

17-4PH 不锈钢热老化脆化的非线性超声检测评估

杨广宇, 史芳杰, 李乾武, 黄 飞, 刘亚飞
(苏州热工研究院有限公司, 苏州 215004)

摘 要: 研究了 400 ℃ 下, 不同时效核电厂主蒸汽隔离阀备件阀杆的非线性超声和力学性能的变化规律。试验结果表明, 在时效过程中, 17-4PH 不锈钢的冲击功降低, 而布氏硬度、抗拉强度和屈服强度提高; 硬度、拉伸性能与非线性超声表现出明显的关联性; 非线性超声对时效过程中 17-4PH 不锈钢的显微组织变化敏感, 可用来对 17-4PH 不锈钢进行无损评估表征。

关键词: 17-4PH; 非线性超声; 谐波; 热老化

中图分类号: TG142; TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2022)01-0020-04

Evaluation of nonlinear ultrasonic testing for thermal aging embrittlement of 17-4PH stainless steel

YANG Guangyu, SHI Fangjie, LI Qianwu, HUANG Fei, LIU Yafei
(Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

Abstract: The change of nonlinear ultrasonic and mechanical properties of the main steam isolation valve stem in a nuclear power plant at 400 ℃ for different aging time was studied. The results show that with the thermal aging time increasing, the impact energy of 17-4PH stainless steel decreases, while the Brinell hardness, tensile strength and yield strength increase. Hardness, tensile properties and nonlinear ultrasonic show a clear correlation. Ultrasonic nonlinear parameter is sensitive to the microstructure changes of 17-4PH stainless steel during the aging process, which can be used for nondestructive evaluation and characterization of 17-4PH stainless steel.

Key words: 17-4PH; nonlinear ultrasonic; harmonic wave; thermal aging

17-4PH 不锈钢是一种沉淀硬化马氏体不锈钢, 是制造压水堆主反应堆冷却剂系统的结构材料, 广泛应用于核电站的阀杆等部件。17-4PH 不锈钢在核电厂运行温度下(约 300 ℃)长期服役, 会发生热老化脆化, 其内部微观结构变化可引起力学性能下降^[1-2], 对核安全造成潜在影响。对阀杆进行在线无损检测可以提升工业设备的运行安全水平, 减少灾难性事故的发生。传统的无损检测方法受检测技术原理的限制, 对于损伤早期阶段形成的微尺寸缺陷并不敏感, 无法表征材料或构件早期性能的退

化^[3], 而非线性超声技术可通过对材料性能变化的响应来评估 17-4PH 的热脆性^[4]。非线性超声检测是根据超声波的非线性效应(包括谐振频率的变化、二次谐波及高次谐波的产生等)发展而来的检测方法, 其主要通过分析频域信号特征来评估缺陷损伤, 较好地克服了传统线性超声检测方法的不足^[5]。笔者以 17-4PH 不锈钢为研究对象, 以某核电厂主蒸汽隔离阀备件为试验对象, 研究了其在 400 ℃ 下时效处理后的非线性系数变化, 讨论了非线性系数与力学性能的关系。为 17-4PH 不锈钢热老化脆化的非线性超声检测提供了理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

主蒸汽隔离阀阀杆备件外观如图 1 所示, 其制造规范参照 ASTM A 564—2007《热轧和冷精轧时效

收稿日期: 2021-06-22
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1901500)
作者简介: 杨广宇(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事核电厂内材料或构件的性能和寿命检测评估工作
通信作者: 杨广宇, p196524@cgnpc.com.cn



图1 主蒸汽隔离阀阀杆备件外观

硬化不锈钢棒材和型材的标准规格》中的 Type 630 金属,元素质量分数为:C 为 0.042%;Si 为 0.54%;Mn 为 0.48%;P 为 0.021%;S 为 0.000 3%;Cr 为 15.22%;Ni 为 4.61%;Cu 为 3.32%;Nb 与 Ta 一共为 0.33%。在 1 052 ℃保温 10.5 h 空冷的固溶处理后,在 593 ℃下回火 12 h,空冷。

1.2 热老化试验

试样加工成圆棒形状,尺寸(直径×长度)为 16 mm×90 mm。试样表面进行打磨处理,保证足够的光滑平整。试样在 400 ℃下进行时效处理,时效时间分别为 0,100,200,300,500 h。阀杆实际运行温度约为 283 ℃。

