

钛合金蠕变损伤的非线性 Lamb 波检测

叶有俊¹, 朱武军², 王-宁¹, 项延训²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏南京 210036;
2. 华东理工大学承压系统与安全教育国家重点实验室, 上海 200237)

摘要: 金属材料在高温高压服役过程中会发生蠕变损伤, 检测和评价金属材料的早期蠕变损伤具有重要工程意义。针对 Ti60 钛合金蠕变损伤采用非线性 Lamb 波进行检测, 分别选择 Lamb 波 S_1 - S_2 模式对和 A_4 - S_8 模式对开展钛合金蠕变损伤试样的实验测量, 并采用归一化非线性参数来表征钛合金的蠕变损伤状态。研究结果表, 明两种模式对的归一化非线性参数随着材料蠕变损伤程度的加剧均表现出“上升-下降”的变化趋势, 且 A_4 - S_8 模式对归一化非线性参数变化率比 S_1 - S_2 模式对更大, 说明该模式对对 Ti60 钛合金蠕变损伤更为敏感。

关键词: 非线性 Lamb 波; 二次谐波; 蠕变损伤

中图分类号: TB551

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-04-0345-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.04.012

Evaluation of creep damage in Ti60 alloys by nonlinear Lamb waves

YE You-jun¹, ZHU Wu-jun², WANG Yi-ning¹, XIANG Yan-xun²

(1. Jiangsu Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute, Nanjing, 210036 Jiangsu, China;
2. Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, East China University of Science and Technology, 200237, Shanghai, China)

Abstract: Creep induced damages occur when metallic materials are operated in the condition of elevated temperature and high pressure. It has an important engineering value to make an early test and evaluation of material creep damage. The present paper performs an in-depth analysis on the evaluation of creep damage of titanium alloy by nonlinear Lamb waves, in which Lamb mode pairs of S_1 - S_2 and A_4 - S_8 are conducted on creep damaged Ti60 plates. The normalized acoustic nonlinear parameter is proposed to characterize the creep damage state. A “mountain-shape” change in the normalized acoustic nonlinearity of Lamb wave versus the level of creep degradation in the Ti60 specimens has been observed both for Lamb mode pairs of S_1 - S_2 and A_4 - S_8 . The change rate of the normalized nonlinear parameter of Lamb mode pair A_4 - S_8 is much greater than that of S_1 - S_2 , which means that Lamb mode pair A_4 - S_8 is more sensitive to the creep damage of Ti60 alloys.

Key words: nonlinear Lamb waves; second-harmonic generation; creep damage

0 引言

在石油化工、电力、核电等行业大量使用的压力管道和压力容器长期处于高温高压环境下运行, 将不可避免地发生高温蠕变损伤。一般情况下材料的蠕变变形分为三个阶段: 初期阶段、稳定阶段和后期阶段。研究表明, 材料早期性能退化阶段占据材料整个蠕变寿命大于 70% 以上。因此, 检测和评价材料早期蠕变损伤具有重要的工程意义。材料早

期蠕变损伤主要表现为析出相、位错、微孔洞等的形成和演化, 而非线性超声对这些微观组织变化较敏感, 作为一种材料早期损伤的有效检测方法引起了广泛关注。

近年来, 研究者多采用非线性纵波检测材料的蠕变损伤。Ohtani^[1] 等人研究了锅炉换热管焊缝蠕变损伤情况下的二次谐波变化, 结果表明二次谐波随材料蠕变损伤显著变化。Baby^[2] 等人利用非线性超声纵波测量了 IMI834 钛合金蠕变损伤时非线性参数的变化, 并通过扫描电镜、透射电镜等检测微观结构来解释非线性超声信号的变化趋势。文献 [3-4] 研究了非线性超声检测纯铜蠕变损伤的表征参数, 结果表明三次谐波较线性超声参数(声速、衰减等)和二次谐波对纯铜材料蠕变损伤更敏感。随后研究者们利用非线性纵波检测了多种材料的蠕变

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11474093); 上海市科技启明星计划资助项目(14QA1401200)

