

文章编号：0258-0926(2020)05-0053-07; doi:10.13832/j.jnpe.2020.05.0053

含双边轴向裂纹 N18 锆合金薄壁管的蠕变裂纹扩展行为研究

李志浩, 包 陈*, 王 博, 刘晓坤

西南交通大学力学与工程学院, 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都, 610031

摘要：通过对含双边轴向裂纹管 (DEAT) 试样及其加载装置进行设计, 基于能量等效和载荷分离原理获得了 DEAT 试样的能量率回路积分 (C^* 积分) 表达式, 从而建立了含轴向裂纹薄壁管的蠕变裂纹扩展速率测试方法。基于此方法, 采用 DEAT 试样完成了 N18 锆合金薄壁管在 350 不同载荷水平下的蠕变裂纹扩展试验。结果表明, 蠕变载荷会显著影响 N18 锆合金的蠕变裂纹扩展速率; 蠕变裂纹扩展可分为稳态扩展和快速扩展 2 个阶段; 蠕变裂纹扩展速率 (da/dt) 与 C^* 积分存在良好的幂律关系, 可用于预测 N18 锆合金管蠕变裂纹扩展行为。

关键词：含双边轴向裂纹管 (DEAT); N18 锆合金薄壁管; 蠕变裂纹扩展; C^* 积分

中图分类号：TG115.5⁺7 **文献标志码：**A **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID)：**



Creep Crack Growth Behavior of N18 Zircaloy Thin-Walled Tubes with Double Edged Axial-Notched Cracks

Li Zhihao, Bao Chen*, Wang Bo, Liu Xiaokun

Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China

Abstract: Through the design of double edged axial-notched tube (DEAT) specimen and fixture, the expression of C^* integral of DEAT specimen was obtained based on the principles of energy equivalent and load separation. A test method for the creep crack growth rate of thin-walled tubes with axial cracks has been established. The creep crack growth tests of N18 zircaloy thin-walled tubes at different load levels at 350 are carried out by using DEAT specimens. The results show that the creep load will significantly affect the creep crack growth rate of N18 zircaloy; the creep crack growth can be divided into two stages: steady state expansion and rapid expansion; the creep crack growth rate (da/dt) and C^* integral have a good power-law relationship, and it can be used to predict the creep crack growth behavior of N18 zircaloy.

Key words: Double edged axial-notched tube (DEAT), N18 zircaloy thin-walled tube, Creep crack growth, C^* integral

0 前 言

锆合金由于热中子吸收截面小以及抗腐蚀性能强等优点而被广泛用作核反应堆中的燃料棒包壳。锆合金包壳管在反应堆内长时间受高温、载

荷和中子辐照等影响会发生蠕变行为, 因此为保证核反应堆的有效运行, 要求锆合金具有良好的抗蠕变变形能力。N18 锆合金薄壁管作为新型核燃料包壳的代表, 研究其堆外蠕变裂纹扩展行为

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2020-02-21

作者简介: 李志浩 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事疲劳断裂方面的研究, E-mail: 18339723936@163.com

