

N18 锆合金的单轴拉伸和应力松弛性能

包 陈¹, 蔡力勋¹, 谭 军², 贾 琦¹, 郑国云¹

(1. 西南交通大学 应用力学与工程系, 四川 成都 610031;

2. 中国核动力研究设计院 核燃料及材料国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:本工作试验研究 20~700 °C、不同应变加载速率下 N18 锆合金的单轴拉伸和应力松弛性能。结果表明, N18 合金的单轴拉伸应力-应变曲线出现明显的屈服拐点, 且温度低于 500 °C 时呈现后继屈服强化, 高于 500 °C 后又呈后继屈服软化。除横向试样的断面收缩率高于轧向试样外, 试样取向对 N18 合金的单轴性能影响不大。温度低于 300 °C 时, N18 合金的应变速率敏感性受温度的影响不大; 350 °C 时, N18 合金的敏感系数达到最小值, 其后, 对应变速率的敏感性随着温度的升高逐渐增强。N18 合金在不同温度和应变水平下均产生明显的应力松弛。在 300 °C 以内, 最大应力松弛程度受温度影响较小, 且随应变水平的增大明显降低; 在 350~550 °C 范围内, 应变水平越高, 对应的最大应力松弛程度越大; N18 合金的最大松弛程度在 350 °C 附近出现最小值。在 350~450 °C 范围内, N18 合金表现出明显的动态应变时效特性。

关键词: N18 锆合金; 单轴性能; 应变速率敏感性; 应力松弛; 动态应变时效

中图分类号: TL341

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)02-0151-06

Properties of Uniaxial Tension and Stress Relaxation of Zircaloy N18

BAO Chen¹, CAI Li-xun¹, TAN Jun², JIA Qi¹, ZHENG Guo-yun¹

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Materials,

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: A series of uniaxial tension and relaxation tests were completed at temperatures from 20 °C to 700 °C. The results show that, the tensile constitutive curves of the alloy present obvious yield breaks, subsequent yield hardening in the temperature range from 20 °C to 500 °C and softening in the range from 500 °C to 700 °C. The elastic modulus, strength and percentage elongation of the alloy in the rolling direction are closed to those of the alloy in the transverse direction, but percentage reduction of area of the uniaxial specimen in the transverse direction is somewhat large. With increase of temperature, elastic modulus and strength of the alloy decrease, and percentage elongation and percentage reduction of area increase. It is seen that the percentage elongation

has a sudden reduction in the temperature range from 350 °C to 450 °C. The elevated temperature makes properties of the alloy to have strong sensitivity of strain rate under strain loading. The sensitivity of strain rate is slightly affected by the variety of temperature below 300 °C and the alloy behaves least sensitivity to strain rate at 350 °C. Subsequently, the sensitivity of strain rate enhances with increase of temperature. The influence of temperature on stress relaxation effect of N18 alloy is outstanding. The influence of the variety of temperature on the maximum of stress relaxation is unobvious below 300 °C, and with increase of strain level the maximum of stress relaxation reduces obviously. Conversely, the strain level is higher, the extent of the maximum of stress relaxation is larger in the temperature range from 350 °C to 550 °C. About 350 °C, the maximum of stress relaxation reaches minimum value. In the range from 350 °C to 450 °C, N18 alloy presents characteristic of dynamic strain aging obviously.

Key words: zircaloy N18; uniaxial property; sensitivity of strain rate; stress relaxation; dynamic strain aging

由于锆合金的热中子吸收截面小,并具有优异的耐高温水腐蚀性能、良好的综合力学性能和理想的热导率,因此,锆合金被用作核电站水冷动力堆核燃料元件的包壳材料和堆芯的其他结构材料。已往的工作多集中于对锆合金循环变形和疲劳行为的研究^[1-5],而对 N18 新锆合金的单轴力学性能缺乏系统的研究。本工作对 20~700 °C、不同应变加载速率下 N18 合金的单轴拉伸和应力松弛进行研究。

