DOI: 10.3901/JME.2019.12.058

TP347HFG 钢高温老化非线性超声检测技术*

袁廷璧 纳日苏 常 青 杨新军 张广兴
(国电锅炉压力容器检验有限公司 北京 102209)

摘要: 高温老化过程和早期损伤快速检测研究对 TP347HFG 这种脆性大, 稳定扩展期短的奥氏体耐热钢非常重要。非线性超声技术对微纳米尺度缺陷敏感, 在早期损伤检测方面具有极大的应用潜力。利用非线性超声技术得到材料热损伤程度与超声非线性系数之间的关系曲线, 并根据材料的显微组织演变特征进行分析。结果显示, TP347HFG 钢的超声非线性系数随时效时间的增加, 首先在 500 h 时出现极大值点, 然后单调增加, 这种趋势与材料共格应变状态的形成和失去有关。试验结果为高温工况下 TP347HFG 钢非线性超声检测提供了理论依据。

关键词: TP347HFG; 非线性超声; 高温老化; 超超临界机组

中图分类号: TG142; TH212

High Temperature Aging TP347HFG Steel by Nonlinear Ultrasonic Detection Technology

YUAN Tingbi NA Risu CHANG Qing YANG Xinjun ZHANG Guangxing
(Guodian Boiler Pressure Vessel Inspection Co., Ltd., Beijing 102209)

Abstract: Study of high temperature aging process and early damage is meaningful to TP347HFG steel due to its large brittleness and short stable expansion period. Nonlinear ultrasonic technology is sensitive to micro and nano scale damages and it has great applied potency in early damage examination which limited by its mechanism. The quantitative analysis between aging time and Nonlinear ultrasonic coefficient is described and the mechanism is discussed based on the microstructure characteristics of aging steel samples. The results show that, with the increasement of aging time, the Nonlinear ultrasonic coefficient has a maximum point at 500 h and then increased monotonically. The tendency could be due to the formation and loss of coherency strain. The results provides a theoretical basis for nonlinear ultrasonic detection of TP347HFG steel under high temperature conditions.

Key words: TP347HFG; nonlinear ultrasonic wave; high temperature aging; ultra-supercritical unit

0 前言

清洁高效的超超临界机组的发展对于缓解我国的能源短缺和环境污染具有重要的战略意义。超超临界压力锅炉的受热面部件如过热器和再热器管道^[1], 大量应用了 TP347HFG 钢, 该材料是一种新型的 18-8 型奥氏体耐热钢, 具有持久强度高, 抗蒸汽氧化腐蚀性能好的优势。但是, 由于该材料在我国国内应用时间较短, 缺少足够的运行试验数据; 而且其脆性大、稳定扩展期短, 一旦出现宏观裂纹, 其扩展速度远超普通钢材, 具有极大的安全风险, 因此对 TP347HFG 钢进行早期损伤检测具有重要意义。

传统的无损检测方法只能检测宏观缺陷, 对于材料早期损伤阶段形成的微纳尺度缺陷并不敏感, 而非线性超声技术能够克服传统无损检测方法的不足, 有效表征材料微观结构的变化, 如位错演化、微裂纹萌生等, 在钢材性能劣化规律评估方面具有极大的应用潜力^[2]。

利用非线性超声技术表征材料损伤的研究工作目前已经持续开展, 按照损伤类型可以分为塑性损伤^[3]、疲劳损伤^[4]、热损伤、蠕变损伤^[5]等多个类别, 其中热损伤是奥氏体耐热钢早期损伤的主要因素之一。热损伤是指材料在无应力或较低应力状态下, 由温度作用导致材料性能变化, 由于热损伤过程中材料中固溶原子、析出物以及位错等影响较为复杂, 因此超声非线性参量对于热损伤的响应随材料的不同而不同。KIM 等^[6]对 2.25Cr-1Mo 钢的高温老化样品进行了非线性超声检测, 他们发现非线性系

* 国电集团科技资助项目(GJ2016Y01J)。20180619 收到初稿, 20181113 收到修改稿

数随老化时间的增加而单调递增, 该研究认为老化过程中析出物与基体材料不匹配性增大是超声非线性系数增加的主要原因; HURLEY 等^[7]发现 ASTM A710 钢高温老化样品超声非线性系数随老化时间增加则呈现先增加后下降的变化趋势。XIANG 等^[8]认为由于位错密度的增加, 以及析出物粗化导致的析出物与基体之间的应变不匹配是热损伤早期超声非线性增加的原因, 而老化时间达到一定程度后的超声非线性下降可能与位错密度的下降、空洞引起的超声衰减增加等有关。