*通讯作者: 包 陈, E-mail: bchxx@163.com

对于确保核反应堆长期安全稳定的运行具有重要的意义^[1-3]。

DAVID^[4]研究了蠕变以及蠕变生长对锆合金性能的影响,并对反应堆内燃料组件的设计给予改进意见。王文生^[5]通过对低铌新锆合金板材的蠕变性能曲线和变形亚结构的分析及对微观组织的研究,探讨了低铌新锆合金的蠕变过程及其抗蠕变性能优越的原因。张长义^[6]采用内冲压方式对国产以及法国产两种 M5 锆合金包壳管进行内压蠕变,探究了国产 M5 锆合金包壳管高温蠕变性能。SEOK^[7]通过对锆合金管进行环蠕变和爆破试验,探究了锆合金管环蠕变和爆破的变形机理,结果表明环蠕变和爆破试验得到的环向蠕变数据是等价的。王鹏飞^[8]采用 N36 锆合金包壳管进行蠕变试验,探究了不同应力水平及温度下 N36 锆合金包壳管的蠕变变形机制。对于蠕变裂纹扩展的表征参量,早期学者采用净截面应力(σ_{net})、弹性应力强度因子(K)、弹塑性 J 积分等来关联裂纹扩展速率,但所得结果不够理想^[9]。LANDES 和 BEGLEY^[10]提出在稳态条件下使用能量率回路积分(C^* 积分)作为蠕变断裂参量,预测蠕变裂纹扩展寿命;美国 ASTM 结合众多学者在蠕变裂纹扩展方面的研究成果,制订了 ASTM-E1457 标准^[11],该标准中应用 C^* 积分作为表征蠕变裂纹扩展速率的力学参量。已有研究多集中于锆合金管蠕变机制或其他材料的蠕变裂纹扩展行为,有关锆合金蠕变裂纹扩展行为的研究少见文献报道。

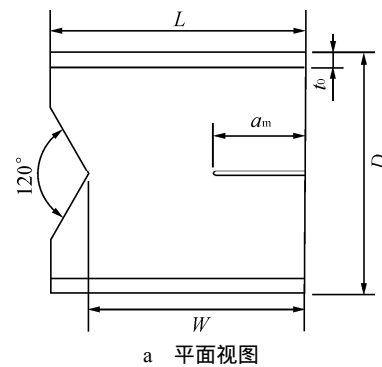
本文拟对国产 N18 锆合金薄壁管在 350 下的蠕变裂纹扩展行为进行研究,探讨不同载荷水平对其蠕变裂纹扩展速率与 C^* 积分之间的规律。

1 试验材料及方法

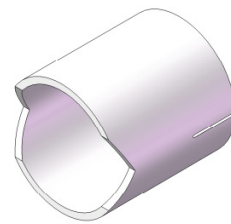
试验材料为 N18 锆合金管材,其化学成分(质量百分比)为:Sn, 1.06%; Nb, 0.25%; Fe, 0.28%; Cr, 0.09%; O, 0.064%; Zr, 余量。N18 锆合金的室温力学性能为:弹性模量(E)为 74 GPa、屈服强度(σ_s)为 300 MPa、抗拉强度(σ_b)为 509 MPa。

根据 N18 锆合金管材的结构特征,将试样设计为含双边轴向裂纹管(DEAT)试样,如图 1 所示。试样总长(L)为 10 mm,韧带长度(W)

为 8.5 mm,壁厚(t_0)为 0.6 mm,外径(D)为 9.5 mm,机加工裂纹长度(a_m)为 1.5 mm。DEAT 试样左侧开了 2 个夹角为 120°的 V 型口,便于试样受拉时韧带尾部的相对自由变形。DEAT 试样蠕变裂纹扩展试验采用销钉式拉伸加载装置进行加载,如图 2 所示。DEAT 试样安装在销钉式拉伸加载装置上并在杠杆式蠕变试验机上完成蠕变裂纹扩展试验。



a 平面视图



b 三维视图

图 1 DEAT 试样示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of DEAT Specimen

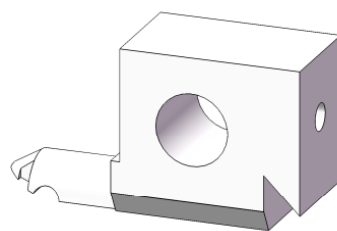


图 2 销钉式拉伸加载装置示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Pin-Loading Tension Fixture

