◇ 研究报告 ◇

P92钢焊接接头蠕变损伤的非线性超声检测研究

黄桥生1节 任德军2 章亚林1 刘胜利2

(1 国电科学技术研究院有限公司 武汉 430066)(2 国电长源电力股份有限公司 武汉 430066)

摘要:为解决 P92 钢焊接接头蠕变损伤的无损检测问题,该文选用温度为 650 ℃、施加应力为 95 MPa 的加速 试验方法,制作不同蠕变时间的试样,对 P92 钢焊接接头进行蠕变性能试验。采用非线性超声波技术和金相检 测对蠕变试样焊接接头各区域进行研究。结果表明: P92 钢焊接接头母材、热影响区以及焊缝区域的非线性超 声二次谐波幅值在蠕变试验后都呈上升趋势,在热影响区中的增加速率要快于其在母材和焊缝中, P92 钢焊接 接头热影响区非线性二次谐波参数的变化与蠕变损伤严重程度存在对应关系。该文为开展 P92 钢焊接接头蠕 变损伤的无损检测工程应用打下了坚实的基础。 关键词: P92;蠕变损伤;非线性超声; IV 型裂纹

中图法分类号: TG44 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)03-0366-06 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.007

Nonlinear ultrasonic detection of creep damage in welded joints of P92 steel

HUANG Qiaosheng¹ REN Dejun² ZHANG Yalin¹ LIU Shengli²

Guodian Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430066, China)
 (2 Guodian Changyuan Power Co., Ltd., Wuhan 430066, China)

Abstract: In order to solve the problem of non-destructive testing of P92 steel welded joint creep damage, in this paper, the creep properties of the P92 steel welded joint are tested by means of an accelerated test method with a temperature of 650 $^{\circ}$ C and a stress applied of 95 MPa. Nonlinear ultrasonic technology and metallographic testing were used to study the welding joint areas of creep samples. The results showed that the secondary harmonic amplitude of the welding joint base, thermal influence area and weld area of the T/P92 steel welded joint showed an upward trend after the creep test. The increase rate of the second harmonic in the thermal impact zone was faster than that in the parent and weld areas. The change of nonlinear parameters in the thermal impact zone of the welded joint of P92 steel had a corresponding relationship with the creep damage degree. This paper lays a solid foundation for developing the engineering application of P92 steel welded joint creep damage detection.

 ${\bf Keywords:}$ P92 steel; Creep damage; Nonlinear ultrasound; Type IV crack

2019-07-18 收稿; 2019-11-28 定稿

†通信作者 E-mail: 63292537@qq.com

作者简介:黄桥生(1980-),男,湖南衡东人,硕士,高级工程师,研究方向:电力设备无损检测。

0 引言

耐热铁素体、奥氏体和部分新材料已经在现有 600 ℃超超临界机组中得到大规模的应用^[1-2],其 中9%~12%Cr马氏体钢所占比重越来越大。这些 用于电站燃煤锅炉的耐热钢材料长期在十分恶劣 的环境介质中运行,材料微观组织与机械性能发生 劣化,机组频繁起停,也加剧材质劣化,产生蠕变损 伤,在运行中发展成裂纹,从而导致金属部件的损伤 失效^[3]。

对于蠕变损伤,文献 [4-9] 使用 CDM 方法对焊 件变形和失效进行了分析。Tu 等^[10] 使用本构方 程模拟了服役材料的蠕变行为,研究了焊件损伤 的发展,在此基础上提出了基于损伤的设计准则。 Becker 等^[11]列出了大量的标准例子,包括单轴、双 轴和多轴应力状态下的蠕变损伤。李兆霞^[12]研究 发现,T/P92 钢接头 IV 型蠕变断裂过程中,孔洞首 先在内部产生,最后才扩展到管道外表面,因此,用 现场覆膜金相方法检测孔洞并不适用,需要开发新 的检测方法。

声波是一种以波动形式传播的机械振动。当声 波在固体介质中传播时,波动方程仅在一定条件下 才被近似认为是线性的,而当线性化的条件不能满 足时,波动方程则被认为是非线性的。当一列具有 足够强度的正弦波在固体介质中传播时,超声波会 与固体介质发生非线性的相互作用并产生高频谐 波。通常把振动系统的最低固有频率称为基频或基 波,谐波是指频率等于基频整数(n)倍的正弦波。声 波在介质中传播以及在发射和散射时,都具有非线 性效应,导致产生谐波。因此基频也称一次谐波,频 率为基频2倍的正弦波称为二次谐波。