超声非线性系数的变化与共格应变状态也密切相关。在一定的温度作用下, 固溶强化材料中的固溶原子会析出, 析出相与基体材料能够达到共格应变状态; 随着析出物进一步长大, 析出相与基体材料会失去共格应变状态, 转变为准共格应变或非共格应变状态^[9]。CANTRELL 等^[10]和 MONDAL 等^[11]分别考虑共格应变状态和准共格应变状态下位错与析出物之间的作用力, 提出超声非线性共格应变模型和准共格应变模型。根据这两种理论模型, 相同情况下, 共格应变状态下超声非线性最大, 其次为准共格应变状态, 最后是非共格应变状态。CANTRELL 等用该模型理论分析预测了铝合金热处理过程中的超声非线性变化, 理论数据和试验测量数据吻合较好。BARNARD 等^[12]利用非线性超声技术对两种热处理状态后的 Inconel718 合金在 650 °C 温度下进行 1 000 h 内的不同时效处理试样进行检测, 结果表明超声非线性对不同时效处理导致材料性能差异十分敏感, 随着时效时间的增加, 两种材料的超声非线性参量均呈现先增后减的变化趋势; METYA 等^[13]对经历不同热损伤时间 C250 级马氏体时效钢相应的透射电子显微镜观察表明, 初始阶段超声非线性增加是由于中间亚稳定相 Ni3Mo 和 Ni3Ti 共格析出, 随着老化时间进一步增长, 平衡相 FeTi、Fe2Ni 和 Fe2Mo 形成, 使得析出物与基体之间的共格应变状态消失, 从而导致超声非线性参量的下降。

本文首先对非线性超声技术原理进行简要介绍, 并根据电厂实际需求, 采用高温时效后的 TP347HFG 奥氏体耐热钢进行非线性超声检测, 然后结合晶相和析出物信息, 从微观层面对非线性超声系数的变化进行了解释和说明, 证明非线性超声技术在奥氏体钢热损伤评估中具有极大应用潜力。

1 非线性超声技术原理

由于晶体结构、晶体缺陷或微裂纹的存在, 固

体材料一般存在非线性的特征, 只是非线性信号极其微弱且传统线性超声检测技术也不关注此类信号。然而, 当大幅度高能超声输入固体介质当中时, 非线性效应显著增强, 超声波的传播发生畸变, 从而产生二次或者高次谐波。非线性信号对微纳米尺度的微小缺陷和微裂纹比较敏感, 能够填补传统无损检测方法在微尺度检测领域的空白, 对材料早期损伤的检测具有重要意义。

本文以一维纵波为例, 简要描述固体中非线性超声波的形成^[14-15]。一般情况下, 考虑三阶精度, 固体介质非线性应力应变关系可描述如下

$$\sigma = E\varepsilon \left(1 + \frac{1}{2}\beta\varepsilon \right) \quad (1)$$

式中, σ 为应力, ε 为应变, E 为弹性模量, β 为二阶非线性系数。由式(1)可知, 固体介质中质点在 x 方向上的运动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (2)$$

式中, ρ 为材料密度, x 是超声波的传播距离, u 为方向的位移, t 为传播时间。假设一列沿 x 轴方向传播的压缩纵波进入上述固体介质中, 结合式(1), 可以得到该纵波的波动方程

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

当进入固体介质的超声波为一单频正弦波, 即 $u = A_1 \sin \omega t$, 其中, A_1 为基频波幅值, ω 是角速度, 忽略声衰减, 结合式(2)、(3), 采用近似迭代法。可以得到固体介质中超声波的表达式

$$u(x, t) = A_1 \sin(kx - \omega t) - \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x \cos 2(kx - \omega t) + \dots \quad (4)$$

式中, k 为波数, 从式(4)可以看出, 二次谐波幅值为

$$A_2 = \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x \quad (5)$$

对式(5)进行变换可得二阶超声非线性参量

$$\beta = \frac{8}{k^2 x} \frac{A_2}{A_1^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, β 可由基频波幅值和二次谐波幅值计算得到。通过 β 可以用于材料中的损伤和微缺陷等进行评价。