2 DEAT 试样蠕变裂纹扩展测试方法

2.1 DEAT 试样 C^* 积分表达式

表征蠕变裂纹扩展速率的 C^* 积分的表达式为^[11]:

$$C^* = \frac{P\dot{h}_c}{B(W-a)} H\eta \quad (1)$$

$$H = n / (n+1)$$

式中, P 为载荷; \dot{h}_c 为蠕变位移速率; n 为蠕变指数; η 为塑性因子; B 为试样厚度 (2 倍壁厚); a 为实时裂纹长度。

蠕变裂纹扩展的总位移速率 (\dot{h})^[12] 可表示为:

$$\dot{h} = \dot{h}_e + \dot{h}_p + \dot{h}_c \quad (2)$$

式中, \dot{h}_e 为弹性位移速率; \dot{h}_p 为塑性位移速率。

\dot{h}_e 和 \dot{h}_p 可表示为:

$$\dot{h}_e = \dot{a} \left(\frac{\partial h_e}{\partial a} \right)_P + \dot{P} \left(\frac{\partial h_e}{\partial P} \right)_a \quad (3)$$

$$\dot{h}_p = \dot{a} \left(\frac{\partial h_p}{\partial a} \right)_P + \dot{P} \left(\frac{\partial h_p}{\partial P} \right)_a \quad (4)$$

式中, \dot{a} 为蠕变裂纹扩展速率; h_e 为弹性位移; h_p 为塑性位移; \dot{P} 为蠕变施加的应力。

联立式 (2)、式 (3)、式 (4), 且已知 $\dot{P}=0$, 可得:

$$\dot{h} = \dot{h}_c + \dot{a} \left[\left(\frac{\partial h_e}{\partial a} \right)_P + \left(\frac{\partial h_p}{\partial a} \right)_P \right] \quad (5-1)$$

$$C^* = \frac{P}{B(W-a)} H\eta \left\{ \dot{h} - \dot{a} \left[\left(\frac{\partial h_e}{\partial a} \right)_P + \left(\frac{\partial h_p}{\partial a} \right)_P \right] \right\} \quad (5-2)$$

可见, 求解 DEAT 试样 C^* 积分的关键在于确定蠕变裂纹扩展过程中的 a 、 \dot{h}_e 和 \dot{h}_p 。

2.2 \dot{h}_e 的计算

对于 \dot{h}_e , 由能量释放率的相关定义可知:

$$\begin{cases} G = \frac{P^2}{2} \frac{dC}{dA} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \\ G = \frac{K^2}{E'} \end{cases} \quad (6)$$

可求解得到:

$$\left(\frac{\partial h_e}{\partial a} \right)_P = P \left(\frac{\partial h_e / P}{\partial a} \right)_P = P \left(\frac{\partial C}{\partial a} \right) = \frac{2BK^2}{PE'} \quad (7)$$

式中, C 为弹性位移对应的柔度; K 为应力强度因子; 对于平面应力, $E' = E$, 对于平面应变, $E' = E / (1 - \nu^2)$, E 为弹性模量; ν 为泊松比。

CHEN 等^[13-15]和贺屹等^[16]基于能量中值等效原理建立了常见含裂纹结构体的弹性应变能 (U_e) 与 P 以及 P 与 h_e 之间的关系为:

$$\begin{cases} U_e = \frac{P^2}{2Ek_0} \frac{h^*}{A^*} \\ \frac{P}{P_e^*} = \frac{h_e}{h^*} \end{cases} \quad (8)$$

式中, h^* 为特征位移; k_0 为待求的未知参数; A^* 为变形域特征面积; P_e^* 为特征载荷。

结合 J 积分的变形功率定义可得弹性 J 积分的表达式为:

$$J_e = \frac{P^2}{2BEk_0} \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{h^*}{A^*} \right) \quad (9)$$

J_e 与 K 之间存在以下关系:

$$J_e = \frac{K^2}{E'} \quad (10)$$

结合式 (9) 和式 (10) 可以得到构件的 K 因子计算公式:

$$K = \sqrt{\frac{1}{k_0} \frac{P^2 E'}{2BE} \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{h^*}{A^*} \right)} \quad (11)$$

