

Zr-4 合金管材辐照前后低周疲劳行为研究

张海生, 李国云, 黄娟, 蒋国富, 李福荣, 王斐

中国核动力研究设计院, 成都 610041

摘要 对中性辐照前后的 Zr-4 合金包壳管进行了低周疲劳试验, 以研究其在辐照前后的低周疲劳行为变化。通过试验数据拟合出了未辐照试样的循环应力-应变特性和 Coffin-Manson 关系曲线, 得出了中性辐照对 Zr-4 合金包壳管低周疲劳行为的影响。并对管材的低周疲劳断口进行扫描电镜 (SEM) 分析, 讨论 Zr-4 合金管材的低周疲劳断裂机制。研究结果表明辐照后的 Zr-4 管材脆化比较严重, 中性辐照不改变 Zr-4 管材循环软化的特性, 使其强度系数和应变硬化指数变大, 材料常数变小, 疲劳寿命大大降低。

关键词 Zr-4 包壳管; 低周疲劳; 疲劳寿命; SEM

中图分类号 TG115.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.003

Low Cycle Fatigue Behavior of Zr-4 Cladding Before and After Neutron Irradiation

ZHANG Haisheng, LI Guoyun, HUANG Juan, JIANG Guofu, LI Furong, WANG Fei

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China

Abstract The low cycle fatigue property of the Zr-4 cladding before and after the neutron irradiation is investigated in this paper. The stress-strain curve and the Coffin-Manson relation of the pre-irradiation specimens are first obtained. Then an estimation of the effect of the neutron irradiation on the low cycle fatigue property of Zr-4 cladding is obtained. The fatigue crack microstructure is analyzed and the mechanism of the fatigue is discussed. It is shown that the Zr-4 tube sees a serious irradiation-embrittlement. Both non-irradiated and irradiated specimens show cyclic softening. The strength coefficient and the hardening exponential are increased, the material constant is decreased and the life of the Zr-4 tube is reduced after the irradiation.

Keywords Zr-4 cladding; low cycle fatigue; fatigue life; SEM

0 引言

Zr-4 合金具有优异的核性能、优良的耐蚀性能和综合力学性能, 被广泛用作核电站反应堆燃料元件的包壳材料。在反应堆运行过程中, 堆功率的波动和水冷却介质的流动将导致燃料元件局部承受反复的塑性变形^[1], 当变形达到一定程度, 包壳就会发生破损或变形, 严重影响反应堆的安全运行。Kobayashi 曾较为系统地研究了冲击载荷作用下 Zr-4 的力学行为, 但对于疲劳循环特性涉及较少^[2]。国内只针对未辐照的锆合金做过疲劳循环方面的研究, 且多采用棒状试样^[3-4], 采用管状试样的情况较少, 对于中性辐照后锆合金的疲劳循环变

形试验还没有开展。锆合金经中性辐照后会形成空洞、原子位移等缺陷, 使其发生脆化和强化。因此研究 Zr-4 合金包壳管辐照前后低周疲劳行为的变化对于反应堆燃料组件的设计、制造和安全评审具有重要意义。

1 低周疲劳试验

1.1 材料

辐照前后的试样均为 $\phi 9.5\text{mm} \times 0.57\text{mm}$ 的 Zr-4 管材, 辐照后试样取自试验组件的燃料棒包壳管, 试验组件的平均燃耗达到了 42102 MWd/tU。Zr-4 的主要化学成分的质量分数分

收稿日期: 2012-08-24; 修回日期: 2012-09-12

基金项目: 中国核动力研究设计院青年基金项目 (SQNJ-07-12)

作者简介: 张海生, 助理研究员, 研究方向为核材料辐照后力学性能检验, 电子邮箱: hason1981@126.com

别为: Sn 1.3%; Fe 0.24%; Cr 0.11%; C 0.01%。

1.2 样品制备

根据试验设备, 确定试样长度为 150mm。用专用端塞安装装置在夹持部位塞上塞头, 塞头光滑, 且有一定锥度; 试样夹持部位外表面经过特殊处理, 保证试验机夹头不损伤试样表面, 避免试样在疲劳试验过程中从夹持部位断裂而报废。

1.3 试验方法

低周疲劳试验在 MTS 810 万能材料试验机上进行, 温度为室温, 试验采用对称拉压循环, 加载波形为三角波^[1], 应变速率为 $1 \times 10^{-3} / s$, 控制应变的引伸计标距为 25mm。为防止因疲劳频率过快导致引伸计打滑, 将加载频率设置为 0.5Hz^[1]。