1 试验

1.1 试验材料与试样

试样材料为 N18 新锆合金,其化学成分(质量分数,%)为:Sn, 1.06; Nb, 0.25; Fe, 0.28; Cr, 0.09; O, 0.064; 其余成分为 Zr。再结晶态下,经 580 °C 退火热处理后的 N18 合金被轧制成板材,然后将板材按轧向和与轧制方向垂直的横向加工成矩形截面的等直拉伸试样,其等直部分宽 8 mm,厚 1.4 mm。

1.2 试验设备

试验设备为美国 MTS809 (25 kN) 电液伺服材料试验机,其控制系统为 TestStar II,应用软件为 MTS790.10/SX。采用高温应变引伸计 MTS632.68F-08 (标距为 25 mm,量程为 -10%~10%) 测量应变。试验机载荷传感器和应变引伸计精度为 0.5 级。高温控制采用 MTS653 高温炉及其温控系统。通过计算机对

试验过程进行控制和实时数据采集。

1.3 试验方法

本工作对 N18 合金板材试样在 20~700 °C 范围内的恒应变加载速率单轴拉伸、应变加载速率单轴拉伸和应力松弛等力学行为进行试验研究。其中,应力松弛试验采用应变控制,在不同应变值下保持 15 min,使松弛应力接近饱和。试验方法及程序列于表 1。

2 试验结果及讨论

2.1 恒应变加载速率单轴拉伸性能

2.1.1 应力-应变曲线 在恒应变速率 (0.001 s^{-1}) 单轴拉伸下, N18 合金各温度下的应力-应变曲线示于图 1。由图 1 可以看到,在 20~350 °C 范围内,轧向试样和横向试样的应力-应变曲线呈现明显的屈服拐点;在 20~450 °C 范围内,两类试样表现出明显的后继屈服强化,500 °C 后则表现出软化现象;在 350~450 °C 范围内,轧向试样和横向试样的应力-应变曲线都很接近,且其后继强化程度明显比 350 °C 以下的高。

2.1.2 试样取向对 N18 合金单轴拉伸性能参数的影响 在恒定应变速率 (0.001 s^{-1}) 单轴拉伸下,图 3、4 分别显示了轧向试样和横向试样的弹性模量 E 、屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 、延伸率 δ 以及断面收缩率 ψ 等随温度 t 的变化情况。

表 1 N18 合金单轴力学行为试验方法及程序

Table 1 Uniaxial experiment of N18 zirconoy

试样取向	试样数量	试验方法	试验程序	试验温度/℃
轧向	12	恒应变速率单拉	先应变控制(应变速率 0.001 s^{-1})到 9%,然后用位移控制试验直至试样拉断(位移速率 0.03 mm/s ,相应应变速率不变)	20、100、200、300、400、500、600、700、350、450
	12	变应变速率单拉	先应变控制: $1\%(4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}) \rightarrow 2\%(4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}) \rightarrow \dots \rightarrow 9\%(4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}) \rightarrow 9.2\%(4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1})$,换成位移控制(速率 0.011 mm/s)直至试样拉断	20、100、200、300、400、500、600、700、350、450、550
横向	11	恒应变速率单拉	先应变控制(应变速率 0.001 s^{-1})到 9%,然后用位移控制试验直至试样拉断(位移速率 0.03 mm/s ,相应应变速率不变)	20、100、200、300、400、500、600、700、350、450
	9	应力松弛	应变控制: $2\%(15 \text{ min}) \rightarrow 5\%(15 \text{ min}) \rightarrow 8\%(15 \text{ min}) \rightarrow 9\%$,应变加载速率 0.002 s^{-1}	20、100、200、300、400、500、600、350、450