1.3 试验分析方法

在非线性超声(频率为 0.29 MHz,瑞丽波)测量时,使用中心频率为 5 MHz 的窄带压电换能器作为发射探头,使用中心频率为 10 MHz 的宽带压电换能器作为接收探头,且每次测量时施加在换能器上的压力相对稳定。超声换能器与试样之间均为薄层耦合,采用的耦合剂为甘油。最后通过傅里叶变换获得非线性系数。

进行非线性超声检测后,再对试样的冲击功、布氏硬度、拉伸性能进行了测试。冲击试验样品参考标准 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》加工成尺寸(长×宽×高)为 10 mm×10 mm×55 mm 的 V 型缺口试样,采用 Zwick RKP 450 型冲击试验机测量其 0 ℃的冲击功。拉伸试样根据标准 GB/T 228.1—2010《拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》加工尺寸为 M12×80 mm(螺纹直径×长度),拉伸性能采用 100 kN AG-IC 型拉力试验机测得。试验采用 XHBT-3000Z 型硬度计测量样品硬度。

2 试验结果及分析

2.1 非线性超声

非线性系数 β 通过基波 A_1 和二次谐波 A_2 的幅值计算得出,非线性系数 β 随时效时间的变化如

图 2 所示。由图 2 可知,在 400 ℃时效温度下, β 随时效时间的延长呈明显增大趋势,表明时效时间对 β 产生了重要影响。这是由于随着时效时间的延长,17-4PH 不锈钢发生了不同程度的脆化。需要指出的是, β 相对于 β_0 (0 h 对应的非线性系数)的增量并不大,在 0~300 h, β 有相对较大的增速;在时效时间为 500 h 时, β 达到了最大值。

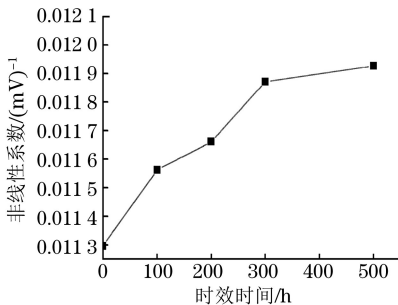


图2 17-4PH 不锈钢阀杆非线性系数随时效时间的变化曲线

17-4PH 不锈钢是一种晶体结构,其机械性能的下降与位错的移动相关。金属材料中的非线性效应主要与位错、晶体结构、沉淀析出以及微裂纹有关。高次谐波分量通常是由超声波在非谐固体中传播时变形引起的,这种现象与晶体的晶格非谐性有关(非谐性来自声子与声子间的相互作用,热振动等)。另一个可能影响超声波非线性响应的因素是第二相和位错作用产生的微应变。

晶格畸变引起超声波的非线性效应增加。超声波穿过弹性固体介质时,析出相的晶格间距不同于基质的晶格间距,这会导致晶格失配,引起应变场扭曲(可以通过失配参数进行测量)。第二相和矩阵之间不匹配也会引起晶格应变。1956 年 GRANATO 等^[6]提出了材料的位错弦钉扎理论,认为晶体中的位错或点缺陷等可能在位错线上形成钉扎点,而形成的钉扎点会限制位错线的运动。因此,析出相可能是控制 17-4PH 不锈钢热脆化过程中超声波产生非线性响应的最主要因素。

2.2 布氏硬度

17-4PH 不锈钢阀杆布氏硬度与时效时间的关系曲线如图 3 所示。阀杆时效时间为 0 h 时,其布氏硬度为 350 HBW。随着热老化的加速进行,硬度不断增大,直至 500 h 时达到最大值,为 374 HBW。硬度在整个过程中上升了 7%。

在比较非线性系数和硬度在 0~500 h 的变化规律时发现,二者变化规律大体一致。图 4 为 17-4PH 不锈钢阀杆非线性系数与硬度的关系曲线

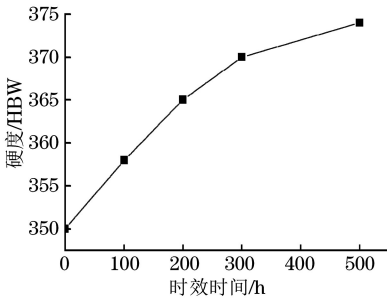


图 3 17-4PH 不锈钢阀杆布氏硬度与时效时间的关系曲线

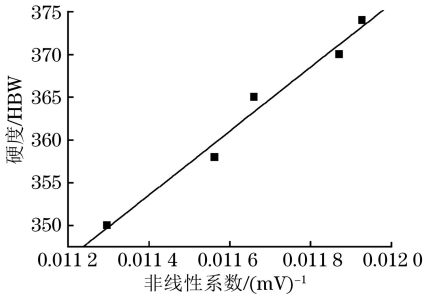


图 4 17-4PH 不锈钢阀杆非线性系数与硬度的关系曲线(决定系数为 0.97)。根据 ARDELL 的研究可知,时效处理后共格沉淀的尺寸和数量增大,其与位错发生相互作用产生时效硬化,使材料的硬度增大。同时,滑移面上形成的钉扎点阻碍了位错运动,在应力作用下,相邻钉扎点之间的位错线会产生受迫振动,伴随着产生高频谐波分量。因此非线性系数与硬度的变化规律表现出一致性。