2 试验结果及分析

对未辐照试样进行 0.4%、0.6%、0.8%、1.0% 和 1.2% 5 种应变幅的循环变形试验。由于辐照后的试样脆化较严重, 在 0.6% 的应变水平下仍未出现滞后环, 在 0.8% 的应变水平下疲劳寿命已经很低, 所以只对其进行 0.7% 和 0.8% 2 种应变幅的循环变形试验。

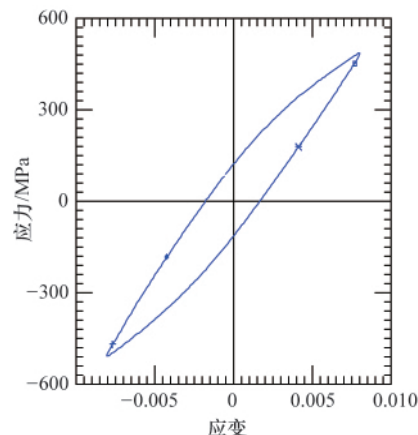
2.1 循环响应特性

疲劳寿命结果如表 1 所示, 表中的稳定应力幅是取半寿命 ($N_f/2$) 时的应力幅。辐照后的 Zr-4 管材脆化比较严重, 塑性储备较少, 塑性应变幅范围较窄。相同塑性应变幅下辐照后试样的疲劳寿命远低于未辐照试样。

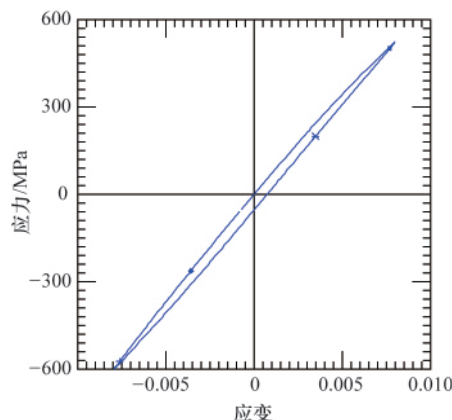
表 1 Zr-4 包壳管循环变形试验结果
Table 1 Cyclic deformation test result of Zr-4 cladding tube

应变幅/%	试样状态	循环寿命 N_f /次	塑性应变幅/%	弹性应变幅/%	稳定应力幅/MPa
0.4	未辐照	10642	0.001	0.399	319
0.6	未辐照	1067	0.030	0.570	453
0.8	未辐照	468	0.153	0.647	493
1.0	未辐照	259	0.342	0.658	499
1.2	未辐照	176	0.520	0.680	497
0.7	辐照后	365	0.023	0.677	485
0.8	辐照后	98	0.037	0.763	525

图 1 为辐照前后 Zr-4 管材相同应变幅(0.8%)下的滞后环对比, 可以明显看出, 未辐照试样的塑性应变远大于辐照后试样, 试验组件燃料棒包壳辐照脆化效应明显。孪生是锆合金塑性变形的一个重要方式, Crépin 等的研究表明, 在循环变形时锆合金中的部分孪晶是不可逆的; MacEWEN 等用中子衍射测定了变形及退火 Zr-2 合金中的晶间热应力, 表明 Zr-2 合金在 650℃保温后冷却到室温, 晶粒的 c 轴处于张应力状态而 a 轴处于压应力状态, 这是由 α -Zr 的热膨胀各向异性引起的; 最近, Pang 等测定了锆合金中晶间热应力状态的张量; Turner 等用弹塑性自协调模型估算了锆合金中的



(a) 未辐照
(a) Non-irradiated



(b) 辐照后
(b) Irradiated

图 1 辐照前后 Zr-4 管材滞后环

Fig. 1 Hysteresis of irradiated and non-irradiated Zr-4 tube

晶间热应力, 并认为拉伸和压缩时屈服应力的差异与晶间热应力有关^[6]。本试验中拉伸和压缩时应力并不对称, 主要是锆合金中的晶间热应力所致。

图 2 为试样的循环最大应力与循环次数的变化关系, 可

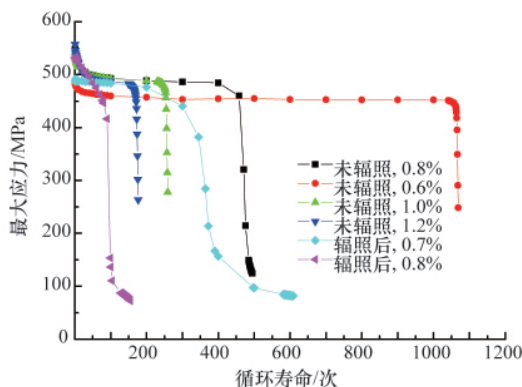


图 2 Zr-4 管材试样循环次数与应力幅关系
Fig. 2 Relationship between cycles and stress amplitude for Zr-4 pipe sample