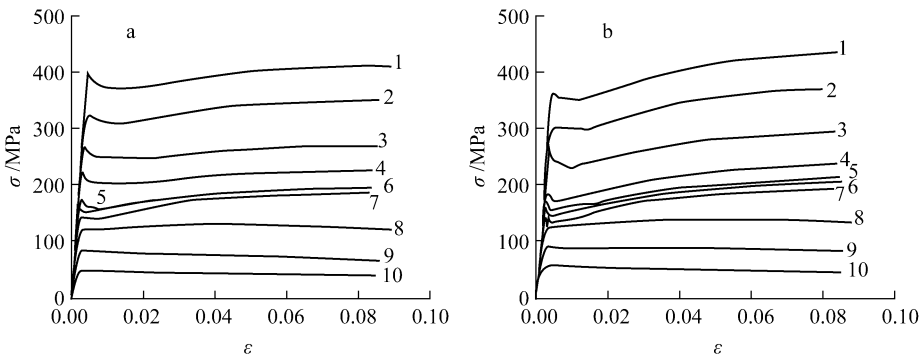


图 1 N18 合金轧向(a)和横向(b)试样单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of zirconoy N18 in rolling direction (a) and transverse direction (b) on uniaxial tension

1—20 ℃; 2—100 ℃; 3—200 ℃; 4—300 ℃; 5—350 ℃;
6—400 ℃; 7—450 ℃; 8—500 ℃; 9—600 ℃; 10—700 ℃

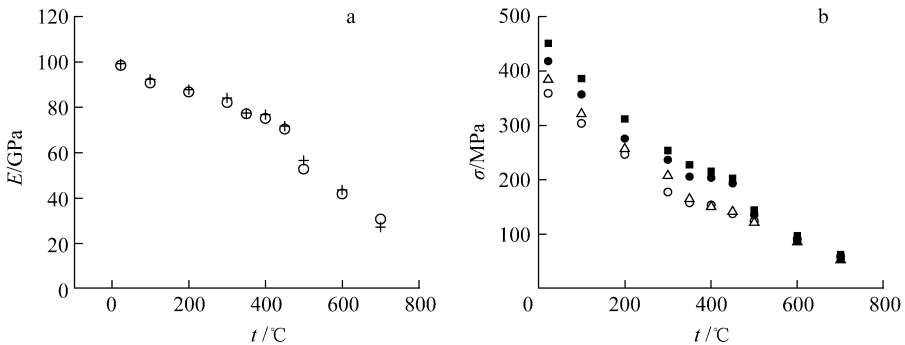


图 2 试样取向及温度对 N18 合金弹性模量(a)和强度(b)的影响

Fig. 2 Influence of specimen direction and temperature on elastic modulus (a) and tensile strength (b) of zirconoy N18

a: ○——轧向试样; +——横向试样

b: ○——轧向试样, σ_s ; △——横向试样, σ_s ; ■——轧向试样, σ_b ; ●——横向试样, σ_b

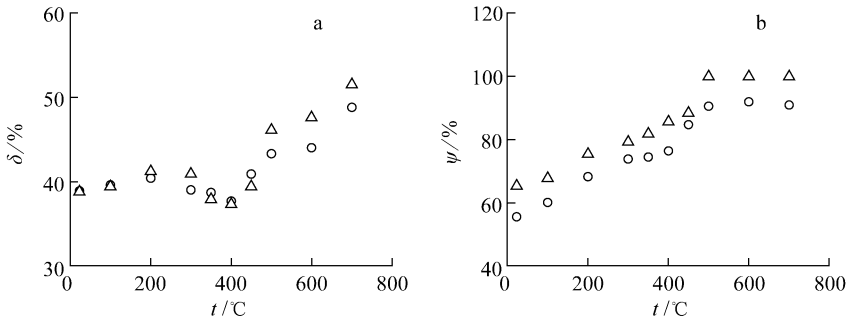


图3 试样取向及温度对 N18 合金延伸率(a)和断面收缩率(b)的影响

Fig. 3 Influence of direction and temperature on specific elongation (a) and reduction in cross-section (b) of zircaloy N18

○——轧向试样;△——横向试样

由图 2a 可知,随着温度的升高,N18 合金的弹性模量不断降低,且在 450 °C 后,其下降速率加快;同时,轧向试样和横向试样在各温度下的弹性模量非常接近,其最大相对偏差不超过 10%,表明试样的取向对 N18 合金的弹性模量影响不大。从图 2b 可看出,N18 合金的屈服强度和抗拉强度均随温度的升高而下降,但在 350~450 °C 范围内,其下降速度稍缓;温度在 400 °C 以上时,试样的取向对 N18 合金的屈服强度影响很小;当温度低于 300 °C 时,轧向试样的抗拉强度略高于横向试样的。