2.3 拉伸性能

17-4PH 不锈钢阀杆拉伸性能与时效时间的关系曲线如图 5 所示,阀杆初始抗拉强度为 1 082 MPa,屈服强度为 1 051 MPa。随着热老化的进行,阀杆的抗拉强度和屈服强度增大,但增速逐渐下降,直至 500 h 时达到最大值,分别为 1 212,1 175 MPa。

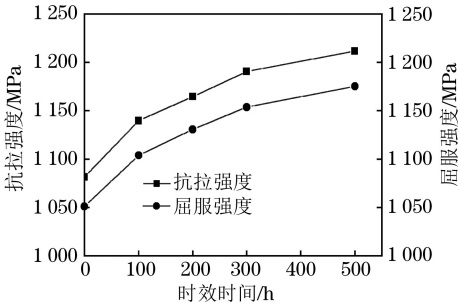


图 5 17-4PH 不锈钢阀杆拉伸性能与时效时间的关系曲线

图 6 为 17-4PH 不锈钢阀杆抗拉强度和屈服强度与非线性系数的关系曲线(两条曲线的决定系数均为 0.98)。与硬度一样,抗拉强度、屈服强度的变化与非线性参数密切相关。彭艳华等^[7]认为析出相的沉淀硬化效果主要在于其和位错的交互作用所产

生的强化,同时造成一定程度的晶格畸变(表现为抗拉强度以及屈服强度的增大)。这两种因素也是非线性效应产生的主要原因,因此表现出很强的相关性。

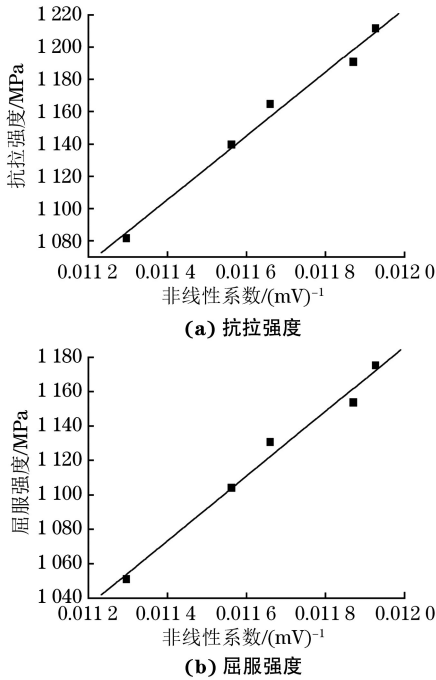


图 6 17-4PH 不锈钢阀杆抗拉强度和屈服强度与非线性系数的关系曲线

2.4 冲击功

17-4PH 不锈钢阀杆在 0 ℃时冲击功与时效时间的关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,冲击功随热老化的进行下降明显,在 0~100 h 的下降速率最大,100 h 之后缓慢地持续下降。时效处理过程中冲击功由 0 h 的 90.8 J 下降到 500 h 的 22 J,下降了 76%。

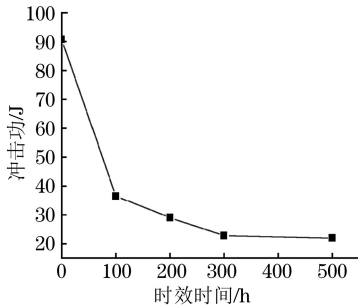


图 7 17-4PH 不锈钢阀杆在 0 ℃时冲击功与时效时间的关系曲线

图 8 为 17-4PH 不锈钢阀杆冲击功与非线性系数的关系曲线(决定系数为 0.82)。邹红等^[8]观察到很多二次碳化物沿马氏体板条束界析出,这也会降低晶界的结合强度,使材料产生脆化,造成冲击功的严重下降。由此推论,对于非线性效应,析出相在晶