以看出随着循环次数增加,循环最大应力呈下降趋势,表明 Zr-4 合金管材为循环软化材料,辐照后的试样尤为明显;随着应变幅的增加,循环最大应力的下降趋势越明显,没有稳定的应力幅。

对循环应力范围和塑性应变范围按公式 $\Delta\sigma/2=k'(\Delta\varepsilon_p/2)^{n'}$ 进行拟合。其中 $\Delta\sigma$ 为循环应力范围, $\Delta\varepsilon_p$ 为塑性应变范围, k' 为循环强度系数, n' 为应变硬化指数,拟合曲线如图 3 所示。

得到未辐照 Zr-4 管材的低周疲劳的循环强度系数 k' 和应变硬化指数 n' 分别为 541.08 和 0.0679, 即未辐照 Zr-4 管材的循环应力-应变特性为 $\Delta\sigma/2=541.08(\Delta\varepsilon_p/2)^{0.0679}$, 鉴于辐照后材料特性的约束,数据点只有两个,无法进行拟合,只能与未辐照数据进行定性比较,从曲线上可以看出经中子辐照后,材料的强度系数和应变硬化指数均变大。

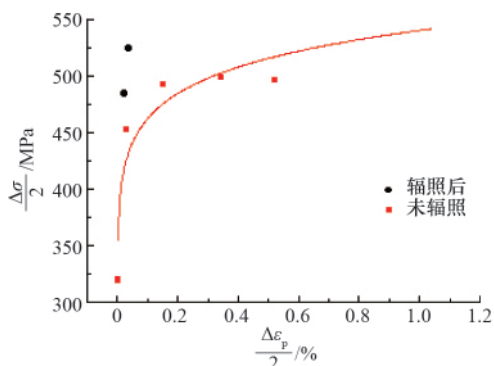


图 3 $\Delta\varepsilon_p/2-\Delta\sigma/2$ 关系

Fig. 3 Relationship between $\Delta\varepsilon_p/2$ and $\Delta\sigma/2$

2.2 Coffin-Manson 方程

低周疲劳是在塑性应变循环下引起的疲劳断裂,因而低周疲劳寿命决定于塑性应变幅,即材料的低周疲劳抗力应该用 $\Delta\varepsilon_p-N_f$ 曲线(图 4)表示,近似为直线。Coffin-Manson 方程为

$$\Delta\varepsilon_p \cdot N_f^z = c$$

其中, z, c 为材料常数。根据图 4 可以得出未辐照 Zr-4 管材

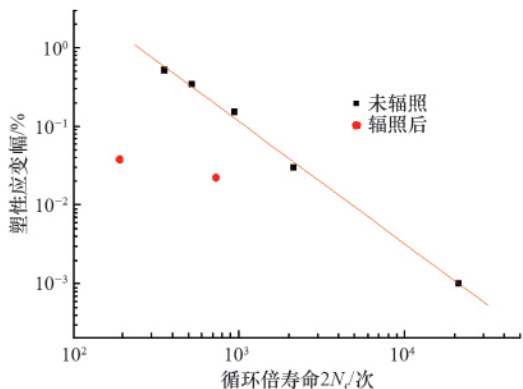


图 4 塑性应变幅与循环倍寿命关系

Fig. 4 Relationship between $\Delta\varepsilon_p$ and $2N_f$

的 Coffin-Manson 方程为

$$\Delta\varepsilon_p \cdot N_f^{1.5245} = 10^{3.1393}$$

由于辐照后的数据点只有两个,不能准确拟合出材料辐照后的 Coffin-Manson 方程,定量得出 Zr-4 管材辐照后的材料常数,但从塑性应变幅与循环倍寿命的关系趋势可以看出,经中子辐照后 Zr-4 包壳管的材料常数变小。

2.3 疲劳断口形貌

选取典型的辐照前后疲劳断口进行扫描电镜 (SEM) 观察,典型照片如图 5 所示,铝合金的疲劳断口由疲劳裂纹源区、裂纹扩展区和断裂区 3 部分组成,在主裂纹附近往往出现二次裂纹,裂纹扩展区主要特征为疲劳辉纹,最后断裂区布满切窝,呈现明显的塑性断口形貌。