特别地, 令 $h^* = W$, $A^* = WB(b/W)^t$, $P_e^* = k_0 EA^*$, b 为剩余韧带长度, t 为待求的未知参数, 可以计算获得:

$$\frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{h^*}{A^*} \right) = \frac{1}{BW} \frac{t(b/W)^{t-1}}{[(b/W)^t]^2} \quad (12)$$

将式 (12) 代入式 (11), 则得到 DEAT 试样的 K 因子公式为:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{2W}} \sqrt{\frac{t}{k_0}} (1-a/W)^{-\left(\frac{t+1}{2}\right)} \quad (13)$$

K 因子可由线弹性有限元计算确定。

采用 ANSYS14.5 模拟 DEAT 试样的加载过程。固定试样总长度为 10 mm, 设定不同裂纹长度, $a/W=0.2\sim 0.7$, 管直径及厚度与 N18 铝合金管保持一致。

考虑到试样几何形状、裂纹和加载结构的对称性, 建立四分之一的试样有限元模型, DEAT 试样的韧带部分被固定在 Y 方向上, 在 X 和 Z 方向是自由的。试样与加载装置的有限元网格划分如图 3 所示, 裂纹尖端附近进行了网格细化。试样和加载装置均采用 SOLID185 单元, 加载销与试样之间采用刚柔接触模型。

由式 (8) 可得, DEAT 试样在线弹性条件下的 $P-h_e$ 关系为:

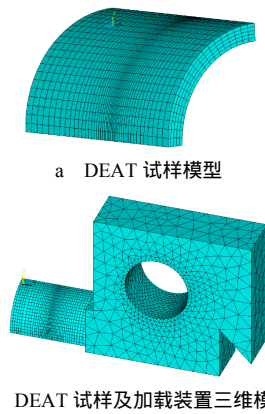


图3 DEAT 试样及加载装置有限元模型
Fig. 3 Finite Element Model of DEAT Specimen and Fixture

$$\frac{P}{EWB\left(\frac{b}{W}\right)^t} = k_0 \frac{h_e}{W} \quad (14)$$

对式(14)移项可得:

$$1/C = \frac{dP}{dh_e} = k_0 EB \left(\frac{b}{W}\right)^t \quad (15)$$

式中, 参数 k_0 、 t 可由 $1/C \sim b/W$ 关系确定。

图4为DEAT试样在不同 a/W 下的 $P-h_e$ 关系, 可见不同 a/W 下的 $P-h_e$ 曲线均符合良好的线性关系, 其斜率即为 C 。图5为DEAT试样的 $1/C \sim b/W$ 关系曲线, 采用式(15)拟合曲线可得到参数 $k_0=0.0066$ 、 $t=1.7031$ 。

2.3 h_p 的计算

包陈等^[17-21]基于载荷分离理论提出了修正的规则化法, 将无量纲处理后的载荷 P 假设为2个相互独立的几何函数 $g(a/W)$ 和变形函数 $f(h_p/W)$ 的乘积, 即:

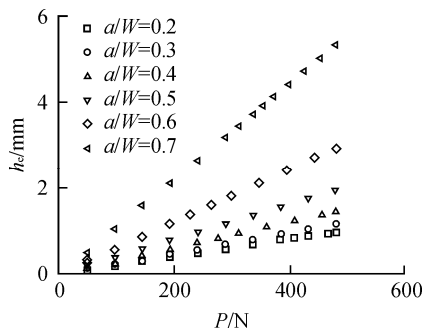


图4 DEAT 试样在不同 a/W 下的 $P-h_e$ 关系曲线
Fig. 4 $P-h_e$ Relationship of DEAT Specimen with Different a/W