作者简介: 叶有俊(1980-), 男, 安徽枞阳人, 硕士, 工程师, 主要从事高温构件结构损伤及无损检测研究。

通讯作者: 项延训, E-mail: yxxiang@ecust.edu.cn

损伤,如镍基合金^[5]、钛合金^[6]等。目前,一般采用非线性纵波对金属材料蠕变的损伤进行评价,而非线性导波检测金属材料蠕变损伤的研究却鲜有报道^[1-6]。

与超声纵波相比, Lamb 波具有线扫查、同侧激发与接收等优点,更适合大面积类板状结构和大口径管道的无损检测。Seale^[7]等人采用 Lamb 波对复合材料的疲劳损伤、热损伤进行了检测和评价,结果显示随着损伤的加剧,复合材料中 Lamb 波的传播速度呈现出明显的下降。Holland 和 Chimenti^[8]发现对称 S_1 模式在群速度为 0 的地方能够发生 Lamb 波的共振,该处的模式能够在空气中有效传播并可用于板材介质中缺陷的 C 扫描成像。Benmeddour^[9]等人研究了纯 A_0 和 S_0 模式对于对称缺口裂纹的敏感性,结果表明从模式能量反射系数的角度看, A_0 模式比 S_0 模式更加敏感。张海燕^[10]等人采用联合迭代重建技术(simultaneous iterative reconstruction technique)在理论和实验上研究了层析成像在管道结构中类 Lamb 波检测中的适用性。最近, Philtron 和 Rose^[11] 基于超声相控阵梳状换能器对 Lamb 波相速度和频率空间的扫查,提出一种新型的导波模式和频率扰动方法,用于确定最优化的导波检测模式。

本文前期工作中研究了非线性 Lamb 波对钛合金蠕变损伤的检测^[12]。鉴于 Lamb 波具有频散和多模式特性,有较多模式能够满足积累效应二次谐波的激发条件,因此有必要进一步研究不同模式对 Lamb 波检测蠕变损伤的敏感性,为定量评价材料蠕变损伤的模式选择提供参考。本文分别采用典型的 S_1 - S_2 和 A_4 - S_8 模式对 Ti60 钛合金蠕变损伤进行测量,探讨不同非线性 Lamb 波模式与材料蠕变损伤之间的变化关系。

1 试样及实验测量

1.1 试样制备

本文中试验研究材料选用 Ti60 钛合金材料,由中国科学院金属研究所提供。Ti60 是一种近 α 型高温钛合金,其名义成分为: Ti - 5.8Al - 4.0Sn - 3.5Zr - 0.4Mo - 0.4Nb - 1.0Ta - 0.4Si - 0.06C,其 $\alpha+\beta/\beta$ 相转变温度约为 1040 °C(即原始材料中包含的 α 和 β 相转变成全部都是 β 相的温度)。首先将精锻的板材进行适当的热处理:将精锻板材放置在真空加热炉中在 $\alpha+\beta/\beta$ 相转变温度 $T_{\beta}-20$ (约 1020 °C)下保温 2 h 后空冷,然后在 700 °C 下保温 2 h 后空冷,得到

制作高温蠕变损伤试样的原始材料。

参照 GB/T2039-2012《金属材料单轴拉伸蠕变试验方法》,将经过热处理后大的板状材料加工成尺寸如图 1 所示的非标准板状蠕变试样,厚度为 2 mm,平行段宽度为 15 mm,平行段长度为 80 mm。利用高温电子蠕变试验机 CSS-3905 对试样进行加速蠕变试验,温度设定为 600 °C,应力大小设定为 320 MPa。采取中断蠕变实验,蠕变加载中断时间分别为 0、24、48、72、96、120 h 以及 134 h(断裂)。每一次蠕变试验中断后取出试样进行非线性 Lamb 波的测量,完成测量后将试样重新放到蠕变试验机高温炉内继续在相同温度和相同应力下加载,直到下一次蠕变中断时间或者试样断裂。通过蠕变试验获得在相同试验条件下经历不同蠕变时间的 Ti60 高温蠕变损伤试样。

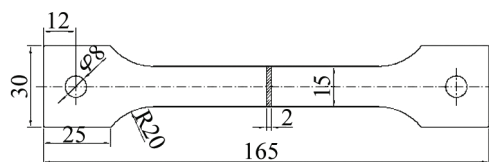


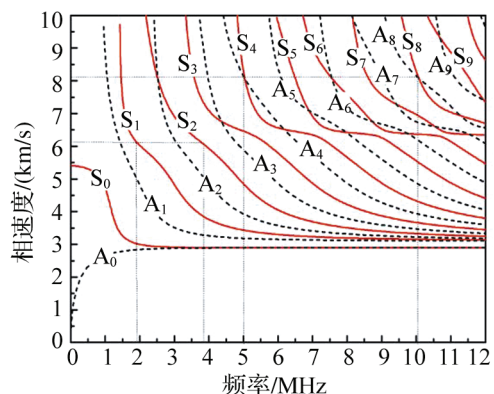
图 1 Ti60 高温蠕变板状试样示意图

Fig.1 The schematic diagram of the plate-like Ti60 specimen for high-temperature creep test