图 3 表明,随着温度的升高,N18 合金的延伸率逐渐增大,但在 350~450 °C 范围内,出现延伸率突然下降再回升的现象,且在 400 °C 时,延伸率最小。从图 3 中还可看到,在 20~450 °C 范围内,试样取向对延伸率的影响很小,500 °C 后,横向试样的延伸率比轧向试样的高;随着温度的升高,N18 合金的断面收缩率不断增大,500 °C 后,试样已几乎被拉尖,且横向试

样的断面收缩率总是比轧向试样的高。

2.2 变应变加载速率单轴拉伸性能

2.2.1 应变速率对弹性模量和屈服强度的影响 取表 1 中所列轧向试样恒定应变速率工况和变应变速率工况的弹性模量和屈服强度进行比较,结果示于图 4。由图 4 可知,应变加载速率对 N18 合金的弹性模量的影响很小;在 300~500 °C 范围内,两种应变加载速率下的屈服强度非常接近,而在其他温度下,N18 合金在较高应变加载速率时的屈服强度比较低应变加载速率时的略高。

2.2.2 N18 钼合金对应变速率的敏感性 根据表 1 所列变速率单轴拉伸试验工况下的数据,可绘制各温度下的应力-应变曲线(图 5)。

由图 5 可见,在应变加载速率变换的时刻,应力产生突变。同时还可以看到,各温度下的应力突变程度不尽相同。采用应变速率敏感性系数 m 来描述应力突变程度随温度的变化。如图 6 所示,定义应变速率敏感性系数 $m^{[6]}$ 为:

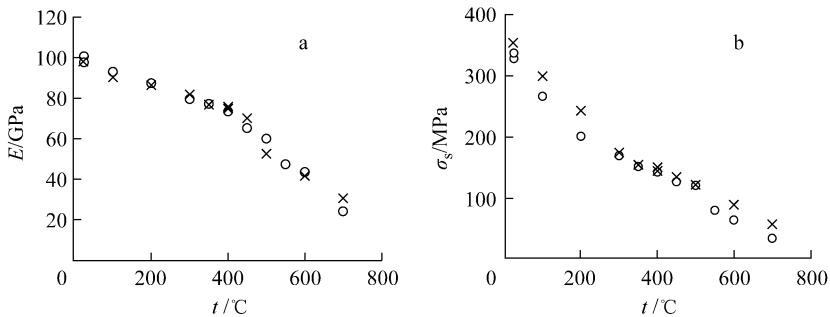


图4 应变加载速率对 N18 合金弹性模量和屈服强度的影响

Fig. 4 Influence of strain rate on elastic modulus and yield strength of zircaloy N18

○——0.000 04 s⁻¹;×——0.001 s⁻¹

$$m = \frac{\ln(\sigma_1/\sigma_2)}{\ln(\dot{\epsilon}_1/\dot{\epsilon}_2)} \quad (1)$$

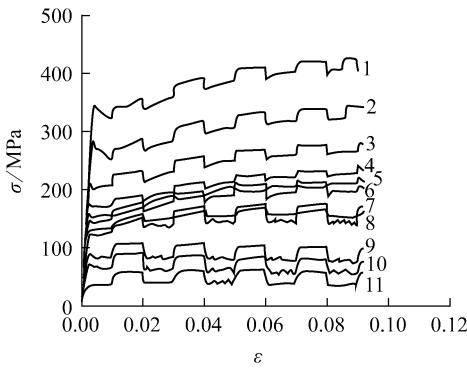


图 5 N18 合金变速率单轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of zircaloy N18 at various strain rate on uniaxial tension with strain rate alternate transforming