2 试验装置与试验方法

本文以美国 RITEC SNAP 为中心, 搭建了非线性超声测量系统, 测量系统示意图和实物图分别如

图 1、2 所示。

图 1 非线性超声测量系统示意图

图 2 非线性超声系统

SNAP 系统主要包括一个宽带射频脉冲放大器、信号追踪接收器、90°相敏检测器、门积分器和多个频率合成器，能产生高功率射频脉冲，内置的超外差接收机具有超强提取难检信号的能力，本文选择相应的衰减器、放大器以及高/低通滤波器模块对 SNAP 系统进行优化配置，并且集成一台采样频率为 200 MHz 的 UTD4202C 示波器，形成了一套非线性超声测量系统。非线性超声测量系统含有两个超声压电直探头，一个为发射端，另一个为接收端，发射端的中心频率为 5 MHz，接收端的中心频率为 10 MHz，超声压电直探头端面的直径为 8 mm。

本文采用专用夹具对样品进行固定，以增加测量的稳定性。夹具如图 3 所示：夹具可以固定一个

图 3 夹具实物图

压力传感器，反映了夹具施加给超声换能器探头的作用力，试验设置不同的压力值对样品进行测量，测量时采用甘油做耦合剂。由于试验用不锈钢管壁较薄，为保证样品的具有适当厚度，将圆管加工为如图 4 所示样品外形，加工方式为线切割。

图 4 试验样品外观

将非线性超声试验样品置于箱式节能电阻炉(型号 SX₂-5-12)中进行高温时效处理，保持温度为 700 °C，保持时间分别为 0 h、500 h、800 h、1 500 h 以及 3 650 h，共计五个样品；上述样品在 9.8 N、19.6 N 和 29.4 N 三种不同压力下分别进行检测，通过压力传感器设定压力值。在检测试验前，需要对非线性超声检测系统进行参数设置。激励信号为 12 个周期的正弦信号，采用 Hanning 调制信号，可以突出中心频率，减少旁瓣。积分率为 196 V/Vms，基波接收信号增益设置为 32 dB，二次谐波接收信号增益设置为 46 dB，可调前置放大器设置为 20 dB。系统接收到的时域信号和经过时频变换后的频域信号分别如图 5、6 所示。由图 5、6 可以看出，在 5 MHz 超声信号发射的条件下，试验样品的非线性超声频谱中存在明显的二次谐波信号(10 MHz)和三次谐波信号(15 MHz)，说明高温时效后的 TP347HFG 钢非线性效应比较明显，具备定量分析的基本条件。

图 5 示波器显示的时域信号

图6 典型的非线性超声频域信号

为了对非线性超声检测结果进行深入剖析, 本文还对高温时效完成的 TP347HFG 钢试样, 经磨制、抛光、 FeCl_3 盐酸溶液腐蚀, 并在 Olympus 金相显微镜下观察试样的金相组织。在型号为 HitachiS-3400N 和 QYANTA 400 的扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)下对试样显微组织进行扫描电镜观察, 利用 SEM 附带的 EDAX 能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS), 对试样基体及析出相进行成分分析。

3 试验结果与讨论

利用试验采集的非线性超声频域信号, 分别读取 5 MHz 和 10 MHz 处的谱线强度 A_1 和 A_2 。由式(6)可以看出, 在样品厚度以及材料品种不变的情况下, β 与 A_2 / A_1^2 成正比, 因此, 在数据处理时可直接用 A_2 / A_1^2 表示非线性系数 β 。试验样品保持时间与非线性超声系数之间的关系对生产实践具有重要的指导意义。

3.1 非线性系数与保持时间的关系

TP347HFG 钢的非线性超声测量结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, TP347HFG 钢的非线性系数

图7 TP347HFG 钢在不同保持时间下非线性系数变化规律(时效温度 700 °C)

在保持时间为 500 h 时达到极大值后快速减少, 并在 1 000~1 500 h 出现拐点, 之后随着时效时间的增加单调递增。需要注意的是, 非线性系数随着压力的不同而有所差异, 这可能是由试验中超声换能器与样品的耦合程度不同导致的。

当保持时间达到 3 500 h 时, 非线性系数显著增加, 甚至超过了 500 h 的极大值点, 非线性系数与材料老化时间呈现正相关的关系。因此, 本文利用金相显微镜和扫描电子显微镜对试验样品的微观组织进行研究, 并从微观层面对非线性超声试验结果进行讨论。