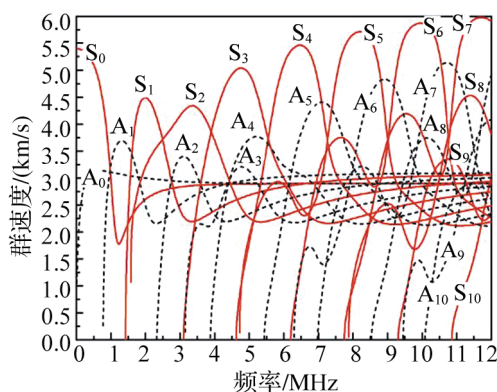
1.2 实验测量

Ti60 原始材料的主要物理参数,如弹性模量为 115 GPa,泊松比为 0.34,密度为 4500 kg/m³,纵波速度为 6272 m/s,横波速度为 3088 m/s。根据这些物理参数,可以计算得到 Ti60 板材中的导波传播的相速度频散曲线以及群速度频散曲线,如图 2(a)和 2(b)所示,板材厚度为 2 mm。

根据文献[13]的研究结果可知,当基频 Lamb 模式的相速度等于或近似等于二倍频 Lamb 波模式的相速度时,基频 Lamb 波在传播过程中能够激发出具有积累增长性质的二次谐波。因此,根据相速度频散曲线图 2(a),可以确定出在 Ti60 合金板材中能够激发具有明显积累二次谐波 Lamb 波信号的条件,也就是确定激发频率和入射角度:(1) 频率为 1.95 MHz 的 S_1 模式,有机玻璃的入射角度为 25.5°;(2) 频率为 5.03 MHz 的 A_4 模式,有机玻璃的入射角度为 19.5°。实验测量系统及装置如图 3 所示,激发的信号经过 2 MHz (或者 5 MHz)低通滤波器后加载到发射换能器上,接收换能器接收到的信号经过 4 MHz(或者 10 MHz)高通滤波器的滤波及前置放大后再经 Retic 系统 20 MHz 的低通滤波,然后由示波器显示和采样存储,示波器的采用频率为 100 MHz,采样点为 10000 点。在对中断蠕变损伤试样



(a) 相速度频散曲线



(b) 群速度频散曲线

图2 Ti60 板材试样 Lamb 波的频散曲线

Fig. 2 The phase velocity (a) and group velocity (b) of Lamb waves in the Ti60 plate

测量的过程中, 发射和接收换能器之间的距离 Z 始终保持不变, 为 50 mm。发射信号的频率 $f=1.95$ MHz 或 $f=5.03$ MHz, 脉冲周数均为 15, 接收信号经过前置放大器放大, 增益均为 40 dB。接收到的信号通过短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)进行信号处理和分析, 分解得到基频 Lamb 波的幅值以及二倍频 Lamb 波的幅值。

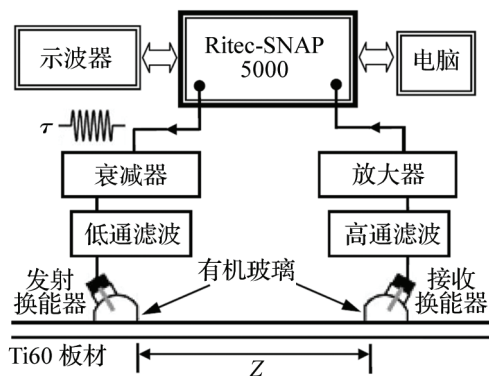


图3 Ti60 试样的非线性 Lamb 波测量实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for nonlinear Lamb waves measurement of Ti60 plate

2 结果讨论

从频散曲线图 2(a)和 2(b)可以看出, 5.03 MHz 激发的交点型 Lamb 波模式同时包含有 S_4 和 A_4 模式, 其中 A_4 模式与二倍频 S_8 模式群速度匹配, 而 S_4 模式和二倍频 S_8 模式群速度不匹配。接收信号中同时有 S_4 和 A_4 基波信号, 快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)不能分离出基波 A_4 信号, 而短时傅里叶变换(STFT)同时从时域和频域分离信号, 可以有效获取基波 A_4 幅值, 如图 4 所示。需要指出的是, 图 4 中不同的 Lamb 波模式是根据图 2 中 Lamb 波群速度频散曲线来计算不同导波模式传播的时间而确定的。