同时,这些谐波信号与介质的微观组织结构密 切相关,例如材料的位错密度变化、位错与析出相 间的交互作用以及材料损伤过程中所形成的微孔 洞和微裂纹等结构特征都会引起非线性效应以及 谐波幅度的改变。因此,通过测量高频谐波的幅值 或是用来表征非线性效应大小的非线性参数,即可 以在一定程度上反映介质内部微观组织的变化状 况。在金属的蠕变过程中,晶体的塑性滑动所形成 的孔洞实质上是组织中细微的不连续现象。超声检 测技术具有灵敏度高、穿透力强、指向性好、检测速 度较快、成本较低、设备相对简单、对人体无害等一 系列优点^[13]。在非线性理论研究方面^[14-15],国内 外研究者对非线性声学所涉及的问题,如非线性弹 性动力学及非线性波动方程进行了比较深入和系 统的研究。王学等^[16]研究发现,IV型断裂是接头 细晶粒 HAZ 萌生蠕变孔洞、晶界蠕变孔洞长大、聚 集最后形成微裂纹。目前国内外的研究者较多地运 用非线性超声技术表征金属构件疲劳、塑性损伤、 蠕变、高温热损伤等状态。然而,对于采用非线性超 声技术表征和评价 P92 钢焊接接头部位蠕变损伤 的研究报道还相对较少。由于 P92 钢焊接接头在高 温高压下存在 IV 型开裂行为,导致焊接接头的蠕变 寿命显著下降。因此开展 P92 钢焊接接头蠕变损伤 的非线性超声检测研究,对保证我国超超临界发电 机组的安全可靠运行具有重要的理论意义和应用 价值。

1 非线性超声平台的搭建

本文使用 RAM-5000-SNAP 非线性检测系统 测量材料非线性二次谐波参数。非线性检测系统 包含脉冲发射器、匹配阻抗、衰减器、超声换能器 以及示波器。其中脉冲发射器用于激发高能射频 (Radio frequency, RF)脉冲群,同时要求加载在发 射换能器上的输出电压不小于 450 V,输出功率不 小于 500 W。

试验前,在高能射频脉冲发射器的输出端口依 次连接一个50 Ω的匹配阻抗、RA-6 大功率可调衰 减器、两个FDK5双工器 (Stage 1和 Stage 2) 以及 超声换能器 (5 MHz 发射探头)。其中, 50 Ω的匹配 阻抗用于保证信号源内阻与所接传输线的特性阻 抗大小相等且相位相同。RA-6型可调衰减器则用 于承受输出功率的衰减,同时可以检验谐波的发生 是来源于声学样品而不是系统的射频门放大器(对 于声学系统来说,1 dB基频波信号的衰减将导致 2 dB二次谐波信号的衰减,二次谐波的振幅与基频 波振幅的平方成正比)。FDK5 双工器具有一个截 止点功能,即截断任何超过工作频率5 MHz以外的 频率分量;同时,FDK5双工器还可以对门控放大器 所产生的谐波频率进行衰减。在脉冲发射器的接收 端口则连接PAS-0.1-40型前置放大器以及超声换 能器(10 MHz 接收探头),以此来接收基本波信号和 二次谐波信号。非线性超声系统的搭建及其模块示 意图如图1所示。



图 1 非线性超声系统的搭建及其模块示意图 Fig. 1 The construction of nonlinear ultrasonic system and its module schematic diagram

超声检测采用纵波法,发射探头与接收探头的 型号为SIUI,直径为 $\Phi = 6$ mm。测量前用超声耦合 剂对探头接触的试样表面进行耦合,耦合剂的用量 要适度。脉冲发射器的外置接口上连接一台示波器, 用于观察接收信号在时域范围内的波形(见图2), 系统激发的射频脉冲信号周期根据被测工件的厚 度及材质进行设定。在试验中统一将脉冲发射信号 的周期设置为13,同时使用汉宁窗对一次底波信号 进行调制。此外,当软件系统对时域信号进行快速 傅里叶变换(Fast Fourier transformation, FFT)之 后,在系统中即可读出基波以及二次谐波在频域内 的幅值。

采用加速试验方法制作 P92 钢焊接接头 (焊接 接头由焊缝 (Weld metal, WM)、热影响区 (Heat affected zone, HAZ) 和母材金属 (Base metal, BM) 组成) 蠕变损伤试样,试验采用的温度为 650 °C,施 加的应力为 95 MPa。

为研究不同蠕变寿命P92钢焊接接头各区域 材料微观损伤与超声非线性二次谐波之间的相互 关系,分别对原始试样、蠕变312h(20%蠕变寿 命)、624h(40%蠕变寿命)、936h(60%蠕变寿命)、 1248h(80%蠕变寿命)以及1560h(蠕变断裂)的 P92焊接接头进行非线性超声测量。焊接接头非线 性超声评估的位置如图3所示。每根试样的测量部 位涵盖焊接接头的所有区域(即母材、热影响粗晶 区、细晶区以及焊缝),由于P92钢焊接接头为非均 匀组织,非线性超声试验的测量位置一共包含5个 点,其中第1点、第5点为P92钢母材组织;第2点、 第4点为热影响区组织;第3点则为焊缝组织。同时 结合金相试验结果,研究非线性二次谐波参数变化 与蠕变损伤之间的联系。