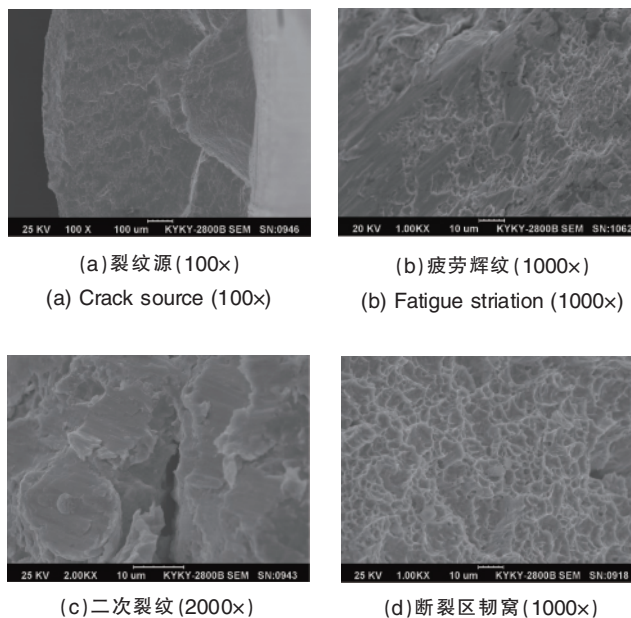


图 5 疲劳断口微观形貌

Fig. 5 Micro topography of fatigue fracture

3 结论

(1) 辐照后的 Zr-4 管材脆化较严重,塑性储备较少,塑性应变幅范围较窄,无法进行系列应变幅下的低周疲劳试验。

(2) Zr-4 管材表现为循环软化特性,中子辐照不改变这一性质。随着循环次数的增加,辐照前后试样的最大应力均呈现下降趋势,随着应变幅的增加,其下降趋势越明显。

(3) 未辐照 Zr-4 管材的循环应力-应变特性为 $\Delta\sigma/2=541.08(\Delta\varepsilon_p/2)^{0.0679}$, Coffin-Manson 方程为 $\Delta\varepsilon_p \cdot N_f^{1.5245} = 10^{3.1393}$ 。

(4) 中子辐照使 Zr-4 包壳管的强度系数和应变硬化指数变大,材料常数变小,疲劳寿命大大降低。

(5) 裂纹扩展区的主要特征为疲劳辉纹,最后断裂区布满切窝,呈现明显的塑性断口形貌。

参考文献 (References)

- [1] 谭军, 应诗浩, 李聪, 等. 铝合金的低周疲劳行为及其机理 [J]. 原子能科学技术, 2005, 39(S1): 18-23.
Tan Jun, Ying Shihao, Li Cong, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2005, 39(S1): 18-23.
- [2] Kobayashi A, Wang L L, Lu W X, *et al.* Macro/ Microscopic approach to dynamic mechanical behavior of zircaloy-4 subjected to tension and compression [M]/Chiem C Y, Kunze H D, Meyer L W, eds. *Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials*. DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1988: 815-822.
- [3] Xiao L, Gu H C. Low cycle fatigue propertiees and microscopic deformation structure of zircaloy-4 in recrystallized and stress-relieved conditions[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1999, 265(1): 213-217.
- [4] Xiao L, Gu H C. Low cycle fatigue behavior and deformation mechanisms of zirconium and zircaloy-4 [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1998, 27(2): 69-74.
- [5] 贾琦, 蔡力勋, 包陈, 等. 铝合金薄壁细管的单调拉伸与低周疲劳试验

研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(6): 712-717.

Jia Qi, Cai Lixun, Bao Chen, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(6): 712-717.

- [6] 苟渊. 氢及氢化物对铝合金力学行为影响 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.

Gou Yuan. Effect of hydrogen and hydride on mechanical behavior of zirconium alloy [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007.

- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15248—2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of Chia. GB/T 15248—2008 The test method for axial loading constant amplitude low-cycle fatigue of metallic materials[S]. Beijing: China Standards Press.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

“2013年中国力学大会”征文



中国力学大会是中国力学界每两年一次的综合性学术盛会, 是广大力学科技工作者学术交流的重要平台。“中国力学大会-2013”将于2013年8月21日在西安举行。会议由中国力学学会、西安交通大学联合主办与承办。

联系电话: 010-82543903, 62559209

电子邮箱: liuyang@cstam.org.cn

大会网站: www.cstam.org.cn/templates/lxxh_1/index.aspx?nodeid=94&page=ContentPage&contentid=171131

·学术动态·

“第一届全国软土工程学术会议”征文



“第一届全国软土工程学术会议”将于2013年11月15-17日在上海召开。本届会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会软土工程专业委员会主办, 由同济大学、上海市力学学会岩土力学专业委员会承办。

征稿范围: 软土强度与变形特性; 软土特性测试技术; 软土基础工程理论设计与施工; 软土地下工程理论设计与施工; 软土地区重大工程实践; 软土工程的其他问题。

论文提交日期: 2013年4月30日

电子邮箱: softsoilcom@163.com

大会网站: <http://geonjut.42137.east-icp.cn/show.asp?id=706>