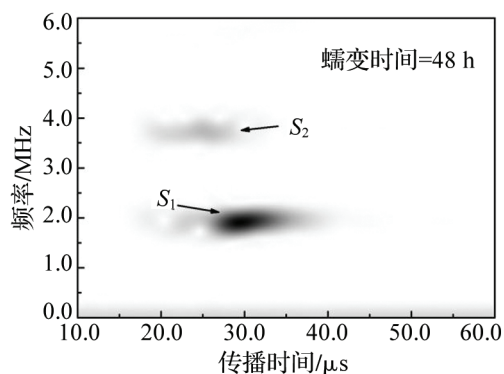
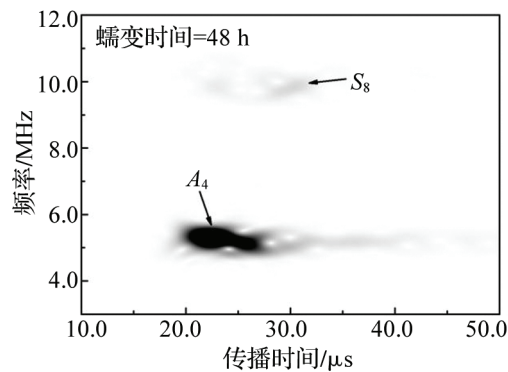
(a) 基频为 S_1 模式(b) 基频为 A_4 模式

图4 蠕变损伤 48 h 试样中 Lamb 波信号的 STFT 时频能量谱
Fig. 4 Spectrograms of STFT analysis for Lamb wave signals received from the specimens with 48 h creep damage

测量结果表明, S_1 - S_2 和 A_4 - S_8 模式对归一化非线性参数 A_2/A_1^2 [6,12] 对 Ti60 蠕变损伤响应的变化趋势基本一致, 如图 5 所示。随着蠕变时间的增加, 归一化非线性参数均大致分为两个阶段: 大约蠕变寿命的 60% 以内的快速上升阶段和蠕变寿命 60% 之后的下降阶段。需要说明的是由于本文采用快速蠕变实验, 蠕变试样断裂时间 134 h 相对较短, 非线性参数峰值对应蠕变寿命的 60% 为近似值。对

Ti60 合金蠕变损伤材料的金相微观组织分析可以看出^[12], Ti60 合金在早期高温蠕变加载下, 基体中析出相的析出和长大使材料的非线性加剧, 同时基体内位错密度逐渐增大, 位错环长度发生变化, 这些微观组织的变化导致归一化声非线性参量单调上升。随着蠕变加载的继续, Ti60 试样内部的析出相逐渐稳定, 基体和析出相晶界处显微孔洞的产生及聚集、位错密度及位错环长度的相应变化, 导致了非线性 Lamb 波幅值出现下降趋势^[12]。

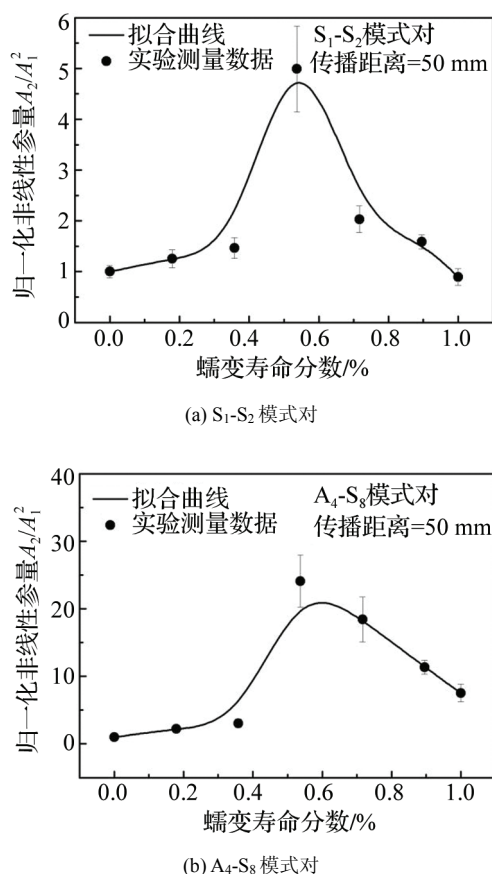


图 5 归一化 Lamb 波声非线性参量和蠕变寿命之间的定标曲线

Fig. 5 The benchmark curves of the relation between the normalized A_2/A_1^2 and the percentage creep life

