

反应堆压力容器钢早期疲劳损伤无损检测

徐远超,于庆凯,宁广胜,张长义,徐延平

(中国原子能科学研究院,北京 102413)

摘要:正电子湮没线形参数测量和寿命测量对 A508cl.3 钢中位错密度反映是灵敏的。当疲劳损伤 $N/N_f = 10\%$, 被测数据与损伤量有较好的对应关系。5 MHz 和 15 MHz 超声衰减常数测量结果与上述情况类似。为验证无损检测结果,进行了 TEM 观测。

关键词:压力容器钢; 疲劳损伤; 无损检测; 正电子寿命; S 参数; 超声衰减常数

中图分类号: TL375.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)S0-0098-04

反应堆压力容器(RPV)是核电厂最重要的设备之一,而且不可更换。压力容器形状不连续区(变截面区),例如冷却剂进出口管嘴区、法兰区等,长期经受机械应力和热应力,疲劳损伤比较严重。由于几何形状和受力状态的复杂性,从而降低力学计算和预测结果的可靠性和有效性。为了对压力容器老化进程做到“定量”掌握和“量化”管理,对敏感部位的疲劳损伤无损检测,确定其疲劳利用系数是非常必要的。

1 疲劳试验

试验材料为国产 A508cl.3 钢。试验材料从反应堆压力容器产品延长段 $1/4$ 厚度处取样,试样轴线方向垂直主锻方向。试样的形状和尺寸示于图 1。

在室温和大气中完成恒应变控制的低周疲劳试验, $R = 0$ 。疲劳试验条件:总应变 $\epsilon_t = 0.70\%$,弹性应变 $\epsilon_e = 0.38\%$,塑性应变 $\epsilon_p = 0.32\%$,拉应力 $\sigma_{max} = 355 \text{ MPa}$,压应力 $\sigma_{min} = -360 \text{ MPa}$,至断裂的 $N_f = 8\ 600$ 周, $f = 0.36 \text{ Hz}$ 。试验机为 MTS-50T 电液伺服材料试验机。当加载周次 $N = 0, 4, 9, 43, 172, 430, 860, 1\ 720, 4\ 300, 8\ 600$ 周时,对应的 N/N_f 分别为 $0\%, 0.05\%, 0.1\%, 0.5\%, 2\%, 5\%, 10\%, 20\%, 50\%$ 和 100% 。

2 TEM 观测

不同加载周次的疲劳试样 TEM 形貌示于图 2。无疲劳损伤的材料,由于经过锻造,存在清晰的位错网络(图 2a),位错密度约为 $8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。在 $N/N_f = 2\%$ 样品中,位错严重缠结

收稿日期:2000-01-10;修回日期:2000-04-20

基金项目:国际原子能机构资助项目(No. 9949)

作者简介:徐远超(1942—),男,湖北随州人,研究员,反应堆材料专业

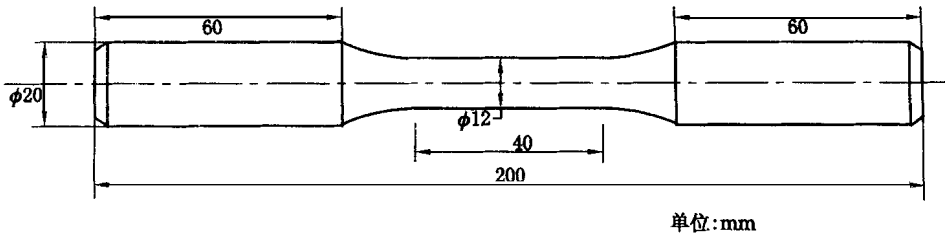


图 1 疲劳试样形状和尺寸

Fig. 1 Dimensions of the fatigue specimen

并出现包结构,在一定方向位错缠结有序化(图 2b),位错密度约为 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 。在 $N/N_f = 20\%$ 样品中,包结构内位错密度降低,在夹杂物边界及某些取向,已萌生微裂纹(图 2c)。