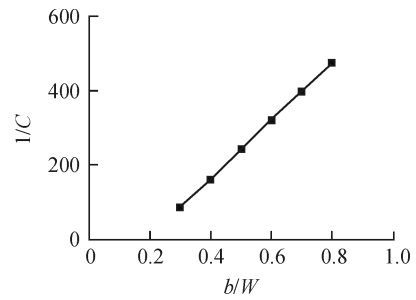


图5 DEAT 试样 $1/C \sim b/W$ 关系曲线
Fig. 5 $1/C \sim b/W$ Relationship of DEAT Specimen

$$\Pi = \frac{P}{\sigma_0 BW} = g\left(\frac{a}{W}\right) \cdot f\left(\frac{h_p}{W}\right) = \left(1 - \frac{a}{W}\right)^m \cdot f\left(\frac{h_p}{W}\right) \quad (16)$$

式中, Π 为载荷 P 的无量纲量; σ_0 为参考屈服应力; m 为待定参数; h_p 为施力点塑性位移。

采用 $g(a/W)$ 对 Π 作规则化处理即可得到规则化载荷 (Π_N) 的表达式为:

$$\Pi_N = \frac{\Pi}{g\left(\frac{a}{W}\right)} = \frac{\Pi}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^m} = f\left(\frac{h_p}{W}\right) \quad (17)$$

而 Π_N 和 h_p 之间满足^[22]:

$$h_p / W = \beta (\Pi_N)^N \quad (18)$$

式中, β 为常数; N 为材料应变硬化指数。

联立式(16)、式(17)、式(18)可得:

$$P = \sigma_0 WB \left(1 - \frac{a}{W}\right)^m k_1 \left(\frac{h_p}{W}\right)^{1/N} \quad (19)$$

式中, $k_1 = \beta^{-(1/N)}$; m 和 k_1 为待定参数, 可通过弹塑性有限元计算确定。

图6为N18 锆合金 DEAT 试样 Π_N 与 h_p/W 归一化曲线, 根据图6可获得 $m=2.19$, $k_1=0.70$ 。

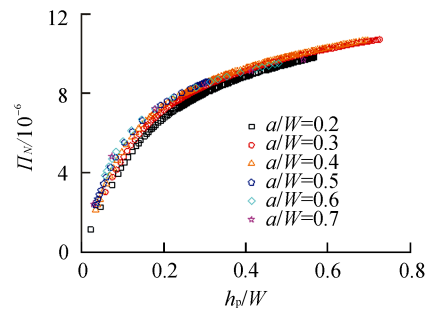


图6 N18 锆合金管 DEAT 试样 Π_N 与 h_p/W 关系曲线
Fig. 6 Curve of Π_N versus h_p/W of DEAT Specimen for N18 Zircaloy Tube

整理式 (19)，可得：

$$\left[\frac{\partial \left(\frac{h_p}{W} \right)}{\partial \left(\frac{a}{W} \right)} \right]_P = mN \left(\frac{P}{k_1 W B \sigma_0} \right)^N \times \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{-(mN+1)} = \left(\frac{\partial h_p}{\partial a} \right)_P \quad (20)$$

将式 (8)、式 (20) 代入式 (5-1)，从而有：

$$\dot{h}_c = \dot{h} - \dot{a} \left[\frac{2BK^2}{PE'} + mN \left(\frac{P}{k_1 W B \sigma_0} \right)^N \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{-(mN+1)} \right] \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (5-2)，可得

$$C^* = \frac{P}{B(W-a)} \frac{n}{n+1} \eta \times \left[\dot{h} - \dot{a} \frac{2BK^2}{PE'} - \dot{a} mN \left(\frac{P}{k_1 W B \sigma_0} \right)^N \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{-(mN+1)} \right] \quad (22)$$

已有研究表明，式 (22) 中蠕变指数 n 可由 R-O 模型中的应力硬化指数 N 近似代替^[23]；塑性因子 η 可由几何函数中的幂指数 m 近似代替^[24]。