1—20 °C; 2—100 °C; 3—200 °C; 4—300 °C; 5—350 °C; 6—400 °C; 7—450 °C; 8—500 °C; 9—550 °C; 10—600 °C; 11—700 °C

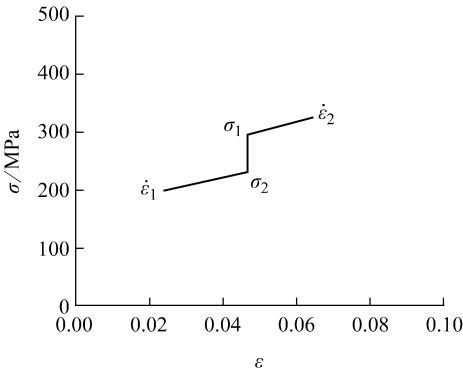


图 6 应变率敏感系数计算示意图

Fig. 6 Scheme of sensitivity

for strain rate coefficient calculation

利用式(1),以 0.05 应变量对应的应变率敏感系数 m 为例,可绘制应变率敏感性随温度变化的关系曲线(图 7)。由图 7 可见,在 20~300 °C 范围内,N18 合金的 m 受温度变化的影响不大,在 350 °C 时, m 达到最小值。此后,N18 合金对速率的敏感性随着温度的升高逐渐增强。

2.3 N18 合金的应力松弛效应

图 8 为 N18 合金各温度下的应力松弛曲线。由图 8 可见,在松弛的初始阶段,应力迅速下降,而在随后较长一段时间内,应力缓慢下降

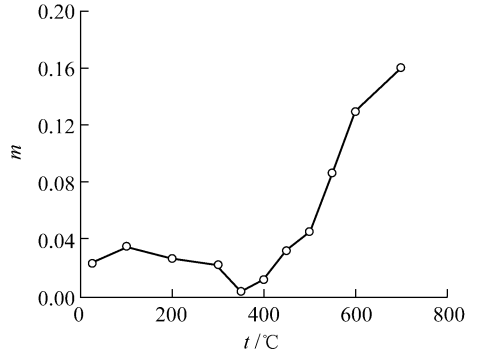


图 7 N18 合金不同温度下的应变率敏感性
Fig. 7 Sensitivity of strain rate for zircaloy N18 at different temperatures

直至饱和;随着温度的变化,各级应变水平下的最大松弛程度 λ 发生变化。图 9 表明,当温度低于 300 °C 时,最大应力松弛程度受温度影响较小,且 2% 应变水平下的最大松弛程度明显高于另外两个应变水平下的最大松弛程度;在 350~550 °C 范围内,应变水平越高,对应的最大应力松弛程度越大;600 °C 时,3 种应变水平下的最大应力松弛程度接近;在 350 °C 附近,N18 合金的最大松弛程度出现最小值。

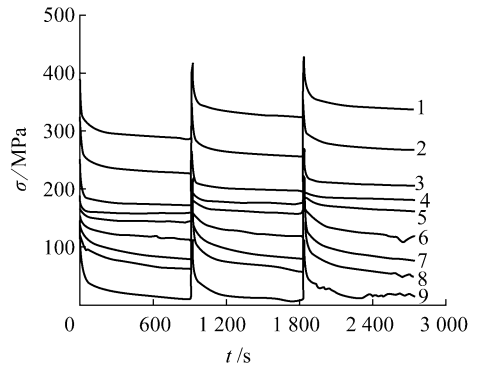


图 8 N18 合金应力松弛曲线

Fig. 8 Stress relaxation curves of zircaloy N18

1—20 °C; 2—100 °C; 3—200 °C; 4—300 °C; 5—350 °C; 6—400 °C; 7—450 °C; 8—500 °C; 9—600 °C

2.4 N18 合金的动态应变时效特性

从图 1 不难看出,轧向试样和横向试样在 350~450 °C 范围内的应力-应变曲线均很接近;从图 2 也可看到,在 350~450 °C 范围内,N18 合金的屈服强度和抗拉强度随温度下降的