3.2 试验样品的微观结构

非线性系数的变化与样品的微观结构密切相关, 对于热损伤样品, 对非线性效应造成影响的因素主要是晶粒大小、析出物数量和尺寸, 本节将从这两个方面入手, 分析试验样品微观结构对非线性系数的影响。

TP347HFG 钢原始材料和高温模拟时效温度为 700 °C、时效时间为 500 h、800 h、1 500 h、2 500 h、3 650 h 的试样的金相组织如图 8 所示。

图8 TP347HFG 原始及时效后的金相组织

由图 8 可以看出, TP347HFG 钢原始材料有明显的孪晶组织, 数量较多, 且孪晶晶界笔直, 有少

量异常粗大晶粒。时效 500 h 后(图 8b), 晶粒度无明显变化, 孪晶数量减少。800 h 的时效组织晶粒明显细化, 孪晶数量较时效 500 h 时减少, 并趋向于等轴晶。1 500 h 时(图 8d), 组织晶粒长大, 与时效 500 h 的晶粒度相似, 且异常长大晶粒增多, 孪晶数量较少。随着时效时间延长, 2 500 h 时(图 8e), 晶粒有较大程度地增长, 异常粗大的晶粒也增多。时效 3 650 h 时, 晶粒相较于时效 2 500 h 尺寸减少, 呈等轴晶, 孪晶几乎消失。

由此可见, 700 °C 高温时效 TP347HFG 钢的组织变化特征为, 随着时效时间增加, TP347HFG 钢的晶粒呈短时细化后快速长大, 最后尺寸趋于稳定并略有减小, 孪晶数量持续减少, 异常粗大晶粒逐渐增多。

TP347HFG 钢析出相的数量和平均尺寸如图 9 所示, 由图 9 可以看出, 析出相数量随着保持时间的增长而逐渐增多, 直到 2 500 h 后, 析出相数量达到饱和; 析出物尺寸在 800 h 以前略有减小, 800 h 后析出相尺寸呈单调递增的趋势。

图9 析出相定量分析数量和平均尺寸

3.3 试验结果讨论

试验样品微观结构与非线性效应之间的关系可以用共格应变的原理进行解释。所谓共格应变, 是指基体与析出物界面质点同时处于基体与析出物两相的点阵上时, 所发生的点阵扭曲。在共格应变状态下, 位错与析出物之间存在较强的作用力, 当析出物进一步长大后, 共格应变状态逐渐消失, 变为准共格应变或非共格应变。共格应变的状态取决于晶界和析出物的共同作用, 晶粒细化能够促使样品尺寸达到共格应变状态, 但这同样需要析出物数量及尺寸的配合。

高温时效样品非线性效应的大小主要取决于晶界与析出物之间的相互作用。从图 8 和图 9 结合来看, 高温老化试验 500 h 左右, 晶粒度无明显变化, 但细颗粒析出物数量的增多, 起到了一定的弥散强

化作用, 使得析出物与晶界作用达到了共格应变的形态, 从而形成了非线性系数在 500 h 的极大值点; 老化时间达到 800 h 后, 析出物尺寸不变, 数量有所增加, 但晶粒明显细化, 使得析出物与晶界的相互作用减弱, 这时可以认为材料失去了共格应变状态, 非线性系数明显降低; 随着老化时间进一步增加, 析出物尺寸和数量单调递增, 而晶粒也快速增大, 此时不再存在共格应变状态, 非线性系数的增大主要与析出相的数量增加以及晶界的粗化有关, 显示了单调递增的状态。

图 10 展示了 TP347HFG 原始及时效后的硬度变化情况。试验发现, 非线性系数与材料的硬度变化具有相关性, 硬度的变化可以辅助解释非线性系数变化趋势。硬度值在老化试验初期的增加也是由于细小的析出物颗粒对晶界的弥散强化作用以及析出物对位错的钉扎作用, 这和非线性参数的增加在本质上类似; 但是硬度值的极大值出现在 1 500 h, 说明共格应变状态并不等同于硬度的极大值, 硬度值的变化主要与析出物的数量、尺寸以及析出物与位错的相互作用有关。