2.4 DEAT 试样实时裂纹长度监测

在蠕变裂纹扩展的试验中，获得试样的裂纹长度是试验的关键。本文采用直流电位法^[25]测量裂纹长度。在蠕变裂纹扩展试验过程中，随着裂纹的扩展，试样导电截面不断缩小，电阻不断增加，在恒定的电流下，裂纹面两端的电位随裂纹尺寸的增加而增加，因此，可利用裂纹面两端的电位差与裂纹扩展长度之间的函数关系，将所测量的电位值转换成等效的裂纹长度。直流电位法的测量电路包括两部分：电源回路，以提供一个恒定的电流；电位测量回路，要求其稳定，并有较高的灵敏度。由于 DEAT 试样尺寸较小，导致直流电位法导线焊接具有很大难度，经过不断探索，本文最终采用氩弧焊技术完成直流电位法导线的焊接工作。直流电位法测量蠕变裂纹长度电路如图 7 所示。

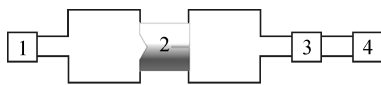


图 7 直流电位法电路图

Fig. 7 Circuit Diagram of DC Potential Method
1—直流恒流电源；2—DEAT 试样；3—数字万用表；4—数据采集装置

按照 ASTM E1457 标准，可根据裂纹长度与测量电位值之间的函数关系式计算蠕变裂纹长度：

$$a = \left[(a_f - a_0) \frac{V - V_0}{V_f - V_0} \right] + a_0 \quad (23)$$

式中， a_0 为初始裂纹长度； a_f 为终止裂纹长度； V 为裂纹端实时电压； V_0 为裂纹端初始电压； V_f 为裂纹端终止电压。

3 结果与分析

选用 5 个 DEAT 试样完成 N18 铝合金薄壁管在 350 下的蠕变裂纹扩展试验。试验载荷及蠕变扩展时间如表 1 所示。

表 1 DEAT 试样 350 蠕变裂纹扩展试验结果

Tab. 1 Creep Crack Growth Test Results of DEAT Specimen at 350

试样编号	试验载荷/N	a_0 /mm	a_f /mm	蠕变扩展时间/h
1#	320	2.46	5.73	11.37
2#	340	2.36	5.68	5.58
3#	310	2.57	5.24	24.35
4#	320	2.44	5.13	13.41
5#	260	2.41	4.96	211.88

图 8 为 DEAT 试样的裂纹扩展长度与时间的关系曲线 (a/W 为无量纲裂纹长度， t/t_{max} 为无量纲时间)。从图 8 可以看出，蠕变裂纹扩展可分为 2 个阶段：蠕变裂纹稳态扩展阶段，此阶段内随着时间的增加，蠕变裂纹长度呈缓慢地线性增长，而蠕变裂纹扩展速率基本保持不变，这一阶段占据试样蠕变裂纹扩展寿命的很大一部分；蠕变裂纹快速扩展阶段，此阶段内蠕变裂纹长度迅速增加，裂纹扩展速率快速增大，直至试样失稳断裂。

裂纹扩展长度与时间的曲线反映了不同阶段有不同的裂纹扩展机理。对于稳态扩展阶段，试

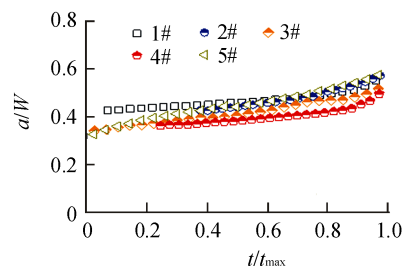


图 8 N18 铝合金管 a/W 与 t/t_{max} 曲线

Fig. 8 Curves of a/W versus t/t_{max} for N18 Zircaloy Tubes

样裂纹尖端在载荷作用下慢慢产生蠕变变形,当蠕变变形达到试样的蠕变断裂韧性时,裂纹尖端部分发生断裂,裂纹逐渐向前扩展;对于快速扩展阶段,由于裂纹长度不断增加,而作用于试样上的载荷不变,剩余韧带面积不断减少,真实应力不断增大,裂纹快速扩展直至试样失稳断裂。