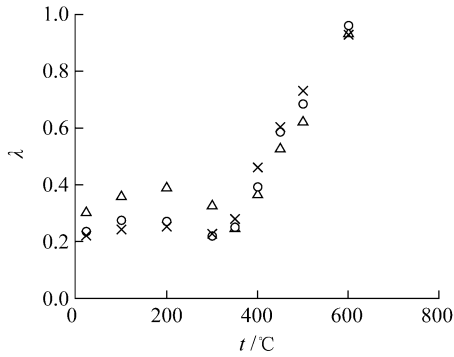


图9 N18合金不同温度下的应力松弛程度

Fig. 9 Stress relaxation curves of zircaloy N18

△——2%应变水平；○——5%应变水平；×——8%应变水平

速度明显减缓；另外，在 350 °C 时，N18 合金的 m 最小，其值接近于 0 (图 6)。上述现象表明，在 350~450 °C 范围内，N18 合金表现出明显的动态应变时效特性^[7]。在该温度范围内，N18 合金的单轴性能以及松弛性能表现异常，呈现诸如不同应变速率下的屈服强度十分接近、延伸率突然下降、应变速率敏感系数和最大松弛应力程度出现最小值等现象。

3 结论

1) 在恒应变速率单轴拉伸过程中，N18 合金的应力应变曲线呈现明显的屈服拐点；温度低于 500 °C 时，表现出后继屈服强化，高于 500 °C 时，表现出后继屈服软化；在 350~450 °C 范围内的应力-应变曲线均很接近。试样取向对 N18 合金的单轴性能的影响不大。

2) 温度低于 300 °C 时，N18 合金对应变速率的敏感性受温度变化的影响不大；350 °C 时，其敏感系数达到最小值，其后，对应变速率的敏感性随着温度的升高逐渐增强。

3) N18 合金在各温度和各级应变水平下均产生明显的应力松弛。在 300 °C 以内，其最大应力松弛程度受温度影响较小，且最大应力松弛程度随应变水平的增大明显降低；在 350~550 °C 范围内，应变水平越高，对应的最大应力松弛程度越大；600 °C 时，3 种应变水平下的最大应力松弛程度接近；N18 合金的最大松弛程度在 350 °C 附近出现最小值。

4) N18 合金在 350~450 °C 范围内表现出明显的动态应变时效特性。

参考文献：

- [1] TAN Jun, YING Shihao, LI Cong, et al. Effect of zirconium hydrides on cyclic deformation behavior of Zr-Sn-Nb alloy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 312: 257-261.
- [2] PIERRONO N, KOSS D A, MOTTA A T. Tensile specimen geometry and the constitutive behavior of zircaloy-4 [J]. Scripta Materialia, 2006, 55: 513-516.
- [3] 陈洪军, 蔡力勋, 李聪, 等. N18 合金薄壁管高温应变循环与疲劳行为研究[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(4): 438-443.
CHEN Hongjun, CAI Lixun, LI Cong, et al. Study on cyclic behaviour and strain fatigue of N18 alloy thin-walled tubes at elevated temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(4): 438-443(in Chinese).
- [4] 叶裕明, 蔡力勋, 李聪. Zr-4 合金小试样高温疲劳行为研究[J]. 核动力工程, 2006, 27(3): 39-44.
YE Yuming, CAI Lixun, LI Cong. Study on fatigue behaviors of Zr-4 alloy based on small specimens at elevated temperature[J]. Nuclear Power Engineering, 2006, 27(3): 39-44(in Chinese).
- [5] 蔡力勋, 范宣华, 李聪, 等. 高温对 Zr-4 合金低循环行为的影响[J]. 航空材料学报, 2004, 24(5): 1-6.
CAI Lixun, FAN Xuanhua, LI Cong, et al. Effects of the elevated temperature on the low cycle behaviors of zircaloy-4[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(5): 1-6(in Chinese).
- [6] 张晓华, 邱晓刚, 卢国清, 等. 应变速率敏感系数 (m 值) 测试方法探讨[J]. 钢铁钒钛, 2001, 22(1): 63-68.
ZHANG Xiaohua, QIU Xiaogang, LU Guoqing, et al. Study on test and measurement method for coefficient (m value) of strain rate sensitivity[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2001, 22(1): 63-68(in Chinese).
- [7] 钱匡武, 李效琦, 萧林钢, 等. 金属和合金中的动态应变时效现象[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(6): 8-23.
QIAN Kuangwu, LI Xiaoqi, XIAO Lingang, et al. Phenomenon of dynamic strain aging of metals [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2001, 29(6): 8-23(in Chinese).