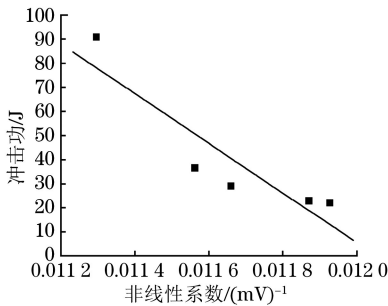


图 8 17-4PH 不锈钢阀杆冲击功与非线性系数的关系曲线

界附近造成的影响不如位错相互作用的影响明显,所以冲击功与非线性系数虽然也表现出了一定的相关性,但不如硬度和拉伸性能与非线性系数的相关性高。

3 结语

(1) 对核电厂中使用的 17-4PH 不锈钢阀杆在 400 ℃ 下进行时效处理,其非线性系数、硬度、抗拉强度、屈服强度以及冲击功均呈现出单一的变化规律,其中非线性系数、硬度、抗拉强度、屈服强度单调上升,且速率变化规律相近;冲击功的变化则相反,是逐渐下降的,且最大下降了 76%。

(2) 材料性能退化可增强透过材料传播的超声波非线性力学行为,微观结构的退化造成了二次谐波分量幅度的增加,基于此发展的非线性超声检测技术对 17-4PH 不锈钢早期阶段的热老化脆化有良好的检测效果。

(3) 由于非线性参数的变化与析出相的变化

相关,非线性系数与硬度、拉伸性能表现出高相关性,所以非线性系数可以用来评估 17-4PH 不锈钢的热脆化程度。

参考文献:

[1] BAI B,ZHANG C Y,WANG J S,et al. Thermal aging effect of 17-4PH martensitic stainless steel valves for nuclear power plant [J]. Materials Science Forum, 2016,850:96-100.

[2] WANG J,ZOU H,WU X Y,et al. The effect of long-term isothermal aging on dynamic fracture toughness of type 17-4 PH SS at 350℃ [J]. Materials Transactions,2005,46(4):846-851.

[3] 张剑锋,轩福贞,项延训. 材料损伤的非线性超声评价研究进展[J]. 科学通报,2016,61(14):1536-1550.

[4] MATLACK K H,BRADLEY H A,THIELE S,et al. Nonlinear ultrasonic characterization of precipitation in 17-4PH stainless steel[J]. NDT & E International, 2015,71:8-15.

[5] 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):2-11.

[6] GRANATO A,LÜCKE K. Theory of mechanical damping due to dislocations [J]. Journal of Applied Physics,1956,27(6):583-593.

[7] 彭艳华,王均,邹红,等. 17-4PH 不锈钢长期时效对拉伸性能的影响[J]. 核动力工程,2007,28(3):82-86.

[8] 邹红,王均,李聪,等. 17-4PH 不锈钢 350℃ 长期时效组织演化的透射电镜观察[J]. 核动力工程,2005,26(4):397-401.



(上接第 19 页)

[4] LI G F,CONGLETON J. Stress corrosion cracking of a low alloy steel to stainless steel transition weld in PWR primary waters at 292℃ [J]. Corrosion Science, 2000,42(6):1005-1021.

[5] 陈志强,张洪波,陈柳. 异种钢 Q235B/304L 焊接过渡区疑似缺陷的无损检测[J]. 无损检测,2020,42(12):20-23,58.

[6] 姚小静,韩伟,韩明,等. 压力容器制造过程中异种钢焊接工艺及无损检测方法研究[J]. 石油工业技术监督,2019,35(5):38-40.

[7] NAGESWARAN C,BIRD C R. Evaluation of the phased array transmit-receive longitudinal and time-of-flight diffraction techniques for inspection of a

dissimilar weld[J]. Insight,2008,50(12):678-684.

[8] 董世运,徐滨士,甘小明,等. 异种钢焊接焊缝缺陷涡流无损检测方法试验研究[C]//第十一次全国焊接会议论文集. 上海:[出版者不详],2005:52-54.

[9] 李运涛,宋成,胡斌,等. 奥氏体不锈钢均匀表面的涡流阵列检测技术应用[J]. 无损检测,2018,40(12):68-73.

[10] AMINEH R K,RAVAN M,SADEGHI S H H,et al. Using AC field measurement data at an arbitrary liftoff distance to size long surface-breaking cracks in ferrous metals[J]. NDT & E International,2008,41(3):169-177.

[11] 李伟,陈国明. U 型 ACFM 激励探头的仿真分析[J]. 系统仿真学报,2007,19(14):3131-3134,3162.