图9为N18 锆合金 DEAT 试样蠕变裂纹扩展速率 (da/dt) 与 C^* 积分的关联曲线。可以看出, C^* 积分与 da/dt 在双对数坐标下有好的线性关联。不同试验载荷下的蠕变裂纹扩展曲线处于不同阶段,试验载荷越大,蠕变裂纹扩展速率越高。进一步分析表明,不同试验载荷下的 C^* 积分与蠕变裂纹扩展速率 da/dt 之间满足以下关系:

$$\frac{da}{dt} = 0.002(C^*)^{0.728} \quad (24)$$

图10为N18 锆合金 DEAT 试样蠕变裂纹扩展试验的断口照片。可以看出,预制疲劳裂纹区、

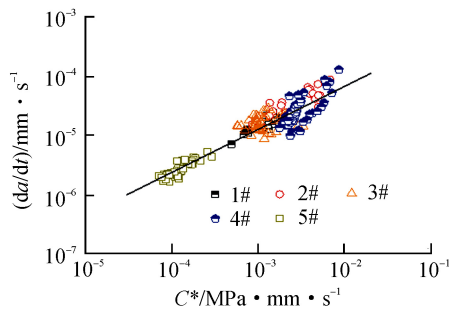


图9 N18 锆合金管蠕变裂纹扩展曲线

Fig. 9 Creep Crack Growth Curves for N18 Zircaloy Tubes

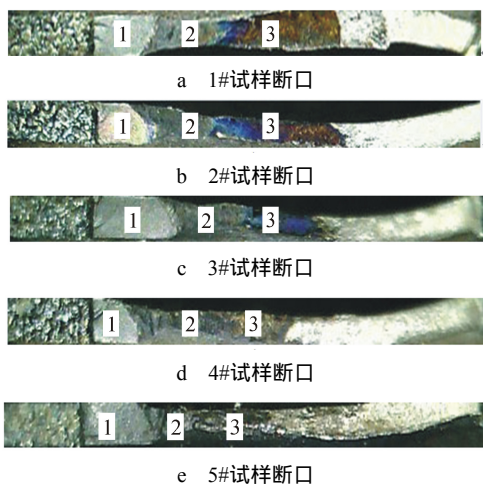


图10 N18 锆合金管蠕变裂纹扩展断口照片

Fig. 10 Fracture Surface of Creep Crack Growth for N18 Zircaloy Tubes

1—预制疲劳裂纹区; 2—蠕变裂纹扩展区; 3—瞬断区

蠕变裂纹扩展区与瞬断区分界明显。由于 DEAT 试样夹具系统较为复杂,其在蠕变加载过程中的对中性调节存在较大难度,故试样预制疲劳裂纹和扩展裂纹前沿均存在一定的不平直性。

4 结论

本文采用 DEAT 试样完成了 N18 锆合金薄壁管在 350 且不同载荷水平下的蠕变裂纹扩展试验,得到如下结论:

(1) 本文建立了基于 DEAT 试样的蠕变裂纹扩展试验方法,可用于含轴向裂纹金属薄壁管的蠕变裂纹扩展行为研究。

(2) 蠕变载荷对 N18 锆合金的蠕变裂纹扩展速率产生显著影响。蠕变裂纹扩展可分为稳态扩展和快速扩展 2 个阶段。

(3) N18 锆合金在不同载荷下的蠕变裂纹扩展 da/dt 与 C^* 积分曲线满足一致的幂律关系。

参考文献:

