舆情演化与治理研究: 基于拓展多意见竞争演化模型[J]. *情报杂志*, 2021, 40(12): 127–134, 185. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1965.2021.12.018.
ZHUANG Wenying, XU Yingzi, REN Junling, et al. Research on the evolution and governance of public opinion on emergencies: based on expanded SEInR model [J]. *Journal of Intelligence*, 2021, 40(12): 127–134, 185. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1965.2021.12.018.
- [27] 熊茵, 江山, 邢若南. 微信舆情的传播特征、机制及引导构想[J]. *情报科学*, 2018, 36(11): 54–60. DOI: 10.13833/j.issn.1007-7634.2018.11.009.
XIONG Yin, JIANG Shan, XING Ruonan. Mechanism of transmission and guidance of WeChat public opinion [J]. *Information Science*, 2018, 36(11): 54–60. DOI: 10.13833/j.issn.1007-7634.2018.11.009.
- [28] TIAN R Y, ZHANG X F, LIU Y J. SSIC model: a multi-layer model for intervention of online rumors spreading [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 427: 181–191. DOI: 10.1016/j.physa.2015.02.008.
- [29] 张梦晓, 高良谋. 基于SD模型的契约与隐性知识转移研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2022, 19(1): 96–103. DOI: 10.13306/j.1672-3813.2022.01.013.
ZHANG Mengxiao, GAO Liangmou. Systems dynamics-based study on contract and tacit knowledge transfer [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2022, 19(1): 96–103. DOI: 10.13306/j.1672-3813.2022.01.013.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:刘至真)

(上接第83页)

- of detecting corrosion fatigue damage based on nonlinear Rayleigh surface wave [J]. *Technical Acoustics*, 2019, 38(3): 296–300. DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.03.010.
- [18] HU H W, ZOU Z C, JIANG Y B, et al. Finite element simulation and experimental study of residual stress testing using nonlinear ultrasonic surface wave technique [J]. *Applied Acoustics*, 2019, 154: 11–17. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.04.014.
- [19] SHUI G S, WANG Y S. Ultrasonic evaluation of early damage of a coating by using second-harmonic generation technique [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(12): 124902. DOI: 10.1063/1.4729300.
- [20] 颜丙生, 吴斌, 何存富. 利用非线性Rayleigh波检测镁合金厚板疲劳损伤的仿真和试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 7–14. DOI: 10.3901/JME.2011.18.007.
YAN Bingsheng, WU Bin, HE Cunfu. Simulation and experiment of fatigue damage detection in magnesium thick plate using nonlinear Rayleigh wave [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 7–14. DOI: 10.3901/JME.2011.18.007.
- [21] 税国双, 汪越胜, QU Jianmin, 等. 利用直接激发Rayleigh表面波的方法测量材料的声学非线性系数 [J]. *声学学报(中文版)*, 2008, 33(4): 378–384. DOI: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2008.04.004.
SHUI Guoshuang, WANG Yueheng, QU Jianmin, et al. Evaluation of the acoustic nonlinearity parameter of materials with Rayleigh waves excited directly [J]. *Acta Acustica*, 2008, 33(4): 378–384. DOI: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2008.04.004.
- [22] CHEN L, ZHANG X W, WANG Y Y, et al. Microstructure and elastic constants of AlTiVMoNb refractory high-entropy alloy coating on Ti₆Al₄V by laser cladding [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 116571. DOI: 10.1088/2053-1591/ab49e7.
- [23] HERRMANN J, KIM J Y, JACOBS L J, et al. Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(12): 124913. DOI: 10.1063/1.2204807.
- [24] LIU M Y, SHI B, WANG C, et al. Normal Hall-Petch behavior of mild steel with submicron grains [J]. *Materials Letters*, 2003, 57(19): 2798–2802. DOI: 10.1016/s0167-577x(02)01377-0.
- [25] KINSLER L E, FREY A R, COPPENS A B, et al. *Fundamentals of Acoustics* [M]. Hoboken: Wiley, 1999.

(责任编辑:石月珍;校对:彭三军 刘平;英文编辑:彭卓寅)