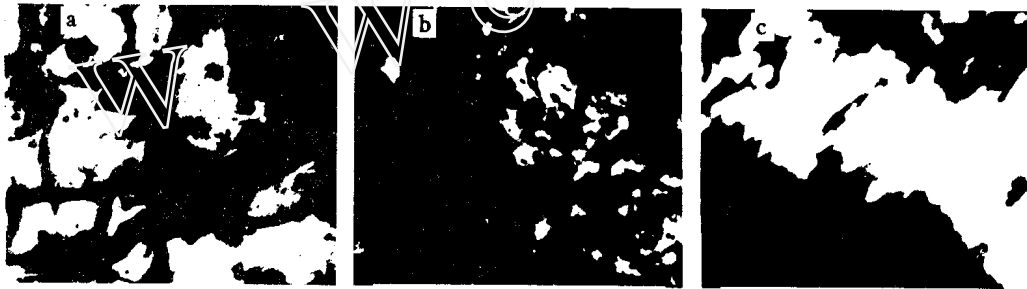


图 2 A508cl.3 钢疲劳损伤 TEM 形貌

Fig. 2 TEM photographs of A508cl.3 steel before and after fatigue

a —— $N/N_f = 0$; b —— $N/N_f = 2\%$; c —— $N/N_f = 20\%$

3 疲劳损伤无损检测

3.1 正电子湮没测量

本实验采用了 光子能谱多普勒增宽线形分析和正电子湮没寿命谱测量。

1) 多普勒增宽能谱的测量 测量多普勒增宽能谱的装置示于图 3。由 Ge(Li) 或高纯 Ge 探头测量每个光子的能量,来自探头的脉冲电压经适当放大后送入多道分析器记录。实验中要求能量分辨率尽可能高,并要求采用稳谱措施。

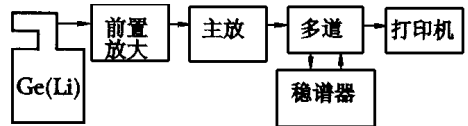


图 3 多普勒增宽谱仪方框图

Fig. 3 Schematic diagram of Doppler spectrometer for lineshape broadening analysis

2) 正电子湮没寿命谱的测量 在金属或合金的空位型缺陷(空位团、位错)处,由于缺乏正离子,电子密度较低,正电子湮没的概率较小,从而使其寿命较长。从正电子寿命谱可以获得金属或合金的缺陷信息。本实验的解谱采用了比较通用的 POSITRONFIT 程序。把寿命谱看作 3 个指数衰减成分 (τ_1 、 τ_2 、 τ_3) 的叠加与仪器分辨函数的卷积。 τ_1 代表正电子体寿命与位错处寿命的组合, τ_2 代表空位团处的寿命, τ_3 代表

样品表面效应。正电子平均寿命 $\tau_m = I_1 \tau_1 + I_2 \tau_2$, I_1, I_2 是对应于 τ_1, τ_2 的缺陷(组份)强度。

3) 正电子湮没测量的试样 从每个疲劳加载试样的工作段用线切割方法截取两个圆片,其厚度约为 2.5 mm,用平面磨床研磨,再用细砂纸研磨至 2 mm 左右。测量时,将载带正电子源(^{22}Na)的 Ni 箔夹在两块样品之间,并置于探测器前面。

4) 实验结果及分析 能谱仪的能量分辨率: ^{86}Sr 的单能 光子计数曲线峰值一半处的宽度(FWHM)为 1.5 keV。正电子寿命值精度为 ± 2 ps。正电子湮没线型参数 S 及正电子寿命测量结果示于图 4。当疲劳损伤量从 0 增加到 0.5 %左右, S 参数较快地增加。当损伤程度继续增加, S 参数增加速度趋缓,损伤量为 10 %左右, S 参数达到最大值。随着损伤程度继续增加, S 参数有所下降。正电子寿命 τ_1 (体寿命与位错中的寿命组合)变化趋势与 S 参数的变化趋势基本一致。当损伤量超过 2 %时,平均寿命 τ_m (体寿命、位错及空位团中的寿命组合)值有所下降。 S 参数及寿命测量结果与 TEM 观测结果比较符合。正电子湮没测量对小尺寸(0.2 ~ 2 nm)的空位型缺陷比较灵敏。疲劳损伤量从 0 ~ 0.5 %,位错密度增加较快,因此, S 参数、 τ_1 和 τ_m 也较快增加。损伤程度进一步增加,位错缠结并形成包结构。 N/N_f 超过 2 %,位错在包结构内再排列,部分位错及空位合并至包壁, τ_m 值略有下降,但 τ_1 和 S 值仍呈上升趋势,并持续到损伤量为 10 %左右。 N/N_f 超过 10 %,位错和小空位团进一步被合并,缺陷尺寸增大,但相对数量减少, τ_1 和 S 值开始下降。