从图 5 可以看出, S_1-S_2 模式对非线性参数 A_2/A_1^2 的变化率约为 4.8 倍, A_4-S_8 模式对非线性参数的变化率约为 21.2 倍。可见 A_4-S_8 模式对非线性参数 A_2/A_1^2 的变化率比 S_1-S_2 模式对更大, 对 Ti60 钛合金蠕变损伤更敏感, 更适用于工程评价。两对模式对非线性参数 A_2/A_1^2 的变化率相差较大, 后期工作将继续探讨不同模式对 Lamb 波的激发效率。已有的研究表明, 可以采用激发效率参量来定量表征超声 Lamb 波积累二次谐波的发生效率, 该激发效率参量有利于 Lamb 波积累二次谐波发生效

率高的基频 Lamb 波模式的选择和优化。限于篇幅, 关于基频 Lamb 模式的选择研究将另文报道。

3 结 论

分别采用非线性 Lamb 波 S_1-S_2 模式对和 A_4-S_8 模式对检测了 Ti60 钛合金试样的蠕变损伤。结果显示两种模式对归一化非线性参数 A_2/A_1^2 随蠕变时间变化趋势一致, 均呈现显著的上升-下降趋势。 A_4-S_8 模式对非线性参数 A_2/A_1^2 变化率比 S_1-S_2 模式对更大, 对 Ti60 合金蠕变损伤更敏感, 这为利用非线性超声导波技术定量评价材料蠕变损伤的模式选择提供了研究基础。

参 考 文 献

- [1] Ohtani T, Kawashima K, Drew M, et al. Nonlinear acoustic evaluation of creep damage in boiler heat exchange tubes [J]. Jpn. J. of Appl. Phys, 2007, **46**(7B): 4577-4582.
- [2] Baby S, Nagaraja K B, Omprakash C M, et al. Creep damage assessment in titanium alloy using a nonlinear ultrasonic technique [J]. Scripta Mater, 2008, **59**: 818-821.
- [3] Valluri J S, Balasubramaniam K, Prakash R V. Creep damage characterization using non-linear ultrasonic techniques[J]. Acta Mater, 2010, **58**: 2079-2090.
- [4] Balasubramaniam K, Valluri J S, Prakash R V. Creep damage characterization using a low amplitude nonlinear ultrasonic technique[J]. Mater Charact, 2011, **62**: 275-286.
- [5] Kim C. Creep damage characterization of Ni-based superalloy by acoustic nonlinearity[J]. Prog. Nat. Sci: Mater. Int, 2012, **22**(4): 303-310.
- [6] Xiang Y, Zhu W, Liu C-J, et al. Creep degradation characterization of titanium alloy using nonlinear ultrasonic technique [J]. NDT & E Int, 2015, **72**: 41-49.
- [7] Seale DM, Smith B T, Prosser W H. Lamb wave assessment of fatigue and thermal damage in composites[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1998, **103**: 2416-2424.
- [8] Holland S D, Chimenti D E. Air-coupled acoustic imaging with zero-group-velocity Lamb modes[J]. Appl. Phys. Lett, 2003, **83**: 2704-2706.
- [9] Benmeddour F, Grondel S, Assaad J, et al. Experimental study of the A_0 and S_0 Lamb waves interaction with symmetrical notches[J]. Ultrasonics, 2009, **49**: 202-205.
- [10] 张海燕, 于建波, 陈先华. 管道结构中的类兰姆波层析成像[J]. 声学学报, 2012, **37**(1): 81-90.
ZHANG Haiyan, YU Jianbo, CHEN Xianhua. Lamb-like wave tomography of pipe structures [J]. ACTA Acustica, 2012, **37**(1): 81-90.
- [11] Philtron J H, Rose J L. Mode perturbation method for optimal guided wave mode and frequency selection[J]. Ultrasonics, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2014.02.005>.
- [12] XIANG Y, DENG M, XUAN F-Z, et al. Creep damage evaluation of titanium alloy using nonlinear ultrasonic lamb waves[J]. Chin. Phys. Lett, 2012, **29**(10): 106202.
- [13] DENG M. Analysis of second-harmonic generation of Lamb modes using a modal analysis approach[J]. J. Appl. Phys, 2003, **94**: 4152-4159.