(a) 非线性检测仪器



图 2 非线性超声装置示意图





图 3 P92 钢焊接接头非线性超声测量位置 Fig. 3 Nonlinear ultrasonic measurement position of P92 steel welded joints

2 P92钢焊接接头的非线性超声检测

为了验证测量的非线性是否来自于材料本身, 对不同输入电压下基波和二次谐波的幅值进行了 校验^[17]。图4(a)为原始P92钢焊接接头试样母材 位置(测量点1)处的频谱图。图中非线性超声所测 得的频谱曲线同时包含5 MHz以及10 MHz的信 号,它们分别对应着基波A1以及二次谐波A2频率 分量,然而与基波幅度相比较(A1 ≈ 4 V),二次谐波 A2的幅值明显较小且不在一个数量级上;图4(b) 为断裂试样(即蠕变1560 h)母材位置(测量点1)处 的频谱图,可以发现,蠕变试验后P92钢母材组织的 二次谐波 A2 幅值发生了波动与改变。黄桥生等^[18] 研究发现,采用传统超声无法进行蠕变损伤的评定, 基波 A1 无法评定蠕变损伤,因此本文主要开展非 线性二次谐波 (A2) 波幅变化与蠕变损伤研究。



图 4 P92 钢焊接接头母材组织非线性超声测量频谱图 Fig. 4 Nonlinear ultrasonic measurement spectrum of P92 steel welded joint base material

3 超声非线性信号与蠕变损伤研究

为了准确地研究蠕变试验后 P92 钢焊接接头 中传播的超声波二次谐波随时间的变化,本文将所 观察的频谱范围聚焦在 9.5 MHz~10.5 MHz,即单 独对二次谐波幅值的变化做观察。

图5、图7、图9为P92钢焊接接头各区域二次 谐波幅值随蠕变时间的变化示意图。可以看出,随 着蠕变时间的延长,焊接接头母材、热影响区以及焊 缝区域的二次谐波幅值(即10 MHz信号)都呈上升 趋势。然而,各区域的A2值在焊接接头蠕变寿命的 40%以内增加都相对较小,而在之后的蠕变过程中 增加明显。从图5可以看出,与原始试样相比较,蠕 变1248 h后接头母材二次谐波值增加到2倍左右, 此时母材区域所产生的蠕变孔洞较少(见图6)。从 图7可以看出,与原始试样热影响区相比较,蠕变 1248 h后接头热影响区二次谐波已经增加超过了3 倍以上,此时蠕变孔洞显著增加,且孔洞尺寸变大 (见图8)。从图9可以看出,与原始试样焊缝区相比 较,蠕变1248 h后接头试样焊缝区二次谐波增幅仅 为40%,焊缝区域的晶粒尺寸较为粗大,然而焊缝区 域的蠕变损伤程度较小,500倍光学显微镜下并未 发现有明显的蠕变孔洞形成(见图10)。

图11为P92钢焊接接头蠕变试验后的非线性 二次谐波参数变化示意图。总体来看,焊接接头各 区域的二次谐波随着蠕变时间的延长而增加。在蠕 变寿命的40%以内,热影响区二次谐波的变化幅度 较小,而在后续的蠕变过程中相对明显。在到达蠕 变破断寿命后,热影响区的二次谐波上升了3倍左 右,为P92钢焊接接头中的最大增长点;焊缝组织 的二次谐波为接头中的最大值,然而由于其初始值 较高,因此在蠕变过程中,焊缝位置二次谐波的增幅



图 5 母材二次谐波变化 Fig. 5 Second harmonic change of BM



图 6 母材蠕变 1248 h 显微组织 Fig. 6 Microstructure of BM creep 1248 h



图7 热影响区二次谐波变化

Fig. 7 Second harmonic change of HAZ



图 8 热影响区蠕变 1248 h 显微组织 Fig. 8 Microstructure of HAZ creep 1248 h



图 9 焊缝二次谐波变化

Fig. 9 Second harmonic change of WM $\,$



图 10 焊缝蠕变 1248 h显微组织 Fig. 10 Microstructure of WM creep 1248 h

最小;接头母材区域的二次谐波在蠕变过程中也发 生了明显的增加,然而相比热影响区来说,二次谐波 在母材区域的增幅相对较小。



图 11 P92 钢焊接接头各测量点在不同蠕变时间后 非线性参数变化图

Fig. 11 Nonlinear parameter of each part of the ASME P92 welded joints for different creep times