图10 TP347HFG 原始及时效后的硬度变化

4 结论

(1) 超声非线性效应随着老化时间的增加, 呈现先增后减, 然后单调递增的趋势。试验样品在老化时间为 500 h 时达到了共格应变状态, 非线性系数出现了极大值点。试验样品失去共格应变状态后, 非线性系数随老化时间的增加而单调递增, 这主要与析出相的数量增加以及晶界的粗化有关。

(2) 试验样品的硬度变化佐证了析出相与晶粒之间的相互作用, 从而一定程度上能够解释非线性系数在老化试验初期的变化趋势。但是, 仅仅从硬度方面对试验样品的老化程度进行评价必然是片面的, 如果能结合非线性超声的检测结果, 则可以对

样品的老化试验过程进行较为全面的描述。

(3) 非线性超声技术在 TP347HFG 高温老化条件下的早期损伤的检测与评估方面具有应用价值,但需要进一步扩大数据库,通过数学建模的方式增加其预测的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 迟成宇, 于鸿垚, 谢锡善. 600 °C 超超临界电站锅炉过热器及再热器管用先进奥氏体耐热钢的研究与发展[J]. 世界钢铁, 2012(4): 50-65.
CHI Chengyu, YU Hongyao, XIE Xishan. Research and development of austenitic heat-resistant steels for 600°C superheat/reheater tubes of USC power plant boilers[J]. World Iron & Steel, 2012(4): 50-65.
- [2] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 2-8.
ZHOU Zhenggan, LIU Siming. Nonlinear ultrasonic techniques used in nondestructive testing: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 2-8.
- [3] 阎红娟, 徐春广, 肖定国, 等. 金属材料拉伸应力非线性超声特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 22-29.
YAN Hongjuan, XU Chunguang, XIAO Dingguo, et al. Research on nonlinear ultrasonic properties of tension stress in metal materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 22-29.
- [4] 颜丙生, 刘自然, 张跃春, 等. 非线性超声检测镁合金早期疲劳的试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 20-24.
YAN Bingsheng, LIU Ziran, ZHANG Yuechun, et al. Experimental study of early fatigue nonlinear ultrasonic detection in magnesium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 20-24.
- [5] 张萌, 轩福贞. 汽轮机转子钢蠕变损伤的非线性超声评价[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 76-81.
ZHANG Meng, XUAN Fuzhen. Creep damage evaluation of steam turbine rotor steel by using the nonlinear ultrasonic technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 76-81.
- [6] KIM C S, PARK L. Microstructural degradation assessment in pressure vessel steel by harmonic generation technique[J]. Journal of Nuclear Science and Technology 2008, 45(10): 5.
- [7] HURLEY D C, BALZAR D, PURTSCHER P T. Nonlinear ultrasonic parameter in precipitate-hardened steels[J]. Materials Research Society Symposium Proceedings 1999, 591: 129-134.
- [8] XIANG Y X, XUAN F Z, DENG M X. Evaluation of thermal degradation induced material damage using nonlinear lamb waves[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(1): 016202.
- [9] HULL D, BACON D J. Introduction to dislocations[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [10] CANTRELL J H, YOST W T, Determination of precipitate nucleation and growth rates from ultrasonic harmonic generation[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(13): 1952-1954.
- [11] MONDAL C, MUKHOPADHYAY A, SARKAR R. A study on precipitation characteristics induced strength variation by nonlinear ultrasonic parameter[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(12): 124910.
- [12] BARNARD D J, DACE G E, BUCK O. Acoustic harmonic generation due to thermal embrittlement of Inconel 718[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1997, 16(2): 9.
- [13] METYA A, GHOSH M, PARIDA N, et al. Higher harmonic analysis of ultrasonic signal for ageing behaviour study of C-250 grade maraging steel[J]. NDT&E International, 2008, 41: 484-489.
- [14] 胡海峰. 板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
HU Haifeng. Research on theory and key technologies of nonlinear ultrasonics for health monitoring of plate-like metallic structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [15] 张剑锋. 奥氏体不锈钢服役损伤的非线性超声检测与评价研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
ZHANG Jianfeng. Evaluation of serving damage of austenite stainless steel using nonlinear ultrasonic wave[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014.

作者简介: 袁廷璧(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 高级工程师。
主要研究方向为金属材料无损检测新技术、激光光谱分析。
E-mail: ziyu8271@163.com