- [1] 彭继华, 李文芳, BECHADE J L, 等. 织构对先进锆合金蠕变性能各向异性的影响[J]. 稀有金属, 2008, 32(1): 1-6.
- [2] 包陈, 蔡力勋, 谭军, 等. N18 锆合金的单轴拉伸和应力松弛性能[J]. 原子能科学技术, 2009(2): 151-156.
- [3] 沈复中, 马功勋, 杨旭, 等. 1Cr0.5Mo 钢焊接接头蠕变裂纹扩展速率的评定[J]. 材料工程, 998(4): 12-13.
- [4] FRANKLIN D G, ADAMSON R B. Implications of zircaloy creep and growth to light water reactor performance[J]. Journal of Nuclear Materials, 1988, 159: 12-21.
- [5] 王文生, 李中奎, 张建军, 等. 低铈新锆合金的抗蠕变性能[J]. 原子能科学技术, 2005, 39 (S0): 14-17.
- [6] 张长义, 徐远超, 佟振峰, 等. M5 合金包壳管内压蠕变性能[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2006(1): 221-221.
- [7] SEOK C S, MARPLE B, SONG Y J, et al. High temperature deformation characteristics of zircaloy tubing via ring-creep and burst tests[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(3):599-602.
- [8] 王鹏飞, 赵文金, 陈乐, 等. N36 锆合金包壳管的高温蠕变行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2015(5): 1149-1153.
- [9] 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.
- [10] LANDES J D, BEGLEY J A. A Fracture Mechanics Approach to Creep Crack Growth[J]. ASTM Special Technical Publications, 1976, 590:128-148.
- [11] American Society of Testing and Materials. Standard test methods for measurement of creep crack growth rates in metals: ASTM Standard E1457-00[S]. Philadelphia, USA: Annual Book of ASTM Standards,

- 2000: 944-957.
- [12] SAXENA A, LANDES J D. Characterization of creep crack growth in metals[C]. New Delhi: Springer, 1984.
- [13] CHEN H, CAI L X. Theoretical model for predicting uniaxial stress-strain relation by dual conical indentation based on equivalent energy principle[J]. Acta Materialia, 2016(121): 181-189.
- [14] CHEN H, CAI L X. Unified ring-compression model for determining tensile properties of tubular materials[J]. Materials Today Communications, 2017(13): 210-220.
- [15] CHEN H, CAI L X. Unified elastoplastic model based on strain energy equivalence principle[J]. Applied Mathematical Modelling, 2017(52): 664-671.
- [16] 贺屹, 蔡力勋, 陈辉. 基于能量等效原理的 K 因子、柔度统一模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 98-106.
- [17] 蔡力勋, 包陈. 用于延性断裂韧性测试的载荷分离方法与应用[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 868-875.
- [18] 包陈, 蔡力勋, 石凯凯. 无量纲载荷分离法在延性断裂韧性测定中的应用[J]. 固体力学学报, 2013, 34(1): 20-30.
- [19] BAO C, CAI L X, SHI K K, et al. Improved normalization method for ductile fracture toughness determination based on dimensionless load separation principle[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2015, 28(2): 168-181.
- [20] 巫元俊, 包陈, 何广伟, 等. 用于 J 阻力曲线测试的载荷分离直接标定法[J]. 航空学报, 2017, 38(10): 159-165.
- [21] BAO C, CAI L X, HE G W, et al. A method to evaluate ductile fracture toughness based on load separation principle[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019, 42(1): 178-186.
- [22] LANDES J D, HERRERA R. A new look at J - R curve analysis[J]. International Journal of Fracture, 1988, 36(1): R9-R14.
- [23] DAVIES C. Experimental evaluation of the J or C^* parameter for a range of cracked geometries[J]. Journal of ASTM International, 2006(4): 20.
- [24] ERNST H A, PARIS P C, LANDES J. Estimations on J -integral and tearing modulus T from a single specimen test record[J]. ASTM Special Technical Publications, 1981(743): 476-502.
- [25] JOHNSON H H. Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth[J]. Journal of Materials Research and Standards 5.1, 1965(5): 442-445.

(责任编辑：周 茂)