4 结论

在相同蠕变时间, P92钢焊接接头热影响区蠕 变孔洞的非线性二次谐波参数增长十分明显, 金相 显微组织中, 该位置蠕变损伤程度最大。焊接接头 母材与焊缝区, 非线性二次谐波增长幅度较热影响 区小, 金相组织显示蠕变损伤也无热影响区严重。

综上可知,蠕变孔洞的出现与长大是影响非线 性参数变化的原因之一,P92钢焊接接头热影响区 超声波二次谐波参数的变化与蠕变损伤之间存在 很好的对应关系。

参考文献

 赵中平,姚珉芳. 超超临界机组开发探讨:从材料的成就 看我国超级超临界机组的发展[J].动力工程,2000,20(2): 640-644.

Zhao Zhongping, Yao Minfang. Discussion on development of supercritical unit: development of USC units in China as viewed from the materials[J]. Power Engineering, 2000, 20(2): 640–644.

- [2] 安俊超. P92 钢焊接接头热影响区蠕变裂纹扩展速率研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [3] 杨冬, 徐鸿. 浅议超超临界锅炉用耐热钢 [J]. 锅炉制造, 2006(2): 6-8.

Yang Dong, Xu Hong. Discussion on heat resistance steel for ultra-supercritical boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2006(2): 6–8.

[4] Hall F R, Hayhurst D R. Continuum damage mechanics modelling of high temperature deformation and failure in a pipe weldment[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1991, 443(1): 383–403.

- [5] Mustata R, Hayhurst R J, Hayhurst D R, et al. CDM predictions of creep damage initiation and growth in ferritic steel weldments in a mediumbore branched pipe under constant pressure at 590 °C using a four-material weld model[J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 75(8/9): 475–495.
- [6] Vakili-Tahami F, Hayhurst D R, Wong M T. Hightemperature creep rupture of low alloy ferritic steel buttwelded pipes subjected to combined internal pressure and end loadings[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2005, 363(1836): 2629–2661.
- [7] Hayhurst D R, Hayhurst R J, Vakili-Tahami F. Continuum damage mechanics predictions of creep damage initiation and growth in ferritic steel weldments in a medium bore branched pipe under constant pressure at 590 °C using a five-material weld model[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2005, 461(2): 2303–2326.
- [8] Perrin I J, Hayhurst D R. A method for the transformation of creep constitutive equations[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1996, 68(3): 299–309.
- [9] Hayhurst D R, Goodall I W, Hayhurst R J, et al. Lifetime predictions for high-temperature low-alloy ferritic steel weldments[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(7): 675–701.
- [10] Tu S T, Wu R, Sandstrom R. Design against creep failure for weldments in 0.5Cr0.5Mo0.25V pipe[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1994, 58(3): 345–354.
- [11] Becker A A, Hyde T H, Sun W, et al. Benchmarks for finite element analysis of creep continuum damage mechanics[J]. Computational Materials Science, 2002, 25(1):

34 - 41.

- [12] 李兆霞. 损伤力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-7.
- [13] Cantrell J H, Yost W T. Effect of precipitate coherency strains on acoustic harmonic generation[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(7): 2957–2962.
- [14] Goldberg I L. Two-point calibration of non-linear PC HgCdTe channels[J]. Infrared Physics and Technology, 1995, 36(4): 785–790.
- [15] 王耀俊. 超声切变波与位错非线性相互作用的研究 [J]. 南京 大学学报 (自然科学版), 1983(4): 620–628.
 Wang Yaojun. Study on the nonlinear interaction between ultrasonic shear waves and dislocations[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 1983(4): 620–628.
- [16] 王学, 潘乾刚, 陶永顺, 等. P92 钢焊接接头 IV 型蠕变断裂特性 [J]. 金属学报, 2012, 48(5): 427–434.
 Wang Xue, Pan Qiangang, Tao Yongshun, et al. P92 steel welded joint IV creep fracture characteristics[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(5): 427–434.
- [17] 侯甜甜,轩福贞,项延训. 非线性超声技术表征金属和有机 材料塑性损伤的对比试验研究 [J]. 压力容器, 2016, 33(3): 9–15.

Hou Tiantian, Xuan Fuzhen, Xiang Yanxun. A comparative study on plastic damage characterization of metallic and organic materials based on nonlinear ultrasonic technique[J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(3): 9–15.

[18] 黄桥生, 王学, 王啸. T/P92 钢焊接接头蠕变损伤的超声检测研究 [J]. 无损检测, 2018, 40(10): 53–55.
Huang Qiaosheng, Wang Xue, Wang Xiao. Study on ultrasonic detection of creep damage of welding joint of T/P92 steel[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(10): 53–55.