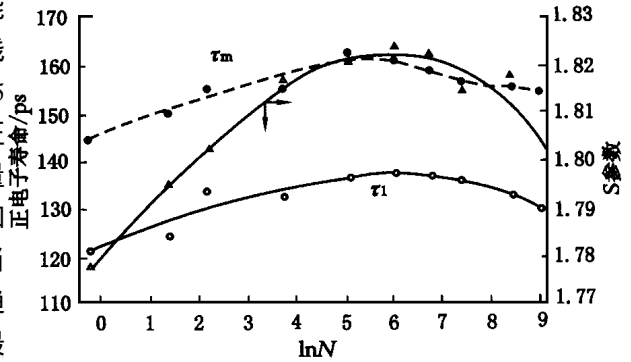


图 4 正电子湮没线形参数 S 及正电子寿命与 A508cl.3 钢疲劳损伤程度的关系

Fig. 4 Positron lifetime and lineshape parameter S versus fatigue damage level of A508cl.3 steel

3.2 超声衰减常数测量

超声衰减常数可以与材料内部位错密度及状态相关联,因此,应用衰减常数测量可以研究材料因塑性行为引起的损伤。

1) 实验方法和装置 高频声波(弹性应力波)引入试样的方式,是将一压电换能器(如石英晶片)粘贴在试样的一个端面上,通过反向压电效应产生高频声波并传入试样,其频率是换能器的基频或奇次谐波。通常用一个换能器,它既产生超声波,又作为回波的接收器。试样制备:从不同加载周次的疲劳试样工作段截取 15 mm 长的圆柱,用不同粒度的砂纸研磨圆柱两端面,再经过粗抛和精抛。试样与换能器之间用硅油或水杨酸苯脂薄而均匀粘结。

2) 测量结果与分析 对于不同的超声频率,衰减常数与疲劳损伤程度的对应关系不一样^[1]。参考 N. Maeda 等^[1]关于衰减常数与频率关系的实验结果,本研究使用的超声频率为 5 MHz。同时用 15 MHz 频率。对 A508cl.3 钢不同疲劳损伤程度的试样测量结果示于图 5。实验结果表明:疲劳损伤量从 0 ~ 5 %,衰减常数曲线呈上升趋势,并且达到峰值。损伤量超过 5 %直至裂纹萌生($N/N_f = 20$ %),曲线呈下降趋势。在裂纹萌生和扩展阶段,衰减常数变化不大。可以看出:衰减常数对小尺寸缺陷(位错)的数量变化反映是灵敏的,对于大尺寸缺陷或

宏观缺陷(裂纹等)不够灵敏。

4 小结

1) 对于疲劳损伤的 A508cl. 3 钢, TEM 观测结果表明, 损伤量从 0~2%, 位错密度迅速增加, 并且严重缠结和出现包结构。损伤量达 20%, 发现了萌生的微裂纹。

2) 正电子湮没线形分析(S 参数测定)、正电子寿命谱测量和超声衰减常数测量对 A508cl. 3 钢的小于 10% 的疲劳损伤是灵敏的; 对于 $N/N_f > 10\%$ 的损伤, 灵敏度较差。上述手段比较适合检测原子尺度的缺陷。

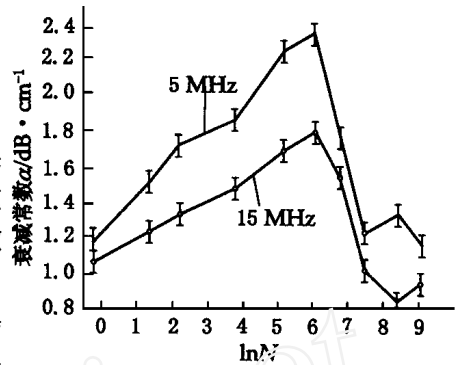


图5 超声频率为 5 MHz 和 15 MHz 时衰减常数与疲劳损伤量的对应关系

Fig. 5 Ultrasonic decay constant versus fatigue damage level of A508cl. 3 steel

参考文献:

- [1] Maeda N, Sugibayashi T, Yamaguchi A. Material Degradation Detection by Ultrasonic Decay Constant Measurement[A], Proceeding 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries[C]. Kyoto: [s. n], 1995. 291~297.

Determination of Fatigue Damage of A508cl. 3 Steel in Early Stage of Fatigue

XU Yuan-chao, YU Qing-kai, NING Guang-sheng, ZHANG Chang-yi, XU Yan-ping

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Results indicate positron annihilation lineshape parameter S and lifetime measurements for dislocation density change in A508cl. 3 steel are sensitive. When fatigue damage $N/N_f < 10\%$, both S parameter and mean lifetime increase with N/N_f value. Results for decay constant measured by ultrasonic waves at frequencies of 5 MHz and 15 MHz agree almost with above mentioned ones. Microstructures of fatigued specimens were examined by TEM to verify the results obtained by NDE.

Key words: pressure vessel steel; fatigue damage; NDE; positron lifetime; S parameter; ultrasonic decay constant